

SÉRGIO ESTEVES DE FREITAS

**LIXIVIAÇÃO DE NITRATO EM COLUNAS DE SOLO AFETADA POR TEXTURA,
DOSES DE NITROGÊNIO E LÂMINA DE ÁGUA ADICIONADA**

Botucatu

2020

SÉRGIO ESTEVES DE FREITAS

**LIXIVIAÇÃO DE NITRATO EM COLUNAS DE SOLO AFETADA POR TEXTURA,
DOSES DE NITROGÊNIO E LÂMINA DE ÁGUA ADICIONADA**

Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências Agronômicas da Unesp Câmpus de Botucatu, para obtenção do título de Mestre em Agronomia (Agricultura).

Orientador: Prof. Dr. Ciro Antonio Rosolem

Coorientador: Dr. Eduardo Mariano

**Botucatu
2020**

F866l Freitas, Sérgio Esteves de
Lixiviação de nitrato em colunas de solo afetadas por textura,
doses de nitrogênio e lâmina de água adicionada / Sérgio
Esteves de Freitas. -- Botucatu, 2020
111 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista
(Unesp), Faculdade de Ciências Agronômicas, Botucatu
Orientador: Ciro Antonio Rosolem
Coorientador: Eduardo Mariano

1. Culturas agrícolas. 2. Fertilizante nitrogenado. 3. Perdas
de nitrogênio. 4. Textura de solo. I. Título.

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

Essa ficha não pode ser modificada.

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: LIXIVIAÇÃO DE NITRATO EM COLUNAS DE SOLO AFETADA POR TEXTURA, DOSES DE NITROGÊNIO E LÂMINA DE ÁGUA ADICIONADA

AUTOR: SÉRGIO ESTEVES DE FREITAS

ORIENTADOR: CIRO ANTONIO ROSOLEM

COORIENTADOR: EDUARDO MARIANO

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



Prof. Dr. CIRO ANTONIO ROSOLEM

Produção Vegetal / Faculdade de Ciências Agrônômicas de Botucatu - UNESP



Prof. Dr. DIRGEU MAXIMINO FERNANDES

Ciência Florestal, Solos e Ambiente / Faculdade de Ciências Agrônômicas de Botucatu - UNESP



Prof. Dr. PAULO SÉRGIO PAVINATO

Ciência do Solo / Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz

Botucatu, 17 de abril de 2020

Dedico

*Aos meus amados pais, Dirce e Sérgio, meus
irmãos Eloize e Cassiano, que sempre me apoiaram e
estiveram ao meu lado.*

AGRADECIMENTOS

À Deus primeiramente, pelo amor incondicional e pela proteção durante toda minha vida.

Aos meus queridos pais pelo apoio incondicional

Ao meu amado avô Oswaldo Esteves (*in memoriam*), pelas maravilhosas histórias de vida compartilhadas comigo desde minha infância, que me fortalecerão por toda vida.

Ao Prof. Dr. Ciro Antonio Rosolem, pela orientação, ensinamentos, paciência e exemplo de professor e pessoa.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil – CAPES – Código de financiamento - 1795740, no período entre 01/08/2017 à 31/05/2018.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), pelo apoio financeiro, concedido por meio de bolsa de mestrado, no período entre 01/06/2018 à 31/07/2019 (Processo nº 2018/04739-4).

À Faculdade de Ciências Agronômicas – UNESP – Botucatu/SP pela possibilidade de realização deste curso e pelas condições oferecidas.

Ao meu amigo e coorientador Eduardo Mariano e sua noiva Carolina Zacarias, pelos ensinamentos, pelas palavras de conforto, ânimo nos momentos mais difíceis, e por estar ao meu lado no decorrer do curso.

Aos amigos e colegas da pós-graduação, Bruno Gazola, Camila Grassman, Carlos Vinícius, Gustavo Dário, Gustavo Ferreira, Jason e Jesion Geibel, Jonas Ferrari, Laudelino Motta, Larissa Chamma e Mara Rubia pelos momentos de descontração que me ajudaram a seguir firme nesta jornada.

Ao Prof. Dr. Cassiano Cremon e a Prof^a. Dr^a. Nilbe Carla Mapeli por todo ensinamento pessoal e científico, pelo incentivo na pesquisa e pelo exemplo de vida.

Aos funcionários Casemiro, Cirinho, Darieli, Eliane, Fernando, Iara, Júlia, Vinicius e a todos os funcionários do Departamento de Agricultura e Melhoramento Vegetal, pelo carinho, competência e eficiência quando solicitados, meu muito obrigado.

A todos que, de alguma forma, contribuíram para que este objetivo fosse alcançado.

“O que ninguém nunca viu nem ouviu, e o que jamais alguém pensou que podia acontecer, foi isso o que Deus preparou para aqueles que o amam.”

RESUMO

Perdas por lixiviação de nitrato (NO_3^-) podem resultar em contaminação de águas subterrâneas e reduzir a eficiência de uso do nutriente pelas culturas. Solos de textura arenosa, solos ricos em N orgânico, chuvas intensas e doses elevadas de fertilizante nitrogenado são reportados como os principais fatores que favorecem as perdas de nitrato por lixiviação. O objetivo do estudo foi avaliar o efeito da percolação de água, do nitrogênio disponível no perfil do solo e da aplicação de fertilizante na lixiviação de nitrato em função da textura do solo. Foram realizados três experimentos em casa de vegetação, no primeiro os tratamentos foram compostos por cinco texturas de solo (28, 176, 321, 467 e 626 g kg^{-1} de argila) e quatro níveis de água (controle, 675, 1006 e 1345 mm). Para o segundo experimento, os tratamentos foram três texturas de solo (28, 321 e 626 g kg^{-1} de argila) e três níveis de N no solo (controle e cultivo de milho e soja). No último experimento, os tratamentos foram constituídos de duas texturas de solo (28 e 626 g kg^{-1} de argila) e quatro doses de N (0, 80, 160 e 240 kg^{-1} ha) aplicadas na forma de sulfato de amônio [$^{15}\text{(NH}_4\text{)}_2\text{SO}_4$] marcado com 10,3% de átomos de ^{15}N . Esse estudo fornece informações importantes a respeito da lixiviação de NO_3^- , levando em consideração alguns dos principais fatores mencionados na literatura. A adição de água, o enriquecimento do perfil do solo com o cultivo da soja e o uso de doses elevadas de N podem favorecer o aumento das perdas por lixiviação de NO_3^- . No geral, solos argilosos apresentaram maior lixiviação de N, especialmente na forma de NO_3^- . Contudo, neste caso, há indícios de que grande parte do N lixiviado é nativo do solo e não do fertilizante, ao contrário do arenoso, que apresenta baixo conteúdo de N nativo. Em regiões com médias históricas de alta pluviosidade, o cultivo da soja pode favorecer a lixiviação de NO_3^- devido à sua alta labilidade favorecer o acúmulo de nitrato no perfil do solo. Perdas por lixiviação de NH_4^+ são observadas em pequenas quantidades, todavia se considerar doses elevadas em solos arenosos as perdas podem ser elevadas. Por fim, doses racionais de N (por exemplo, aquelas que visam repor a quantidade de N extraída ou exportada pela cultura) podem favorecer a diminuição nas perdas de NO_3^- em sistemas agrícolas.

Palavras-chave: Culturas agrícolas. Fertilizante nitrogenado. Perdas de nitrogênio. Textura de solo.

ABSTRACT

Losses by leaching of nitrate (NO_3^-) can result in contamination of groundwater and reduce the efficiency of use of the nutrient by the cultures. Soils with a sandy texture, rich in organic N, intense rainfall and high doses of nitrogen fertilizer are reported as the main factors that favor nitrate losses by leaching. The aim of the study was evaluate the effect of water percolation, available nitrogen in the soil profile and application of fertilizer in the nitrate leaching depending on the texture of the soil. Three experiments were carried out in a greenhouse, in the first treatment consisted of five soil textures (28, 176, 321, 467 and 626 g kg^{-1} of clay) and four water levels (control, 675, 1006 and 1345 mm). For the second experiment, the treatments were three soil textures (28, 321 and 626 g kg^{-1} of clay) and three levels of N in the soil (control and cultivation of corn and soybeans). In the last experiment, the treatments consisted of two soil textures (28 and 626 g kg^{-1} of clay) and four doses of N (0, 80, 160 and 240 kg^{-1} ha) applied in the form of ammonium sulfate [$^{15}\text{(NH}_4\text{)}_2\text{SO}_4$] labeled with 10.3% ^{15}N atoms. This study provides an important information regarding NO_3^- leaching, taking into account some factors mentioned in the literature. The addition of water, the enrichment of the soil profile with the growth of soybeans and the use of high doses of N can increase losses by leaching of NO_3^- . In general, clay soils showed higher N leaching, especially in NO_3^- form. However, in this case, there is evidence that a large part of the leached N is from the soil and not from to the fertilizer, unlike the sandy one, which has a low content of native N. In regions with historical averages of high rainfall, soybean growth may benefit the leaching of NO_3^- due to its high lability benefiting the accumulation of nitrate in the soil profile. Losses by leaching of NH_4^+ are observed in small amounts, however considering high doses in sandy soils the losses can be high. Finally, rational doses of N (for example, those that aim to replace the amount of N extracted or exported by the crop) may benefit the decrease in NO_3^- losses in agricultural systems.

Keywords: Agricultural crops. Nitrogen fertilizer. Nitrogen losses. Soil texture.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1 – Lixiviação de NH_4^+ para o tratamento sem adição de água (a) e para as lâminas 675 (b), 1006 (c) e 1345 mm (d) relacionada às texturas de solo. Os símbolos representam a média e as barras verticais representam o erro padrão da média ($n = 4$).....39
- Figura 2 – Lixiviação de NO_3^- para o tratamento sem adição de água (a) e para as lâminas 675 (b), 1006 (c) e 1345 mm (d) relacionada às texturas de solo. Os símbolos representam a média e as barras verticais representam o erro padrão da média ($n = 4$).....40
- Figura 3 – Lixiviação acumulada de NH_4^+ (a) e NO_3^- (b) relacionada à textura do solo e a lâmina de água adicionada. Os símbolos representam as médias e as barras verticais representam o erro padrão da média ($n = 4$ e 20 para o painel a e b, respectivamente). As linhas representam o ajuste para uma equação de regressão.....42
- Figura 4 – Concentração de NH_4^+ no perfil do solo para o tratamento sem adição de água (a) e para as lâminas 675 (b), 1006 (c) e 1345 mm (d) relacionadas às texturas de solo. Os símbolos representam a média e as barras horizontais representam o erro padrão da média ($n = 4$)43
- Figura 5 – Concentração de NO_3^- no perfil do solo para o tratamento sem adição de água (a) e para as lâminas 675 (b), 1006 (c) e 1345 mm (d) relacionadas às texturas de solo. Os símbolos representam a média e as barras horizontais representam o erro padrão da média ($n = 4$)44
- Figura 6 – Concentração de NH_4^+ (a, b) e NO_3^- (c, d) no solo relacionado ao teor de argila e a lâmina de água adicionada. Os símbolos representam a média e as barras verticais representam o erro padrão da média ($n = 24$ para o painel a e c e 20 para o painel b e d). As linhas representam o ajuste para uma equação exponencial decrescente (b, d) e exponencial crescente (c)45
- Figura 7 – Conteúdo de C total no perfil do solo para o tratamento sem adição de água (a) e para as lâminas 675 (b), 1006 (c) e 1345 mm (d) relacionadas às texturas de solo. Os símbolos representam a média e as barras horizontais representam o erro padrão da média ($n = 4$)46

- Figura 8 – Conteúdo de N total no perfil do solo para o tratamento sem adição de água (a) e para as lâminas 675 (b), 1006 (c) e 1345 mm (d) relacionadas às texturas de solo. Os símbolos representam a média e as barras horizontais representam o erro padrão da média ($n = 4$)..... 47
- Figura 9 – Conteúdo de C (a) e N (b) total do solo relacionado ao teor de argila e a lâmina de água adicionada. Os símbolos representam a média e as barras verticais representam o erro padrão da média ($n = 24$ para o painel a e b, respectivamente). As linhas representam o ajuste para uma equação de regressão..... 48
- Figura 10 – pH no perfil do solo para o tratamento sem adição de água (a) e para as lâminas 675 (b), 1006 (c) e 1345 mm (d) relacionadas às texturas de solo. Os símbolos representam a média e as barras horizontais representam o erro padrão da média ($n = 4$) 49
- Figura 11 – pH do solo relacionado ao teor de argila e a lâmina de água adicionada. Os símbolos representam a média e as barras verticais representam o erro padrão da média ($n = 24, 16$ e 20 para o painel a, b e c, respectivamente). As linhas representam o ajuste para uma equação de regressão..... 50
- Figura 12 - Concentração de NH_4^+ no perfil do solo, em texturas contrastantes, relacionado ao tratamento sem cultivo (a) e as culturas de milho (b) e soja (c). Os símbolos representam a média e as barras horizontais representam o erro padrão da média ($n = 3$) 51
- Figura 13 - Concentração de NO_3^- no perfil do solo, em texturas contrastantes, relacionado ao tratamento sem cultivo (a) e as culturas de milho (b) e soja (c). Os símbolos representam a média e as barras horizontais representam o erro padrão da média ($n = 3$) 52
- Figura 14 – Concentração de NH_4^+ no solo, em diferentes texturas e cultivos, relacionado ao teor de argila (a) e a camadas do solo (b e c). As barras verticais representam o erro padrão da média ($n = 18$ para o painel a, e 9 para os painéis b e c, respectivamente). Letras iguais não indicam diferença ao nível de 5% 54
- Figura 15 – Concentração de NO_3^- no solo em diferentes texturas e cultivos, relacionado ao teor de argila (a) e a camadas do solo (b). As barras verticais representam o erro padrão da média ($n = 18$ e 9 para o painel a

e b, respectivamente). Letras iguais não indicam diferença ao nível de 5% de probabilidade.....	55
Figura 16 – Conteúdo de C total no perfil do solo, em texturas contrastantes, relacionado ao tratamento sem cultivo (a) e as culturas de milho (b) e soja (c). Os símbolos representam a média e as barras horizontais representam o erro padrão da média ($n = 3$).....	56
Figura 17 – Conteúdo de N total perfil do solo, em texturas contrastantes, relacionado ao tratamento sem cultivo (a) e as culturas de milho (b) e soja (c). Os símbolos representam a média e as barras horizontais representam o erro padrão da média ($n = 3$)	57
Figura 18 – Conteúdo de C e N total no solo em diferentes texturas e cultivos, relacionado ao teor de argila (a e b) e a camadas do solo (c). As barras verticais representam o erro padrão da média ($n = 18$ para os painéis a e b, e 9 para o painel c). Letras iguais não indicam diferença ao nível de 5% de probabilidade.....	58
Figura 19 – pH no perfil do solo, em texturas contrastantes, relacionado ao tratamento sem cultivo (a) e as culturas de milho (b) e soja (c). Os símbolos representam a média e as barras horizontais representam o erro padrão da média ($n = 3$)	59
Figura 20 – $\text{pH}_{\text{CaCl}_2}$ no solo em diferentes texturas e cultivos, relacionado ao teor de argila (a) e a camadas do solo (b e c). As barras verticais representam o erro padrão da média ($n = 18$ para o painel a, e 9 para o painel b e c, respectivamente). Letras iguais não indicam diferença ao nível de 5% de probabilidade.....	60
Figura 21 – Lixiviação semanal de NH_4^+ , relacionado ao tratamento sem cultivo (a) e as culturas de milho (b) e soja (c). Os símbolos representam a média e as barras verticais representam o erro padrão da média ($n = 4$)	62
Figura 22 – Lixiviação semanal de NO_3^- , relacionado ao tratamento sem cultivo (a) e as culturas de milho (b) e soja (c). Os símbolos representam a média e as barras verticais representam o erro padrão da média ($n = 4$)	63
Figura 23 – Lixiviação acumulada de NH_4^+ (a) e NO_3^- (b) em diferentes texturas e cultivos, relacionada ao teor de argila do solo. As barras verticais representam o erro padrão da média ($n = 4$ para o painel a e b). Letras	

iguais não indicam diferença ao nível de 5% de probabilidade. NS: não-significativo ao nível de 5%..... 65

Figura 24 – Concentração de NH_4^+ no perfil do solo, em texturas contrastantes, relacionado ao tratamento sem cultivo (a) e as culturas de milho (b) e soja (c). Os símbolos representam a média e as barras horizontais representam o erro padrão da média ($n = 4$) 66

Figura 25 – Concentração de NO_3^- no perfil do solo, em texturas contrastantes, relacionado ao tratamento sem cultivo (a) e as culturas de milho (b) e soja (c). Os símbolos representam a média e as barras horizontais representam o erro padrão da média ($n = 4$) 67

Figura 26 – Concentração de NH_4^+ (a) e NO_3^- (b e c) do solo em diferentes texturas e cultivos, relacionado a camadas de solo. As barras verticais representam o erro padrão da média ($n = 12$ para o painel a, b e c, respectivamente). Letras iguais não indicam diferença ao nível de 5% de probabilidade .. 68

Figura 27 – Conteúdo de C total no perfil do solo, em texturas contrastantes, relacionado ao tratamento sem cultivo (a) e as culturas de milho (b) e soja (c). Os símbolos representam a média e as barras horizontais representam o erro padrão da média ($n = 4$) 70

Figura 28 – Conteúdo de N total no perfil do solo, em texturas contrastantes, relacionado ao tratamento sem cultivo (a) e as culturas de milho (b) e soja (c). Os símbolos representam a média e as barras horizontais representam o erro padrão da média ($n = 4$) 71

Figura 29 – Conteúdo de C (a, b) e N (c) total solo do solo em diferentes texturas e cultivos, relacionado teor de argila e camadas de solo. As barras verticais representam o erro padrão da média ($n = 24, 36$ e 72 para o painel a, b e c, respectivamente). Letras iguais não indicam diferença ao nível de 5% de probabilidade 72

Figura 30 – pH no perfil do solo em texturas contrastantes, relacionado ao tratamento sem cultivo (a) e as culturas de milho (b) e soja (c). Os símbolos representam a média e as barras horizontais representam o erro padrão da média ($n = 4$)..... 74

Figura 31 – pH do solo em diferentes texturas e cultivos, relacionado teor de argila (a) e a camadas de solo (b, c). As barras verticais representam o erro padrão da média ($n = 24$ para o painel a, e 12 para o painel b e c,

respectivamente). Letras iguais não indicam diferença ao nível de 5% de probabilidade	75
Figura 32 – Lixiviação semanal de NH_4^+ para o tratamento sem adição de N (a) e para as doses 0,6 (b), 1,2 (c) e 1,8 g de N coluna^{-1} (d) relacionada à texturas de solo. Os símbolos representam a média e as barras verticais representam o erro padrão da média ($n = 4$).....	76
Figura 33 – Lixiviação semanal de NO_3^- para o tratamento sem adição de N (a) e para as doses 0,6 (b), 1,2 (c) e 1,8 g de N coluna^{-1} (d) relacionada à texturas de solo. Os símbolos representam a média e as barras verticais representam o erro padrão da média ($n = 4$).....	77
Figura 34 – Lixiviação acumulada de NH_4^+ (a) e NO_3^- (b) relacionada a texturas de solo e diferentes doses de N. Os símbolos representam as médias e as barras verticais representam o erro padrão da média ($n = 4$ para o painel a e b, respectivamente). A linha representa o ajuste para uma equação de regressão	80
Figura 35 – Concentração de NH_4^+ no perfil do solo para o tratamento sem adição de N (a) e para as doses 0,6 (b), 1,2 (c) e 1,8 g de N coluna^{-1} (d), relacionado à texturas de solo. Os símbolos representam a média e as barras horizontais representam o erro padrão da média ($n = 4$)	81
Figura 36 – Concentração de NO_3^- no perfil do solo para o tratamento sem adição de N (a) e para as doses 0,6 (b), 1,2 (c) e 1,8 g de N coluna^{-1} (d), relacionado à texturas de solo. Os símbolos representam a média e as barras horizontais representam o erro padrão da média ($n = 4$)	82
Figura 37 – Concentração de NH_4^+ (a) e NO_3^- (b) no solo relacionado a texturas e doses de N. Os símbolos representam a média e as barras verticais representam o erro padrão da média ($n = 24$ para o painel a e b, respectivamente). A linha representa o ajuste para uma equação de regressão	83
Figura 38 – Conteúdo de C total no perfil do solo para o tratamento sem adição de N (a), e para as doses 0,6 (b), 1,2 (c) e 1,8 g de N coluna^{-1} (d), relacionado à texturas de solo. Os símbolos representam a média e as barras horizontais representam o erro padrão da média ($n = 4$)	84
Figura 39 – Conteúdo de N total no perfil do solo para o tratamento sem adição de N (a) e para as doses 0,6 (b), 1,2 (c) e 1,8 g de N coluna^{-1} (d), relacionado	

à texturas de solo. Os símbolos representam a média e as barras horizontais representam o erro padrão da média ($n = 4$).....	85
Figura 40 – Conteúdo de C total do solo relacionado a textura (a) e de N total relacionado a doses de N (b). As barras verticais representam o erro padrão da média e os símbolos representam a média ($n = 96$ e 24 para o painel a e b, respectivamente). Letras distintas indicam diferença ao nível de 5% de probabilidade	86
Figura 41 – pH no perfil do solo para o tratamento sem adição de N (a) e para as doses 0,6 (b), 1,2 (c) e 1,8 g de N coluna ⁻¹ (d), relacionado à texturas de solo. Os símbolos representam a média e as barras horizontais representam o erro padrão da média ($n = 4$)	87
Figura 42 – pH do solo relacionado às interações camada e textura (a), dose de N e textura (b) e dose de N e camada (c). As barras verticais representam o erro padrão da média e os símbolos representam a média ($n = 16$, 24 e 8 para o painel a, b e c, respectivamente). Letras distintas indicam diferença ao nível de 5% de probabilidade. As linhas representam o ajuste para uma equação de regressão	88
Figura 43 – Nitrogênio do solo derivado do fertilizante no perfil do solo para as doses 0,6 (a), 1,2 (b) e 1,8 g de N coluna ⁻¹ (d), relacionado a texturas de solo. Os símbolos representam a média e as barras horizontais representam o erro padrão da média ($n = 4$)	90
Figura 44 – Recuperação de ¹⁵ N no perfil do solo para as doses 0,6 (a), 1,2 (b) e 1,8 g de N coluna ⁻¹ (d), relacionado a texturas de solo. Os símbolos representam a média e as barras horizontais representam o erro padrão da média ($n = 4$).....	91
Figura 45 – Nitrogênio do solo derivado do fertilizante e recuperação de ¹⁵ N do solo, relacionados à camada (a, c) e a texturas de solo (b, d). As barras verticais representam o erro padrão da média ($n = 24$ para o painel a, b, c e d). Letras iguais não indicam diferença ao nível de 5% de probabilidade ..	92
Figura 46 - Nitrogênio do solo derivado do fertilizante (a) e recuperação de ¹⁵ N (b) acumulados, relacionados a texturas e à doses de N. As barras verticais representam o erro padrão da média ($n = 24$ para o painel a e b). Letras iguais não indicam diferença ao nível de 5% de probabilidade	93

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Caracterização das texturas obtidas a partir da mistura do solo argiloso e arenoso	30
Tabela 2 – Valor de P dos fatores e suas interações para o Experimento I	41
Tabela 3 – Valor de P dos fatores e suas interações para o Experimento II, antes da lixiviação.....	53
Tabela 4 – Valor de P dos fatores e suas interações para o Experimento II, após a lixiviação.....	64
Tabela 5 – Valor de P dos fatores e suas interações para o Experimento III	79

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	25
2	REVISÃO DE LITERATURA.....	26
2.1	LIXIVIAÇÃO DE NITRATO	26
2.2	LIXIVIAÇÃO DE NITRATO NO BRASIL	27
2.3	PROBLEMAS DECORRENTES DA LIXIVIAÇÃO DE NITRATO.....	28
3	MATERIAL E MÉTODOS.....	29
3.1	CARACTERIZAÇÃO DOS SOLOS	29
3.2	PREPARO DOS EXPERIMENTOS	31
3.3	EXPERIMENTO I: INTERAÇÃO DA TEXTURA COM A PERCOLAÇÃO DE ÁGUA	32
3.4	EXPERIMENTO II: INTERAÇÃO DA DISPONIBILIDADE DE N COM A TEXTURA.....	34
3.5	EXPERIMENTO III: INTERAÇÃO DA TEXTURA COM DOSES DE N APLICADAS	35
4	RESULTADOS	38
4.1	EXPERIMENTO I.....	38
4.2	EXPERIMENTO II.....	51
4.2.1	ANTES DA LIXIVIAÇÃO	51
4.2.2	APÓS A LIXIVIAÇÃO	61
4.3	EXPERIMENTO III.....	76
5	DISCUSSÃO	94
5.1	EXPERIMENTO I.....	94
5.2	EXPERIMENTO II.....	95
5.3	EXPERIMENTO III.....	97
6	CONCLUSÕES	99
	REFERÊNCIAS.....	101
	APÊNDICE A	111

1 INTRODUÇÃO

A maior parte do N do solo é encontrada na fração orgânica (95% do total), originada a partir de restos de plantas e dejetos animais, enquanto que a fração mineral [principalmente amônio (NH_4^+) e nitrato (NO_3^-)], as formas de N predominantemente absorvidas pelas plantas, compõe a fração restante (ALVES et al., 2016). No solo, a quantidade de N disponível às plantas é usualmente reduzida e dependente da ação de microrganismos amonificadores e nitrificadores, sendo necessário o aporte do nutriente via fertilizantes visando a manutenção ou obtenção de elevadas produtividades. O N sofre diversos processos de transformação por reações químicas e biológicas no solo, sendo passível de perdas no sistema solo-planta-atmosfera (FURTINI NETO et al., 2001). Juntamente com a volatilização de amônia, uma das principais perdas de N no sistema tem sido atribuída à lixiviação de nitrato (ROCHA et al., 2020). A lixiviação de nitrato pode ser afetada pela textura do solo, e acredita-se que seja menos intensa em solos argilosos do que arenosos (CANTARELLA, 2007). Fatores como o conteúdo de nitrato na solução do solo e a quantidade de água que é drenada do sistema também afetam a movimentação do N no perfil do solo (ROSOLEM et al., 2018).

Embora haja farta literatura demonstrando que perdas de N são afetadas pela textura do solo e volume de precipitação, há trabalhos demonstrando que, se considerada uma profundidade compatível com a exploração radicular, a lixiviação não pode ser confundida com perda de N do sistema (ROSOLEM et al., 2017). Além disso, a grande maioria dos trabalhos não estabeleceu uma comparação sistemática dos sistemas estudados, de modo a se avaliar a importância relativa de cada fator. Considerando o perfil do solo, há algumas evidências de que as perdas podem ser mais afetadas pela disponibilidade do nutriente no perfil que propriamente pela textura e água percolada (ROSOLEM et al., 2018). Desta forma, pode-se levantar a hipótese de que a quantidade de nitrato disponível no perfil, seja em razão do uso de fertilizantes ou do próprio sistema de produção seria tão ou mais importante na determinação do potencial de lixiviação de nitrato que simplesmente a textura do solo ou a quantidade de água percolada. Assim, o objetivo do presente estudo foi avaliar o efeito da percolação de água, do nitrogênio disponível no perfil do solo e da aplicação de fertilizante na lixiviação de nitrato em função da textura do solo.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Lixiviação de nitrato

A lixiviação ocorre quando o nitrato não é absorvido pelas plantas ou imobilizado pelos microrganismos (FAGERIA et al., 2011), ficando livre na solução do solo. Por apresentar carga negativa, não é adsorvido aos colóides do solo, que em sua maioria, apresentam cargas negativas, favorecendo assim a movimentação vertical do nitrato no perfil (CARVALHO; ZAMBOT 2012). Podem ocorrer perdas quando o fertilizante nitrogenado (especialmente fontes nítricas ou mesmo fontes amoniacais em solos com alta taxa de nitrificação) é aplicado antes da semeadura, no momento da mesma ou ainda em estádios iniciais de crescimento das plantas, uma vez que a ausência de sistema radicular desenvolvido pode resultar em acúmulo de nitrato na solução do solo, que poderá ser transportado para camadas mais profundas do solo (GROENENDIJK et al., 2014). Essas perdas estão diretamente relacionadas com a quantidade de água que percola no perfil do solo, quantidade de fertilizante aplicado, frequência de precipitação, exigência e absorção de N pelas plantas, dinâmica do ciclo do N no sistema solo-planta, manejo da irrigação, atividade radicular baixa e textura do solo (CAMPBELL et al., 1993). Com exceção da aplicação de ureia sobre o solo, que resulta em emissões de amônia da ordem de 25% do N aplicado (SOMMER et al., 2004), a lixiviação de nitrato é considerada a principal via de perda de N disponível às plantas (ERREBHI et al., 1998).

De acordo com Black e Waring (1979), a granulometria dos solos é um dos principais fatores que afetam a lixiviação de nitrato. A maior macroporosidade (por definição: poros do solo destinados à difusão de gases e drenagem de água gravitacional) de solos arenosos favorece o caminhamento do referido ânion para camadas mais profundas do solo (GROENENDIJK et al., 2014). Os solos argilosos, por sua vez, geralmente possuem maior estoque de nitrato devido à maior capacidade de armazenamento de água pelos microporos, quando comparados com solos arenosos (CAMARGO et al., 1997; BORTOLINI, 2000). Na maioria dos solos localizados em regiões tropicais há predominância de cargas negativas. No entanto, devido ao alto grau de intemperismo, horizontes subsuperficiais podem apresentar balanço de cargas positivas pela ocorrência de óxidos de Fe e Al, que favorecem a adsorção de nitrato, mitigando as perdas de N por lixiviação (RAIJ; CAMARGO, 1974).

Sangoi et al. (2003), comparando a lixiviação de nitrato em solo arenoso e argiloso reportaram que as perdas foram numericamente maiores e mais aceleradas em solo arenoso. Da mesma forma, Correa et al. (2006), relataram que as perdas por lixiviação de nitrato após aplicação de biossólido em solo argiloso e arenoso foram, em média, de 20 e 57% do N total aplicado, respectivamente, para os 20 cm iniciais.

2.2 Lixiviação de nitrato no Brasil

Cantarella (2007) compilou resultados de 13 estudos em que a lixiviação de nitrato foi medida com o traçador ^{15}N , e observou que, de modo geral, as quantidades de N lixiviadas foram baixas. As maiores perdas ocorreram em ensaios de Coelho et al. (1991) e de Camargo (1989), porém foram referentes à mineralização da matéria orgânica (MO) e posterior nitrificação e não ao N-fertilizante aplicado, uma vez que o parcelamento da fertilização nitrogenada, doses relativamente baixas do nutriente e a aplicação no período ideal de absorção de N pelas plantas podem explicar as baixas concentrações de nitrato lixiviado. Contudo, a tendência de aplicação de doses elevadas (acima de $200 \text{ kg ha}^{-1} \text{ N}$) e a antecipação do N aplicado podem impulsionar as perdas de nitrato (SANGOI et al., 2007). Cantarella et al. (2003), avaliando a lixiviação de nitrato em um pomar de laranja fertilizado com 180 e 240 kg ha^{-1} de N, observaram que na camada de 20-60 cm, foram encontrados 80 kg ha^{-1} do N-fertilizante, no final da estação das chuvas, sendo que parte deste N presente na solução do solo e adsorvido pode ser lixiviado para camadas mais profundas, podendo ficar fora do alcance do sistema radicular das plantas. Lara Cabezas et al. (1997) relataram que a antecipação da fertilização nitrogenada representa uma prática de risco, podendo acarretar em elevadas perdas de N, pois a ocorrência de chuvas nesse período pode potencializar a volatilização de amônia quando a ureia é aplicada superficialmente, além de perdas de nitrato por lixiviação, devido ao baixo grau de enraizamento das plantas. Em adição, perdas de produtividade relacionadas a antecipação de fertilização nitrogenada referentes a épocas e formas de aplicação de N no milho foram observadas (SILVA et al., 2005).

2.3 Problemas decorrentes da lixiviação de nitrato

Devido a sua grande mobilidade, o nitrato pode chegar ao lençol freático com alto potencial de se tornar um contaminante do meio ambiente (CARVALHO; ZAMBOT, 2012). De acordo com a Organização Mundial de Saúde (OMS), recomenda-se que a água para o consumo humano não apresente concentrações superiores a 10 mg L^{-1} de N (WHO, 1993), pois pesquisas realizadas relacionaram a metaemoglobina em crianças à presença de nitrato em excesso na dieta (PEDROSA; CAETANO, 2002). A metaemoglobina é uma doença caracterizada pela redução da atividade da hemoglobina devido à alta concentração de nitrato no sangue, resultando na coloração azulada da extremidade dos membros (por exemplo, dedos) de recém-nascidos, e é popularmente conhecida como síndrome do bebê azul (FERNICOLA; AZEVEDO, 1981).

Outro problema que está diretamente relacionado com a perda de N via lixiviação é a eutrofização de rios e encostas (HOWARTH; MARINO, 2006). Embora a eutrofização promova a oferta de nutrientes para ambientes aquáticos, níveis elevados de entrada de nitrato estão relacionados com o aumento de algas tóxicas, modificação na distribuição das espécies aquáticas e decréscimo de oxigênio em virtude da decomposição da matéria orgânica produzida (LAGREID et al., 1999). Scavia e Bricker (2006) relataram que cerca de 74% das concentrações de nitrato encontradas nas águas da costa americana no Golfo do México, eram originárias de fontes relacionadas à atividades agrícolas, grande parte de regiões do meio oeste americano produtoras de grãos. Com o propósito de prevenir e minimizar a poluição de águas subterrâneas por nitrato, é necessário ajustar as doses de N aplicadas anualmente às culturas para quantidades racionais, por exemplo, com base na extração ou exportação do nutriente pelas plantas, além da compreensão dos fatores que visam intervir a mobilidade do nutriente no solo (COSTA et al, 1999). Sendo assim, o desenvolvimento de pesquisas que avaliem o potencial de perdas de nitrato por lixiviação é de grande importância para aumento da sustentabilidade dos diferentes agrossistemas.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Caracterização dos solos

Foram obtidas texturas de solo a partir da mistura de solo argiloso e arenoso. O solo argiloso foi coletado em uma área cultivada, e classificado como NITOSSOLO VERMELHO distroférico estruturado (SANTOS et al., 2018), ou *Typic Rhodudult* (USDA, 2014), de textura muito argilosa (626 g kg⁻¹ de argila). O solo arenoso foi coletado sob mata nativa, e é classificado como NEOSSOLO QUARTZARÊNICO distrófico (SANTOS et al., 2018), ou *Typic Ustpsamments* (USDA, 2014), de textura arenosa (28 g kg⁻¹ de argila), ambos localizados no município de Botucatu, estado de São Paulo, Brasil. O ponto de coleta do solo argiloso (latitude sul 22°49'27" e longitude oeste 48°25'47") está a uma distância de 4 km do ponto de coleta do solo arenoso (latitude sul 22°49'03" e longitude oeste de 48°25'37"). Os solos foram coletados em uma área equivalente a 10 m², na camada de 0,0-0,20 m, secos ao ar, destorroados e passados em peneira de malha de 2 mm. Após a coleta foi realizada caracterização físico-química dos solos, e foi feita correção da acidez do solo arenoso por meio de calagem. Os solos foram combinados nas proporções de 0:100, 25:75, 50:50, 75:25 e 100:0 (argiloso:arenoso) visando a obtenção de texturas equidistantes para os experimentos. A mistura foi realizada com base volumétrica, sendo validada por meio de análise granulométrica pelo método do densímetro (GEE; BAUDER, 1986). Desse modo, os solos apresentaram 28, 174, 321, 467 e 626 g kg⁻¹ de argila para as proporções de 0:100, 25:75, 50:50, 75:25 e 100:0 respectivamente. Os resultados da caracterização dos solos antes da instalação dos experimentos estão expressos na Tabela 1. O pH em CaCl₂ foi determinado de acordo com Raij et al. (2001). O ponto de carga zero (PCZ) foi quantificado por titulação potenciométrica (RAIJ et al., 1973). Os teores de C e N total foram obtidos via combustão seca utilizando analisador elementar CHN200 (Leco Corp., St. Joseph, MI, EUA). As formas minerais de N (amônio e nitrato) do solo foram extraídas com solução de KCl 2 M, na relação 1:5 (solo:solução, m/v). As amostras foram agitadas por 1 h em agitador orbital e posteriormente filtradas usando papel de filtro quantitativo n. 42. As formas minerais de N foram determinadas por colorimetria. O N-amônio foi quantificado pelo método do salicilato de sódio (MULVANEY, 1996), enquanto que a concentração de N-nitrato foi determinada via redução com VCI₃ (DOANE; HORWÁTH, 2003).

Tabela 1 – Caracterização das texturas obtidas a partir da mistura do solo argiloso e arenoso

Textura g kg ⁻¹ argila	Areia g kg ⁻¹	Silte g kg ⁻¹	pH	PCZ	C total	N total g kg ⁻¹	C/N	N-NH ₄ ⁺ mg kg ⁻¹	N-NO ₃ ⁻ mg kg ⁻¹
28 g kg ⁻¹	957 ± 7	14 ± 2	5,6 ± 0,1	-	3,1 ± 0,2	0,3 ± 0,1	10 ± 1	17 ± 1	18 ± 1
175 g kg ⁻¹	765 ± 3	60 ± 3	5,5 ± 0,1	3,7 ± 0,1	6,9 ± 0,2	0,7 ± 0,1	10 ± 1	24 ± 1	22 ± 1
321 g kg ⁻¹	574 ± 5	106 ± 7	5,6 ± 0,1	3,4 ± 0,1	10,9 ± 0,3	1,0 ± 0,1	10 ± 1	27 ± 1	30 ± 1
467 g kg ⁻¹	382 ± 12	151 ± 13	5,5 ± 0,1	3,7 ± 0,1	12,8 ± 0,2	1,3 ± 0,1	10 ± 1	32 ± 1	33 ± 1
626 g kg ⁻¹	195 ± 12	189 ± 27	5,6 ± 0,1	3,4 ± 0,1	18,6 ± 0,2	2,0 ± 0,1	10 ± 1	34 ± 1	49 ± 1

PCZ: ponto de carga zero. -: não determinado.

3.2 Preparo dos experimentos

Foram realizados três experimentos em casa de vegetação. Assim, colunas de policloreto de vinila (PVC) foram segmentadas nas camadas de 0,0-0,10, 0,10-0,20, 0,20-0,30, 0,30-0,50, 0,50-0,70 e 0,70-1,0 m. Para os experimentos I e II as dimensões das colunas foram as seguintes: 1,10 m de altura e 0,15 m de diâmetro, enquanto que para o experimento III foram: 1,10 m de altura e 0,10 m de diâmetro. As colunas foram preenchidas com solo seco até 1,0 m de altura, e a massa de solo utilizada variou de acordo com a densidade de cada textura. Levando em consideração o volume da coluna (17,7 L), para a textura 28 g kg⁻¹ de argila (densidade de 1,45 g cm⁻³) foram necessários 25,7 kg de solo para o preenchimento da coluna. Já para as texturas de 174 (densidade de 1,32 g cm⁻³), 321 (densidade de 1,23 g cm⁻³), 467 (densidade de 1,15 g cm⁻³) e 626 (densidade de 1,06 g cm⁻³) g kg⁻¹ foram utilizados 23,4, 21,8, 20,4 e 18,8 kg de solo, respectivamente.

Posteriormente, cada segmento da coluna de PVC foi unido com fita adesiva de polipropileno para facilitar a retirada de amostras de solo ao final do experimento. Para evitar o excesso de escoamento de água pela parede do tubo de PVC (vias preferências), foram criadas abas internas com fita adesiva na junção de cada camada no intuito de redirecionar a água para o solo. O fundo de cada coluna foi vedado com tela de polipropileno (tecido TNT) para evitar a perda de solo. Sacos plásticos foram colocados na parte inferior da coluna para direcionar a solução lixiviada para frascos plásticos com capacidade de armazenamento de 1,5 L. As colunas foram suspensas em estrutura metálica. Para facilitar sua sustentação, foram utilizadas barras de ferro (10 mm de diâmetro) cortadas em 0,20 m e transpassadas na última camada de cada coluna. Por fim, antes do início dos experimentos, as colunas de solo foram saturadas com água respeitando-se a capacidade máxima de retenção de água (CMRA; MARIANO et al., 2017) de cada proporção utilizada. As colunas foram drenadas por ~4 dias para remoção da água livre retida nos macroporos. Cessada a drenagem, as colunas de solo foram cobertas com sacos plásticos até o início dos experimentos, visando evitar a evaporação de água.

3.3 Experimento I: interação da textura com a percolação de água

O objetivo do experimento foi avaliar o efeito da textura do solo e a adição de água na lixiviação de nitrato. Foi utilizado o delineamento experimental inteiramente casualizado, em arranjo fatorial 5×4 , com quatro repetições. Os tratamentos foram constituídos de cinco texturas de solo (28, 174, 321, 467 e 626 g kg⁻¹ de argila), e quatro lâminas de água adicionadas (controle, 675, 1006 e 1345 mm), que foram estimadas com base na precipitação acumulada que ocorre durante o ciclo da cultura do milho (*Zeamays* L.) em diferentes regiões produtoras do Brasil. Também se realizou a aplicação de 1,35 g de N na forma de ureia em cada coluna, simulando dose de ~200 kg⁻¹ ha de N. O fertilizante nitrogenado foi aplicado superficialmente em faixa, com base na fertilização do milho cultivado em espaçamento de 0,45 m entre linhas.

O experimento teve duração de 126 dias. Semanalmente foi realizada a adição de água nas colunas de solo. Para a lâmina de 675 mm, adicionou-se 660 mL de água, semanalmente, correspondendo a uma chuva de 37 mm. Em relação à lâmina de 1006 mm, foi adicionado 990 mL de água em cada semana, sendo equivalente à uma chuva de 56 mm. Por fim, na lâmina de 1345 mm, foi adicionado 1320 mL de água, referente à chuva de 75 mm em cada semana. O cálculo para quantidade de água adicionada foi realizado com base nas lâminas de água, quantidade de semanas e área da coluna. Sendo assim, ao dividir as lâminas de água (675, 1006 e 1345 mm), pela duração do experimento (18 semanas no total), determinou-se o volume de água a ser adicionado semanalmente em cada coluna. É sabido que 1 mm de chuva equivale à entrada de 1 L de água em área de 1 m². Desta forma, ao determinar a área da coluna em metro quadrado (0,018 m²), estimou-se a quantidade de água (em mL) correspondente a cada lâmina utilizada.

A adição de água foi realizada a partir de um sistema de irrigação, desenvolvido com o auxílio de frascos PET e equipo de soro macrogotas (ESM). Os frascos foram suspensos 1 m acima das colunas, e a água foi conduzida gravimetricamente via ESM. Para evitar o contato direto da água com o solo, foi adicionada uma tela de tecido TNT na superfície do solo, permitindo assim a infiltração da água sem a perturbação das partículas do mesmo. Com o objetivo de diminuir as perdas de água por evaporação, na superfície de cada coluna foi colocado um saco plástico com algumas perfurações.

Esse sistema permitiu a liberação gradual da água, simulando chuva com intensidade de $\sim 15 \text{ mm h}^{-1}$ para todos os tratamentos.

A solução lixiviada das colunas foi armazenada no mesmo frasco durante sete dias a contar a aplicação de água, após cada adição de água nas colunas, totalizando 18 amostragens. Em cada amostragem quantificou-se o volume de solução lixiviada. Em seguida, foi retirada uma alíquota de $\sim 50 \text{ mL}$, que foi armazenada em congelador à -20°C até o início das determinações das formas de N mineral contidas no lixiviado. Posteriormente, os frascos eram lavados com sabão neutro e esterilizados com água deionizada, e novamente dispostos na parte inferior da coluna.

Ao final do experimento, as colunas de solo foram segmentadas aos 0,10, 0,20, 0,30, 0,50 e 0,70 m com auxílio de uma faca. Cada camada de solo foi destorroadada e homogeneizada. Uma subamostra de $\sim 100 \text{ g}$ de solo foi congelada à -20°C para quantificação de N-amônio e N-nitrato, enquanto que $\sim 80 \text{ g}$ de solo foram secos à 40°C para determinação do pH, C e N total, como descrito anteriormente (item 3.1).

Todas as análises estatísticas foram efetuadas no programa SAS (versão 9.4, SAS Institute, Inc., Cary, NC, USA) usando modelos lineares generalizados mistos por meio do procedimento GLIMMIX. Para a lixiviação de N-amônio e N-nitrato, foi empregada ANAVA de duas vias para checar a influência das texturas e lâminas de água. Para as demais variáveis, foi empregada ANAVA de três vias, sendo os fatores compostos por textura, lâmina de água e camada de solo. Assim, os fatores textura, lâmina e camada de solo foram considerados como variáveis fixas. O teste de Shapiro-Wilk foi usado para checar a normalidade. Dados com distribuição não-normal foram ajustados à distribuição lognormal, com posterior re-transformação dos valores. Em caso de significância na ANAVA, fatores qualitativos e quantitativos foram tratados diferentemente. Para fatores qualitativos, comparações múltiplas dos efeitos principais e interações foram estimadas pelo LSMEANS com ajuste por meio do *simulate* no nível de 5% de probabilidade. Por outro lado, para fatores quantitativos, equações lineares (linear e quadrática) e não-lineares (exponencial crescente e decrescente) foram ajustadas usando-se o programa SigmaPlot (versão 10.0, Systat Software Inc., San Jose, CA, EUA). A escolha da equação foi decidida com base nos valores de R^2 , visando o melhor ajuste possível.

3.4 Experimento II: Interação da disponibilidade de N com a textura

O objetivo do experimento foi avaliar a lixiviação de nitrato afetada por diferentes texturas de solo e disponibilidade de N no perfil do solo. O delineamento experimental utilizado foi o inteiramente casualizado, em arranjo fatorial 3×3 , com sete repetições. Os tratamentos foram compostos por três texturas de solo (28, 321 e 626 g kg⁻¹ de argila) e um controle sem plantas e duas culturas prévias [milho e soja (*Glycine max* L. Merrill)], que foram cultivadas nas colunas visando empobrecer o solo com o milho, sem adubo nitrogenado, ou enriquecer o solo em N com o cultivo da soja, através da fixação biológica de N.

A semeadura do milho e da soja foi realizada utilizando as cultivares TMG 7062 IPRO e DKB 363 PRO3, respectivamente. Foram colocadas quatro sementes por coluna, e no estágio V2 foi realizado o desbaste, deixando apenas duas plantas até o término do experimento. Para a adubação, foram adicionados em cada coluna 0,98 g de P (na forma de superfosfato simples), 0,25 g de K (na forma de cloreto de potássio) na semeadura, mais 0,80 g de K no estágio V4. A adubação nitrogenada foi realizada apenas para a cultura do milho, sendo adicionado 1,1 g de N (na forma de ureia) por coluna, para promover o arranque inicial da cultura. Para a soja as sementes foram inoculadas com *Bradyrhizobium spp.* Aos 63 dias após a semeadura (estádio R4 da soja e R1 do milho), foi realizada a dessecação da soja (paraquat; 200 g L⁻¹.a) e a retirada da parte aérea do milho. A parte aérea das plantas de soja também foi retirada das colunas 14 dias após a aplicação do herbicida dessecante. Com intuito de avaliar a modificação do teor de N no perfil do solo pelo cultivo de milho e soja, três colunas de cada tratamento (27 colunas no total) foram desmontadas. O solo de cada camada foi amostrado e homogeneizado, em seguida congelado e foram realizadas as determinações de N mineral, C e N total e pH, como mencionado para o experimento anterior.

As colunas remanescentes ($n = 36$ no total) foram então submetidas à saturação com água, seguida da drenagem para remoção da água livre (item 3.2). Desse modo, iniciou-se o ensaio de lixiviação, seguindo-se o protocolo utilizado no experimento anterior. Após o início da adição de água nas colunas, o experimento teve duração de 119 dias (17 semanas). Semanalmente foi realizada a adição de 1320 mL de água nas colunas, equivalente a chuva de 75 mm. A adição de água, amostragem de

solução lixiviada e determinações foram realizadas conforme descrito no Experimento I. Ao final do experimento de lixiviação, as colunas foram desmontadas e subamostras de solo de cada camada foram coletadas para quantificação da concentração de N mineral, C e N total e pH.

Todas as análises estatísticas foram efetuadas no programa SAS (versão 9.4, SAS Institute, Inc., Cary, NC, USA) usando modelos lineares generalizados mistos por meio do procedimento GLIMMIX. Para a lixiviação de N-amônio e N-nitrato, foi empregada ANAVA de duas vias para checar a influência das texturas e do cultivo de milho e soja. Para as demais variáveis, foi empregada ANAVA de três vias, sendo os fatores compostos por textura, cultura e camada de solo. Assim, os fatores textura, cultura e camada de solo foram considerados de efeito fixo. O teste de Shapiro-Wilk foi usado para atestar a normalidade. Variáveis com distribuição não-normal foram ajustados à uma distribuição lognormal, seguido da re-transformação dos valores. Em caso de significância na ANAVA, comparações múltiplas dos efeitos principais e interações foram estimadas pelo LSMEANS com ajuste por meio do *simulate* ao nível de 5% de probabilidade.

3.5 Experimento III: Interação da textura com doses de N aplicadas

O objetivo do experimento foi avaliar o efeito da textura do solo e doses de fertilizante nitrogenado na lixiviação de N mineral em colunas de solo. Foi utilizado o delineamento experimental inteiramente casualizado em arranjo fatorial 2×4 , com quatro repetições. Os tratamentos do primeiro fator foram duas texturas de solo (28 e 626 g kg⁻¹ de argila), enquanto que o fator secundário foi compreendido por quatro doses de N (controle, 0,60, 1,20 e 1,80 g de N adicionado por coluna). A quantidade de N aplicada em cada coluna é equivalente à aplicação de 0, 80, 160 e 240 kg⁻¹ ha de N, respectivamente, para a cultura de milho com espaçamento de 0,75 m. O N foi aplicado na forma de sulfato de amônio [¹⁵(NH₄)₂SO₄] marcado com 10,3% de átomos de ¹⁵N. O sal enriquecido com ¹⁵N foi fornecido pela Sigma-Aldrich Inc. (St. Louis, Michigan, EUA). Antes da aplicação do fertilizante, as colunas foram saturadas com água para saturação dos microporos, como reportado previamente. Em seguida, o fertilizante, na forma de pó, foi adicionado superficialmente em uma faixa concentrada. O experimento teve duração de 112 dias (16 semanas) e semanalmente foram adicionados 600 mL de água em cada coluna, correspondendo a uma chuva de 75

mm, totalizando ao final do experimento uma lâmina de água equivalente a 1200 mm. O protocolo de adição de água, amostragem da solução lixiviada e as determinações de N mineral do lixiviado foram realizadas conforme descrito no Experimento 1.

Ao final do experimento, as colunas foram segmentadas em camadas de 0,0-0,10, 0,10-0,20, 0,20-0,30, 0,30-0,50, 0,50-0,70 e 0,70-1,0 m. Foram coletadas amostras de solo para a quantificação de N mineral, C e N total e pH, como descrito anteriormente. Subamostras de solo destinadas à análise isotópica foram moídas em moinho de bola. A determinação de ^{15}N no reservatório de N total do solo foi realizada com o uso de um analisador automático de N (PDZ Europa ANCA-GSL, Sercon Ltd., Crewe, Reino Unido) em interface com um espectrômetro de massa de razão isotópica (PDZ Europa 20-20, Sercon Ltd., Crewe, Reino Unido). A concentração de N do solo derivado do ^{15}N -fertilizante (N_{sdf}) e a recuperação percentual do isótopo ^{15}N (^{15}N recuperado) no solo foram calculadas por meio das equações a seguir:

$$N_{sdf}(\%) = (a/b) \times 100 \quad (1)$$

onde N_{sdf} é o percentual de N do solo derivado do ^{15}N -fertilizante (%), a representa a abundância em excesso no solo fertilizado (% átomos ^{15}N) e b é a abundância em excesso no fertilizante (% átomos ^{15}N). A abundância natural do solo não-fertilizado e do fertilizante nitrogenado foi de 0,3700 e 0,3663% átomos ^{15}N , respectivamente.

$$N_{sdf} (\text{g coluna}^{-1}) = (N_{sdf}/100) \times NTS \quad (2)$$

onde N_{sdf} é concentração de N do solo derivado do ^{15}N -fertilizante (g coluna^{-1}) e NTS é o conteúdo de N total do solo (g coluna^{-1}). O NTS foi calculado por meio da multiplicação entre a quantidade de solo contida em cada camada da coluna e o teor de N total do solo.

$$^{15}\text{N recuperado} (\% \text{ do } N \text{ aplicado}) = (N_{sdf}/DFN) \times 100 \quad (3)$$

onde o $^{15}\text{N recuperado}$ é o percentual de ^{15}N -fertilizante encontrado no solo (%), N_{sdf} representa a concentração de N do solo derivado do ^{15}N -fertilizante (g coluna^{-1}) e DFN é a dose de nitrogênio aplicada (g coluna^{-1}).

Todas as análises estatísticas foram efetuadas no programa SAS (versão 9.4, SAS Institute, Inc., Cary, NC, USA) usando modelos lineares generalizados mistos por meio do procedimento GLIMMIX. Para a lixiviação de N-amônio e N-nitrato, foi empregada ANAVA de duas vias para checar a influência das texturas e doses de N. Para as demais variáveis, foi empregada ANAVA de três vias, sendo os fatores compostos por textura, dose de N e camada de solo. Assim, a textura, dose de N e camada de solo foram considerados fatores fixos. O teste de Shapiro-Wilk foi usado para checar a normalidade. Dados com distribuição não-normal foram ajustados à distribuição lognormal, com posterior re-transformação dos valores. Em caso de significância na ANAVA, os fatores qualitativos foram submetidos ao LSMEANS com ajuste por meio do *simulate* ao nível de 5% de probabilidade. Por outro lado, para fatores quantitativos, equações lineares (linear e quadrática) e não-lineares (exponencial crescente e decrescente) foram ajustadas com uso do SigmaPlot (versão 10.0, Systat Software Inc., San Jose, CA, EUA). A equação de ajuste foi decidida com base nos valores de R^2 , visando o melhor ajuste possível.

4 RESULTADOS

4.1 Experimento I

Na Tabela 2 encontram-se os valores de P dos fatores e suas interações. Na primeira semana, o controle (sem água adicionada) apresentou um pequeno pico na taxa de lixiviação de NH_4^+ na textura de 174 g kg^{-1} de argila (Figura 1a). No decorrer do experimento, a textura de 28 g kg^{-1} de argila apresentou maior lixiviação, sendo que com a lâmina de 675 mm ocorreu um pico na décima primeira semana (Figura 1b). Para a lâmina de 1006 mm, o pico de lixiviação ocorreu na sexta semana (Figura 1c), enquanto para a lâmina de 1345 mm o maior pico ocorreu na quarta semana (Figura 1d). Em geral, observou-se que quanto maior foi a lâmina de água aplicada, mais cedo ocorreu o pico de lixiviação de NH_4^+ .

Para a lixiviação de NO_3^- , o controle (sem água adicionada) apresentou um pequeno pico de lixiviação na primeira semana, na textura 321 g kg^{-1} de argila (Figura 2a). Na lâmina de 675 mm o maior pico de lixiviação ocorreu na nona semana com a textura 174 g kg^{-1} de argila (Figura 2b). A lâmina de 1006 mm apresentou maior pico na décima primeira semana com a textura 321 g kg^{-1} de argila (Figura 2c). Por fim, a lâmina de 1345 mm teve maior pico de lixiviação de NO_3^- na oitava semana na textura de 467 g kg^{-1} de argila (Figura 2d). Diferente das demais, na última semana, todas as texturas com a lâmina 675 mm apresentaram um leve aumento na lixiviação de NO_3^- .

Para a lixiviação de NH_4^+ , houve interação de textura (ou teor de argila) e lâmina de água adicionada (Figura 3a). Assim, para as lâminas de 675, 1006 e 1345 mm, a equação de regressão que melhor se ajustou aos dados foi a exponencial decrescente, sendo que conforme ocorre o aumento do teor de argila nas texturas, menor é a lixiviação de NH_4^+ . No caso do controle, não houve ajuste de regressão aos dados experimentais. Para o efeito principal de lâmina de água, observado para a lixiviação de NO_3^- , ajustou-se o modelo polinomial quadrático (Figura 3b). À medida que aumentou a lâmina de água aplicada, também aumentou a lixiviação de nitrato.

Figura 1 – Lixiviação de NH_4^+ para o tratamento sem adição de água (a) e para as lâminas 675 (b), 1006 (c) e 1345 mm (d) relacionada às texturas de solo. Os símbolos representam a média e as barras verticais representam o erro padrão da média ($n = 4$)

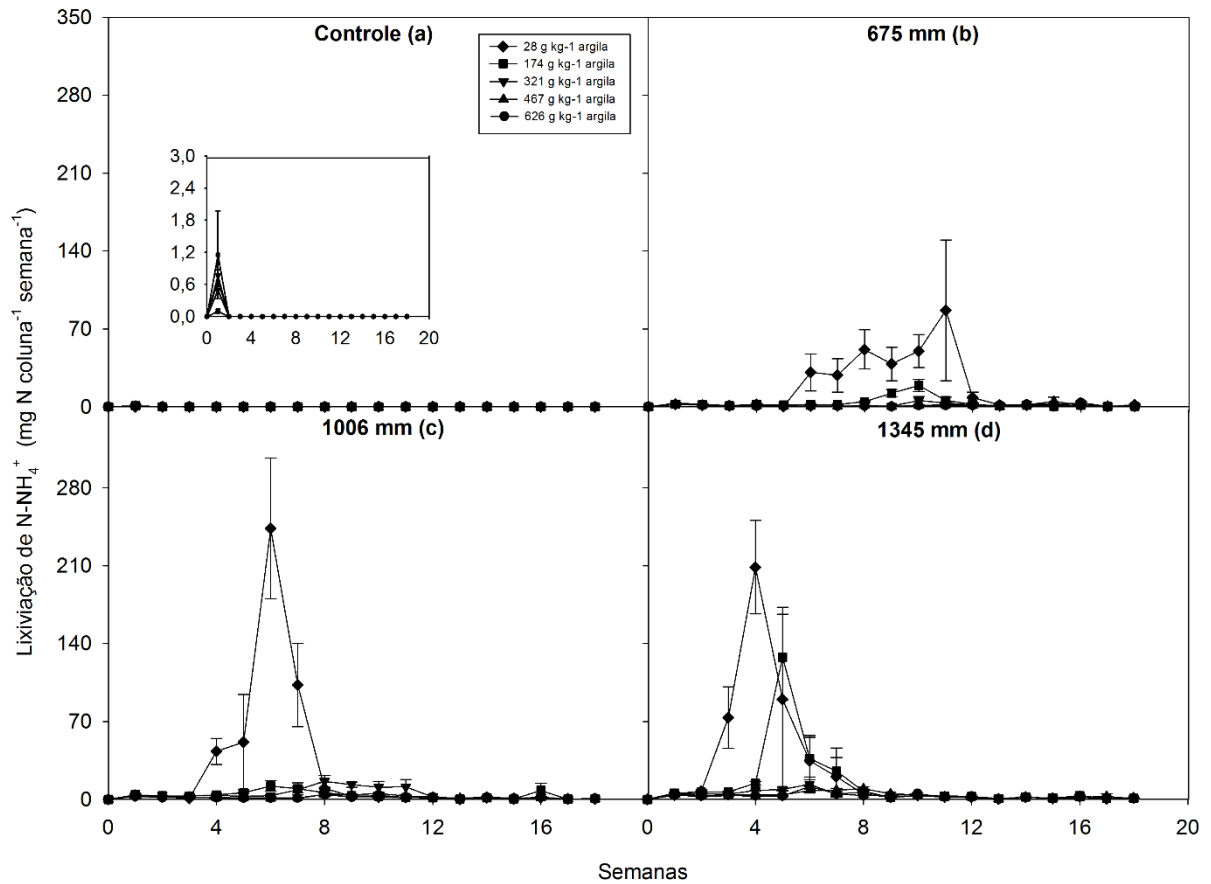


Figura 2 – Lixiviação de NO_3^- para o tratamento sem adição de água (a) e para as lâminas 675 (b), 1006 (c) e 1345 mm (d) relacionada às texturas de solo. Os símbolos representam a média e as barras verticais representam o erro padrão da média ($n = 4$)

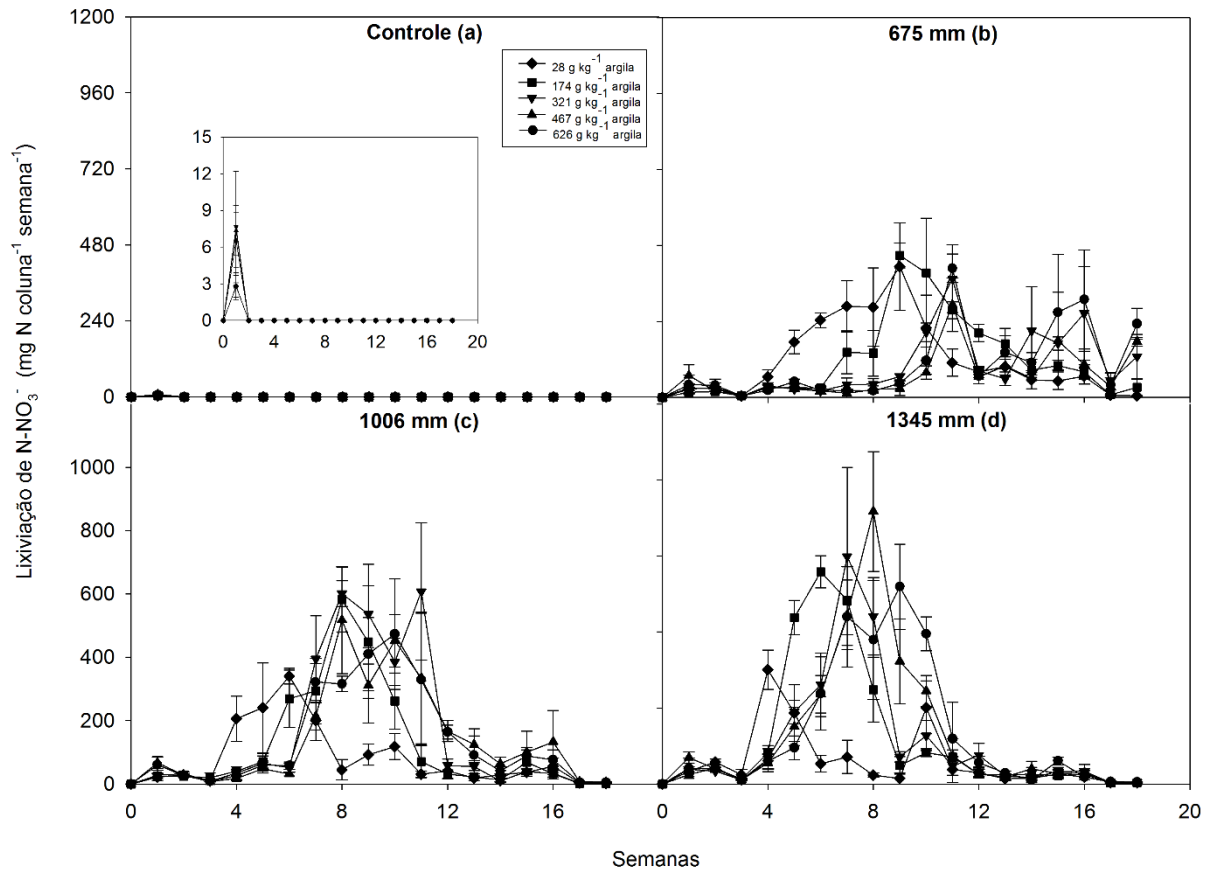


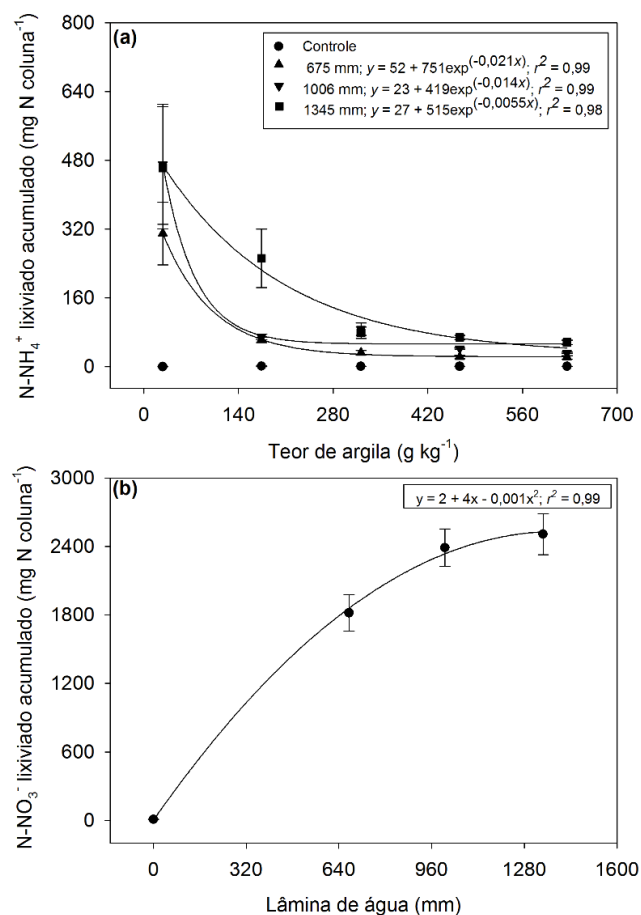
Tabela 2 – Valor de P dos fatores e suas interações para o Experimento I

Fator	N-NH₄⁺_{lixiv}	N-NO₃⁻_{lixiv}	N-NH₄⁺_{solo}	N-NO₃⁻_{solo}	C-total	N-total	pH_{CaCl2}
Textura	< 0,001	0,209	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001
Lâmina	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	0,002	< 0,001
Camada	-	-	< 0,001	0,003	0,499	0,202	< 0,001
Textura × Lâmina	< 0,001	0,825	0,015	< 0,001	< 0,001	0,005	< 0,001
Textura × Camada	-	-	0,999	0,279	0,998	0,969	< 0,001
Lâmina × Camada	-	-	< 0,001	< 0,001	0,999	0,986	< 0,001
Textura × Lâmina × Camada	-	-	1,000	0,054	1,000	1,000	< 0,001

-: fator não considerado no modelo estatístico.

N-NH₄⁺_{lixiv}: lixiviação acumulada de NH₄⁺; N-NO₃⁻_{lixiv}: lixiviação acumulada de NO₃⁻.

Figura 3 – Lixiviação acumulada de NH_4^+ (a) e NO_3^- (b) relacionada à textura do solo e a lâmina de água adicionada. Os símbolos representam as médias e as barras verticais representam o erro padrão da média ($n = 4$ e 20 para o painel a e b, respectivamente). As linhas representam o ajuste para uma equação de regressão



A concentração de NH_4^+ no perfil do solo foi superior no controle na profundidade de 10 cm em todas as texturas (Figura 4a). A partir de 20 cm houve decréscimo na concentração de NH_4^+ . Nas lâminas 675, 1006 e 1345 mm, a concentração de NH_4^+ no perfil do solo foi similar para todas as texturas (Figura 4b, c, d). Para a concentração de NO_3^- no perfil do solo, o controle nas texturas 321, 467 e 626 g kg^{-1} de argila apresentaram valores superiores àsquelas de 28 e 174 g kg^{-1} de argila na profundidade 10 cm (Figura 5a). Em geral, a concentração de NO_3^- para as lâminas de 675, 1006 e 1345 mm foram similares ao longo do perfil para todas as texturas estudadas (Figura 5b, c, d).

Figura 4 – Concentração de NH_4^+ no perfil do solo para o tratamento sem adição de água (a) e para as lâminas 675 (b), 1006 (c) e 1345 mm (d) relacionadas às texturas de solo. Os símbolos representam a média e as barras horizontais representam o erro padrão da média ($n = 4$)

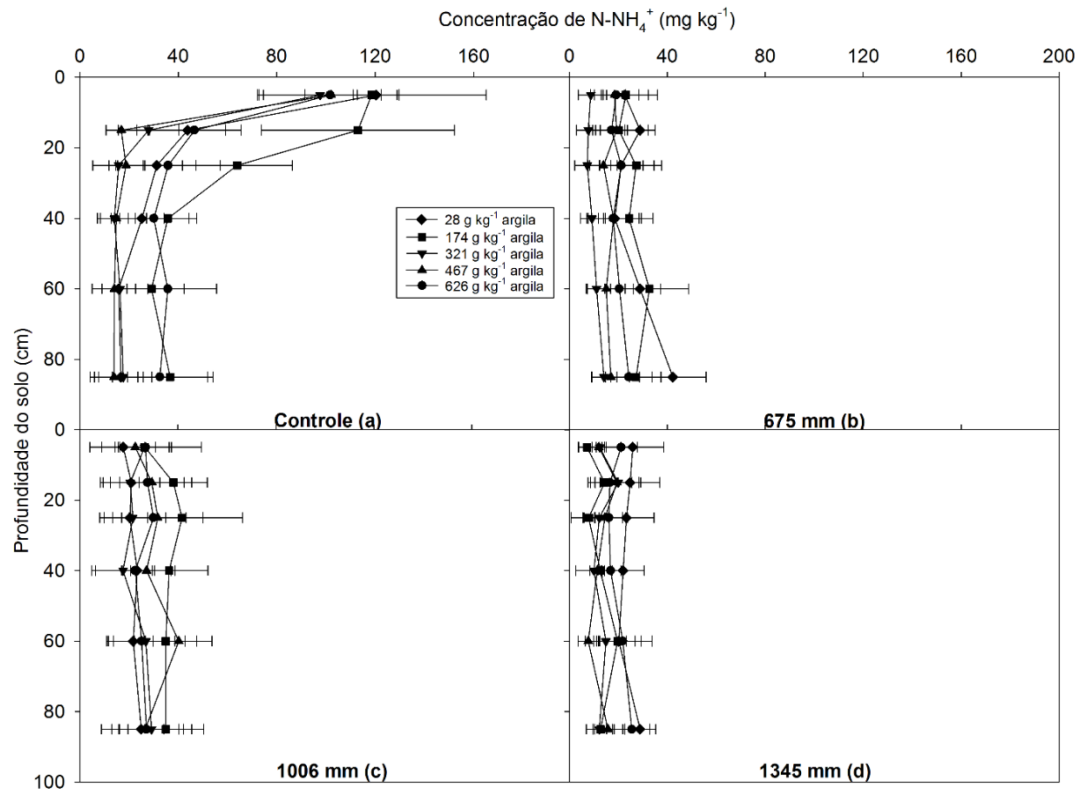
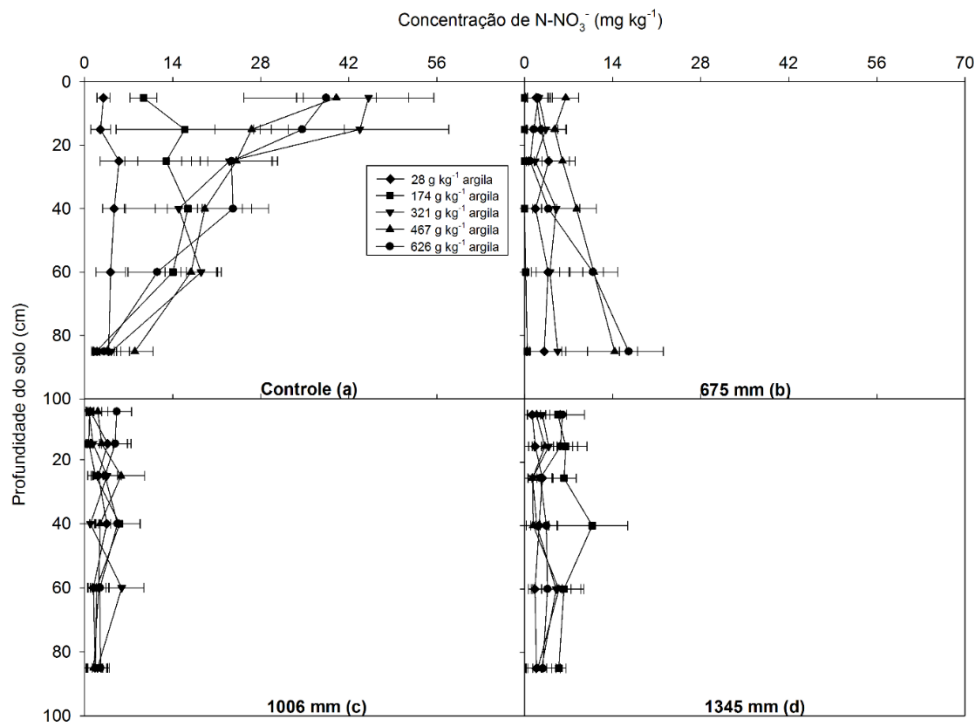


Figura 5 – Concentração de NO_3^- no perfil do solo para o tratamento sem adição de água (a) e para as lâminas 675 (b), 1006 (c) e 1345 mm (d) relacionadas às texturas de solo. Os símbolos representam a média e as barras horizontais representam o erro padrão da média ($n = 4$)

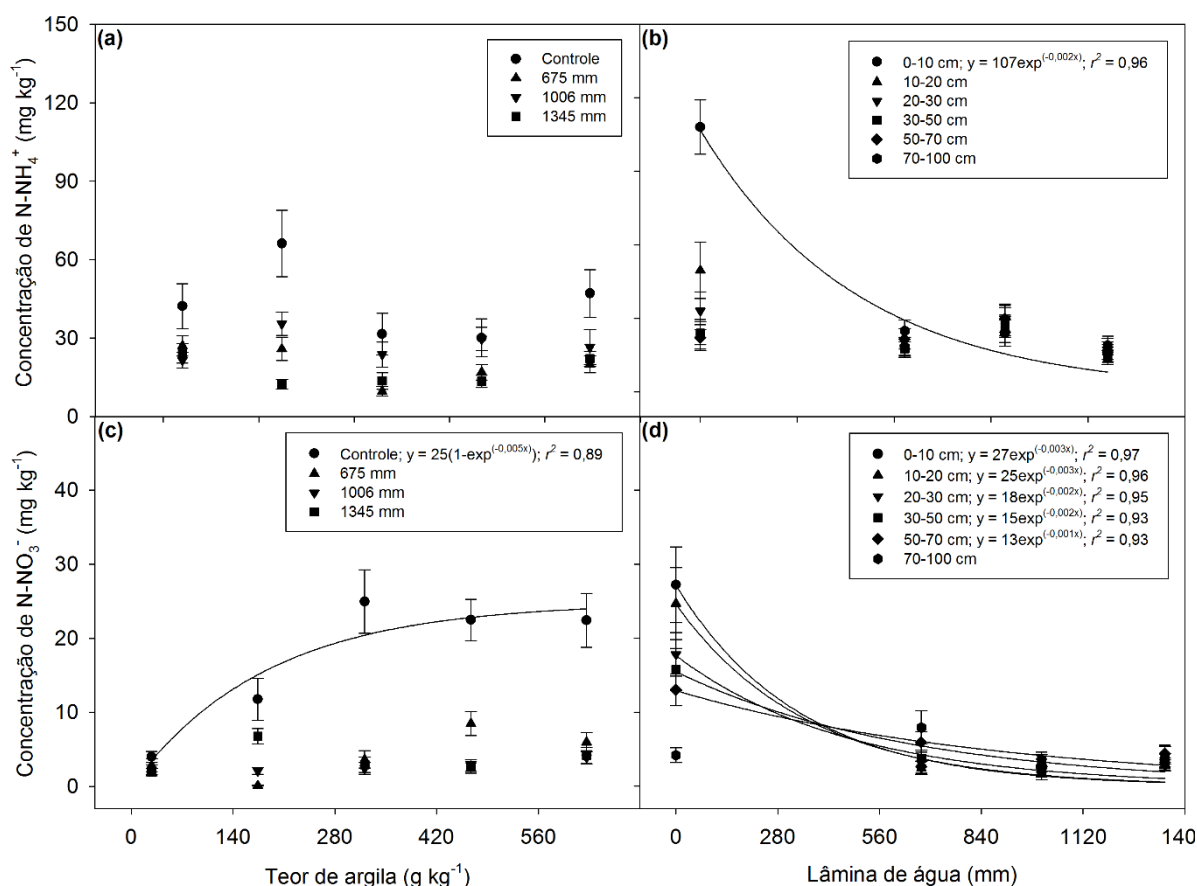


Para a concentração de NH_4^+ , houve interação da textura (Figura 6a), e da camada de solo com as lâminas de água (Figura 6b). Para a interação da lâmina de água e textura (Figura 6a) não houve ajuste de equações de regressão, todavia o tratamento sem adição de água (controle) foi o que apresentou as maiores concentrações de NH_4^+ no solo, independente da textura estudada. No caso da interação da camada de solo com a lâmina (Figura 6b), houve o ajuste de regressão exponencial decrescente para a camada de 0-10 cm, sendo que, quanto maior a lâmina de água, menor é a concentração de NH_4^+ no solo.

Em relação a concentração de NO_3^- no solo, apenas para o controle houve ajuste de regressão exponencial crescente no desdobramento do efeito de textura de solo e lâmina de água (Figura 6c). Neste caso, observa-se que o maior teor de argila do solo resultou em maior concentração de NO_3^- . Para as lâminas de 675, 1006 e 1345 mm, não houve ajuste de regressão (Figura 6c). Para a concentração de NO_3^- no solo também houve interação entre a lâmina de água e camada de solo (Figura 6d). O modelo de equação de regressão que melhor se ajustou foi o exponencial decrescente

para todas as camadas, exceto para a camada de 70-100 cm, que não apresentou ajuste significativo. Observa-se que o aumento nas lâminas de água proporcionou redução da concentração de nitrato nas camadas de até 70 cm.

Figura 6 – Concentração de NH_4^+ (a, b) e NO_3^- (c, d) no solo relacionado ao teor de argila e a lâmina de água adicionada. Os símbolos representam a média e as barras verticais representam o erro padrão da média ($n = 24$ para o painel a e c e 20 para o painel b e d). As linhas representam o ajuste para uma equação exponencial decrescente (b, d) e exponencial crescente (c)



No que diz respeito ao conteúdo de C e N total no solo, as texturas apresentaram comportamentos semelhantes ao longo da coluna, independentemente da lâmina de água (Figura 7 e 8). De modo geral, o teor de C e N total foi maior de acordo com o aumento no teor de argila do solo.

Analisando-se o desdobramento da interação lâmina de água e teor de argila para o conteúdo de C e N total do solo, o modelo de regressão que melhor se ajustou foi o linear (Figura 9a, b). O aumento do teor de argila do solo proporcionou maior conteúdo de C e N total, independente da lâmina de água aplicada.

Figura 7 – Conteúdo de C total no perfil do solo para o tratamento sem adição de água (a) e para as lâminas 675 (b), 1006 (c) e 1345 mm (d) relacionadas à texturas de solo. Os símbolos representam a média e as barras horizontais representam o erro padrão da média ($n = 4$)

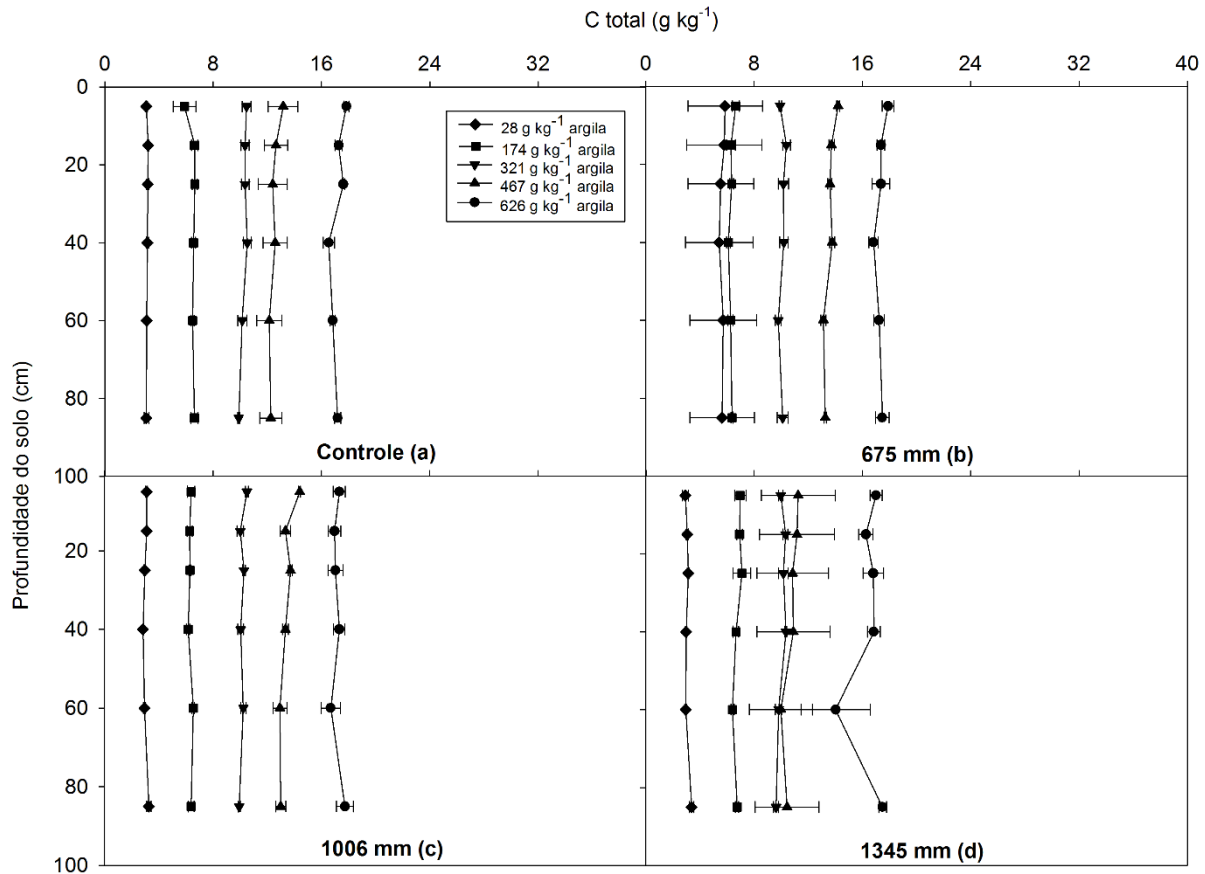


Figura 8 – Conteúdo de N total no perfil do solo para o tratamento sem adição de água (a) e para as lâminas 675 (b), 1006 (c) e 1345 mm (d) relacionadas à texturas de solo. Os símbolos representam a média e as barras horizontais representam o erro padrão da média ($n = 4$)

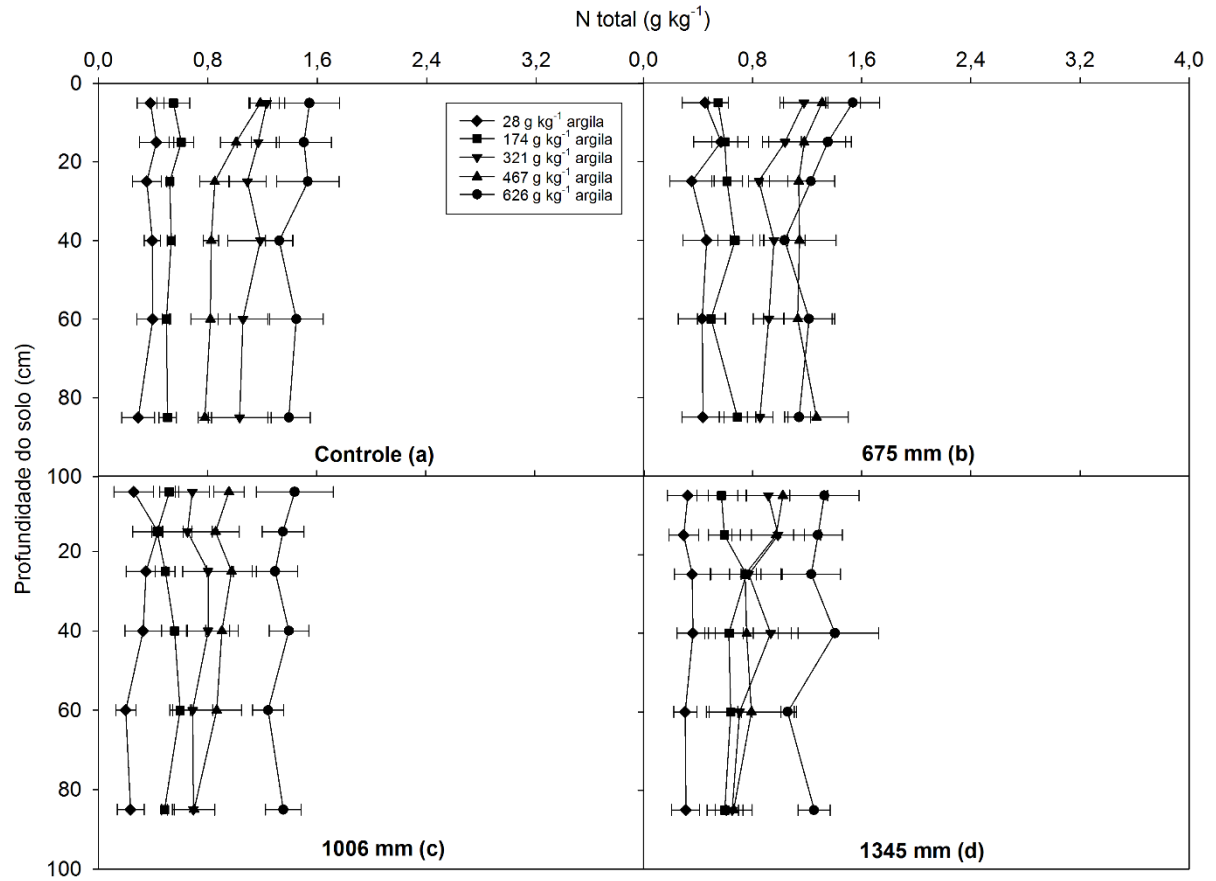
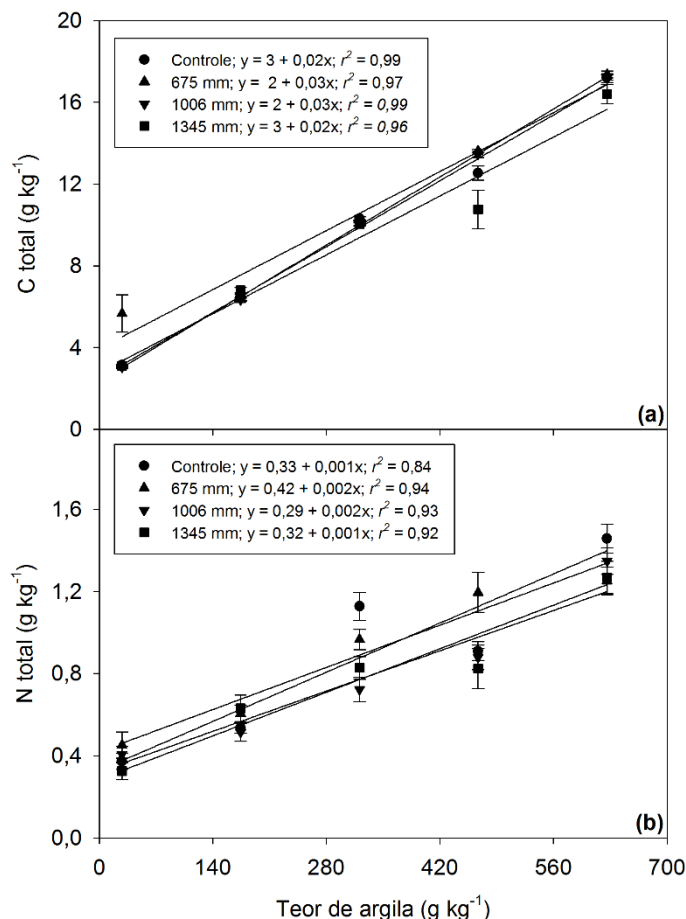


Figura 9 – Conteúdo de C (a) e N (b) total do solo relacionado ao teor de argila e a lâmina de água adicionada. Os símbolos representam a média e as barras verticais representam o erro padrão da média ($n = 24$ para o painel a e b, respectivamente). As linhas representam o ajuste para uma equação de regressão



Foi observado que ocorreu decréscimo no pH no perfil do solo até a profundidade de ~40 cm para a maioria dos tratamentos (Figura 10). Para a interação do teor de argila com lâmina de água, houve ajuste de regressão quadrática para o controle, e linear para as lâminas de 1006 e 1345 mm (Figura 11a). Para a interação do teor de argila com a camada de solo, a equação que melhor se ajustou aos dados experimentais para as camadas de 0-10 e 10-20 cm foi a linear, enquanto que o pH decresceu exponencialmente para a camada de 20-30 cm (Figura 11b). Por fim, para a interação da lâmina de água e camada de solo, o pH decresceu linearmente nas camadas de 50-70 e 70-100 cm (Figura 11c).

Figura 10 – pH no perfil do solo para o tratamento sem adição de água (a) e para as lâminas 675 (b), 1006 (c) e 1345 mm (d) relacionadas à texturas de solo. Os símbolos representam a média e as barras horizontais representam o erro padrão da média ($n = 4$)

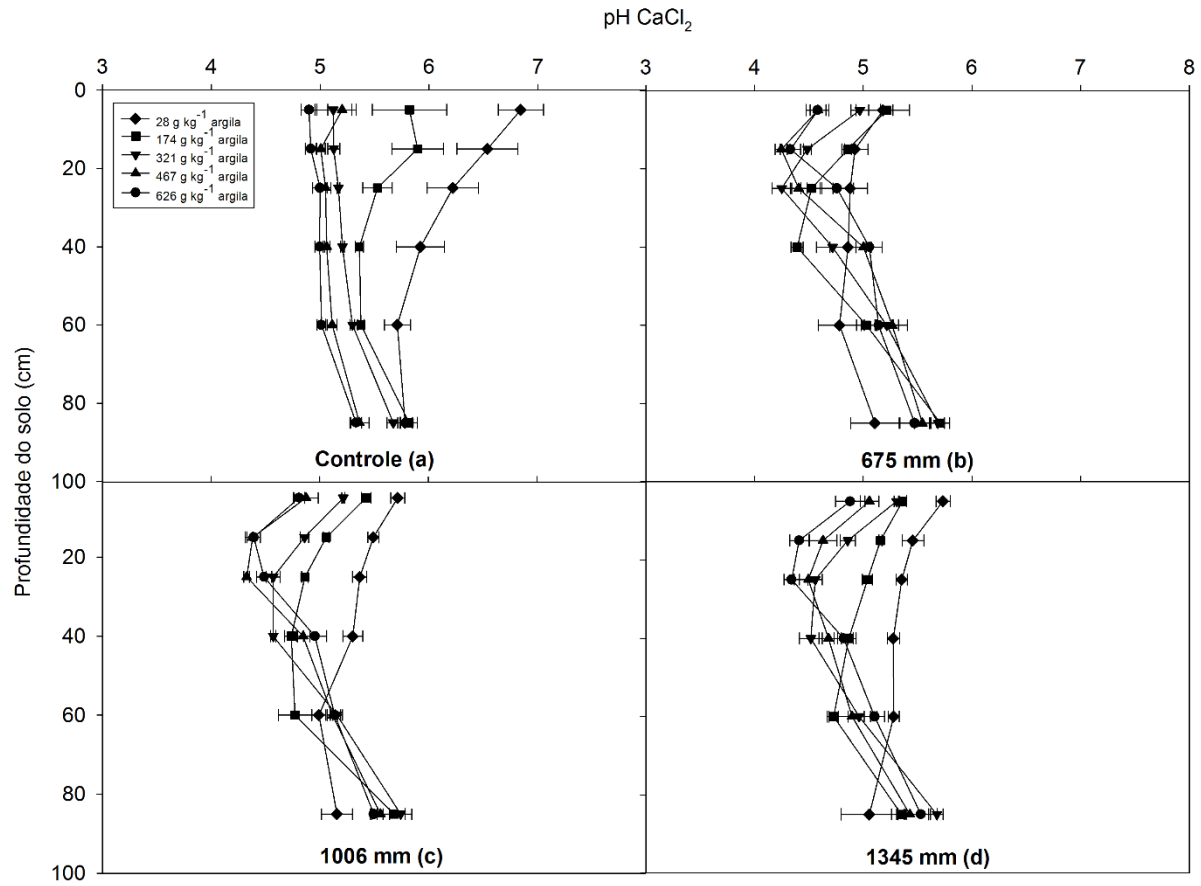
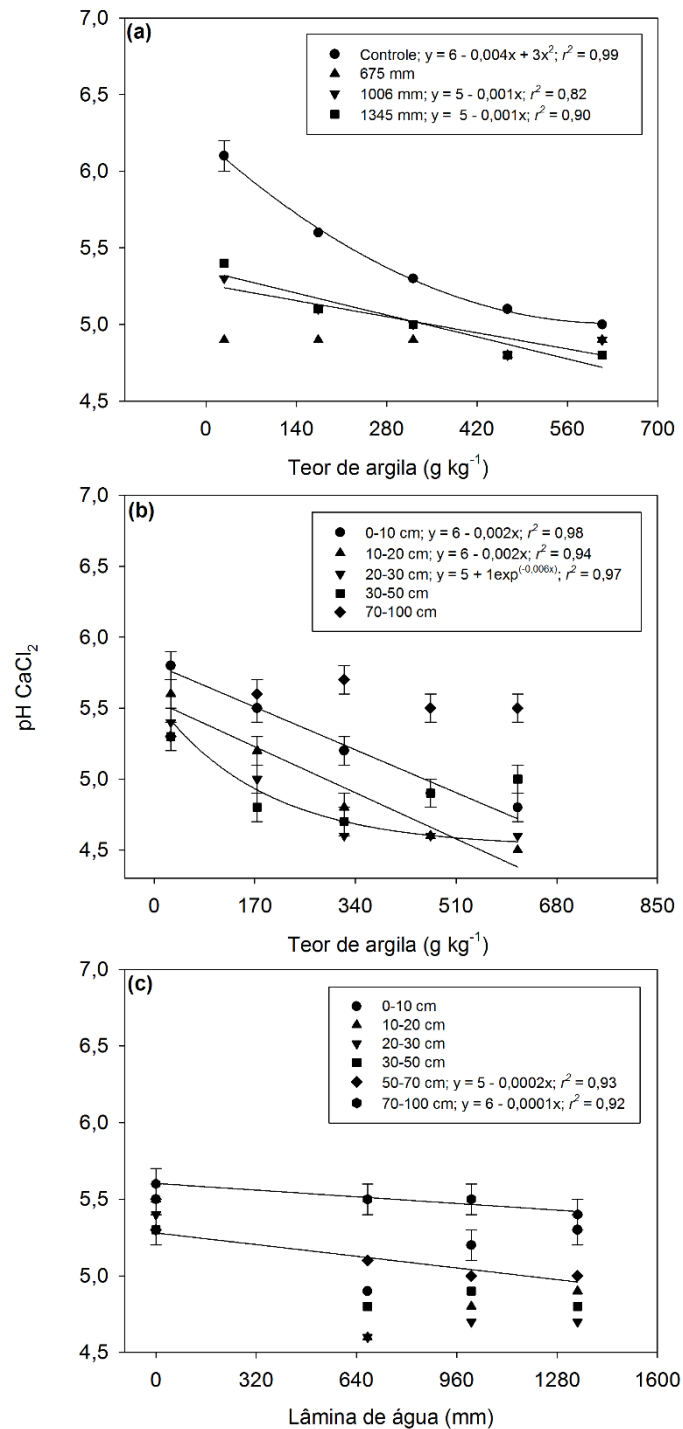


Figura 11 – pH do solo relacionado ao teor de argila e a lâmina de água adicionada. Os símbolos representam a média e as barras verticais representam o erro padrão da média (n = 24, 16 e 20 para o painel a, b e c, respectivamente). As linhas representam o ajuste para uma equação de regressão

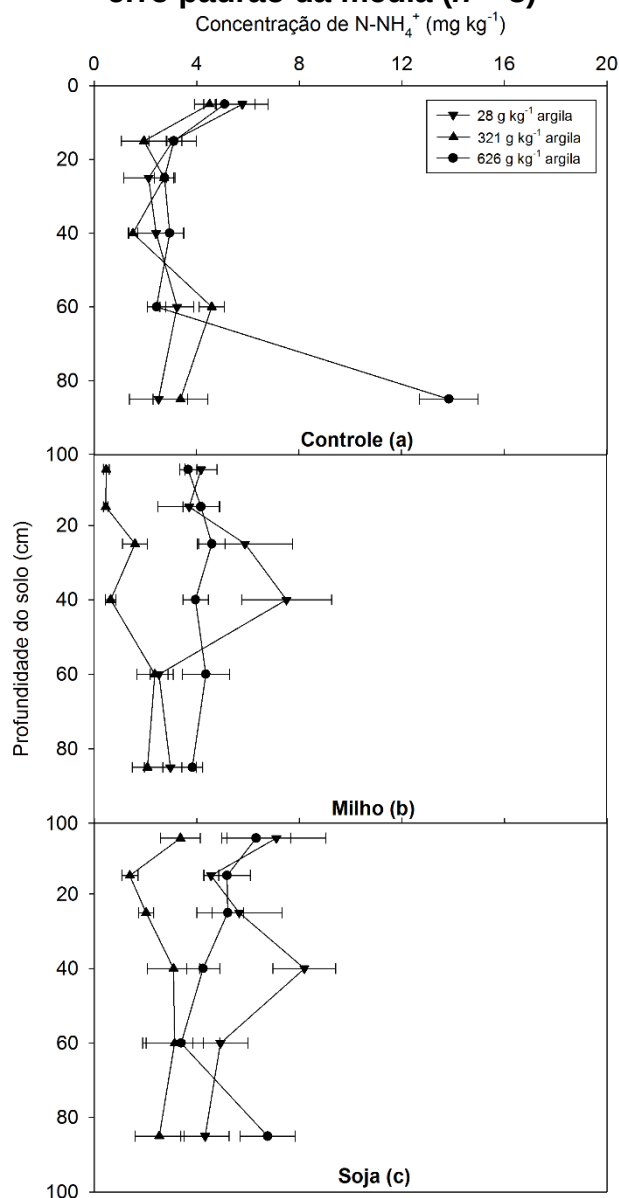


4.2 Experimento II

4.2.1 Antes da lixiviação

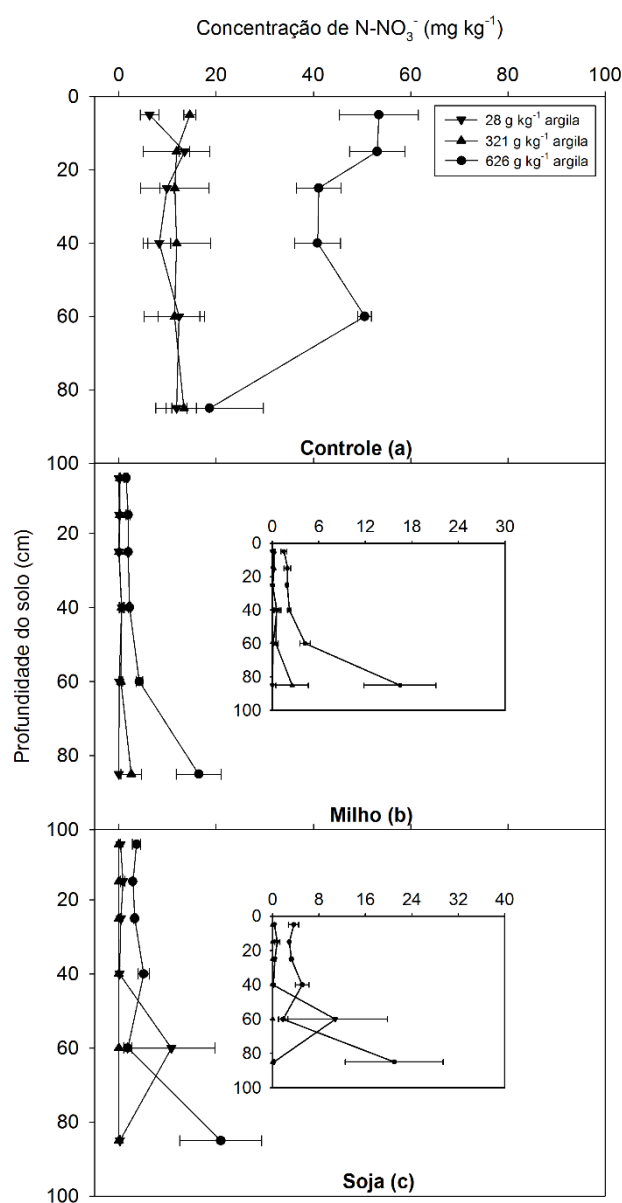
A concentração de NH_4^+ no solo foi maior a partir da profundidade de 60 cm para o controle na textura 626 g kg^{-1} de argila (Figura 12a), sem diferença para solos cultivados com milho e soja, com valores superiores na textura 28 g kg^{-1} de argila e profundidade de 40 cm (Figura 12b, c).

Figura 12 - Concentração de NH_4^+ no perfil do solo, em texturas contrastantes, relacionado ao tratamento sem cultivo (a) e as culturas de milho (b) e soja (c). Os símbolos representam a média e as barras horizontais representam o erro padrão da média ($n = 3$)



Para o NO_3^- do solo, a textura 626 g kg^{-1} de argila apresentou valores superiores às outras texturas no controle (sem cultivo), além de um decréscimo abaixo dos 60 cm (Figura 13a), também sem diferença para milho e soja (Figura 13b, c). Em adição, os menores valores de NO_3^- no solo foram encontrados na textura 28 g kg^{-1} de argila (Figura 13b, c).

Figura 13 - Concentração de NO_3^- no perfil do solo, em texturas contrastantes, relacionado ao tratamento sem cultivo (a) e as culturas de milho (b) e soja (c). Os símbolos representam a média e as barras horizontais representam o erro padrão da média ($n = 3$)

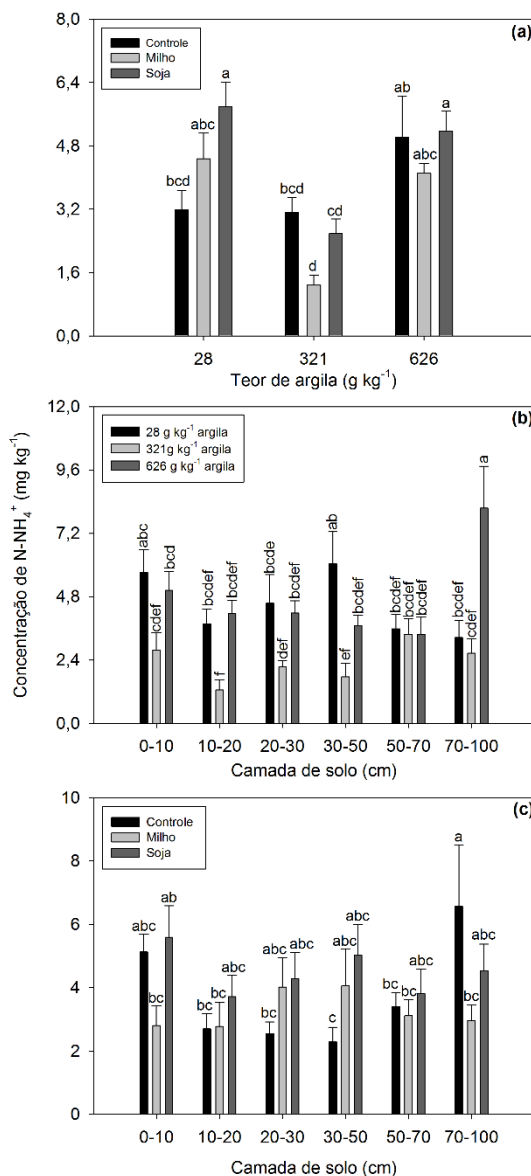


Os valores de P estão apresentados na Tabela 3. Em relação aos fatores textura e cultura, concentração de NH_4^+ foi maior com soja nas texturas 28 e 626 g kg^{-1} de argila, seguido do controle na textura de 626 g kg^{-1} de argila e o milho nas texturas 28 e 626 g kg^{-1} de argila (Figura 14a). Na interação textura e camada, os tratamentos que apresentaram maiores valores foram a textura 626 g kg^{-1} de argila na camada de 70-100 cm e a textura 28 g kg^{-1} de argila nas camadas 0-10 e 30-50 cm (Figura 14b). Para a interação da cultura com a camada de solo, o tratamento com maior valor foi o controle na camada 70-100 cm (Figura 14c).

Tabela 3 – Valor de P dos fatores e suas interações para o Experimento II, antes da lixiviação

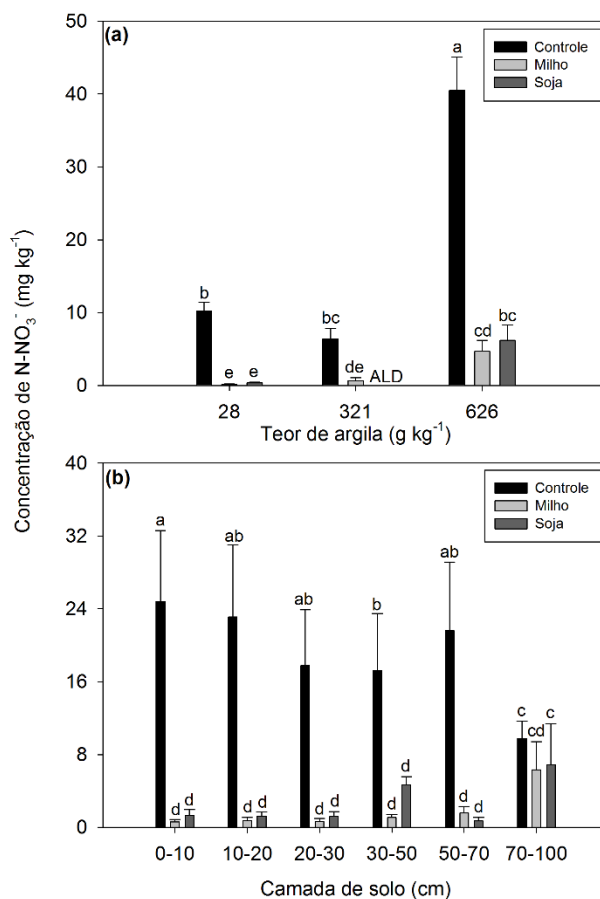
Fator	N-NH_4^+ solo	N-NO_3^- solo	C-total	N-total	pH$_{\text{CaCl}_2}$
Textura	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001
Cultura	0,002	< 0,001	< 0,001	0,337	< 0,001
Camada	0,010	0,118	0,357	0,482	< 0,001
Textura × Cultura	0,010	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001
Textura × Camada	< 0,001	0,225	0,500	0,027	< 0,001
Cultura × Camada	< 0,001	< 0,001	0,959	0,788	< 0,001
Textura×Cultura×Camada	0,011	< 0,001	0,922	0,967	0,100

Figura 14 – Concentração de NH_4^+ no solo, em diferentes texturas e cultivos, relacionado ao teor de argila (a) e a camadas do solo (b e c). As barras verticais representam o erro padrão da média ($n = 18$ para o painel a, e 9 para os painéis b e c, respectivamente). Letras iguais não indicam diferença ao nível de 5%



Quanto à concentração de NO_3^- no solo, o controle apresentou valores superiores nas três texturas (Figura 15a). Os tratamentos com milho e soja apresentaram os menores valores de NO_3^- no solo em todas as camadas, em relação ao controle (Figura 15b).

Figura 15 – Concentração de NO_3^- no solo em diferentes texturas e cultivos, relacionado ao teor de argila (a) e a camadas do solo (b). As barras verticais representam o erro padrão da média ($n = 18$ e 9 para o painel a e b, respectivamente). Letras iguais não indicam diferença ao nível de 5% de probabilidade.



Para o conteúdo de C e N total, os tratamentos apresentaram comportamento semelhante ao longo da coluna (Figura 16 e 17). Para o conteúdo de C e N total, a textura 626 g kg^{-1} de argila resultou nos maiores valores (Figura 18a, b), também houve interação de textura e camada de solo para o conteúdo de N total, e na textura 626 g kg^{-1} de argila foram observados os maiores valores em todas as camadas (Figura 18c).

Figura 16 – Conteúdo de C total no perfil do solo, em texturas contrastantes, relacionado ao tratamento sem cultivo (a) e as culturas de milho (b) e soja (c). Os símbolos representam a média e as barras horizontais representam o erro padrão da média ($n = 3$)

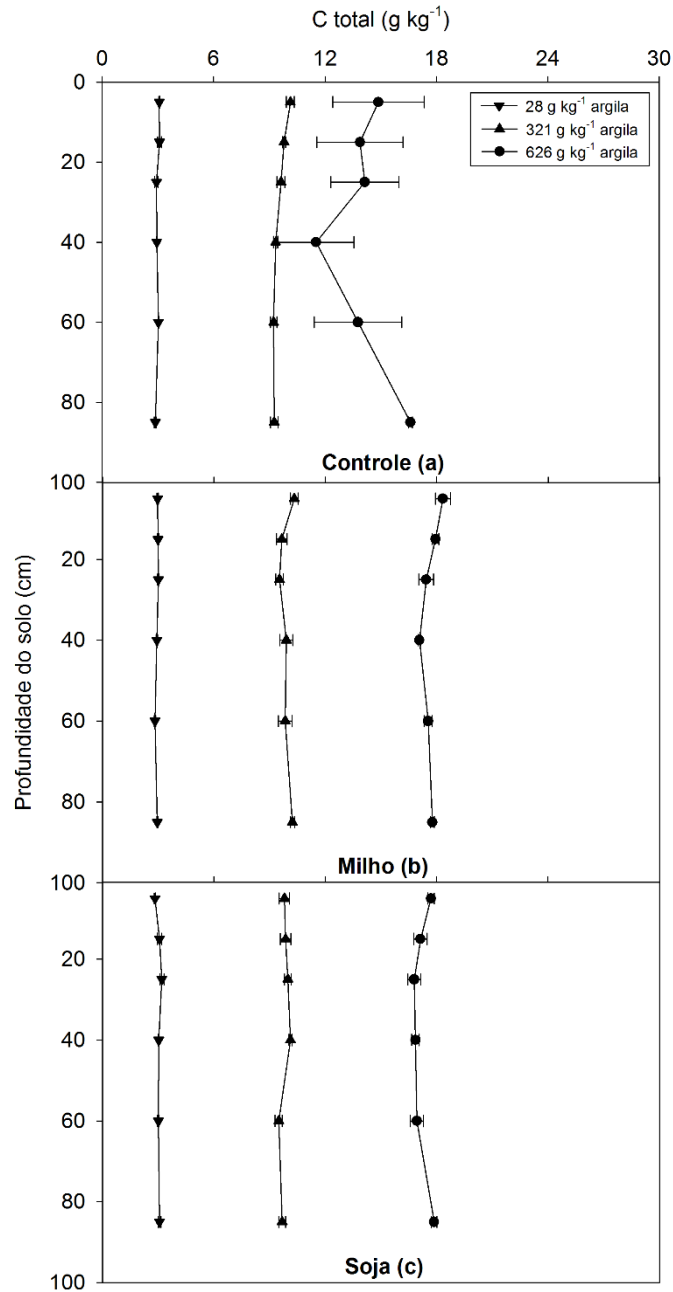


Figura 17 – Conteúdo de N total perfil do solo, em texturas contrastantes, relacionado ao tratamento sem cultivo (a) e as culturas de milho (b) e soja (c). Os símbolos representam a média e as barras horizontais representam o erro padrão da média ($n = 3$)

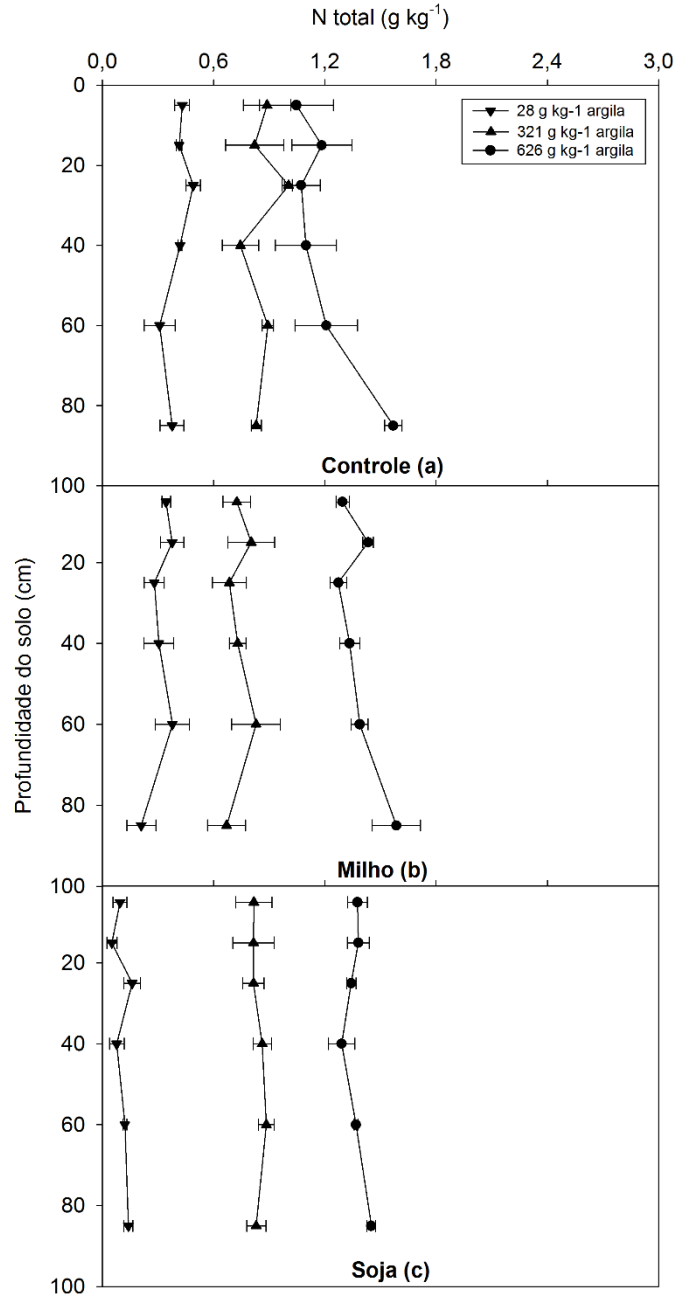
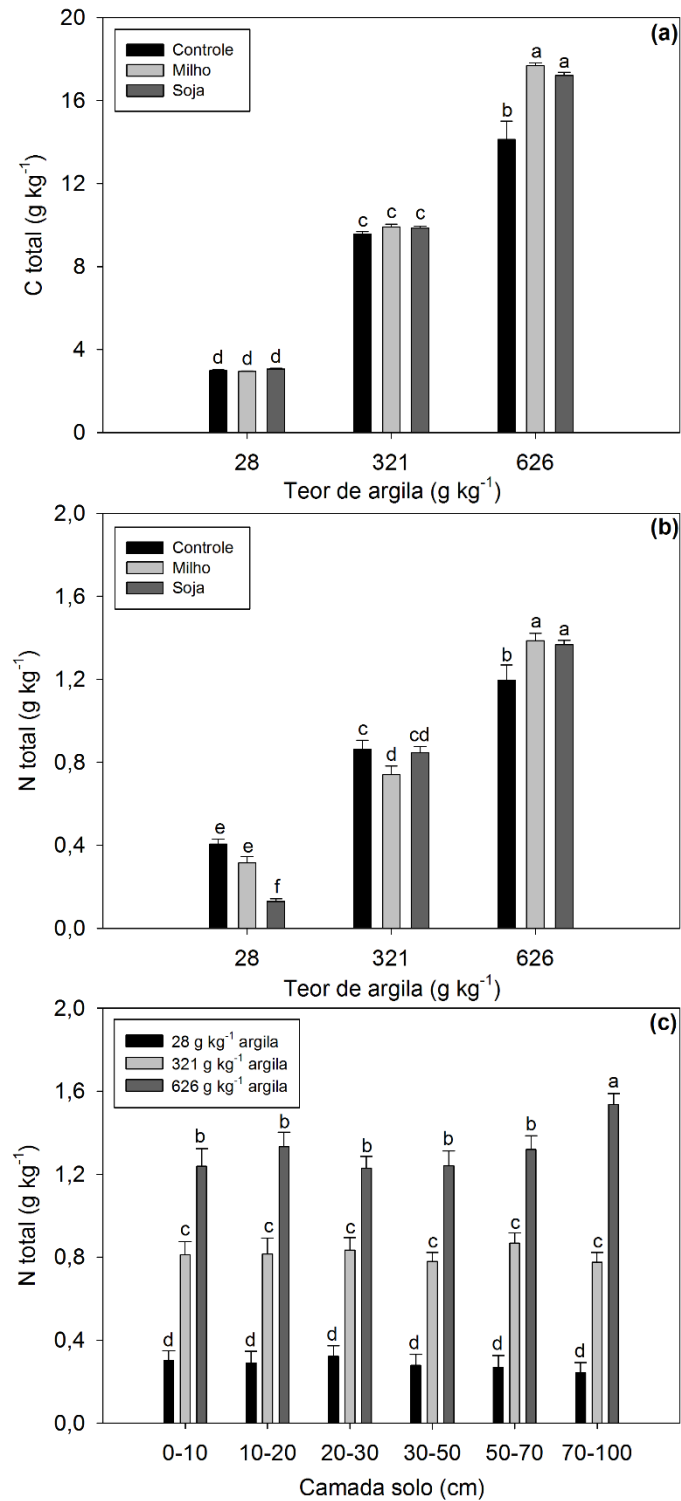


Figura 18 – Conteúdo de C e N total no solo em diferentes texturas e cultivos, relacionado ao teor de argila (a e b) e a camadas do solo (c). As barras verticais representam o erro padrão da média ($n = 18$ para os painéis a e b, e 9 para o painel c). Letras iguais não indicam diferença ao nível de 5% de probabilidade



Foi observado um decréscimo nos valores de pH para a textura de 28 g kg⁻¹ de argila abaixo dos 10 cm, independente da cultura (Figura 19a, b, c). A textura de 321 g kg⁻¹ de argila apresentou o menor valor de pH na interação entre os fatores textura e cultura (Figura 20a). Os maiores valores foram observados na textura 626 g kg⁻¹ de argila nas camadas de 70-100, 50-70 e 30-50 cm, enquanto que na textura 28 g kg⁻¹ de argila o maior valor foi observado na camada de 0-10 cm (Figura 20b). O menor valor de pH foi observado no tratamento controle na camada de 10-20 cm, e o maior foi na cultura do milho, para a camada de 70-100 cm (Figura 20c).

Figura 19 – pH no perfil do solo, em texturas contrastantes, relacionado ao tratamento sem cultivo (a) e as culturas de milho (b) e soja (c). Os símbolos representam a média e as barras horizontais representam o erro padrão da média (n = 3)

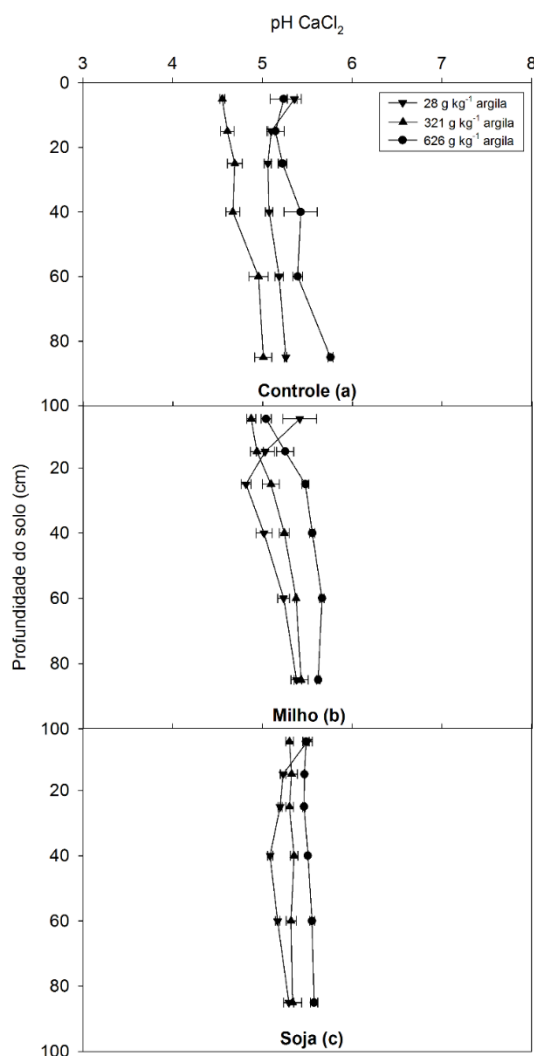
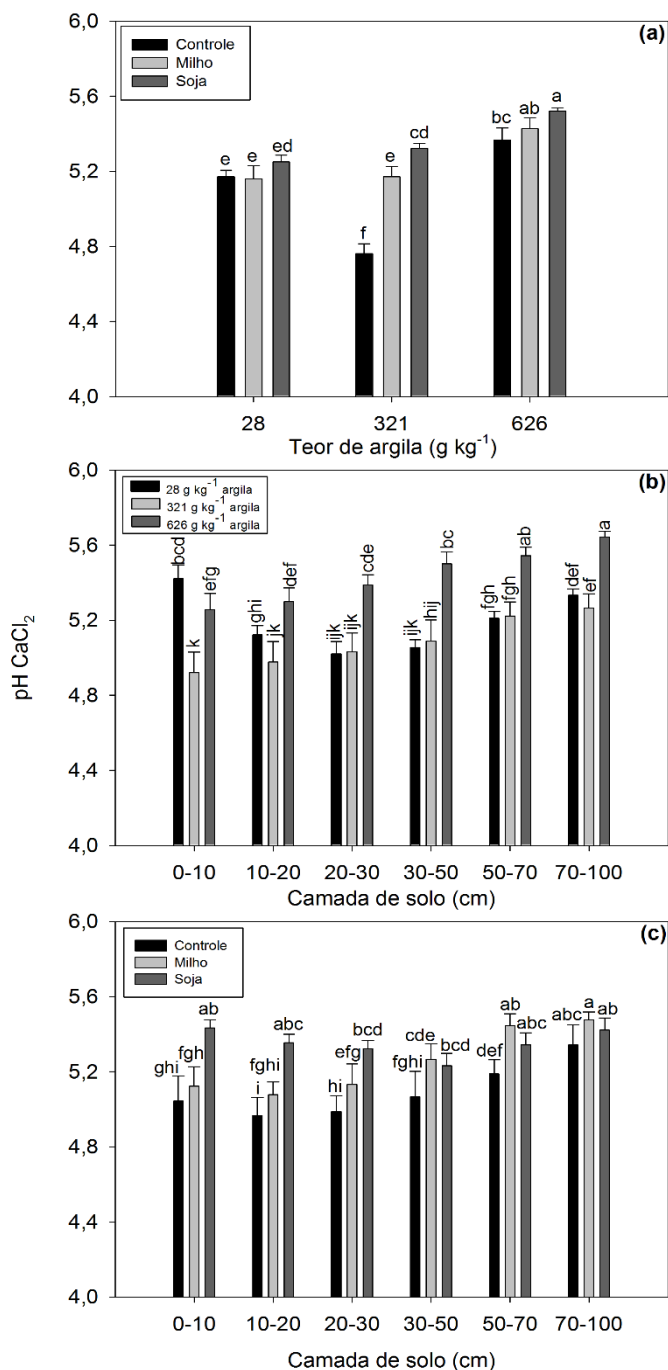


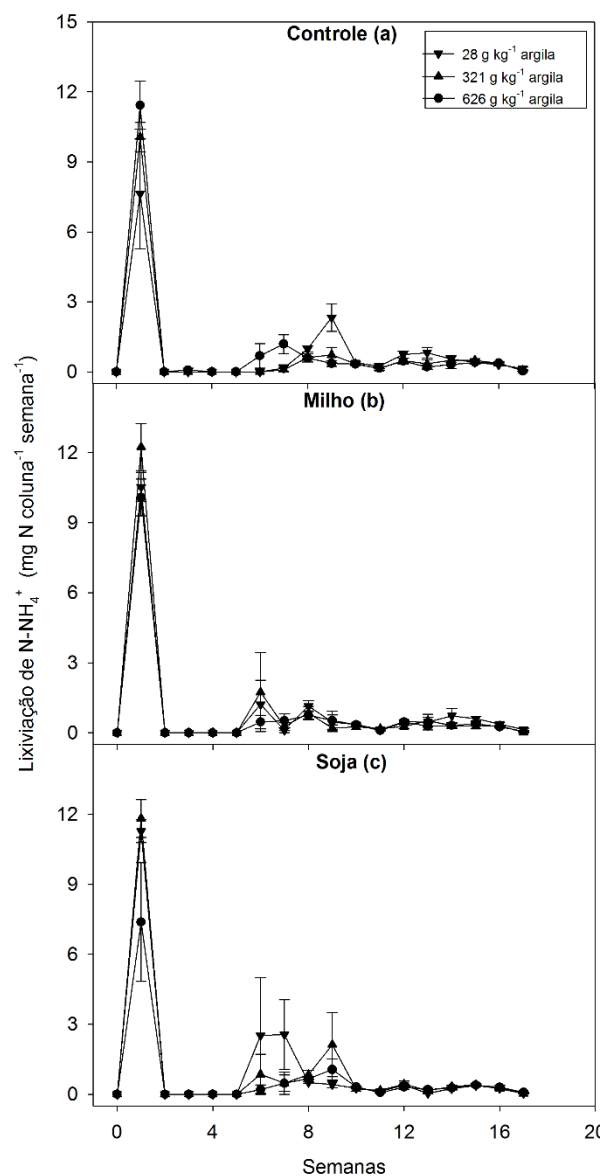
Figura 20 – $\text{pH}_{\text{CaCl}_2}$ no solo em diferentes texturas e cultivos, relacionado ao teor de argila (a) e a camadas do solo (b e c). As barras verticais representam o erro padrão da média ($n = 18$ para o painel a, e 9 para o painel b e c, respectivamente). Letras iguais não indicam diferença ao nível de 5% de probabilidade.



4.2.2 Após a lixiviação

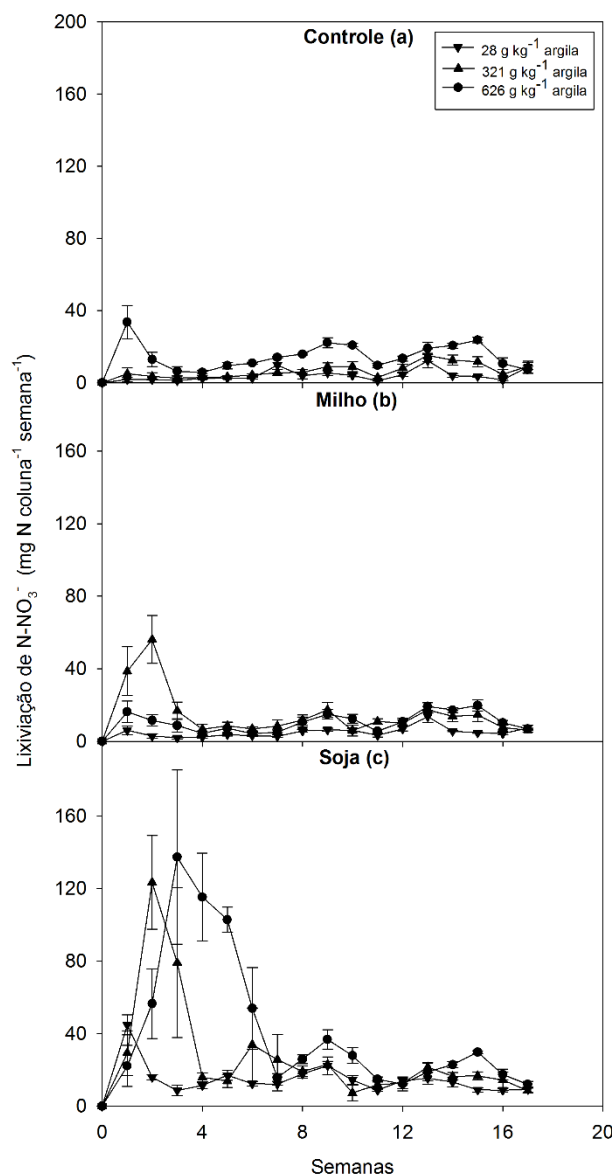
O maior pico de lixiviação de NH_4^+ foi observado na primeira semana, em todos tratamentos (Figura 21). No controle, o maior pico correspondeu à textura e 626 g kg^{-1} de argila na primeira semana, e nas semanas 6, 7 e 9 um leve pico ocorreu nas texturas de 626 e 28 g kg^{-1} de argila respectivamente (Figura 21a). Para as culturas do milho e da soja, os maiores picos ocorreram na primeira semana, na textura 321 g kg^{-1} de argila (Figura 21b, c). Na cultura do milho também foi observado um pequeno pico na sexta semana para a textura 321 g kg^{-1} de argila (Figura 21b). Já para a soja, foram observados leves picos na lixiviação de NH_4^+ na sexta e sétima semana para a textura 28 g kg^{-1} de argila e na nona semana para a de 321 g kg^{-1} de argila (Figura 21c).

Figura 21 – Lixiviação semanal de NH_4^+ , relacionado ao tratamento sem cultivo (a) e as culturas de milho (b) e soja (c). Os símbolos representam a média e as barras verticais representam o erro padrão da média ($n = 4$)



Para a lixiviação de NO_3^- no controle foi observado um pequeno pico na primeira semana com a textura de 626 g kg⁻¹ de argila, (Figura 22a). Para a cultura do milho, a lixiviação de NO_3^- foi maior na primeira e segunda semana do experimento nas texturas 321 e 626 g kg⁻¹ de argila (Figura 22b). Já na cultura da soja, os maiores picos foram observados na segunda semana com a textura 321 g kg⁻¹ de argila e na terceira semana para a textura 626 g kg⁻¹ de argila.

Figura 22 – Lixiviação semanal de NO_3^- , relacionado ao tratamento sem cultivo (a) e as culturas de milho (b) e soja (c). Os símbolos representam a média e as barras verticais representam o erro padrão da média ($n = 4$)



Na Tabela 4 encontram-se os valores de P . Não houve diferença na lixiviação acumulada de NH_4^+ (Figura 23a). Para a lixiviação acumulada de NO_3^- , houve interação da textura de solo e cultura, sendo que os maiores valores foram observados na cultura da soja para as texturas 626, 321 e 26 g kg $^{-1}$ de argila respectivamente (Figura 23b).

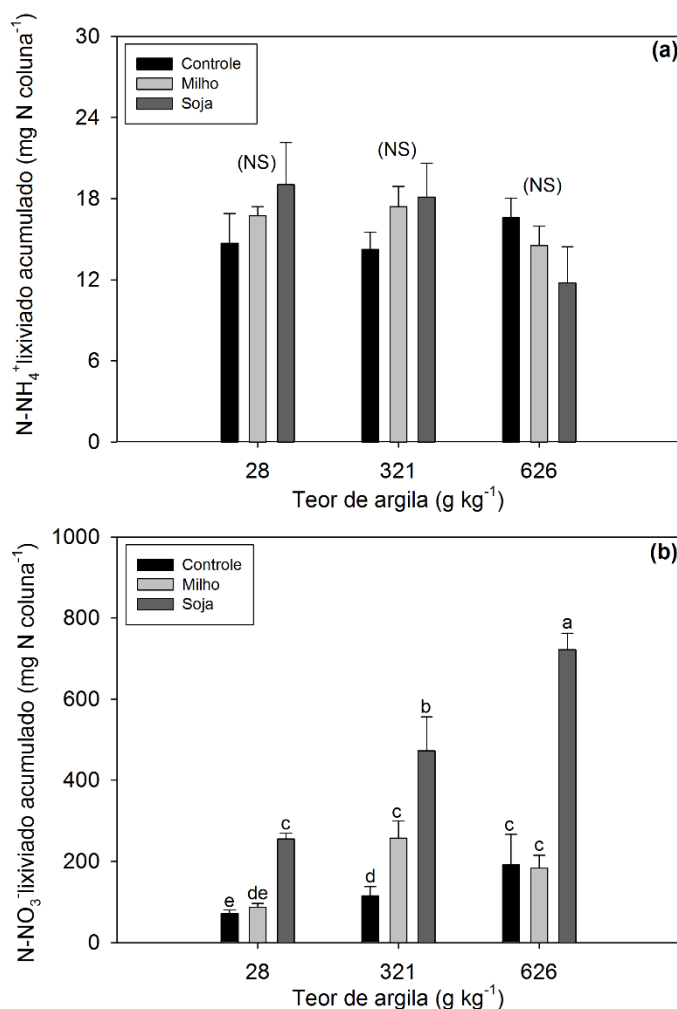
Tabela 4 – Valor de P dos fatores e suas interações para o Experimento II, após a lixiviação

Fator	N-NH₄⁺_{lixiv}	N-NO₃⁻_{lixiv}	N-NH₄⁺_{solo}	N-NO₃⁻_{solo}	C-total	N-total	pH_{CaCl2}
Textura	0,247	< 0,001	0,947	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001
Cultura	0,748	< 0,001	0,817	0,035	0,013	0,845	0,013
Camada	-	-	0,022	< 0,001	< 0,001	0,069	< 0,001
Textura × Cultura	0,177	0,005	0,373	0,460	0,002	0,052	< 0,001
Textura × Camada	-	-	0,025	< 0,001	0,467	0,114	< 0,001
Cultura × Camada	-	-	0,900	0,049	0,104	0,263	< 0,001
Textura × Cultura × Camada	-	-	0,283	0,020	0,803	0,946	< 0,001

-: fator não considerado no modelo estatístico.

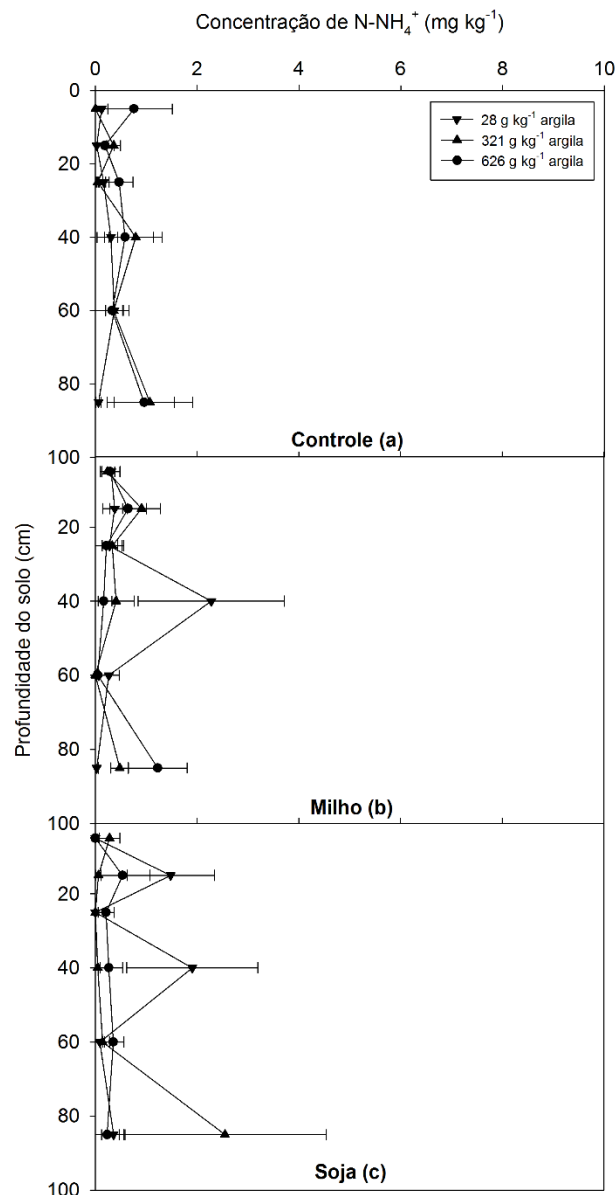
N-NH₄⁺_{lixiv}: lixiviação acumulada de NH₄⁺; N-NO₃⁻_{lixiv}: lixiviação acumulada de NO₃⁻.

Figura 23 – Lixiviação acumulada de NH_4^+ (a) e NO_3^- (b) em diferentes texturas e cultivos, relacionada ao teor de argila do solo. As barras verticais representam o erro padrão da média ($n = 4$ para o painel a e b). Letras iguais não indicam diferença ao nível de 5% de probabilidade. NS: não-significativo ao nível de 5%



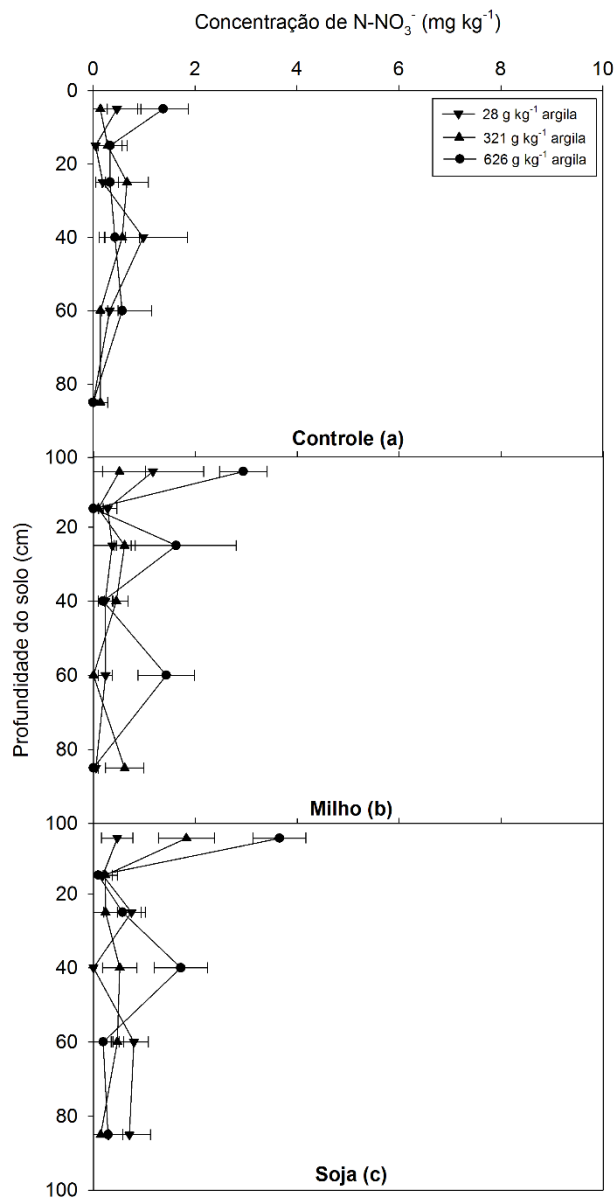
A concentração de NH_4^+ no perfil do solo foi semelhante ao longo da coluna, em todas as texturas para o controle, (Figura 24a). No milho, o maior valor foi verificado na profundidade de ~40 cm, na textura 28 g kg^{-1} de argila (Figura 24b), e na soja os maiores valores foram observados nas profundidades de ~10, e 40 cm, na textura 28 g kg^{-1} de argila, e à partir dos 80 cm na textura 321 g kg^{-1} de argila (Figura 24c).

Figura 24 – Concentração de NH_4^+ no perfil do solo, em texturas contrastantes, relacionado ao tratamento sem cultivo (a) e as culturas de milho (b) e soja (c). Os símbolos representam a média e as barras horizontais representam o erro padrão da média ($n = 4$)



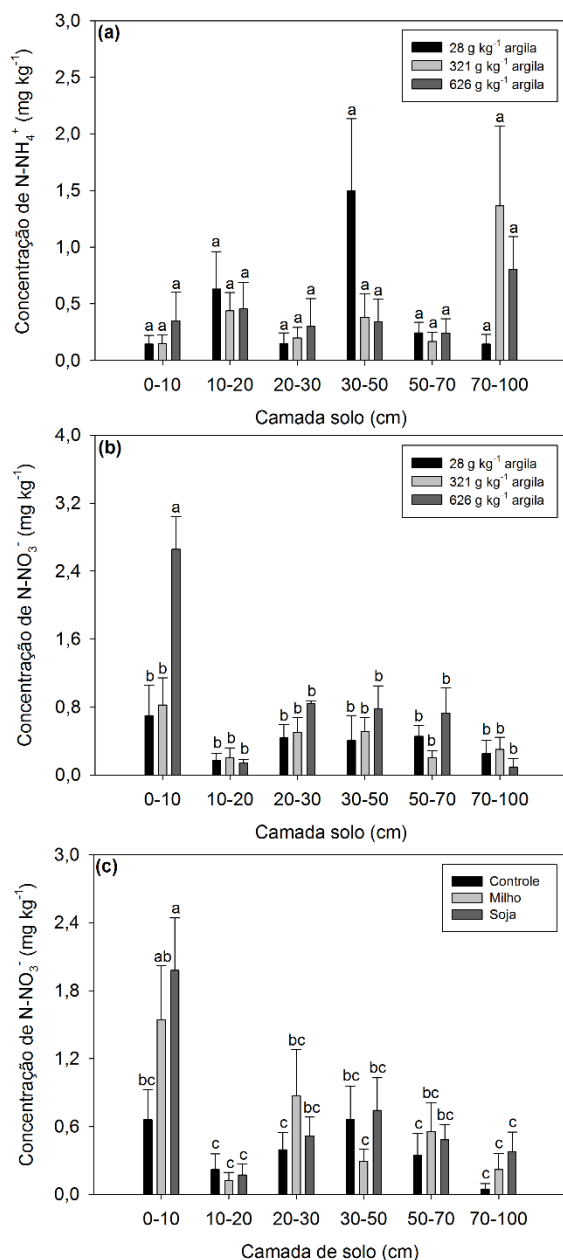
Em relação a concentração de NO_3^- no perfil do solo, a textura 626 g kg⁻¹ de argila apresentou valores superiores, incluindo o controle (Figura 25). O controle apresentou comportamento similar, em todas as texturas, ao longo da coluna (Figura 25a). Na cultura do milho os maiores valores foram observados nas profundidades de ~10, ~20 e 60 cm, na textura de 626 g kg⁻¹ de argila (Figura 25b). Para a soja foram observados valores superiores nas profundidades ~10 e 40 cm, com a textura de 626 g kg⁻¹ de argila (Figura 25c).

Figura 25 – Concentração de NO_3^- no perfil do solo, em texturas contrastantes, relacionado ao tratamento sem cultivo (a) e as culturas de milho (b) e soja (c). Os símbolos representam a média e as barras horizontais representam o erro padrão da média ($n = 4$)



Para a concentração de NH_4^+ no solo, houve interação da textura com a camada de solo, todavia os tratamentos não diferiram entre si pelo teste de médias (Figura 26a). A textura 626 g kg^{-1} de argila diferiu das demais, apresentando maior concentração de NO_3^- para a camada de 0-10 cm (Figura 26b). Por fim, a interação da camada de solo com a cultura, as culturas soja e milho apresentaram maiores valores na camada 0-10 cm e menores na camada 70-100 cm (Figura 26c).

Figura 26 – Concentração de NH_4^+ (a) e NO_3^- (b e c) do solo em diferentes texturas e cultivos, relacionado a camadas de solo. As barras verticais representam o erro padrão da média (n = 12 para o painel a, b e c, respectivamente). Letras iguais não indicam diferença ao nível de 5% de probabilidade



Em relação ao conteúdo de C e N total no perfil do solo, o comportamento ao longo da coluna foi similar em todos os tratamentos, sendo que a textura de 626 g kg^{-1} de argila apresentou os maiores valores para ambas as variáveis (Figura 27 e 28). A textura 626 g kg^{-1} de argila diferiu das demais em relação ao teor de C total do solo, independentemente das culturas (Figura 29a). Também foi observado efeito principal

para a camada de solo, e a camada de 0-10 cm foi superior no conteúdo de C total em relação às demais camadas, exceto para a subjacente (10-20 cm; Figura 29b). Por fim, para o conteúdo de N total no solo houve efeito principal de textura, sendo que o solo mais argiloso (626 g kg⁻¹ de argila) apresentou maior valor em relação as demais (Figura 29c).

Figura 27 – Conteúdo de C total no perfil do solo, em texturas contrastantes, relacionado ao tratamento sem cultivo (a) e as culturas de milho (b) e soja (c). Os símbolos representam a média e as barras horizontais representam o erro padrão da média (n = 4)

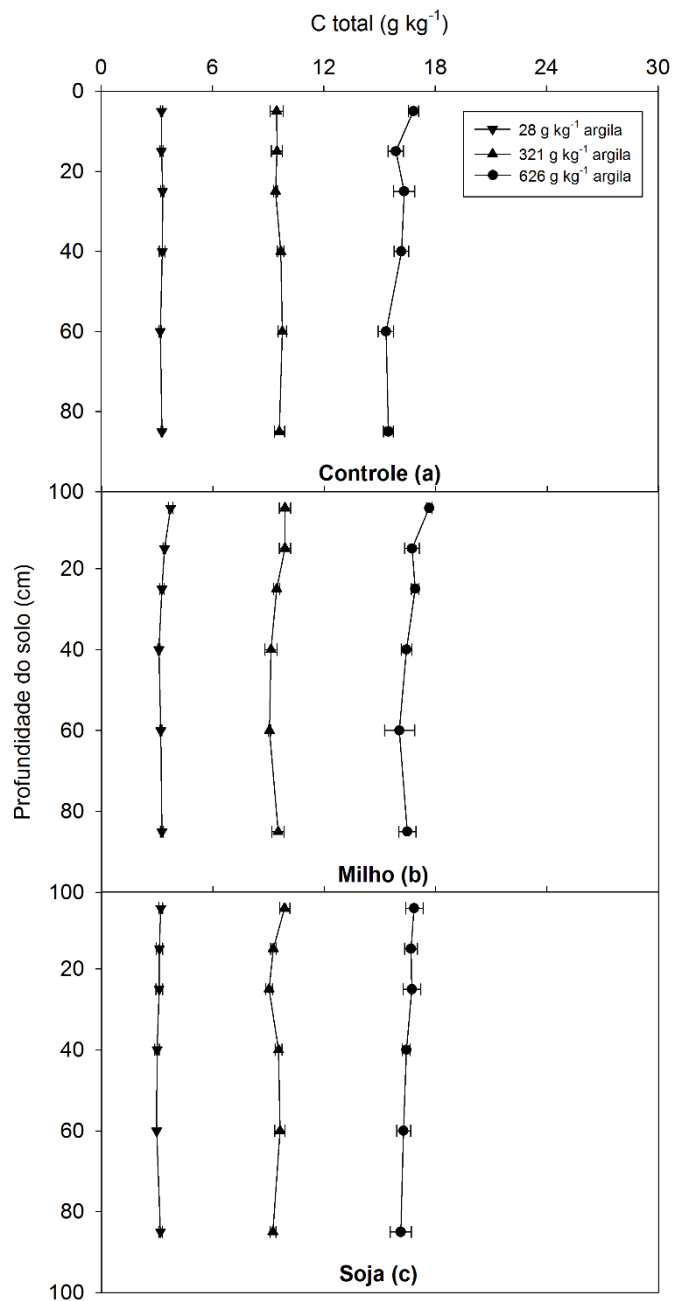


Figura 28 – Conteúdo de N total no perfil do solo, em texturas contrastantes, relacionado ao tratamento sem cultivo (a) e as culturas de milho (b) e soja (c). Os símbolos representam a média e as barras horizontais representam o erro padrão da média (n = 4)

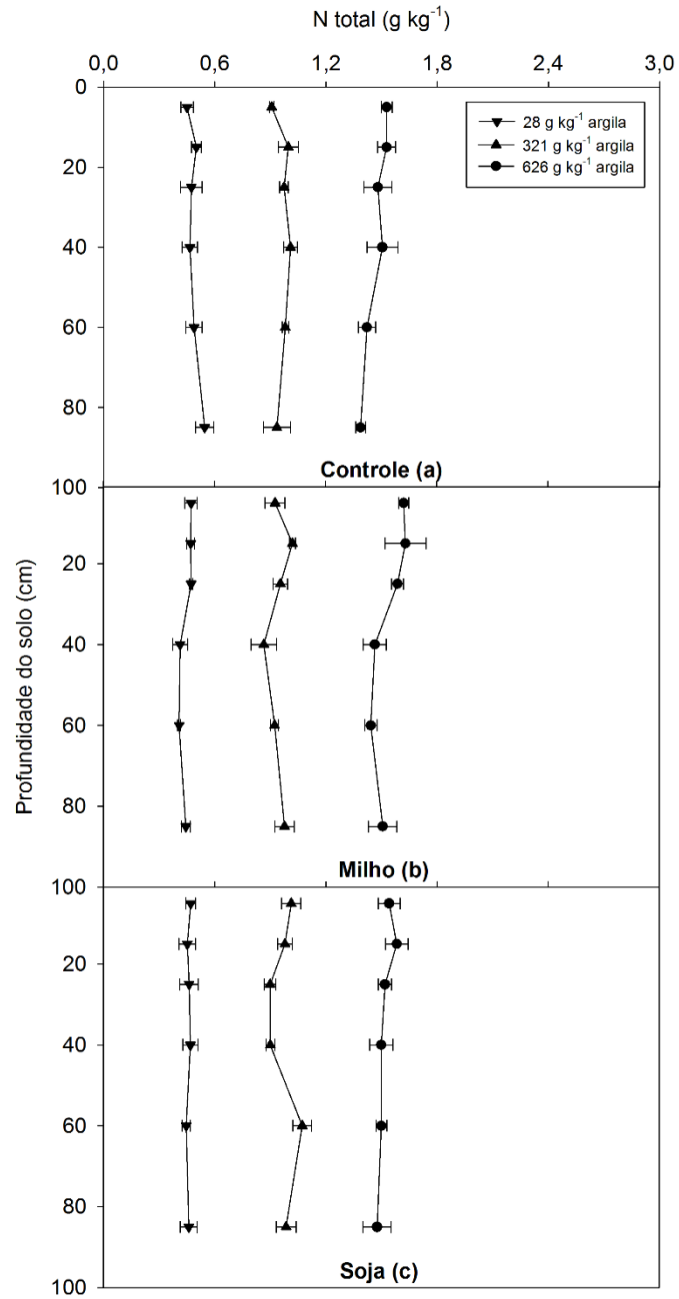
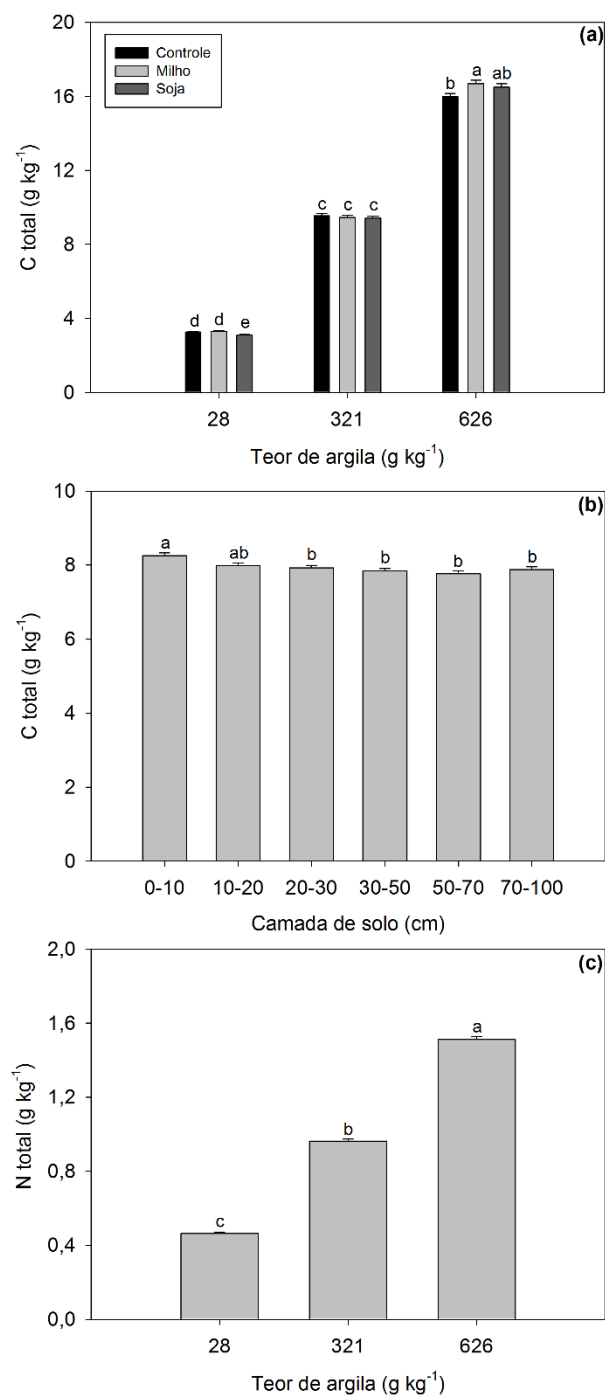


Figura 29 – Conteúdo de C (a, b) e N (c) total solo do solo em diferentes texturas e cultivos, relacionado teor de argila e camadas de solo. As barras verticais representam o erro padrão da média (n = 24, 36 e 72 para o painel a, b e c, respectivamente). Letras iguais não indicam diferença ao nível de 5% de probabilidade



Ao longo da coluna, foi observado um comportamento semelhante para o pH, exceto na textura 28 g kg⁻¹ de argila, que apresentou decréscimo a partir dos 10 cm, especialmente no solo cultivado previamente com milho e soja (Figura 30a, b, c). Na

interação entre a textura e cultura, o solo mais arenoso (28 g kg^{-1} de argila) cultivado com soja diferiu das demais texturas e apresentou o menor valor de pH (Figura 31a). Na interação da textura com a camada de solo, houve diferença entre os tratamentos e a textura 28 g kg^{-1} de argila apresentou os menores valores de pH nas camadas 20-30 e 30-50 cm (Figura 31b). O pH no solo da camada de 70-100 cm cultivado com milho foi superior em relação às demais camadas e culturas (Figura 31c).

Figura 30 – pH no perfil do solo em texturas contrastantes, relacionado ao tratamento sem cultivo (a) e as culturas de milho (b) e soja (c). Os símbolos representam a média e as barras horizontais representam o erro padrão da média (n = 4)

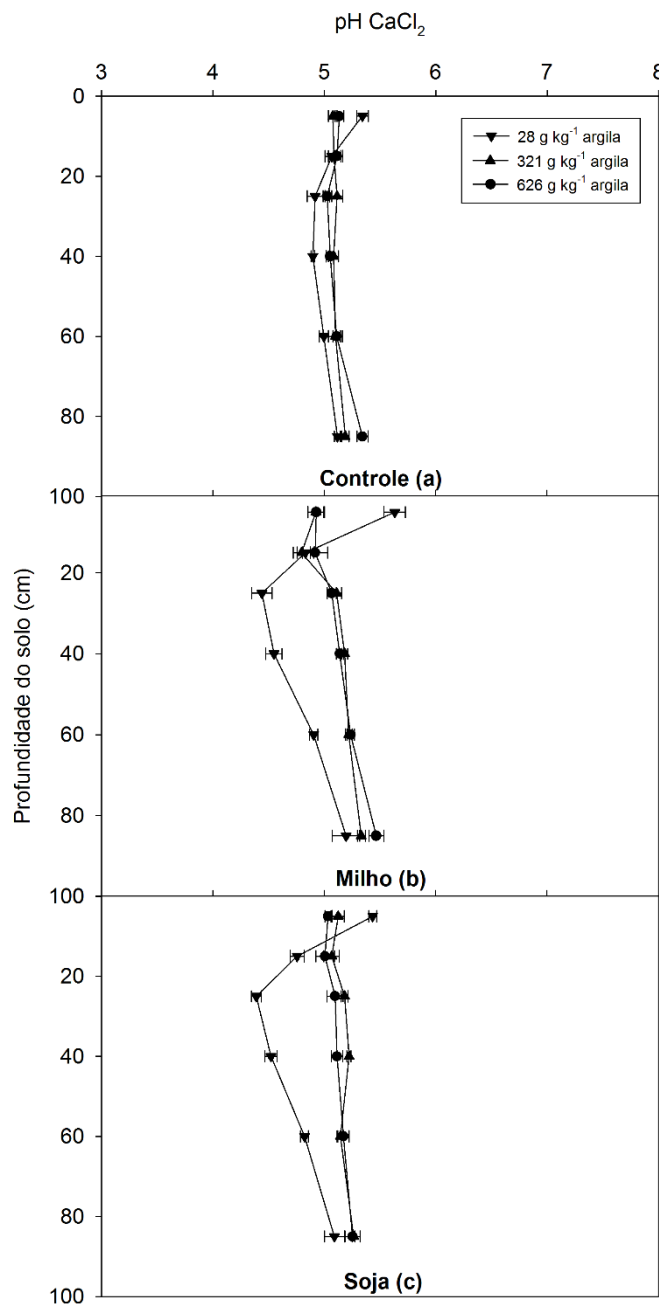
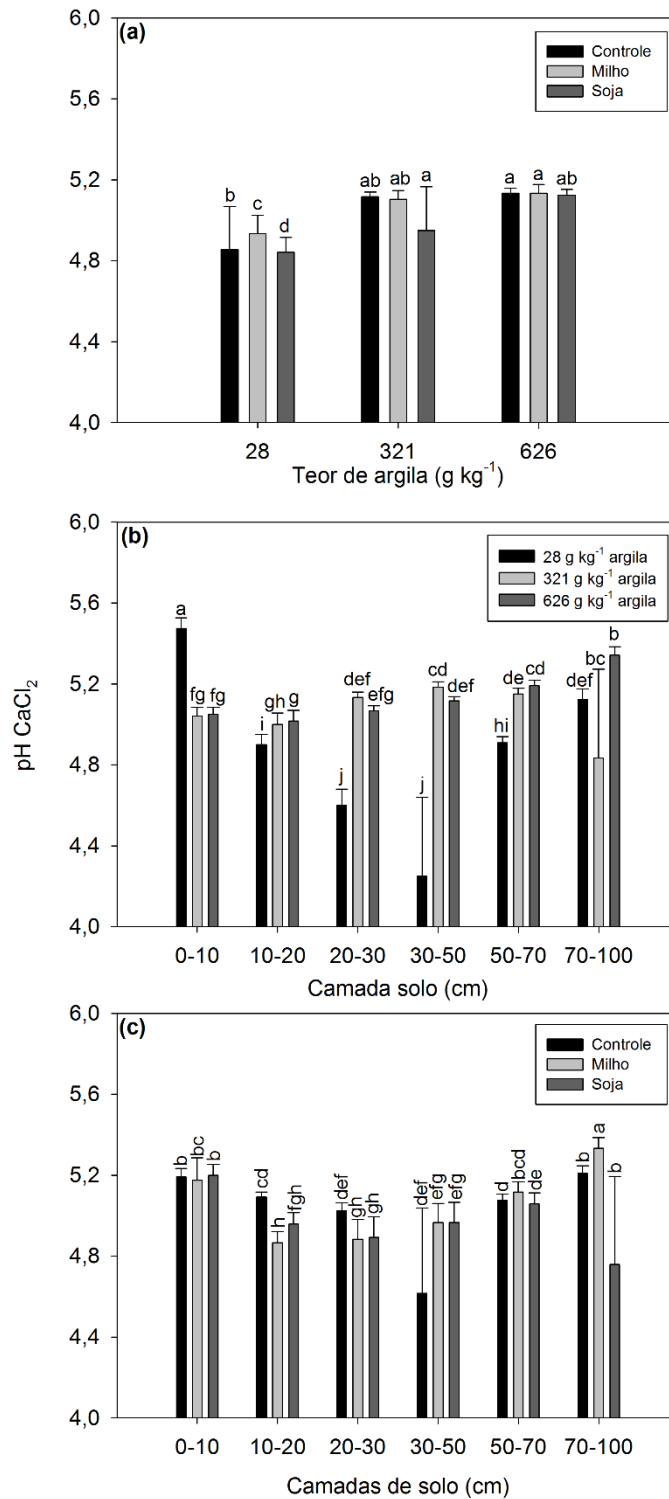


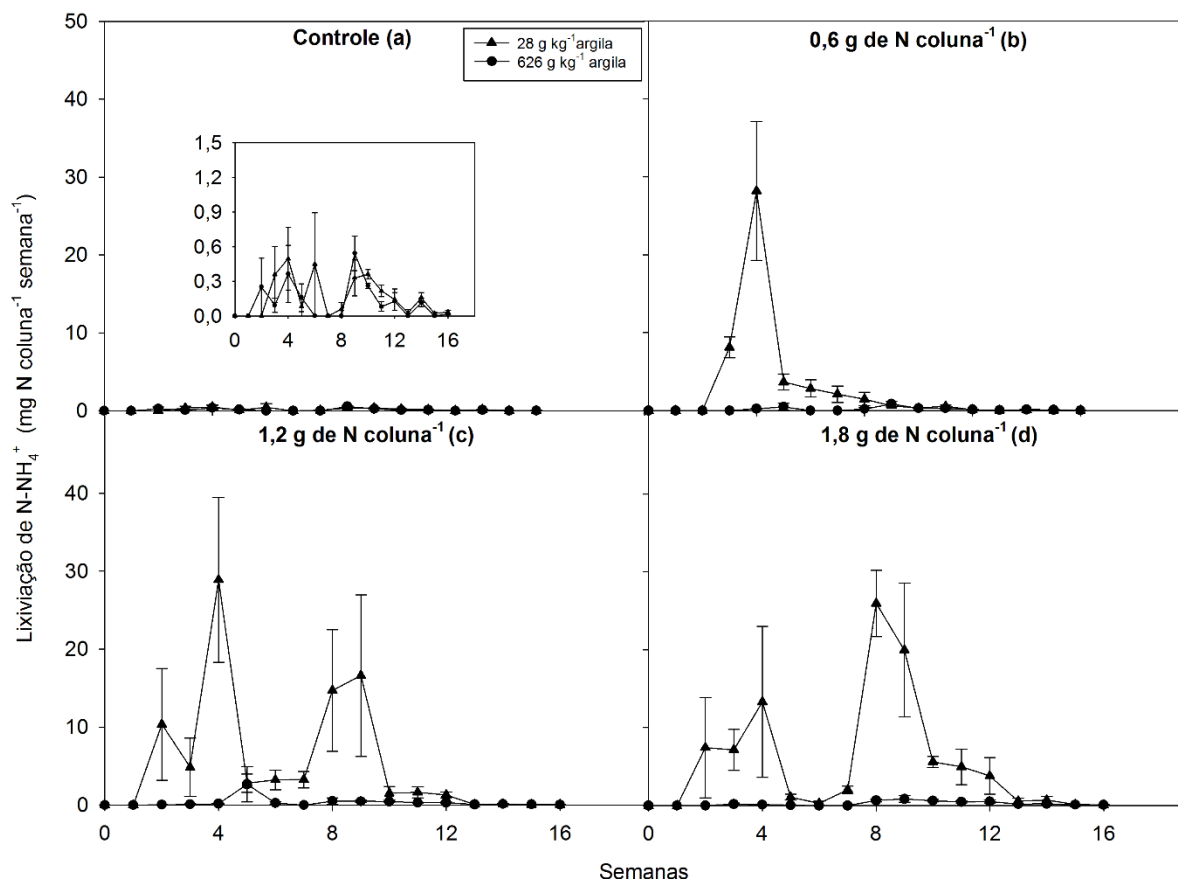
Figura 31 – pH do solo em diferentes texturas e cultivos, relacionado teor de argila (a) e a camadas de solo (b, c). As barras verticais representam o erro padrão da média (n = 24 para o painel a, e 12 para o painel b e c, respectivamente). Letras iguais não indicam diferença ao nível de 5% de probabilidade



4.3 Experimento III

A textura 28 g kg⁻¹ de argila apresentou os maiores picos de lixiviação de NH₄⁺ no decorrer do experimento (Figura 32), com exceção do controle sem N, quando não houve diferença entre as texturas (Figura 32a). Para as doses de 0,6 e 1,2 g de N, o maior pico ocorreu na quarta semana (Figura 32b, c), enquanto que na dose de 1,8 g de N o maior pico ocorreu na oitava semana (Figura 32d).

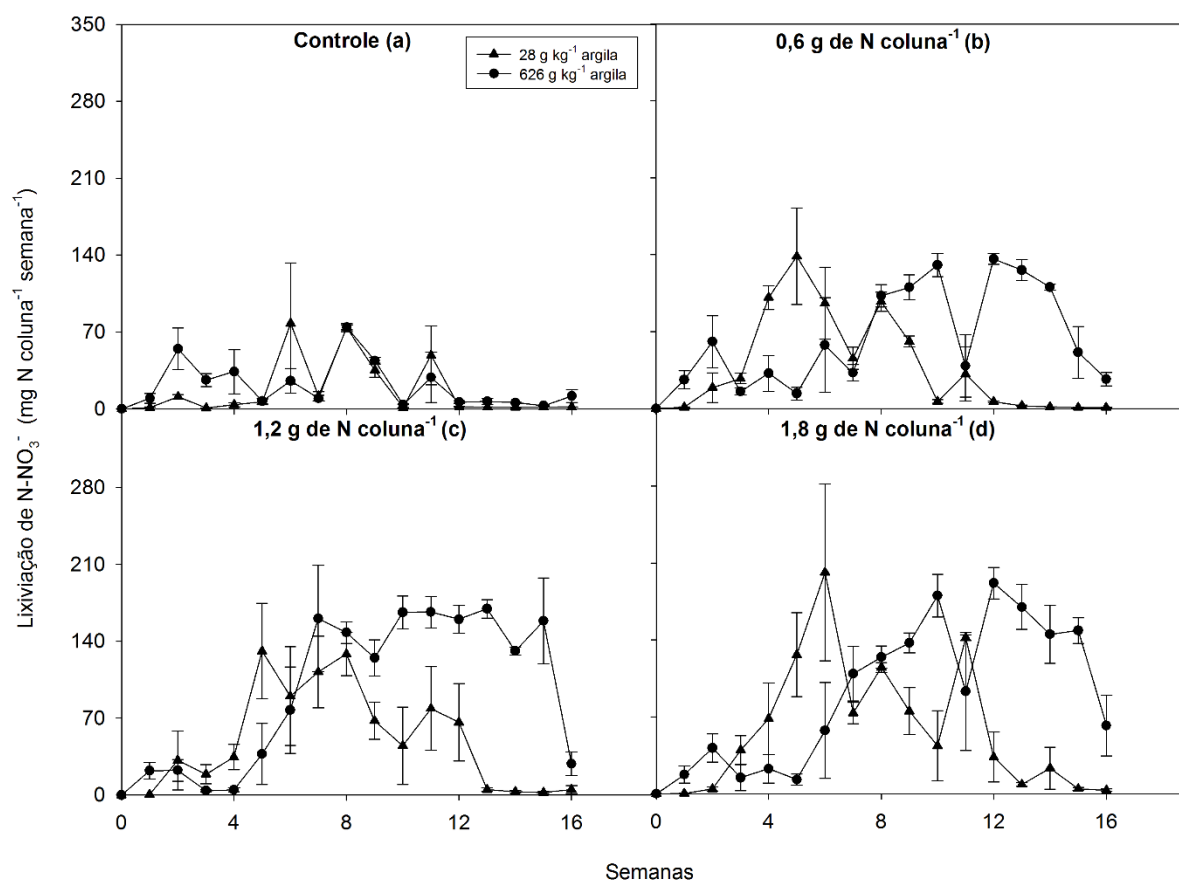
Figura 32 – Lixiviação semanal de NH₄⁺ para o tratamento sem adição de N (a) e para as doses 0,6 (b), 1,2 (c) e 1,8 g de N coluna⁻¹ (d) relacionada à texturas de solo. Os símbolos representam a média e as barras verticais representam o erro padrão da média (*n* = 4)



Os maiores picos de lixiviação de NO₃⁻ ocorreram nos tratamentos com adição de N (Figura 33). Em relação ao controle, os maiores picos foram detectados na quinta semana para a textura 28 g kg⁻¹ de argila, e na sétima semana nas texturas 28 e 626 g kg⁻¹ de argila (Figura 33a). Na dose de 0,6 g N, o maior pico ocorreu na sexta

semana na textura 28 g kg⁻¹ de argila e para textura 626 g kg⁻¹ de argila, na décima terceira semana (Figura 33b). No tratamento com a dose de 1,2 g de N, a maior lixiviação de NO₃⁻ pode ser observada no solo mais argiloso (Figura 33c). Por fim, os maiores picos para a dose mais alta (1,8 g de N) ocorreram na sexta semana para a textura 28 g kg⁻¹ de argila e na décima e décima segunda semana para a textura de 626 g kg⁻¹ de argila (Figura 33d).

Figura 33 – Lixiviação semanal de NO₃⁻ para o tratamento sem adição de N (a) e para as doses 0,6 (b), 1,2 (c) e 1,8 g de N coluna⁻¹ (d) relacionada à texturas de solo. Os símbolos representam a média e as barras verticais representam o erro padrão da média ($n = 4$)



A Tabela 5 apresenta os valores de P para os fatores avaliados. Na lixiviação acumulada de NH_4^+ , não houve ajuste de regressão para a interação entre textura do solo e dose de N (Figura 34a). Para a lixiviação acumulada de NO_3^- , houve ajuste de regressão linear entre a textura de solo e dose de N apenas para a textura de 28 g kg^{-1} de argila (Figura 34b).

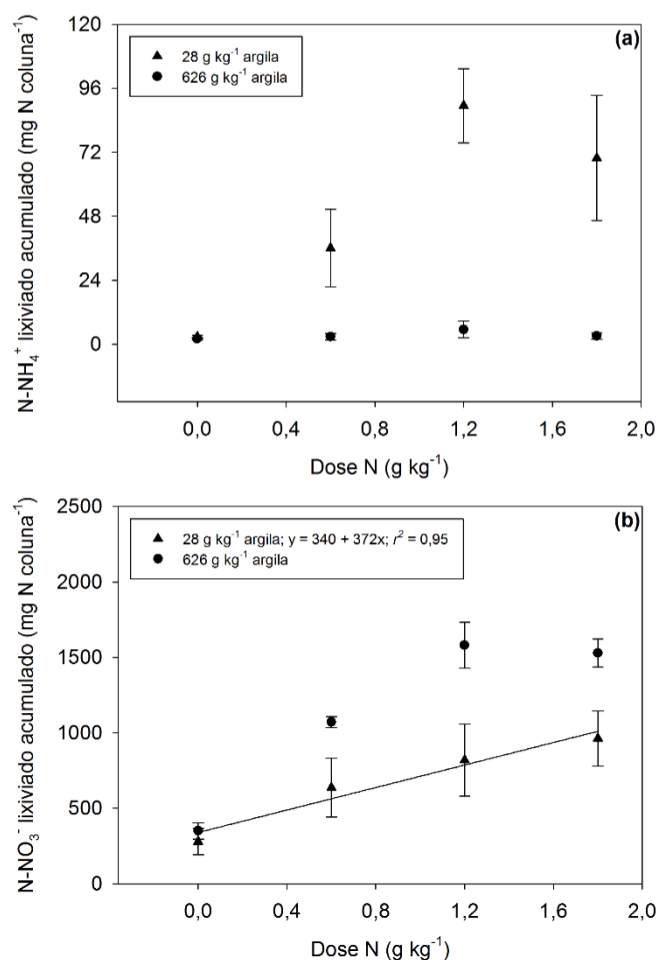
Tabela 5 – Valor de P dos fatores e suas interações para o Experimento III

Fator	N-NH₄⁺_{lix}	N-NO₃⁻_{lix}	N-NH₄⁺_{solo}	N-NO₃⁻_{solo}	C-total	N-total	pH_{CaCl2}	Nsdf	¹⁵N-rec	Nsdf_{ac}	¹⁵N-rec_{ac}
Textura (T)	< 0,001	< 0,001	0,004	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001
Dose (D)	< 0,001	< 0,001	0,004	< 0,001	0,613	0,007	< 0,001	< 0,001	0,038	< 0,001	0,359
Camada (C)			0,438	0,706	0,656	0,614	< 0,001	< 0,001	< 0,001	-	-
T × D	< 0,001	0,008	0,015	< 0,001	0,364	0,004	< 0,001	< 0,001	< 0,001	0,005	0,006
T × C	-	-	0,527	< 0,051	0,574	0,641	< 0,001	0,393	0,391	-	-
D × C	-	-	0,919	0,401	0,483	0,393	< 0,001	0,129	0,128	-	-
T × D × C	-	-	0,983	0,621	0,498	0,308	< 0,001	0,163	0,162	-	-

-: fator não considerado no modelo estatístico.

N-N₂O_{acum}: emissão acumulada de N₂O; N-NH₄⁺_{lixiv}: lixiviação acumulada de NH₄⁺; N-NO₃⁻_{lixiv}: lixiviação acumulada de NO₃⁻; Nsdf: nitrogênio derivado do fertilizante (mg); ¹⁵N-rec: recuperação de N do solo (%); Nsdf_{ac}: nitrogênio derivado do fertilizante acumulado; ¹⁵N-rec_{ac}: recuperação de N do solo acumulado.

Figura 34 – Lixiviação acumulada de NH_4^+ (a) e NO_3^- (b) relacionada a texturas de solo e diferentes doses de N. Os símbolos representam as médias e as barras verticais representam o erro padrão da média ($n = 4$ para o painel a e b, respectivamente). A linha representa o ajuste para uma equação de regressão



De modo geral, a maior concentração de NH_4^+ no perfil do solo foi observada na textura de 626 g kg^{-1} de argila (Figura 35). Para o controle e a dose de $0,6 \text{ g}$ de N, as texturas apresentaram padrão semelhante ao longo da coluna (Figura 35a, b). Por outro lado, nas doses de $1,2$ e $1,8 \text{ g}$ de N ocorreu diminuição na concentração de NH_4^+ na textura 626 g kg^{-1} de argila abaixo dos 20 cm (Figura 35c, d).

As maiores concentrações de NO_3^- no perfil foram observadas na textura 626 g kg^{-1} de argila (Figura 36). Na maioria dos tratamentos, a concentração de NO_3^- ao longo da coluna foi constante (Figura 36a, b, c), exceto na dose de $1,8 \text{ g N}$ para a textura de 626 g kg^{-1} de argila, onde foram observados os maiores valores (Figura 36d).

Figura 35 – Concentração de NH_4^+ no perfil do solo para o tratamento sem adição de N (a) e para as doses 0,6 (b), 1,2 (c) e 1,8 g de N coluna⁻¹ (d), relacionado à texturas de solo. Os símbolos representam a média e as barras horizontais representam o erro padrão da média ($n = 4$)

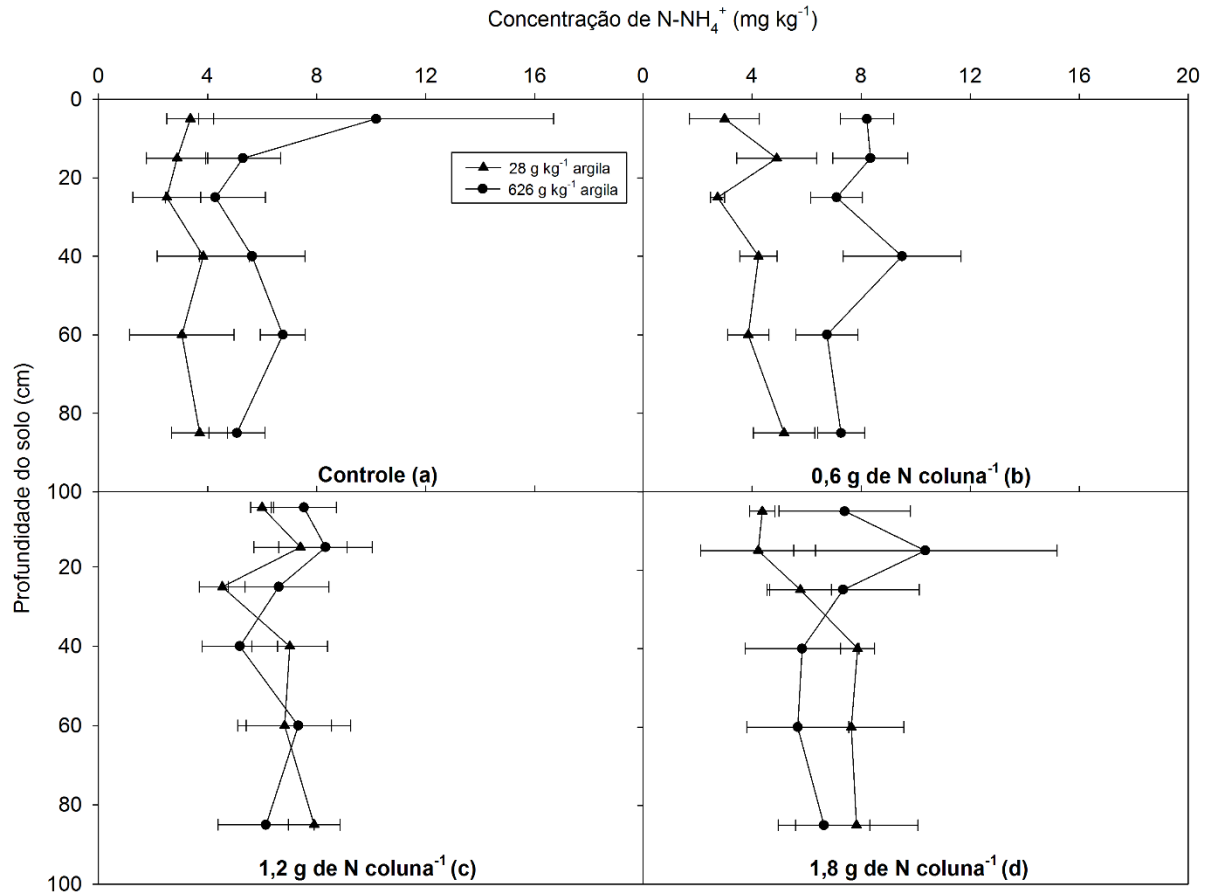
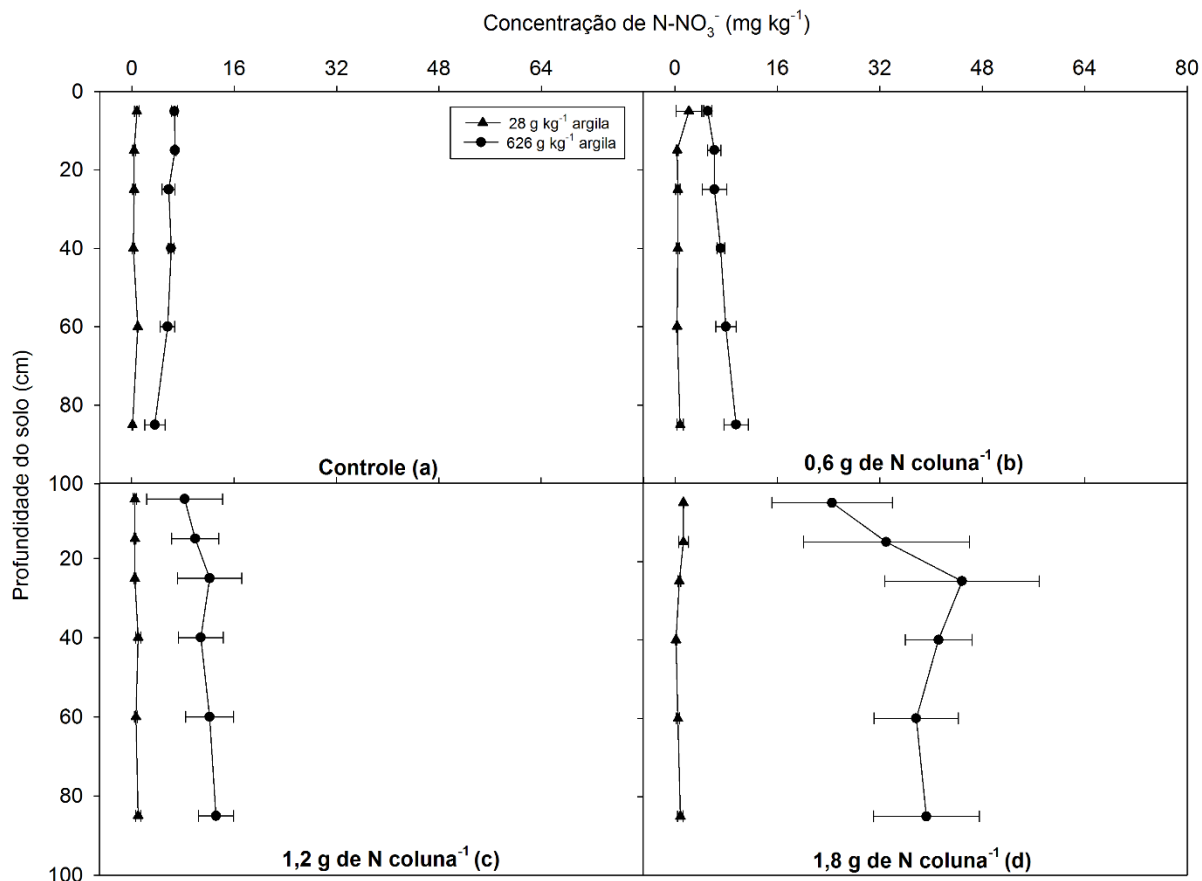
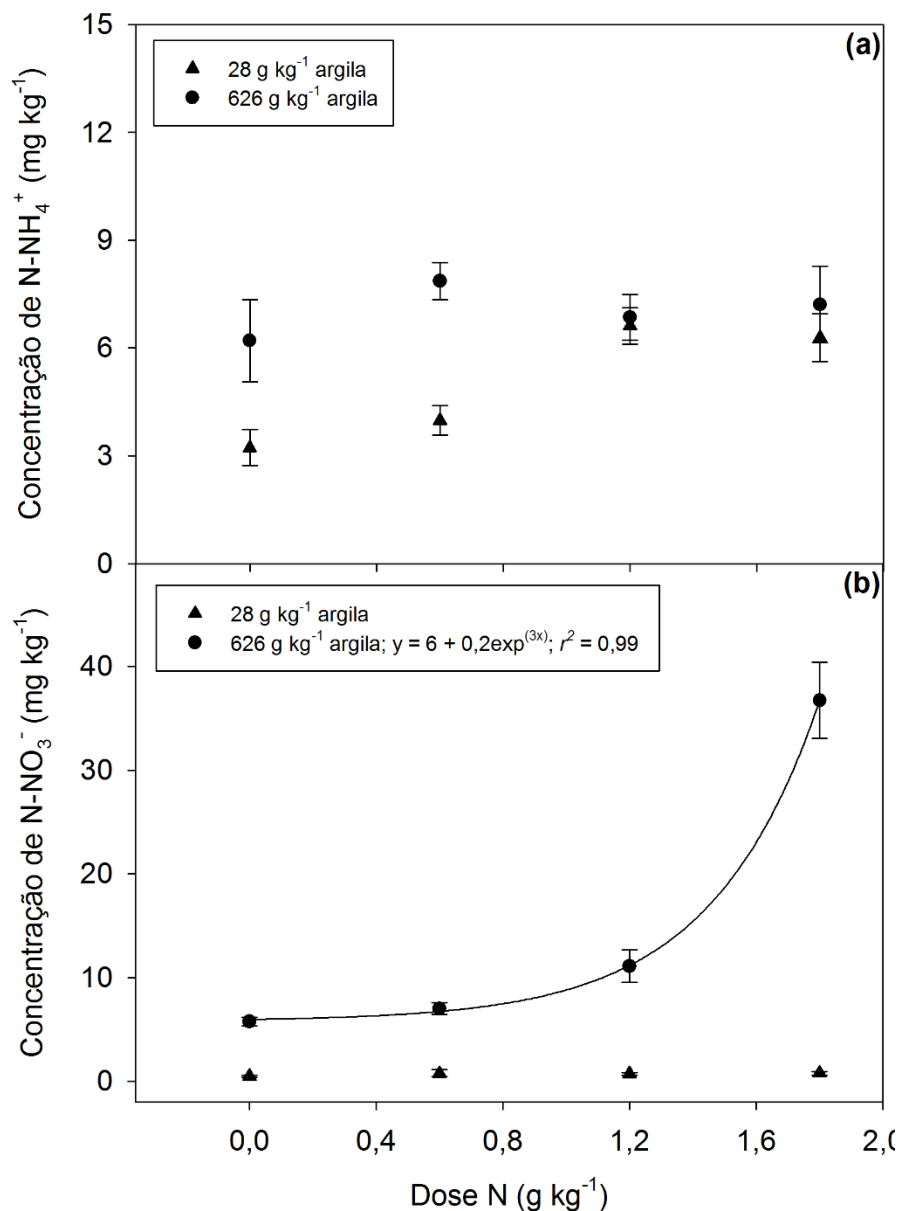


Figura 36 – Concentração de NO_3^- no perfil do solo para o tratamento sem adição de N (a) e para as doses 0,6 (b), 1,2 (c) e 1,8 g de N coluna⁻¹ (d), relacionado à texturas de solo. Os símbolos representam a média e as barras horizontais representam o erro padrão da média ($n = 4$)



Na interação da dose de N com a textura para o NH_4^+ no solo, não houve ajuste de regressão (Figura 37a). A mesma interação, porém, relativa a concentração de NO_3^- no solo, apresentou crescimento exponencial para a textura 626 g kg^{-1} de argila (Figura 37b).

Figura 37 – Concentração de NH_4^+ (a) e NO_3^- (b) no solo relacionado a texturas e doses de N. Os símbolos representam a média e as barras verticais representam o erro padrão da média ($n = 24$ para o painel a e b, respectivamente). A linha representa o ajuste para uma equação de regressão



Em relação ao conteúdo de C e N total no perfil do solo, a textura de 626 g kg^{-1} de argila apresentou os maiores valores, e, independente da dose de N utilizada, as texturas apresentaram padrão semelhante ao longo da coluna (Figura 38 e 39). Para o conteúdo de C total, houve efeito da textura, com maior valor para o solo mais argiloso (Figura 40a). Para o conteúdo de N total, houve interação da dose de N com a textura de solo, embora não tenha ocorrido ajuste de regressão aos dados (Figura 40b).

Figura 38 – Conteúdo de C total no perfil do solo para o tratamento sem adição de N (a), e para as doses 0,6 (b), 1,2 (c) e 1,8 g de N coluna⁻¹ (d), relacionado à texturas de solo. Os símbolos representam a média e as barras horizontais representam o erro padrão da média ($n = 4$)

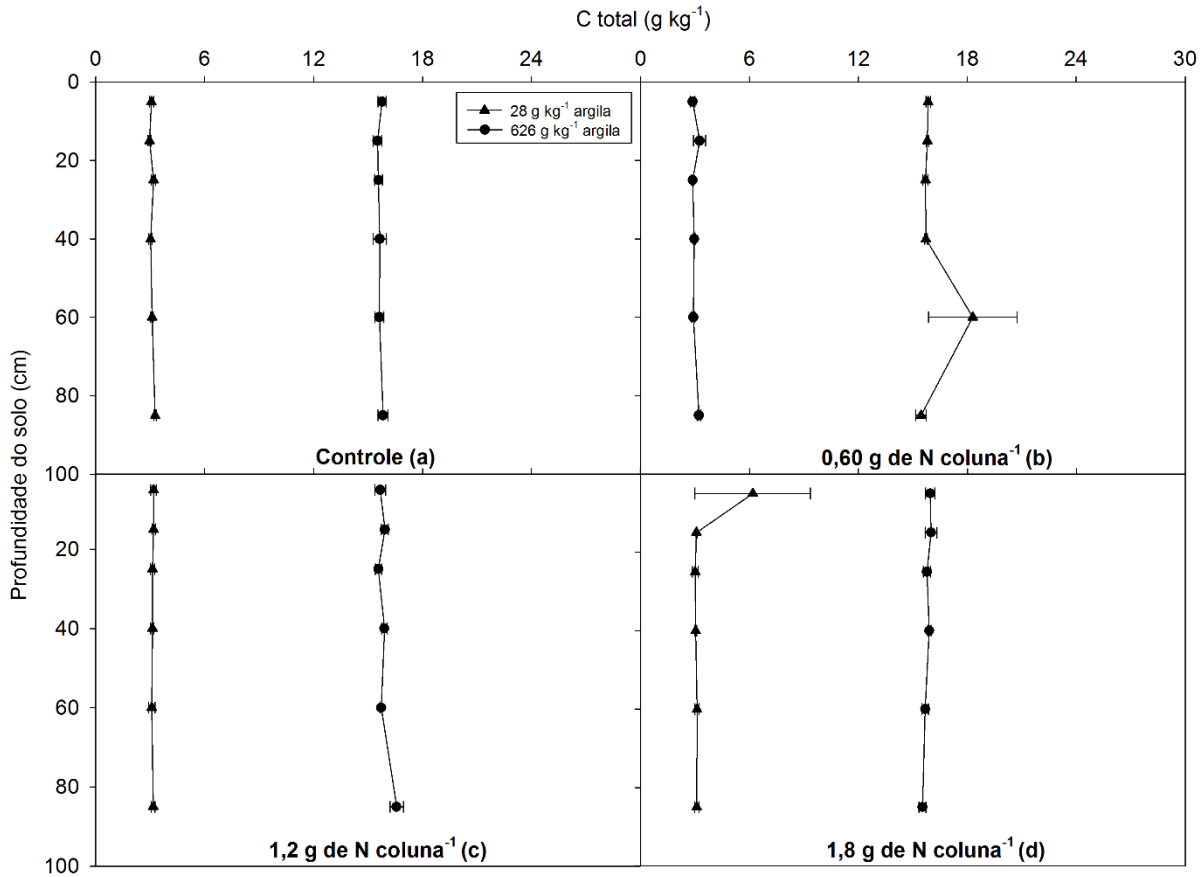


Figura 39 – Conteúdo de N total no perfil do solo para o tratamento sem adição de N (a) e para as doses 0,6 (b), 1,2 (c) e 1,8 g de N coluna⁻¹ (d), relacionado à texturas de solo. Os símbolos representam a média e as barras horizontais representam o erro padrão da média ($n = 4$)

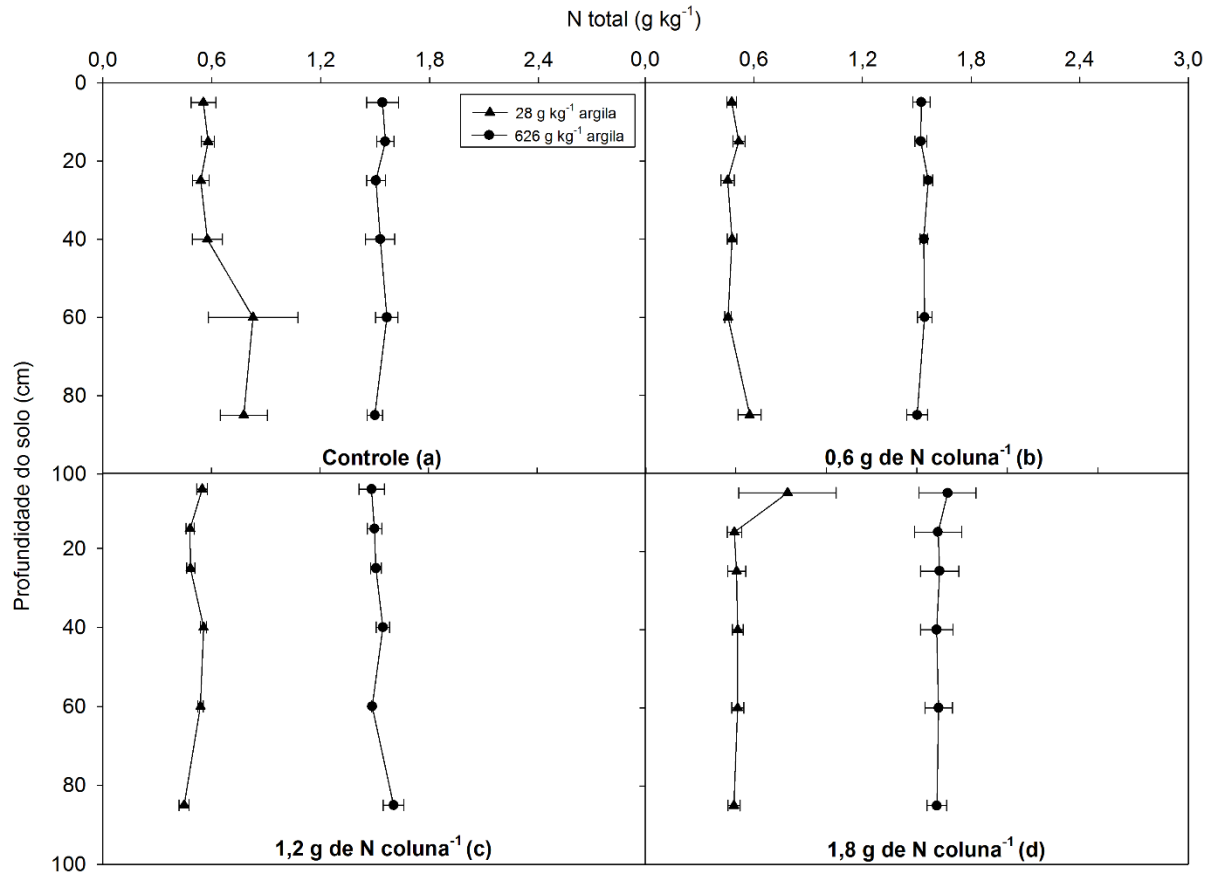
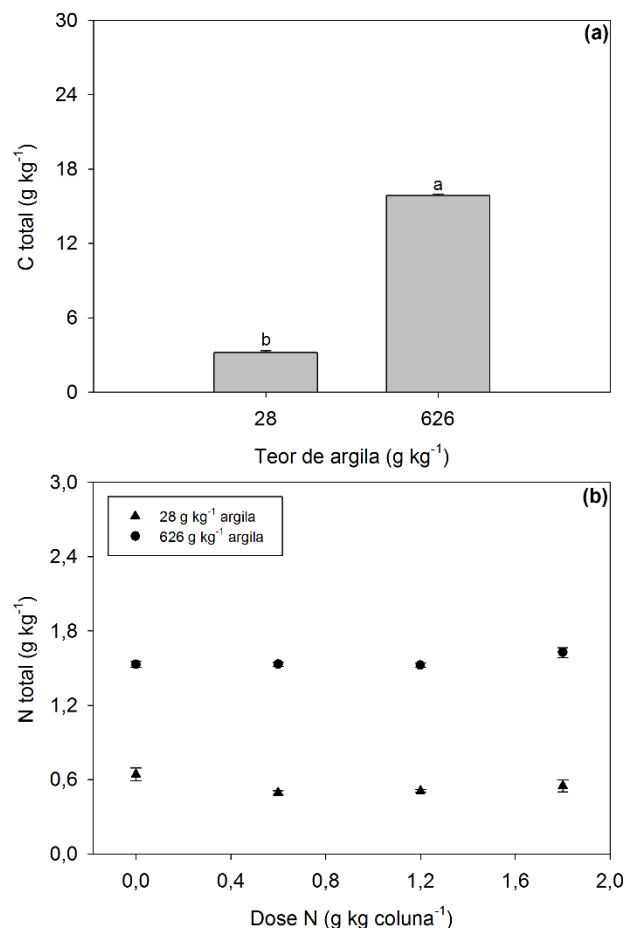


Figura 40 – Conteúdo de C total do solo relacionado a textura (a) e de N total relacionado a doses de N (b). As barras verticais representam o erro padrão da média e os símbolos representam a média ($n = 96$ e 24 para o painel a e b, respectivamente). Letras distintas indicam diferença ao nível de 5% de probabilidade



Quanto ao pH no perfil, o controle apresentou valores relativamente similares entre as duas texturas (Figura 41a). O solo argiloso apresentou aumento nos valores a partir da profundidade de 20 cm nas doses de 0,6 e 1,2 g de N (Figura 41b, c). Para a dose de 1,8 g de N, este aumento no pH foi observado a partir da profundidade de 50 cm (Figura 41d). Na interação da camada de solo com a textura de solo, os maiores valores foram observados nas camadas de 50-70 e 70-100 cm com a textura 626 g kg^{-1} de argila (Figura 42a). Para a interação das doses de N com a textura, houve ajuste de regressão linear para pH do solo argiloso (Figura 42b), sendo que quanto maior a dose de N, menor é o pH. Também houve interação da dose de N com a camada de solo, sendo que para a camada superficial (0-10 cm), o pH diminuiu exponencialmente com o aumento da dose de fertilizante nitrogenado (Figura 42c).

Para camada 10-20 cm o ajuste do pH foi quadrático; para as camadas de 20-30, 30-50 e 50-70 cm, o pH decresceu linearmente, enquanto que para a última camada não houve ajuste de regressão (Figura 42c).

Figura 41 – pH no perfil do solo para o tratamento sem adição de N (a) e para as doses 0,6 (b), 1,2 (c) e 1,8 g de N coluna⁻¹ (d), relacionado à texturas de solo. Os símbolos representam a média e as barras horizontais representam o erro padrão da média ($n = 4$)

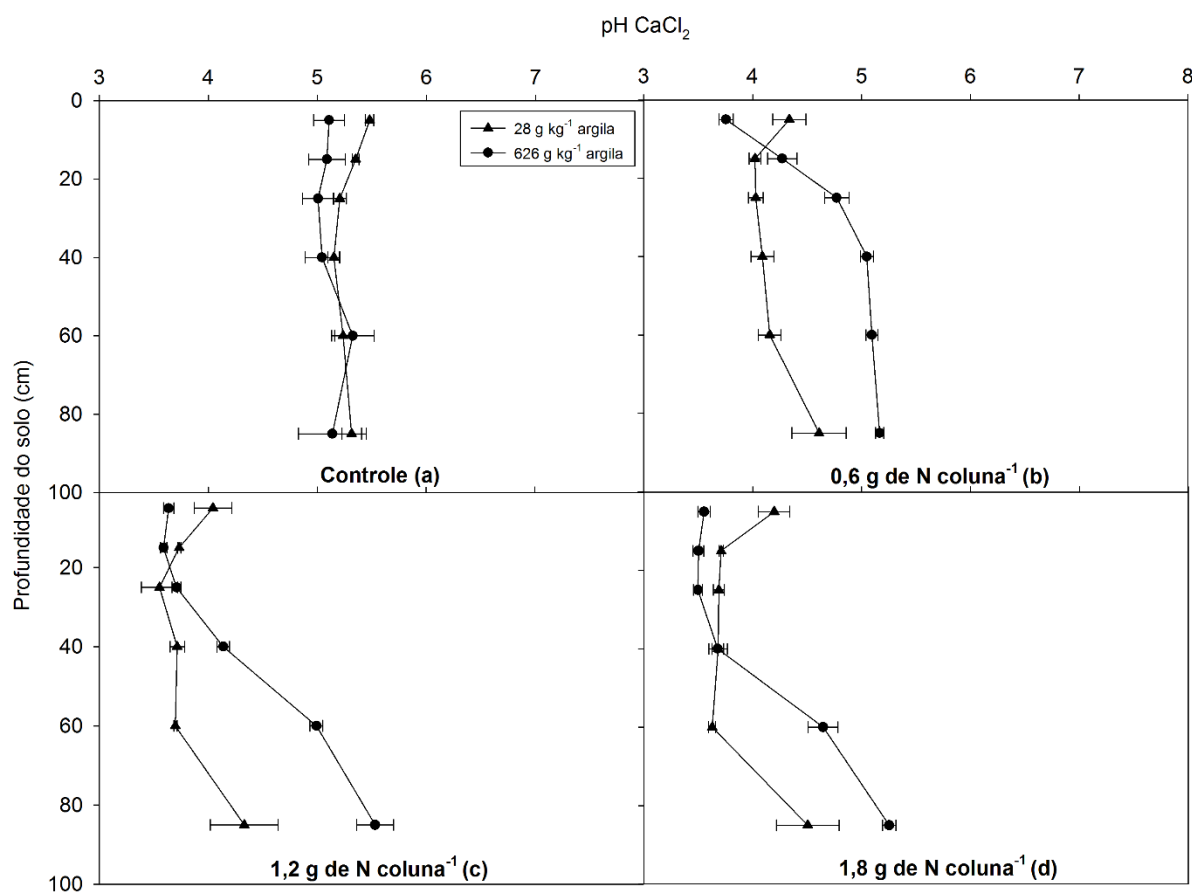
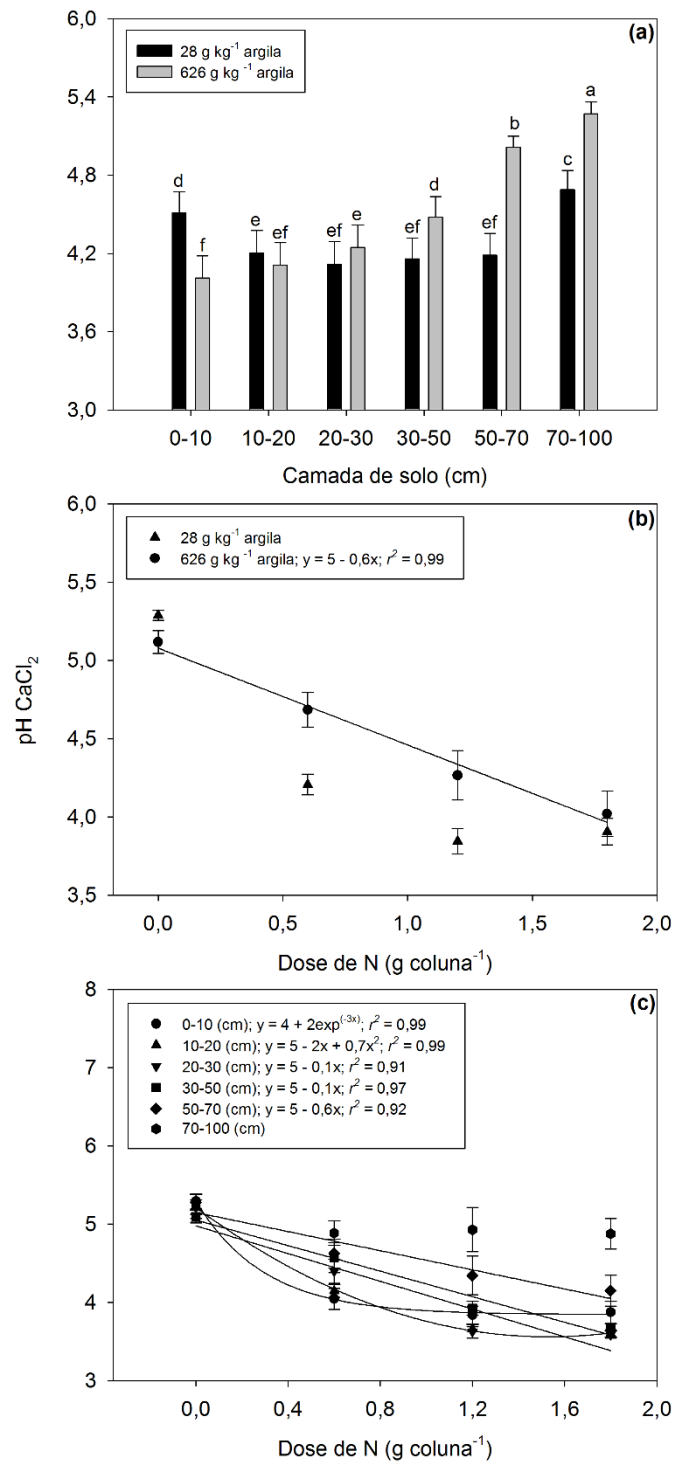


Figura 42 – pH do solo relacionado às interações camada e textura (a), dose de N e textura (b) e dose de N e camada (c). As barras verticais representam o erro padrão da média e os símbolos representam a média ($n = 16, 24$ e 8 para o painel a, b e c, respectivamente). Letras distintas indicam diferença ao nível de 5% de probabilidade. As linhas representam o ajuste para uma equação de regressão



Para os resultados envolvendo o uso do fertilizante nitrogenado enriquecido com ^{15}N , pode-se observar que na textura de 626 g kg^{-1} de argila, os valores de Nsdf (Figura 43a, b, c) e de recuperação de ^{15}N (Figura 44a, b, c) no perfil do solo foram superiores aos da textura 28 g kg^{-1} de argila, independente da dose de N. Tanto para o Nsdf quanto para a recuperação de ^{15}N , houve efeito da camada de solo, sendo que a camada mais profunda (70-100 cm) apresentou o maior valor em relação às camadas superiores (Figura 45a, c). Também ocorreu a interação da textura com a dose de N, sendo que o solo argiloso fertilizado com $1,8 \text{ g}$ de N foi superior aos demais para o Nsdf e o ^{15}N recuperado (Figura 45b, d). Em relação aos valores de Nsdf e recuperação de ^{15}N na coluna inteira (Figura 46), também houve a interação da textura com a dose de N, com maiores valores para o solo argiloso que recebeu a dose mais alta (Figura 46a, b).

Figura 43 – Nitrogênio do solo derivado do fertilizante no perfil do solo para as doses 0,6 (a), 1,2 (b) e 1,8 g de N coluna⁻¹ (d) relacionado a texturas de solo. Os símbolos representam a média e as barras horizontais representam o erro padrão da média ($n = 4$)

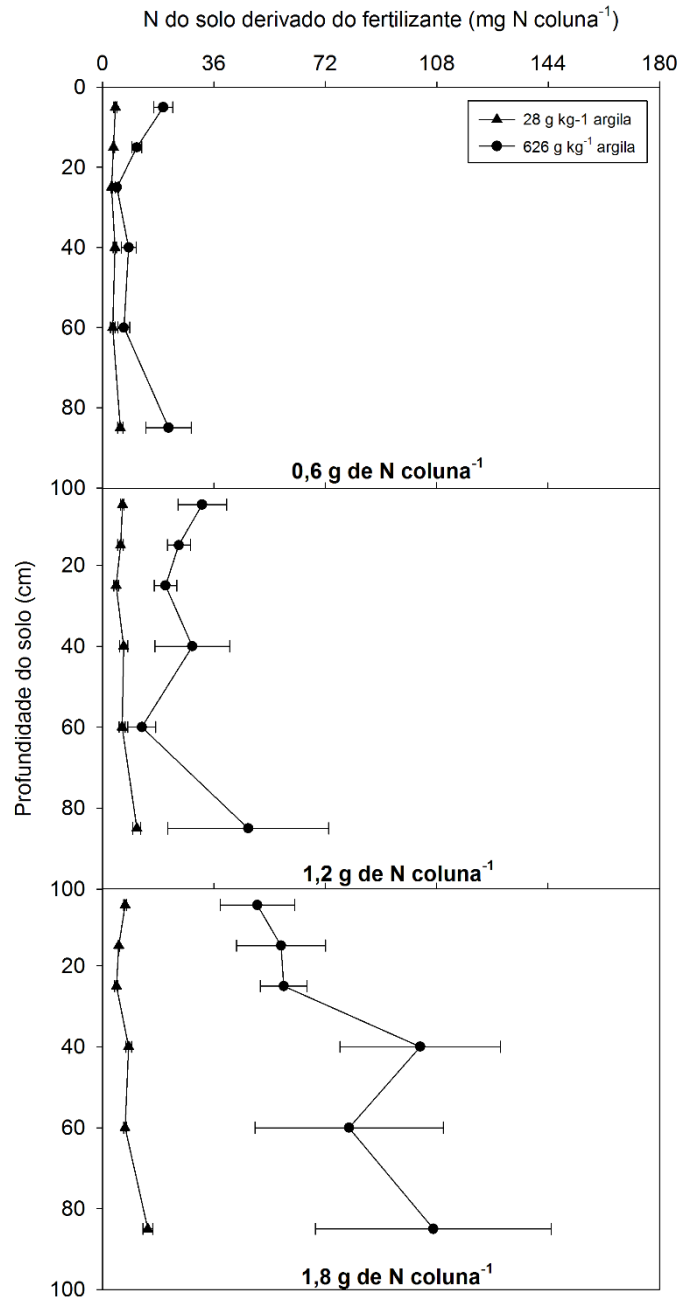


Figura 44 – Recuperação de ^{15}N no perfil do solo para as doses 0,6 (a), 1,2 (b) e 1,8 g de N coluna $^{-1}$ (d) relacionado a texturas de solo. Os símbolos representam a média e as barras horizontais representam o erro padrão da média ($n = 4$)

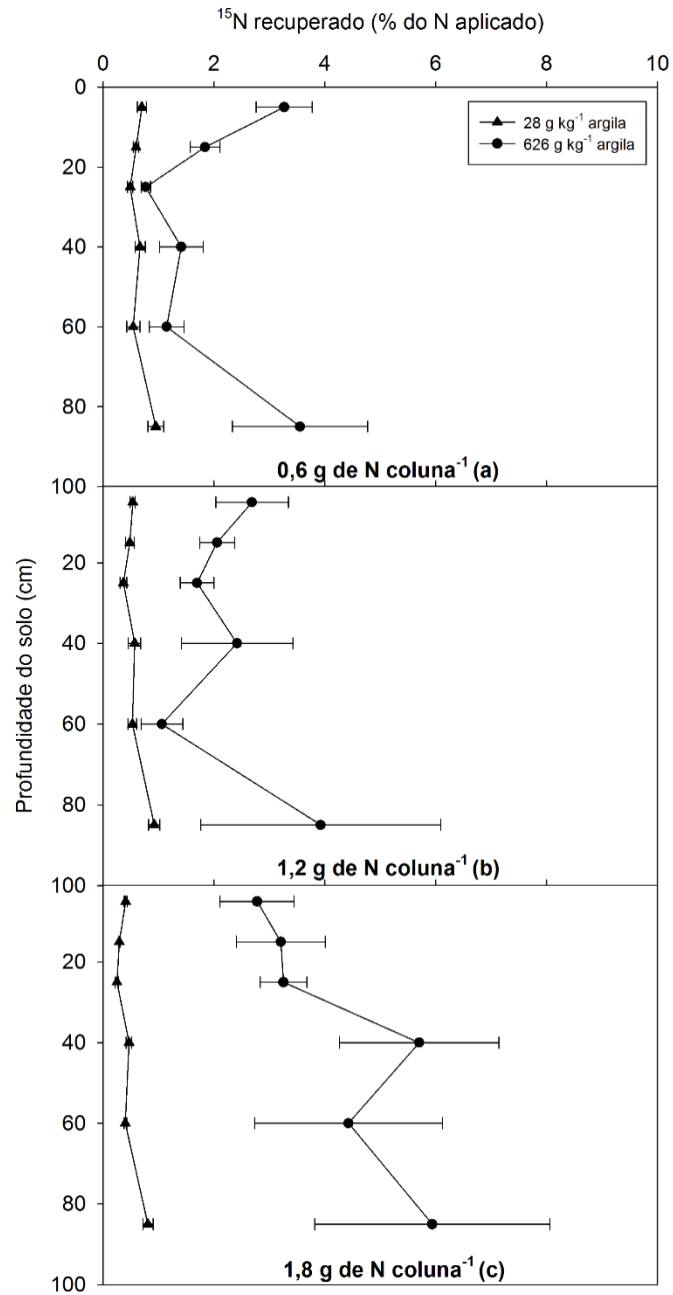


Figura 45 – Nitrogênio do solo derivado do fertilizante e recuperação de ^{15}N do solo, relacionados à camada (a, c) e a texturas de solo (b, d). As barras verticais representam o erro padrão da média ($n = 24$ para o painel a, b, c e d). Letras iguais não indicam diferença ao nível de 5% de probabilidade

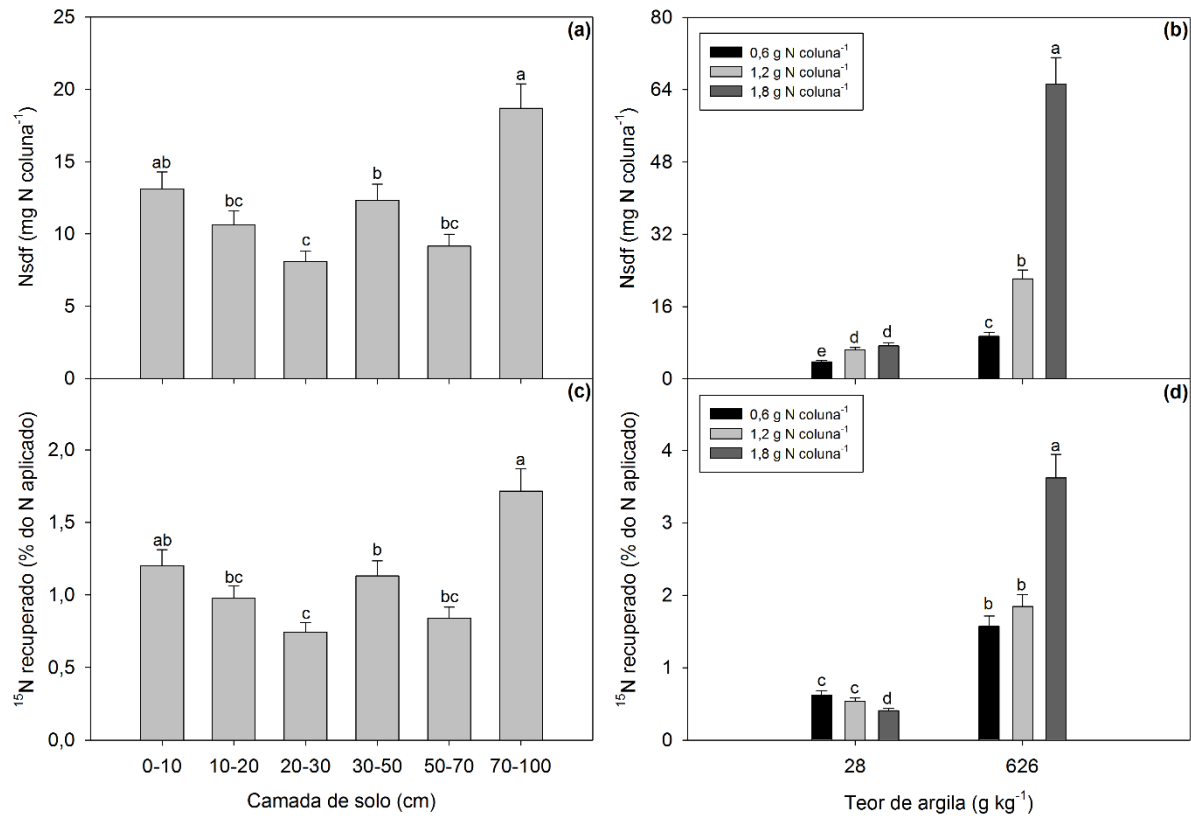
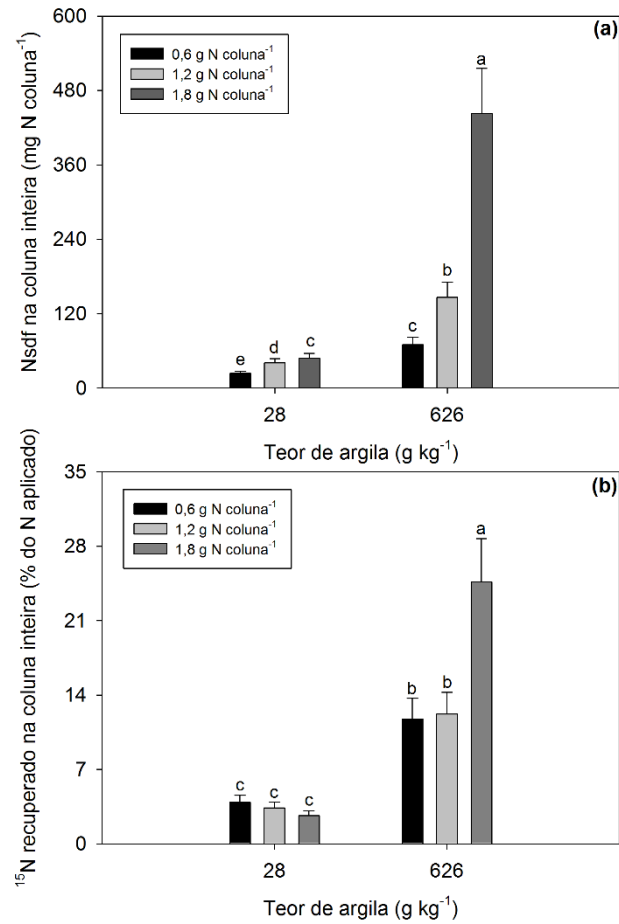


Figura 46 - Nitrogênio do solo derivado do fertilizante (a) e recuperação de ^{15}N (b) acumulados, relacionados a texturas e à doses de N. As barras verticais representam o erro padrão da média ($n = 24$ para o painel a e b). Letras iguais não indicam diferença ao nível de 5% de probabilidade



5 DISCUSSÃO

5.1 Experimento I

A ocorrência de um pequeno pico de lixiviação de NH_4^+ e NO_3^- constatado no controle (Figuras 1a e 2a) está relacionada com a saturação dos microporos do solo ocorrido antes do início do experimento, uma vez que para esse tratamento não foi realizada a adição de lâmina de água. Em geral, para o solo com 28 g kg^{-1} de argila, quanto maior foi a lâmina de água utilizada, menor foi o tempo para a ocorrência dos maiores picos de perda de NH_4^+ (Figura 1b, c, d). Isso evidencia que a lixiviação de NH_4^+ é maior em solos arenosos e a quantidade de água é fator determinante nesse processo (XIONG et al., 2010). A lixiviação de NH_4^+ foi reduzida com o aumento no teor de argila do solo (Figura 3a). Solos com maior teor de argila favorecem a adsorção de NH_4^+ no complexo de cargas negativas dos colóides (MACKOWN; TUCKER, 1985; YANG et al., 1998). A lixiviação de nitrato foi influenciada pela lâmina de água, uma vez que o comportamento da maioria das texturas foi semelhante ao longo do experimento (Figura 2b, c, d). Para a lixiviação acumulada de NO_3^- (Figura 3b), as perdas de N aumentam conforme o aumento no volume de água adicionada na coluna, o que favorece o movimento vertical de NO_3^- no perfil do solo (HERRMAN et al., 2005; CARVALHO; ZAMBOT, 2012). Outros autores também relatam que a quantidade de nitrato lixiviado está diretamente ligada à quantidade de água adicionada e não à textura de solo (GILETTO; CHEVERRIA, 2013; POCH-MASSEGUÉ et al., 2014; WOLI et al., 2016).

A adição de água diminuiu a concentração de NH_4^+ (Figura 4a, b, c, d) e NO_3^- (Figura 5a, b, c, d) no solo, ao longo da coluna, o que, além da nitrificação que certamente ocorreu, está relacionado com a lixiviação acima relatada (XIONG et al., 2010; WOLI et al., 2016). A aplicação do fertilizante nitrogenado na superfície da coluna resultou em maior concentração de NH_4^+ na camada superficial (Figura 6b). Da mesma forma, a conversão do NH_4^+ oriundo do fertilizante em NO_3^- também pode ter contribuído para a alta concentração de NO_3^- na camada de 0-10 cm (Figura 6d; CANTARELLA, 2007; LI et al., 2018).

O conteúdo de C e N total do solo aumentou linearmente com o teor de argila (Figura 9a, b), o que seria esperado dada a alta correlação entre argila e o teor de C

orgânico (WATTEL-KOEKKOEK et al., 2001). O conteúdo de C e N total do solo não foi influenciado pelas lâminas de água (Figura 9a, b), uma vez que a alteração desses atributos é lenta e depende de uma série de fatores relacionados ao sistema de manejo empregado no solo (LAL et al., 1995; WANG et al., 2016). Além disso, o estoque de C e N total é elevado e pequenas alterações, como a lixiviação de N durante o experimento não chegam a afetar o N total do solo (LAL et al., 1995).

O pH do solo diminuiu com o aumento na lâmina de água e teor de argila, até a profundidade de 30 cm (Figura 10a, b, c, d; Figura 11a, b). Esse resultado pode estar relacionado à adição do fertilizante, que, através do processo de nitrificação, aumenta a liberação de H^+ para a solução do solo (FRANCHINE et al., 2000), e também a não presença de raízes para consumir o nitrato gerado e promover a liberação de hidroxilas, que contribuem no aumento de pH (CANTARELLA, 2007). Por outro lado, o conteúdo de C orgânico está relacionado com a textura do solo. Ou seja, quanto maior o teor de argila, maior o teor de C orgânico (WATTEL-KOEKKOEK et al., 2001). Desta forma, a acidificação pode estar relacionada com os grupos ácidos da matéria orgânica do solo argiloso, uma vez que a estrutura da referida molécula orgânica é repleta de grupos funcionais (grupos ácidos), dos quais os mais importantes são os ácidos carboxílicos e fenólicos. Desta forma, o processo de decomposição da matéria orgânica acaba por liberar H^+ para o meio, acidificando-o (CAMARGO et al., 1987; LUCHESE et al., 2001).

5.2 Experimento II

A lixiviação de NH_4^+ não foi alterada por influência do teor de argila e das culturas (Figura 23a). Todavia, os resultados apontam que ela ocorre, mesmo que em níveis baixos, se comparada com a lixiviação de NO_3^- (Figura 23b). Estes resultados refutam vários estudos os quais demonstram que a perda por lixiviação de amônio é irrelevante na dinâmica do N no solo (SUKREEYAPONGSE et al., 2001; PAGE et al., 2003; PHILIPS; BURTON, 2005; MIN et al., 2012). O potencial de perdas de N por lixiviação de NH_4^+ pode ser ainda maior em solos arenosos, como discutido anteriormente (Figura 3a). Para a lixiviação de NO_3^- , a cultura da soja apresentou os maiores valores, independentemente da textura (Figura 23b). Esse comportamento pode ter ocorrido devido à maior disponibilidade de NO_3^- no solo, oriundo do processo de decomposição do material orgânico da soja, o qual possui menor relação C/N do

que a do milho (PADOVAN, 2006; GEZAHEGN et al., 2016). A soja é uma leguminosa fixadora de N atmosférico, e seu cultivo tende a enriquecer o reservatório de N total do solo (GREEN;BLACKMER, 1995; GENTRY et al., 2001; CASTOLDI, 2014; CIAMPITTI; SALVAGIOTTI, 2018), o que pode ter favorecido a lixiviação de NO_3^- . Embora não tenham sido observadas diferenças no N mineral do solo antes da lixiviação, os resíduos da soja foram mantidos nos vasos e, possivelmente foram mineralizados, liberando N no solo. O cultivo do milho e da soja, independente da adição de água, não resultou em aumento da concentração de NH_4^+ no solo, e a maioria dos efeitos observados não apresentou um padrão definido (Figura 14a, b, c; Figura 26a). Em geral, nos tratamentos que não receberam a adição de água (antes da lixiviação), a concentração de NH_4^+ no solo foi maior se comparado àqueles que foram irrigados (após a lixiviação), considerando que a quantidade de água pode favorecer a lixiviação de NH_4^+ (XIONG et al., 2010; WOLI et al., 2016).

De modo geral, apenas na camada superficial do solo (0-10 cm) a concentração de NO_3^- foi alterada por influência do teor de argila e das culturas (Figura 25a, b, c; Figura 26b, c). Nesta camada, o solo com maior teor de argila (628 g kg^{-1} de argila) proporcionou maior concentração de nitrato em relação aos de textura média e arenosa. Solos argilosos podem diminuir o deslocamento vertical de NO_3^- ao longo do perfil (ROCHA, 2017), o que explica a maior concentração observada na camada 0-10 cm. O efeito das culturas aumentando a concentração de NO_3^- na profundidade 0-10 cm, (Figura 26c), deve-se à maior concentração de raízes nas camadas mais profundas de solo, ou seja, a absorção radicular do NO_3^- foi maior nestas camadas. Assim como notado nas determinações antes da lixiviação, as interações relativas ao conteúdo de C e N total (Figura 29a, c) dizem respeito às características intrínsecas do solo e não remetem ao cultivo do milho ou soja.

Para a textura de 28 g kg^{-1} de argila, os valores de pH foram reduzidos até a camada de 20-30 cm nos experimentos “antes” e “após” a lixiviação (Figura 19a, b, c; Figura 30a, b, c), entretanto, notaram-se efeitos mais acentuados nos tratamentos com milho e soja, quando houve a adição de água (Após a lixiviação). A calagem, que foi realizada apenas no solo arenoso, e a presença de material vegetal das culturas, podem ter favorecido a mineralização e a nitrificação do N (SILVA et al., 1999; ROSOLEM et al., 2003). A mineralização e principalmente a nitrificação do N são processos que podem acidificar o solo (SILVA et al., 1999; CANTARELLA, 2007). Na nitrificação, para cada mol de NH_4^+ oxidado, há a liberação de dois moles de H^+ , essa

reação representa importante contribuição para a acidificação de solos agrícolas (CANTARELLA, 2007). Além disso, a adição de água pode explicar os menores valores de pH encontrados na camada de 20-30 e 30-50 cm (Figura 31b), uma vez que, ao desmontar as colunas, foi observado que nessas camadas a umidade se manteve por mais tempo, em relação as demais, o que pode ter proporcionado condições mais favoráveis à nitrificação (AITA et al., 2007; VIEIRA, 2017).

5.3 Experimento III

A lixiviação de NH_4^+ foi maior no solo arenoso, independente da dose de N aplicada (Figura 32a, b, c, d; Figura 34a). A exemplo do que foi discutido no Experimento I, solos com maior teor de argila favorecem a adsorção de NH_4^+ (MACKOWN; TUCKER, 1985; YANG et al., 1998). Ao contrário do que ocorreu com a lixiviação de amônio, para nitrato a lixiviação foi maior no solo argiloso (Figura 34b). Apesar disso, em ambas as texturas estudadas, o incremento das doses de N resultou no aumento da quantidade de NO_3^- lixiviado (FERNANDES; LIBARDI, 2009; FERNANDES et al., 2017), porém, apenas para o solo arenoso, houve ajuste de regressão linear crescente. A maior perda de nitrato observada na textura 626 g kg^{-1} de argila pode estar relacionada com o teor inicial de NO_3^- do solo, sendo que para o solo argiloso, o teor de nitrato (49 mg kg^{-1}) foi aproximadamente 63% maior em relação ao solo arenoso (18 g kg^{-1}) (Tabela 1).

No solo argiloso, a adsorção de NH_4^+ pode ser mais elevada em relação ao solo arenoso (YANG et al., 1998), o que pode diminuir as perdas por lixiviação deste cátion e, por consequência, resultar em maior concentração no solo (Figura 37a). Em doses mais elevadas de N (1,2 e 1,8 g N coluna^{-1}), as concentrações de NH_4^+ foram semelhantes quando comparados os solos de textura argilosa e arenosa, situações em que a quantidade de N fornecida via fertilizante pode ter aumentado o teor de NH_4^+ no solo arenoso. Em contrapartida, no solo argiloso a concentração de NH_4^+ no controle foi maior em relação ao arenoso. Desta forma, à medida que aumentaram as doses de N em condição de textura argilosa, a concentração de NH_4^+ no solo não sofreu grandes alterações.

A concentração de NO_3^- no solo aumentou exponencialmente (Figura 37b), demonstrando que para a textura de 626 g kg^{-1} de argila, o teor de NO_3^- tende a ser

maior, conforme ocorre o aumento da dose de N-fertilizante (FERNANDES; LIBARDI, 2009). Como discutido anteriormente, o teor inicial de nitrato na textura 626 g kg⁻¹ de argila também pode ter favorecido a maior concentração deste ânion no solo.

O C e N total do solo não sofreram influência das doses de N, sendo observado maior conteúdo de ambos os elementos com aumento do teor de argila, (Figura 40a, b), como ocorrido no Experimento I.

De modo geral, para o pH as doses mais elevadas de N favoreceram a acidificação nas camadas superiores do solo argiloso (Figura 41a, b, c; Figura 42a, b, c). O uso frequente de fertilizantes amoniacais pode acidificar o solo, pois no processo de nitrificação do amônio ocorre liberação de H⁺ para a solução (SHEN, et al., 2010; STROIA et al., 2011). Para o solo arenoso, esse efeito não foi pronunciado, o que pode estar relacionado com a maior lixiviação de NH₄⁺ em relação ao solo argiloso (Figura 34a). Desta forma a adição de água também pode ter favorecido o movimento do fertilizante ao longo da coluna, impedindo que o processo de nitrificação tenha se pronunciado no perfil, como ocorrido no solo argiloso.

A quantidade de Nsdf e de recuperação de ¹⁵N foi maior nas camadas de 0-10 e 70-100 cm (Figura 45a, c), o que está relacionado com o fornecimento do fertilizante na superfície do solo e também em consequência da adição de água nas colunas, que pode ter favorecido a movimentação de N no sentido descendente (GOMES et al., 2004; CANTARELLA, 2007). A maior quantidade de Nsdf e recuperação de ¹⁵N, constatadas para a condição de textura 626 g kg⁻¹ de argila (Figura 45b, d), está relacionada com a maior CTC do solo argiloso em relação ao arenoso e a maior dose do fertilizante nitrogenado, que favoreceram o acúmulo de N no solo (CAMARGO et al., 1989; BORTOLONI, 2000). A menor recuperação de ¹⁵N observada na maior dose e no solo arenoso (Figura 45d; Figura 46b), pode estar relacionada com a maior perda por lixiviação de NH₄⁺ (Figura 34a). Esse efeito demonstra que o uso de doses racionais de fertilizantes nitrogenados em solos arenosos pode favorecer a diminuição das perdas de N por lixiviação.

6 CONCLUSÕES

Esse estudo fornece informações importantes a respeito da lixiviação de NO_3^- , levando em consideração alguns dos principais fatores mencionados na literatura. A adição de água, o enriquecimento do perfil do solo em N com o cultivo da soja e o uso de doses elevadas de N podem favorecer as perdas por lixiviação de NO_3^- . No geral, solos argilosos apresentaram maior lixiviação de N, especialmente na forma de NO_3^- . Contudo, neste caso, há indícios de que grande parte do N lixiviado é nativo do solo e não do fertilizante, ao contrário do arenoso, que apresenta baixo conteúdo de N nativo. Em regiões com médias históricas de alta pluviosidade, o cultivo da soja pode favorecer a lixiviação de NO_3^- devido à sua alta labilidade favorecer o acúmulo de nitrato no perfil do solo. Perdas por lixiviação de NH_4^+ são observadas em pequenas quantidades, todavia se forem aplicadas doses elevadas em solos arenosos as perdas podem ser elevadas. Por fim, doses racionais de N (por exemplo, aquelas que visam repor a quantidade de N extraída ou exportada pela cultura) podem favorecer a diminuição nas perdas de NO_3^- em sistemas agrícolas.

REFERÊNCIAS

AITA, C.; GIACOMINI, S.J. HÜBNER, A.P. Nitrificação do nitrogênio amoniacal de dejetos líquidos de suínos em solo sob sistema de plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 42, p. 95-102, 2007. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-204X2007000100013. Acesso em: 20 fev. 2020.

ALVES, L. S.; JUNIOR, T.; VERGARA, C.; FERNANDES, M. S.; SANTOS, A. M. D.; SOUZA, S. R. D. Soluble fractions and kinetics parameters of nitrate and ammonium uptake in sunflower ("Neon" Hybrid). **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 47, n. 1, p. 13-21, 2016. Disponível em: <http://ccarevista.ufc.br/seer/index.php/ccarevista/about/contact>. Acesso em: 22 nov. 2019.

BLACK, A. S.; WARING, S. A. Adsorption of nitrate, chloride and sulphate by some highly weathered soils from South-East Queensland. **Australian Journal of Soil Research**, [s. l.], v. 17, n. 2, p. 271-282, 1979. Disponível em: <https://trove.nla.gov.au/work/224142749?q&versionId=245891883>. Acesso em: 22 nov. 2019.

BORTOLINI, C. G. **Eficiência do método de adubação nitrogenada em pré-semeadura do milho implantado em semeadura direta após aveia preta**. 2000. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2000. Acesso em: 22 nov. 2019.

CAMARGO, O. A.; VALADARES, J. M. A. S.; BERTON, R. S.; TEÓFILO SOBRINHO, J.; MENK, J. R. F. **Alterações de características químicas de um Latossolo Vermelho Escuro pela aplicação de vinhaça**. Campinas: IAC, 1987. (Boletim Científico, 9).

CAMARGO, P. B. **Dinâmica do nitrogênio dos fertilizantes: uréia (¹⁵N) e aquamônia (¹⁵N) incorporados ao solo na cultura da cana-de-açúcar**. 1989.. Dissertação (Mestrado em Energia Nuclear na Agricultura) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1989. Disponível em: <https://teses.usp.br/teses/disponiveis/11/11133/tde-20181127-154855/pt-br.php>. Acesso em: 13 ago. 2019.

CAMARGO, F. A. O.; GIANELLO, C.; VIDOR, C. Potencial de mineralização do nitrogênio em solos do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, Viçosa, v. 21, n. 3, p. 575-579, 1997. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0100-06831997000400007&script=sci_abstract&tlng=pt. Acesso em: 02 abr. 2019.

CAMPBELL, C. A.; ZENTNER, R. P.; SELLES, F.; AKINREMI, O. O. Nitrate leaching as influenced by fertilization in the Brown soil zone. **Canadian Journal of Soil Science**, Ottawa, v. 73, n. 4, p. 387-397, 1993. Disponível em: <http://agris.fao.org/agris-search/search.do?recordID=CA19960002053> . Acesso em: 27 nov. 2019.

CANTARELLA, H.; MATTOS, Jr. D.; QUAGGIO, J. A.; RIGOLIN, A. T. Fruit yield of Valencia sweet orange fertilized with different N sources and the loss of applied N. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, [s. l.], v. 67, p. 2015-223, 2003. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1023/B:FRES.0000003600.20499.76>. Acesso em: 22 nov. 2019.

CANTARELLA, H. Nitrogênio. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ, V. H.; BARROS, N. F.; FONTES, R. L.; CANTARUTTI, R. B.; NEVES, J. C. L. (Ed.). **Fertilidade do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007 p. 375-470.

CARVALHO, N. L.; ZABOT, V. Nitrogênio: Nutriente ou poluente? **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e tecnologia Ambiental**, Santa Maria, v. 6, n. 6, p. 960–974, 2012. Disponível em: <https://periodicos.ufsm.br/reget/article/view/4671>. Acesso em: 14 jul. 2019.

CASTOLDI, G. **Dinâmica do nitrogênio em sistemas de produção sob semeadura direta**. 2014. Tese (Doutorado em Agronomia (Agricultura) - Faculdade de Ciências Agronômicas de Botucatu, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Botucatu, 2014. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/handle/11449/123373>. Acesso em 15 set. 2019.

CIAMPITTI, I. A.; SALVAGIOTTI, F. New Insights into Soybean Biological Nitrogen Fixation. **Agronomy Journal**, Madison, v. 110, n. 4, p. 1185 - 1196, 2018. Disponível em: <https://dl.sciencesocieties.org/publications/aj/abstracts/110/4/1185>. Acesso em: 04 mai. 2019.

COELHO, A. M.; FRANÇA, G. E.; BAHIA FILHO, A. F. C.; GUEDES, G. A. A. Balanço de nitrogênio (¹⁵N) em um latossolo vermelho-escuro, sob vegetação de cerrado, cultivado com milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 15, p. 187-193, 1991. Disponível em: http://oasisbr.ibict.br/vufind/Record/RCAP_6376ba00e70621658c630b1423064fc5. Acesso em: 08 set. 2019.

CORREA, R. S.; WHITE, R. E.; WEATHERLEY, A. J. Risk of nitrate leaching from two soils amended with biosolids. **Water Resources**, [s. l.], v. 33, n. 4, p. 453-462,

2006. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1134/S0097807806040117>. Acesso em: 01 jan. 2020.

COSTA, S. N.; MARTINEZ, M. A.; MATOS, A. T.; RAMOS, V. B. N. Mobilidade de nitrato em colunas de solo sob condições de escoamento não permanente. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 3, n. 2, p. 190-194, 1999. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1415-43661999000200190. Acesso em: 03 jan. 2020.

DOANE, T. A.; HORWÁTH, W. R. Spectrophotometric determination of nitrate with a single reagent. **Analytical Letters**, [s. l], v. 36, n. 2, p. 2713-2722, 2003. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1081/AL-120024647>. Acesso em: 03 jan. 2020.

ERREBHI, M.; ROSEN, C. J.; GUPTA, S. C.; & BIRONG, D. E. Potato yield response and nitrate leaching as influenced by nitrogen management. **Agronomy Journal**, Madison, v.90, n.1, p.10-15, 1998. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/240783473_Potato_Yield_Response_and_Nitrate_Leaching_as_Influenced_by_Nitrogen_Management. Acesso em: 13 out. 2019.

FAGERIA, N. K.; BALIGAR, V. C.; JONES, C. A. **Growth and mineral nutrition of field crops**. Boca Raton: FLCRC Press, 2011.

FERNANDES, F. C. S.; LIBARDI, P. L. Drenagem interna e lixiviação de nitrato em um Latossolo sob sucessão milho-braquiária-milho, com diferentes doses de nitrogênio. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 33, n. 5, p. 1163-1173, 2009. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-06832009000500010. Acesso em: 05 ago. 2019.

FERNANDES, G.; TIECHER, T.; PITON, R.; PELLEGRINI, A.; SANTOS, D.R. Impacto da fertilização nitrogenada em pastagens perenes na contaminação dos recursos naturais. **Revista Brasileira de Tecnologia Agropecuária**, v. 1, p. 1-12, 2017. Disponível em: <http://revistas.fw.uri.br/index.php/rbdta/article/view/2482>. Acesso em: 23 dez. 2019.

FERNICOLA, N. G. G.; AZEVEDO, F. A. Metemoglobinemia e nitrato nas águas. **Revista Saúde Pública**, São Paulo, v. 15, n. 2, p. 242-248, 1981. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0034-89101981000200009. Acesso em: 17 mar. 2019.

FURTINI NETO, A. E.; VALE, F. R.; RESENDE, A. V.; GULHERME, L.R.G.; GUEDES, G. A. A. **Fertilidade do Solo**. Lavras: UFLA/FAEPE, 2001.

FRANCHINI, J. C., BORKERT, C. M., FERREIRA, M. M., GAUDÊNCIO, C. A. Alterações na fertilidade do solo em sistemas de rotação de culturas em semeadura direta. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 24, p. 459-67, 2000. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/173329/1/22.pdf>. Acesso em: 02 fev. 2019.

GEE, G. W.; BAUDER, J. W. Particle-size analysis. In: KLUTE, A. (Ed.). **Methods of soil analysis: physical and mineralogical methods**. Madison: American Society of Agronomy, 1986. p. 383-411.

GENTRY, L. E.; BELOW, F. E.; DAVID, M. B.; BERGEROU, J. A. Source of the soybean N credit in maize production. **Plant Soil**, [s. l.], v. 236, n. 2, p. 175-184, 2001. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1023/A:1012707617126>. Acesso em: 18 dez. 2019.

GEZAHEGN, A. M.; R.A HALIM, M.M. YUSUF, S.A. WAHID. Decomposition and Nitrogen Mineralization of individual and mixed maize and soybean residue. **MAYFEB Journal of Agricultural Science**, Toronto, v. 2, p. 28-45, 2016. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/332274686_Decomposition_and_Nitrogen_mineralization_of_Individual_and_Mixed_Maize_and_Soybean_Residue. Acesso em: 20 ago. 2019.

GILETTO, C. M.; ECHEVERRIA, H. E. Nitrogen balance for potato crops in the southeast pampas region. **Nutrient Cycling Agroecosystem**, [s. l.], v. 95, p. 73-86, 2013. 95, 73–86. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/257564041_Nitrogen_balance_for_potato_crops_in_the_southeast_pampas_region_Argentina. Acesso em: 02 mai. 2019.

GOMES, E. R. S.; SAMPAIO, S. C.; CORRÊA, M. M.; VILAS BOAS, M. A.; ALVES, L. F. A.; SOBRINHO, T. A. Movimento de nitrato proveniente de águas residuárias em colunas de solo. **Revista de Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 24, n. 3, p. 557-568, 2004. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0100-69162004000300008&script=sci_abstract&lng=pt. Acesso em: 06 abr. 2019.

GREEN, C. J.; BLACKMER, A. M. Residue decomposition effects on nitrogen availability to corn following corn or soybean. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 59, n. 4, p. 1065-1070, 1995. Disponível em: <https://dl.sciencesocieties.org/publications/sssaj/abstracts/59/4/SS0590041065?access=0&view=pdf>. Acesso em: 07 mar. 2020.

GROENENDIJK, P.; HEINEN, M.; KLAMMLER, G.; FANK, J.; KUPFERSBERGER, H.; PISINARAS, V.; GEMITZI, A.; PEÑAHARO, S.; GARCÍA-PRATS, A.; PULIDO-VELAZQUEZ, M.; PEREGO, A.; ACUTIS, M.; TREVISAN, M. Performance assessment of nitrate leaching models for highly vulnerable soils used in low input farming based on lysimeter data. **Science of the Total Environment**, [s.l.], v. 80, p. 499-463, 2014. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S004896971401016X>. Acesso em: 23 out. 2018.

HERRMANN, M.; PUST, J.; POTT, R. Leaching of nitrate and ammonium in heathland and forest ecosystems in Northwest Germany under the influence of enhanced nitrogen deposition. **Plant Soil**, [s. l.], v. 273, p. 129-147, 2005. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/226901673_Leaching_of_nitrate_and_ammonium_in_heathland_and_forest_ecosystems_in_Northwest_Germany_under_the_influence_of_enhanced_nitrogen_deposition . Acesso em: 10 abr. 2019.

HOWARTH, W. R.; MARINO, R. Nitrogen as the limiting nutrient for eutrophication in coastal marine ecosystems: evolving views over three decades. **Limnology and Oceanography**, Waco, v. 51, p. 364-376, 2006. Disponível em: https://aslopubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.4319/lo.2006.51.1_part_2.0364 . Acesso em: 14 ago. 2019.

(IPCC). **Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories**. Genebra: IPCC, 2006.. Disponível em: <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/index.html>. Acesso em 09 jan. 2020.

LAGREID, M.; BOCKMAN, O. C.; KAARSTAD, O. **Agriculture fertilizers and the environment**. Wallingford: CABI Publishing, 1999.

LAL, R.; KIMBLE, J.; LEVINE, E.; STEWART, B. A. (Eds.) **Advances in Soil Science: soil management and greenhouse effect**. Boca Raton: CRC Lewis Publishers, 1995.

LARA-CABEZAS, W. A. R.; KORNDORFER, G. H.; MOTTA, S. A. Volatilização de N-NH₃ na cultura do milho: II. Avaliação de fontes sólidas e fluídas em sistema de plantio direto e convencional. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 21, p. 489- 496, 1997. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S0100-06831997000300019&lng=en&nrm=iso&tlng=pt. Acesso em: 06 jan. 2019.

LI, Y.; CHAPMAN, S. J.; NICOL, G. W.; YAO, H. Nitrification and nitrifiers in acidic soils. **Soil Biology and Biochemistry**, [s.l.], v. 116, p. 290-301 , 2018. Disponível

em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0038071717306259>. Acesso em: 26 set. 2019.

LUCHESE, E. B.; FAVERO, L. O. B.; LENZI, E. **Fundamentos da química do solo**. Rio de Janeiro: Freitas Bastos, 2001.

MACKOWN, C. T.; TUCKER, T. C. Ammonium nitrogen movement in a coarse-textured soil amended with zeolite. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 49, n. 1, p. 235-238, 1985. Disponível em: <https://access.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.2136/sssaj1985.03615995004900010048x>. Acesso em: 03 fev. 2020.

MARIANO, E.; OTTO, R.; MONTEZANO, Z.F.; CANTARELLA, H.; TRIVELIN, P. C. O. Soil nitrogen availability indices as predictors of sugarcane requirements. **European Journal of Agronomy**, Conthey, v. 89, p. 25–37, 2017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1161030117300849>. Acesso em: 13 dez. 2019.

MIN, J.; ZHANG, H.; SHI, W. Optimizing nitrogen input to reduce nitrate leaching loss in greenhouse vegetable production. **Agricultural Water Management**, [s. l.], v. 111, p. 53-59, 2012. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378377412001333>. Acesso em: 30 jan. 2020.

MULVANEY, R. L. Nitrogen - inorganic forms. In: SPARKS, D.L. (Ed.). **Methods of Soil Analysis**. Madison: SSSA, ASA, 1996. p. 1123-1184.

PADOVAN, M. P.; ALMEIDA, D. L.; GUERRA, J. G. M.; RIBEIRO, R. L. D.; OLIVEIRA, F. L.; SANTOS, L. A.; ALVES, B. J. R.; SOUTO, S. M. Decomposição e liberação de nutrientes de soja cortada em diferentes estádios de desenvolvimento. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 41, p. 667-672, 2006. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0100204X2006000400018&script=sci_abstract&lng=pt. Acesso em: 24 dez. 2019.

PAGE, K. L.; MENZIES, N. W.; DALAL, R. C. Using quantity/intensity relationships to assess the potential for ammonium leaching in a Vertisol. **Australian Journal Soil Research**, Melbourne, v. 41, n. 2, p. 207-214, 2003. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/43445605_Using_quantityintensity_relationships_to_assess_the_potential_for_ammonium_leaching_in_a_Vertisol. Acesso em: 22 ago. 2019.

PEDROSA, C. A.; CAETANO, F. A. **Águas subterrâneas**. Brasília: Superintendência de Informações Hidrológicas - SIH, ANA, 2002.

PHILLIPS, I.; BURTON, E. 2005. Nutrient leaching in undisturbed cores of an acidic sandy Podsol following simultaneous potassium chloride and di-ammonium phosphate application. **Nutrient Cycling Agroecosystems**, [s. l.], v. 73, n. 1, p. 1-14, 2005. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10705-005-6080-8>. Acesso em: 15 ago. 2019.

POCH-MASSEGUÉ, R.; JIMÉNEZ-MARTÍNEZ, J.; WALLIS, K. J.; DE CARTAGENA, F. R.; CANDELA, L. Irrigation return flow and nitrate leaching under different crops and irrigation methods in Western Mediterranean weather conditions. **Agriculture Water Management**, [s. l.], v. 134, p. 1-13, 2014. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378377413003326>. Acesso em: 07 mar. 2020.

RAIJ, B. van. Determinação do ponto de carga zero em solos. **Bragantia**, Campinas, v. 32, n. 18, p. 337-347, 1973. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S000687051973000100018&script=sci_abstract&tlng=pt. Acesso em: 22 set. 2019.

RAIJ, B.; CAMARGO, O. A. Nitrate elution from soil columns of three oxisols and one alfisol. In: INTERNATIONAL CONGRESS OF SOIL SCIENCE, 10., 1974, Moscow. **Anais...** Moscow: Nauka Publ. House, v. 2, p. 385-391, 1974.

RAIJ, B.; ANDRADE, J. C.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A. (ed.). **Análise química para a avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Campinas: Instituto agrônomo, 2001.

ROCHA, K. F. **Dinâmica do nitrogênio em rotações de forrageiras com milho**. 2017. Tese (Doutorado em Agronomia/Agricultura) - Faculdade de Ciências Agrônomicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2017. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/handle/11449/152127>. Acesso em: 25 dez. 2019.

ROCHA, K. F.; SOUZA, M.; ALMEIDA, D. A.; CHADWICK, D. R.; JONES, D. J.; MOONEY, S. J.; ROSOLEM, C. A. Cover crops affect the partial nitrogen balance in a maize-forage cropping system. **Geoderma**, [s. l.], v. 360, p. 114000, 2020. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/337153860_Cover_crops_affect_the_partial_nitrogen_balance_in_a_maize-forage_cropping_system. Acesso em: 17 fev. 2020.

ROSOLEM, C. A.; FOLONI, J. S. S.; OLIVEIRA, R. H. Dinâmica do nitrogênio no solo em razão da calagem e adubação nitrogenada, com palha na superfície.

Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília, v. 38, n. 2, p. 301–309, 2003.

Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-204X2003000200018. Acesso em: 31 dez. 2019.

ROSOLEM, C. A.; RITZ, K.; CANTARELLA, H.; GALDOS, M. V.; HAWKESFORD, M. J.; WHALLEY, W. R.; MOONEY, S. J. Enhanced plant rooting and crop system management for improved N use efficiency. **Advances in Agronomy**, [s. l.], v. 146, p. 205-2039, 2017. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0065211317300664>. Acesso em: 25 dez. 2019.

ROSOLEM, C. A.; CASTOLDI, G.; PIVETTA, L. A.; OCHSNER, T. E. Nitrate Leaching in soybean rotations without nitrogen fertilizer. **Plant and Soil**. [s. l.], v. 423, n. 1-2, p. 27-40, 2018. Disponível em:

<https://link.springer.com/article/10.1007/s11104-017-3494-4>. Acesso em: 04 fev. 2020.

SANGOI, L.; ERNANI, P. R.; LECH, V. A.; RAMPAZZO, C. Volatilização de N-NH₃ em decorrência da forma de aplicação de ureia, manejo de resíduos e tipo de solo, em laboratório. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 33, n. 4, p. 687-692, 2003. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0103-84782003000400016&script=sci_abstract&lng=pt. Acesso em: 02 abr. 2019.

SANGOI, L.; ERNANI, P. R.; SILVA, P. R. F. Maize response to nitrogen fertilization timing in two tillage systems in a soil with high organic matter content. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 31, p. 507-517, 2007. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-06832007000300011. Acesso em: 12 dez 2019.

SANTOS, H. G.; JACOMINE, P. K. T.; DOS ANJOS, L. H. C.; DE OLIVEIRA, V. A.; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A.; ARAUJO FILHO, J. C.; OLIVEIRA, J. B.; CUNHA, T. J. F. EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Brasília: EMBRAPA, 2018.

SCAVIA, D.; BRICKER, S. Coastal eutrophication assessment in the United States. **Biogeochemistry**, [s. l.], v. 79, p. 187-208, 2006. Disponível em:

<https://link.springer.com/article/10.1007/s10533-006-9011-0>. Acesso em: 02 jan. 2020.

SHEN, W.; LIN, X.; SHI, W.; MIN, J.; GAO, N.; ZHANG, H.; Yin, R.; HE, X. Higher rates of nitrogen fertilization decrease soil enzyme activities, microbial functional diversity and nitrification capacity in a Chinese polytunnel greenhouse vegetable land. **Plant and Soil**, [s. l.], v.337, n.1-2, p. 137–150, 2010. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11104-010-0511-2>. Acesso em: 25 dez. 2019.

SILVA, C. A.; VALE, F. R.; ANDERSON, S. J.; KOBAL, A. R. Mineralização de nitrogênio e enxofre em solos brasileiros sob influência da calagem e fósforo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 34, n. 9, p. 1679-1689, 1999. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-204X1999000900019. Acesso em: 23 dez. 2019.

SILVA, E. C.; FERREIRA, S. M.; SILVA, G. P.; ASSIS, R. L.; GUIMARÃES, G. L. Épocas e formas de aplicação de nitrogênio no milho sob plantio direto em solo de cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 29, p. 725-733, 2005. Disponível em; http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-06832010000400018. Acesso em: 11 ago. 2019.

SOMMER, S. G.; SCHJOERRING, J. K.; DENMEAD, O. T. Ammonia emission from mineral fertilizers and fertilized crops. **Advances in Agronomy**, [s. l.], v. 82, p. 557-622, 2004. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/223938009_Ammonia_Emission_from_Mineral_Fertilizers_and_Fertilized_Crops. Acesso em: 02 jan. 2020.

STROIA, C., MOREL, C., JOUANY, C. Nitrogen fertilization effects on grassland soil acidification: consequences on diffusive phosphorus ions. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 75, p. 112–120. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/233791263_Nitrogen_Fertilization_Effects_on_Grassland_Soil_Acidification_Consequences_on_Diffusive_Phosphorus_Ions. Acesso em: 26 dez. 2019.

SUKREEYAPONGSE, O.; PANICHSAKPATANA, S.; THONGMARG, J. Nitrogen leaching from soil treated with sludge. **Water Science & Technology**, London, v. 44, n. 7, p. 145-150, 2001. Disponível em: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/11724480>. Acesso em: 22 ago. 2019.

USDA. **Keys to Soil Taxonomy**. 7. ed. Washington: USDA, 2014. p. 338.

VIEIRA, R.F. **Ciclo do nitrogênio em sistemas agrícolas**. Brasília: Embrapa, 2017. Disponível em:

<https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/175460/1/2017LV04.pdf>. Acesso em: 27 dez. 2019.

WANG, J.; BAI, J.; ZHAO, Q.; LU, Q.; XIA, Z. Five-year changes in soil organic carbon and total nitrogen in coastal wetlands affected by flow-sediment regulation in a Chinese delta. **Scientific Reports**, [s. l.], v. 6, p. 21-137, 2016. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/srep21137>. Acesso em: 25 dez. 2019.

WATTEL-KOEKKOEK, E. J. W.; VAN GENUCHTEN, P. P. L.; BUURMAN, P.; VAN LAGEN, B. Amount and composition of clay-associated soil organic matter in a range of kaolinitic and smectitic soils. **Geoderma**, [s. l.], v. 99, p. 27-49, 2001. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016706100000628>. Acesso em: 03 abr. 2019.

WHO. **Guidelines for drinking water quality**. New York: WHO, 1993.

WOLI, P.; HOOGENBOOM, G.; ALVA, A. Simulation of potato yield, nitrate leaching, and profit margins as influenced by irrigation and nitrogen management in different soils and production regions. **Agricultural Water Management**, [s. l.], v. 171, p. 120-130, 2016. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378377416301068>. Acesso em: 30 dez. 2019.

YANG, J. E.; SKOGLEY, E. O.; SCHAFF, B. E.; KIM, J. J. A simple spectrophotometric determination of nitrate in water, resin and soil extracts. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 62, n. 4, p. 1108-1115, 1998. Disponível em: <http://agris.fao.org/agris-search/search.do?recordID=US1999001166>. Acesso em: 15 out. 2019.

XIONG, Z. -Q.; HUANG, T. -Q.; MA, Y. -C.; XING, G. -X.; ZHU, Z. -L. Nitrate and Ammonium Leaching in Variable- and Permanent-Charge Paddy Soils. **Pedosphere**, [s. l.], v. 20, n. 2, p. 209-216, 2010. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1002016010600082>. Acesso em: 31 dez. 2019.

APÊNDICE A - Temperatura (°C) e umidade relativa do ar (UR%) dos experimentos 1 (a), 2 e 3 (b), relacionadas ao período de condução dos experimentos

