

RICARDO PRADO PIOVESAN

**PERDAS DE NUTRIENTES VIA SUBSUPERFÍCIE EM COLUNAS DE
SOLO SOB ADUBAÇÃO MINERAL E ORGÂNICA**

**Dissertação apresentada como requisito parcial a
obtenção do grau de Mestre, apresentado ao Curso
de Pós-Graduação em Agronomia, Área de
Concentração em Ciências do Solo do Setor de
Ciências Agrárias da Universidade Federal do
Paraná.**

Orientadora: Prof^a. Nerilde FAVARETTO

Co-orientadores: Prof. Antônio C. V. Motta

Prof. Carlos Bruno Reissmann

CURITIBA

AGOSTO 2006



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SETOR DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
DEPARTAMENTO DE SOLOS E ENGENHARIA AGRÍCOLA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DO SOLO (MESTRADO)
Rua dos Funcionários, 1540-Curitiba/PR-80035-050-Fone/Fax 41-350-5648
Página: www.pgcsolo.agrarias.ufpr.br/
E-mail: pgcsolo@ufpr.br

PARECER

Os Membros da Comissão Examinadora, designados pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, para realizar a arguição da Dissertação de Mestrado, apresentada pelo candidato **RICARDO PRADO PIOVESAN**, sob o título: "**Perdas de nutrientes via subsuperfície em colunas de solo sob adubação mineral e orgânica**", requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre em Ciência do Solo – Área de Concentração: Qualidade e Sustentabilidade Ambiental, do Setor de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Paraná, após haverem analisado o referido trabalho e argüido o candidato, são de Parecer pela "**APROVAÇÃO**" da Dissertação, completando assim, os requisitos necessários para receber o diploma de **Mestre em Ciência do Solo - Área de Concentração: "Qualidade e Sustentabilidade Ambiental"**.

Secretaria do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, em Curitiba, 25 de agosto de 2006.


Prof. Dr.^a Nerilde Favaretto, Presidente.


Eng.^o Agr.^o Dr. Oromar João Bertol, I.^o Examinador.


Prof. Dr. Carlos Bruno Reissmann, II.^o Examinador.


Prof. Dr. Antonio Carlos Vargas Motta, III.^o Examinador.



AGRADECIMENTOS

A Professora Nerilde FAVARETTO pela orientação, paciência e cobrança durante esta pesquisa.

Aos Professores Carlos Bruno Reissmann e Antônio Carlos Vargas Motta pelas co-orientações e sugestões importantes.

Ao Dr. Oromar BERTOL pelas sugestões iniciais prestadas para a realização deste trabalho e participação na banca examinadora.

À Fundação ABC para Assistência e Divulgação Técnica Agropecuária através do Eng^o Agrônomo M. Sc., Volnei Pauletti, por disponibilizar o experimento de campo e pelo fornecimento de dados e materiais necessários ao desenvolvimento desta pesquisa.

Ao Professor Hélio Olympio da Rocha por disponibilizar o coletor de monólitos.

Ao Éderson Franscisquini, graduando em agronomia, pela ajuda na condução deste projeto.

Aos laboratoristas do Departamento de Solos e Engenharia Agrícola do Setor de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Paraná.

Ao Professor Henrique Soares Koehler pelos auxílios com relação à estatística.

À minha família pelo suporte oferecido.

Aos amigos do curso.

SUMÁRIO

LISTA DE FOTOS	IV
LISTA DE TABELAS	IV
LISTA DE GRÁFICOS	V
LISTA DE QUADROS	VI
RESUMO	VII
ABSTRACT	VIII
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO DE LITERATURA	3
2.1. PARÂMETROS QUÍMICOS DO SOLO	3
2.1.1. Retenção de íons no perfil do solo.....	3
2.1.2. Efeito do esterco e da profundidade do solo.....	5
2.2. CONTAMINAÇÃO DA ÁGUA	7
2.2.1. Contaminação por nutrientes	7
2.2.1.1. Nitrogênio.....	7
2.2.1.2. Fósforo	10
2.3. EFEITO DO GESSO NO TRANSPORTE DE NUTRIENTES DO SOLO PARA A ÁGUA ..	12
3. MATERIAL E MÉTODOS	13
3.1. COLETA E PREPARO DAS COLUNAS DE SOLO.....	15
3.2. LIXIVIAÇÃO	20
3.3. ANÁLISES QUÍMICAS	22
3.3.1. Análises da água percolada pelas colunas de solo.....	22
3.3.2. Análises do solo.....	25
3.4. ANÁLISES ESTATÍSTICAS	26
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	27
4.1. ANÁLISE DA ÁGUA PERCOLADA	27
4.1.1. Nitrogênio na forma de amônio (N-NH ₄).....	27
4.1.2. Nitrogênio na forma de nitrato (N-NO ₃)	31
4.1.3. Fósforo (P).....	33
4.1.4. Potássio (K)	37
4.1.5. Condutividade Elétrica (CE), Transmitância e pH	38
4.2. ANÁLISE DO SOLO.....	41
4.2.1. pH, Acidez Potencial e Alumínio	41
4.2.2. Cálcio, Magnésio e Potássio.....	43
4.2.3. Fósforo	44
4.2.4. Carbono	45
4.2.5. Amônio e Nitrato.....	45
4.3. EFEITO DO GESSO NA ÁGUA PERCOLADA E NO SOLO APÓS A LIXIVIAÇÃO	46
4.3.1. Análise da água percolada	47
4.3.2. Análise do solo das colunas.....	50
5. CONCLUSÕES	53
REFERÊNCIAS	54
ANEXOS	59

LISTA DE FOTOS

FOTO 1 - PREPARO DO TUBO DE PVC PARA INSERÇÃO NO APARELHO (ESQUERDA); APARELHO COLETANDO SOLO (CENTRO); TUBO DE PVC SENDO RETIRADO DO APARELHO APÓS COLETA DE SOLO (DIREITA)	16
FOTO 2 - PREPARAÇÃO DA PARTE SUPERIOR DAS COLUNAS ANTES DA APLICAÇÃO DOS TRATAMENTOS: ADIÇÃO DE PARAFINA (A); COLOCAÇÃO DO TECIDO VOIL (B); MEDIDA DE AREIA (C); AREIA SOBRE TECIDO VOIL (D); COLOCAÇÃO DO PAPEL FILTRO (E)	17
FOTO 3 - VISÃO DO EXPERIMENTO: INÍCIO DA LIXIVIAÇÃO (A); COLETA DA ÁGUA (B)	17
FOTO 4 - PROCEDIMENTO DE MOVIMENTAÇÃO DO SOLO DA COLUNA DE PVC: SECAGEM EM ESTUFA (A); MEDIÇÃO DO VÃO SUPERIOR (B); MEDIÇÃO APÓS DESLOCAMENTO PARCIAL PARA OBTER A PRIMEIRA FRAÇÃO DA COLUNA – 0 a 5 cm (C); CORTE DA FRAÇÃO – 0 a 5 cm (D); MEDIÇÃO PARA FRAÇÃO – 5 a 10 cm (E); MEDIÇÃO PARA FRAÇÃO – 10 a 20 cm (F)	25

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - CONCENTRAÇÃO MÉDIA DE N-NH ₄ (mg L ⁻¹) DE ACORDO COM A APLICAÇÃO DE ESTERCO BOVINO E TURNOS DE LIXIVIAÇÃO	28
TABELA 2 - CONCENTRAÇÃO MÉDIA PONDERADA DE N-NH ₄ , N-NO ₃ , P E K EM CINCO TURNOS DE LIXIVIAÇÃO DE ACORDO COM A APLICAÇÃO DE FERTILIZANTE MINERAL E ESTERCO BOVINO	29
TABELA 3 - PERDA TOTAL MÉDIA DE N-NH ₄ (mg coluna ⁻¹) DE ACORDO COM A APLICAÇÃO DE FERTILIZANTE MINERAL E ESTERCO BOVINO	30
TABELA 4 - PERDAS PERCENTUAIS DE N-NH ₄ e N-NO ₃ EM RELAÇÃO AO N APLICADO NA FORMA SOLÚVEL E TOTAL, DE ACORDO COM AS DOSES DE FERTILIZANTE MINERAL E ESTERCO BOVINO	31
TABELA 5 - CONCENTRAÇÃO MÉDIA DE N-NO ₃ (mg L ⁻¹) DE ACORDO COM A APLICAÇÃO DE FERTILIZANTE MINERAL E TURNOS DE LIXIVIAÇÃO	32
TABELA 6 - PERDA MÉDIA DE N-NO ₃ (mg coluna ⁻¹) DE ACORDO COM A APLICAÇÃO DE ESTERCO BOVINO E FERTILIZANTE MINERAL	33
TABELA 7 - CONCENTRAÇÃO MÉDIA DE P (mg L ⁻¹) DE ACORDO COM A APLICAÇÃO DE ESTERCO BOVINO	34
TABELA 8 - CONCENTRAÇÃO MÉDIA DE P (mg L ⁻¹) DE ACORDO COM A APLICAÇÃO DE FERTILIZANTE MINERAL	34
TABELA 9 - PERDA MÉDIA DE P (mg coluna ⁻¹) DE ACORDO COM A APLICAÇÃO DE ESTERCO	36
TABELA 10 - PERDAS PERCENTUAIS DE P EM RELAÇÃO AO P APLICADO NA FORMA SOLÚVEL E TOTAL, DE ACORDO COM AS DOSES DE FERTILIZANTE MINERAL E ESTERCO BOVINO	36
TABELA 11 - CONCENTRAÇÃO MÉDIA DE K (mg L ⁻¹) DE ACORDO COM A APLICAÇÃO DE ESTERCO BOVINO E TURNOS DE LIXIVIAÇÃO	37
TABELA 12 - CONCENTRAÇÃO MÉDIA DE K (mg L ⁻¹) DE ACORDO COM A APLICAÇÃO DE FERTILIZANTE MINERAL E TURNOS DE LIXIVIAÇÃO	37
TABELA 13 - PERDA TOTAL MÉDIA DE K (mg L ⁻¹) DE ACORDO COM A APLICAÇÃO DE ESTERCO BOIVNO E FERTILIZANTE MINERAL	38
TABELA 14 - PERDAS PERCENTUAIS DE K EM RELAÇÃO AO K APLICADO NA FORMA SOLÚVEL E TOTAL, DE ACORDO COM AS DOSES DE FERTILIZANTE MINERAL E ESTERCO BOVINO	38
TABELA 15 - TEORES MÉDIOS DE N-NH ₄ , pH, CaCl ₂ , Al E K, NO SOLO, APÓS A LIXIVIAÇÃO DE ACORDO COM AS DOSES DE APLICAÇÃO DE ESTERCO BOVINO	42
TABELA 16 - TEORES MÉDIOS DE N-NH ₄ , pH, CaCl ₂ , Al E K, NO SOLO, APÓS A LIXIVIAÇÃO DE ACORDO COM AS DOSES DE FERTILIZANTE MINERAL	42
TABELA 17 - TEORES MÉDIOS DE N-NH ₄ , N-NO ₃ , K, Ca, Mg E C, NO SOLO, APÓS A LIXIVIAÇÃO DE ACORDO COM A PROFUNDIDADE	43

LISTA DE GRÁFICOS

GRÁFICO 1 -	CONDUTIVIDADE ELÉTRICA (CE) DE ACORDO COM A APLICAÇÃO DE ESTERCO BOVINO (A), FERTILIZANTE MINERAL (B) E OS TURNOS DE LIXIVIAÇÃO.....	39
GRÁFICO 2 -	CORRELAÇÃO ENTRE CONDUTIVIDADE ELÉTRICA (CE) E CONCENTRAÇÃO DE N-NO ₃ DE ACORDO COM A APLICAÇÃO DE FERTILIZANTE MINERAL, ESTERCO BOVINO E TURNOS DE LIXIVIAÇÃO	39
GRÁFICO 3 -	CORRELAÇÃO ENTRE pH E CONCENTRAÇÃO DE N-NO ₃ DE ACORDO COM A APLICAÇÃO DE FERTILIZANTE MINERAL, ESTERCO BOVINO E TURNOS DE LIXIVIAÇÃO	40
GRÁFICO 4 -	TRANSMITÂNCIA MÉDIA DE ACORDO COM AS DOSES DE ESTERCO BOVINO (A) E DE FERTILIZANTE MINERAL (B) NOS TURNOS DE LIXIVIAÇÃO	41
GRÁFICO 5 -	pH MÉDIO DE ACORDO COM AS DOSES DE FERTILIZANTE MINERAL E OS TURNOS DE LIXIVIAÇÃO	41
GRÁFICO 6 -	TEORES MÉDIOS DE P, NO SOLO, APÓS A LIXIVIAÇÃO DE ACORDO COM A APLICAÇÃO DE FERTILIZANTE MINERAL E PROFUNDIDADE DO SOLO	45
GRÁFICO 7 -	CONCENTRAÇÃO MÉDIA DE N-NH ₄ E K NA ÁGUA PERCOLADA EM FUNÇÃO DA APLICAÇÃO DE GESSO E TURNOS DE LIXIVIAÇÃO	48
GRÁFICO 8 -	MÉDIAS DE P NA ÁGUA PERCOLADA EM FUNÇÃO DA APLICAÇÃO DE GESSO E TURNOS DE LIXIVIAÇÃO	48
GRÁFICO 9 -	MÉDIAS DE CONDUTIVIDADE ELÉTRICA NA ÁGUA PERCOLADA EM FUNÇÃO DA APLICAÇÃO DE GESSO E TURNOS DE LIXIVIAÇÃO	49
GRÁFICO 10 -	MÉDIAS DA TRANSMITÂNCIA NA ÁGUA PERCOLADA EM FUNÇÃO DA APLICAÇÃO DE GESSO E TURNOS DE LIXIVIAÇÃO	49
GRÁFICO 11 -	TEORES MÉDIOS DE Ca (A), Mg (B), E K (C) NO SOLO EM FUNÇÃO DA PROFUNDIDADE E APLICAÇÃO DE GESSO APÓS A LIXIVIAÇÃO	50
GRÁFICO 12 -	TEORES MÉDIOS DE P NO SOLO EM FUNÇÃO DO EXTRADOR UTILIZADO E PROFUNDIDADE DO SOLO.....	51
GRÁFICO 13 -	TEORES MÉDIOS DE P (A), N-NH ₄ (B) E N-NO ₃ (C) DO SOLO DOS TRATAMENTOS COM E SEM APLICAÇÃO DE GESSO EM FUNÇÃO DA PROFUNDIDADE E EXTRATOR APÓS A LIXIVIAÇÃO	52

LISTA DE QUADROS

QUADRO 1 - ROTAÇÃO DE CULTURAS DE VERÃO E INVERNO NA ÁREA EXPERIMENTAL DE CAMPO, ENTRE 1997 E 2004.....	13
QUADRO 2 - FERTILIZANTE MINERAL APLICADO DE ACORDO COM A CULTURA PARA 100% DA RECOMENDAÇÃO.....	14
QUADRO 3 - PARÂMETROS QUÍMICOS MÉDIOS DO SOLO ADJACENTE À ÁREA EXPERIMENTAL SOB CONDIÇÃO NATURAL (FASE FLORESTA OMBRÓFILA MISTA). AMOSTRA COLETADA EM 2004.....	15
QUADRO 4 - PROPORÇÃO MÉDIA DE MINERAIS NA FRAÇÃO ARGILA DO SOLO DE ACORDO COM A PROFUNDIDADE	15
QUADRO 5 - PARÂMETROS QUÍMICOS MÉDIOS DO SOLO ADJACENTE À ÁREA EXPERIMENTAL SOB CONDIÇÃO NATURAL FASE FLORESTA OMBRÓFILA MISTA COLETADA EM 2004	15
QUADRO 6 - QUANTIDADE APLICADA, POR COLUNA, DOS FERTILIZANTES MINERAIS, GESSO, E ESTERCO LÍQUIDO BOVINO DE ACORDO COM OS TRATAMENTOS	18
QUADRO 7 - QUANTIDADE APLICADA POR COLUNA E POR HECTARE DE NITROGÊNIO, FÓSFORO E POTÁSSIO TOTAL VIA FERTILIZAÇÃO MINERAL E ESTERCO DE ACORDO COM OS TRATAMENTOS.....	19
QUADRO 8 - QUANTIDADE APLICADA POR COLUNA DE NITROGÊNIO, FÓSFORO E POTÁSSIO SOLÚVEIS VIA FERTILIZAÇÃO MINERAL E ESTERCO DE ACORDO COM OS TRATAMENTOS.....	20
QUADRO 9 - TEORES DE NITROGÊNIO, FÓSFORO E POTÁSSIO NA FORMA TOTAL E SOLÚVEL, TEOR DE ATÉRIA SECA E pH DO ESTERCO LÍQUIDO BOVINO	20
QUADRO 10 -RELAÇÃO ENTRE TURNOS DE LIXIVIAÇÃO, VOLUME DE POROS E ÁGUA INFILTRADA ACUMULADA.....	21
QUADRO 11 -RELAÇÃO ENTRE TURNOS DE LIXIVIAÇÃO, VOLUME DE POROS E ÁGUA INFILTRADA ACUMULADA.....	22

RESUMO

A utilização de esterco na produção agrícola tem sido objeto de estudo devido a vários fatores, entre os quais a poluição da água. O objetivo geral deste trabalho foi avaliar a concentração e perda de nutrientes, especialmente do amônio, nitrato, fósforo e potássio, via lixiviação bem como a distribuição destes no perfil do solo em sistema de plantio direto. Colunas indeformadas de solo foram retiradas de um experimento de campo conduzido por sete anos em um Latossolo Bruno Ácrico envolvendo doses de esterco líquido de bovinos de leite e fertilizante mineral. Estas colunas de solo foram transportadas para laboratório onde depois de preparadas receberam os tratamentos correspondentes aos de campo, ou seja, uma combinação de três doses de fertilizante mineral (0, 50 e 100% do recomendado para o milho) e quatro doses de esterco bovino (0, 30, 60 e 90 m³ ha⁻¹ ano). Neste experimento inclui-se um tratamento adicional envolvendo a aplicação de gesso. Logo após a aplicação dos fertilizantes iniciou-se o processo de lixiviação sendo que a coleta da água percolada foi efetuada em cinco turnos ininterruptos, totalizando aproximadamente três volumes de poros ou 515,7 mm de água. Nas amostras de água, após filtração com 0,45 µm, analisou-se: pH, condutividade elétrica (CE), N nas formas de amônio (N-NH₄) e nitrato (N-NO₃), fósforo (P) e potássio (K). No solo avaliou-se, nas diferentes profundidades (0 a 5, 5 a 10, 10 a 20 e 20 a 40 cm): N-NH₄, N-NO₃, P, K, Ca, Mg, C, pH CaCl₂, pH SMP, Al e H+Al. Os resultados mostram, para a água percolada, aumento da concentração de N-NO₃ de acordo com as doses de fertilizante mineral; aumento de P e N-NH₄ com as doses de fertilizante orgânico; aumento de K com as doses de fertilizante mineral e orgânico; e aumento de N-NH₄, K, CE e transmitância com a adição de gesso. No solo houve redução do teor de N-NO₃, N-NH₄, K, C, Mg, P, Ca com a profundidade do solo. Para o esterco bovino, no solo, foi observado aumento de N-NH₄, pH e K e queda de Al com o aumento das doses. Para o fertilizante mineral, no solo, foi observado efeito similar exceto para o K.

Palavra-chave: nitrato, amônio, fósforo, potássio, lixiviação, fertilizante, esterco.

ABSTRACT

The use of manure in agriculture has been goal of research due to several factors, among them the water pollution. The main goal of this work was to evaluate concentration and losses of nutrients, particularly ammonium, nitrate, phosphorus and potassium, by leaching and the distribution of those on soil layers using no-till planting system. Undisturbed soil columns were collected from a field research conducted for seven years in an oxisol from Castro – Paraná state –Brasil, using dairy slurry manure and mineral fertilizers. The columns were brought to laboratory where, after being prepared, received treatment similar to the field, involving three doses of mineral fertilizer (0, 50 and 100% of the corn recommendation) and four doses of dairy slurry manure (0, 30, 60 and 90 m³ ha⁻¹ year). In this research was included one additional gypsum treatment. After the treatment was add on the soil surface the leaching process was become, and, it was made in five continuous turns, making, approximately, three soil volumes or 515,7 mm of water. The water sample, after filtered in a 0,45 µm filter, was analyzed for pH, electric conductivity (EC), ammonium N (NH₄-N), nitrate nitrogen (NO₃-N), phosphorus (P), and potassium (K). The parameters analyzed in soil, in different depth (0 to 5, 5 to 10, 10 to 20, and 20 to 40 cm), were: NH₄-N, NO₃-N, P, K, Ca, Mg, C, pH CaCl₂, pH SMP, Al e H+Al. In water leached, the NO₃-N concentration increased with the mineral fertilizer doses; the P and NH₄-N increased with manure; the K increased with manure and mineral fertilizers; and NH₄-N, K, EC and transmittance increased in gypsum treatment. In soil it was observed a decrease on NH₄-N, NO₃-N, K, C, Mg, P and Ca level with the soil depth. Increase of NH₄-N, pH and K, and decrease of Al was observed in soil due to manure application. Similar results were observed for mineral fertilizer in soil, except for K.

Key-world: nitrate, ammonium, phosphorus, potassium, leaching, fertilizer, manure.

1. INTRODUÇÃO

A água é essencial para o desenvolvimento e manutenção da vida, porém esta tem sido cada vez mais contaminada, devido à utilização incorreta da mesma. Entre as possibilidades de uso destaca-se, em termos de prioridade segundo a legislação, o abastecimento para consumo doméstico. Os outros usos são: turismo, transporte, recreação, indústria, geração de energia e agricultura (TUNDISI, 2003).

Na agricultura se vê uma crescente adoção de técnicas recomendando a utilização de esterco de animais, principalmente como alternativa à aplicação dos fertilizantes minerais tradicionais. Entretanto, dúvidas existem principalmente no que se refere à interação desta forma alternativa de adubação com o meio ambiente, seu efeito nos recursos naturais e a poluição que pode ocasionar na água.

As formas de poluição podem ser diferenciadas em pontual e não pontual (difusa). A primeira consiste numa aplicação direta do poluente no corpo d'água – escorrimento das pocilgas, lavagem do taque de pulverização, descarte de resíduos, descargas de efluentes de estações de tratamento de esgoto, entre outros. A segunda consiste numa poluição que indiretamente chega aos corpos d'água – como, por exemplo, a aplicação de fertilizantes e defensivos agrícolas nas lavouras, os quais, pelo processo de erosão, lixiviação ou fluxo preferencial transporta os poluentes para os corpos d'água (LAL e STEWART, 1994; PIERZYNSKI, SIMS e VANCE, 2000).

A eutrofização está presente em diversos rios e é uma ameaça para lagos e reservatórios no mundo inteiro, sendo ainda maior dentro, ou na proximidade, de cidades devido à rápida adição de nutrientes seja via poluição pontual ou não pontual (KEMKA et al., 2006). Esta adição de nutrientes pode levar ao desenvolvimento excessivo da biota aquática, conseqüentemente diminuindo o oxigênio dissolvido na mesma. Entre os nutrientes envolvidos no processo de eutrofização encontram-se o N e o P, no entanto o P tem sido considerado o principal elemento limitante. O N, essencial ao crescimento de plantas, se aplicado em quantidade desnecessária pode causar problemas para a saúde humana e animal bem como para o meio ambiente,

além de aumentar o custo de produção. Este elemento, apesar de ser responsável pela eutrofização, não é considerado limitante por causa da troca com a atmosfera bem como da fixação pelas algas. O P, além de ser essencial ao crescimento vegetal, não é freqüente em sistemas aquáticos, de forma que, a sua inserção nestes sistemas pode levar ao processo de eutrofização (CORRELL, 1998).

A diminuição dos problemas ambientais através de práticas de manejo do solo tem sido pesquisada em diferentes condições. Recentemente estudos indicam que o uso de gesso na agricultura tem potencial na mitigação da perda de P via escoamento superficial e subsuperficial (FAVARETTO, 2002; McDOWELL e SHARPLEY, 2001; SHAINBERG et al., 1989).

O potencial de contaminação da água não está restrito somente ao período posterior à adição do nutriente ou em momentos de alta precipitação pluviométrica, já que o solo atua como agente tamponante, e é capaz de reter nutrientes e liberá-los gradativamente à solução do solo. Se estes nutrientes chegarem ao lençol freático, estes passarão a fazer parte da água subterrânea, a qual poderá apresentar valores elevados chegando a causar problemas, não só a saúde humana, mas também ao meio ambiente. A contaminação da água subterrânea torna-se também um problema de contaminação de água superficial, pois a água do subsolo em algum momento aflora à superfície formando nascentes e, conseqüentemente, constituindo os cursos de água de superfície.

O objetivo geral deste trabalho foi avaliar a perda de nutrientes via lixiviação bem como a distribuição destes no perfil do solo em sistema de plantio direto sob fertilização mineral e orgânica com esterco líquido de bovinos. Nos objetivos específicos avaliou-se: 1) A concentração e perda de amônio, nitrato, fósforo e potássio na água percolada em colunas indeformadas de solo; 2) A distribuição de amônio, nitrato, fósforo e potássio no perfil do solo após intensa lixiviação; 3) O efeito do gesso agrícola no transporte via lixiviação bem como a distribuição no perfil do solo de amônio, nitrato, fósforo e potássio.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. PARÂMETROS QUÍMICOS DO SOLO

2.1.1. Retenção de íons no perfil do solo

A concentração de nutrientes no solo depende da capacidade do solo em reter cátions ou ânions. Qualquer elemento químico presente no solo, que não esteja ligado às estruturas, minerais ou orgânicas do solo, está na solução do solo, podendo ser transportado pela água para camadas mais profundas, algumas vezes chegando ao lençol freático, contaminando-o (PREVEDELLO, 1996).

As características químicas e mineralógicas de um solo são influenciadas por diversos fatores, entre os quais: capacidade de retenção de íons, pH, disponibilidade de nutrientes, salinidade, condutividade e presença de elementos tóxicos (LAL, MOKMA e LOWERY, 1998). Complementado esta idéia PREVEDELLO (1996) afirma que a água tem sua qualidade melhorada na passagem pelo sistema matricial do solo, devido à retenção de nutrientes e sedimentos em suspensão no perfil do solo. O autor destaca que essa capacidade de reter os nutrientes é particularmente acentuada nos solos argilosos, principalmente os originários do basalto e altamente intemperizados, como os Latossolos, os quais, por possuírem uma mineralogia que desenvolve tanto cargas positivas como cargas negativas, têm a capacidade de reter os principais ânions e cátions presentes em solução que possam vir a percolar no perfil do solo. Assim, pode-se utilizar o potencial de retenção de água no solo como agente de estocagem natural e liberação lenta às nascentes e fontes dos cursos de água e lençóis subterrâneos.

O P, no solo, tem retenção diferenciada de grande parte dos demais nutrientes. Especial atenção deve ser dada à adsorção específica deste elemento em solos ácidos. Tal adsorção ocorre devido à troca da hidroxila (OH) pelo íon fosfato na superfície dos óxidos e hidróxidos de Fé e Al. Esta substituição ocorre em duas fases, sendo a primeira rápida e ainda reversível, lábil, estando presente a ligação Al-O-P. Já,

a segunda, tem uma desorção bem menor por ser composta de uma ligação entre dois íons Al ou Fe com o P (BÖRLING, 2003).

ZHOU, TANG e WANG (2005) destacam uma rápida adsorção de P nas primeiras cinco horas após a adição do mesmo, sendo esta, seguida de uma adsorção mais lenta até a quadragésima oitava hora. A partir deste ponto há um equilíbrio. Estes autores destacam, também que a forma de melhor adsorção do P é na forma de H_2PO_4 , estando o pH do solo entre 2 e 8. MOTTA et al. (2002) também comenta sobre duas fases de fixação do P no solo, sendo a primeira rápida e dependente da dose de P aplicada, a qual ocorre em um período de 5 horas, e outra mais lenta, que finaliza entre a 20ª e 48ª hora após a aplicação do P.

É importante ressaltar a importância da mineralogia do solo na dinâmica do P. A alta capacidade de retenção do P pelos solos, principalmente os com altas taxas de óxidos como os Latossolos, tem sido demonstrada (MOTTA et al., 2002; FONTES, 1996). MOTTA et al. (2002) comenta que o papel da caulinita é secundário na adsorção de P se comparado aos óxidos (gibbsita, hematita e goetita). Estes autores observaram uma menor capacidade de solos cultivados adsorverem o P do que quando comparado com o solo não cultivado, e sugeriram algumas possibilidades para tal fato, entre as quais: diminuição das cargas positivas do solo devido à calagem; maior decomposição da matéria orgânica devido à calagem e a remoção de precipitados de P na solução do solo.

PHILLIPS e BURTON (2005), em experimento envolvendo um “Spodosol” observaram a tendência dos cátions K e NH_4 ficarem mais retidos nas camadas inferiores do solo e justificaram tal fato pela preferência da matéria orgânica reter os cátions multivalentes, já que, quanto maior a profundidade menor a presença de matéria orgânica. Estes autores também comentaram que o solo teve uma preferência para reter o K em relação ao NH_4 e atribuíram grande parte da retenção dos cátions K e NH_4 à capacidade de troca de cátions do solo.

2.1.2. Efeito do esterco e da profundidade do solo

O pH do solo é utilizado como indicativo das condições gerais da fertilidade do solo (TOMÉ, 1997), devido à influência, direta ou indireta, que este tem nas reações químicas do mesmo (SILVA, 2005). WALKER, CLEMENTE e BERNAL (2004) observaram que a aplicação de esterco bovino previne a acidificação do solo e reduz a disponibilidade de metais devido ao aumento do pH causado no solo.

SILVA (2005) observou que, para a acidez potencial ($H + Al$), em sistema de plantio direto, ocorreu comportamento inverso entre pH e $H + Al$, na camada superficial do solo (0 a 5 cm). Este autor verificou também, queda da acidez potencial com o uso de esterco bovino, porém este efeito não ocorreu na camada de 30 a 50 cm de profundidade e aumento da acidez potencial na camada subsuperficial (5 a 10), no entanto, não teve condições de avaliar o efeito do esterco em relação à acidez trocável devido aos altos índices de pH observados.

Com relação aos valores de C no solo, SILVA (2005) não observou efeito da adubação mineral ou orgânica, no entanto, observou que os teores variaram de médio a alto desde a camada superficial até a profundidade de 80 cm. TOMÉ (1997) destaca algumas vantagens de altos valores de C, entre os quais: alta CTC total do solo, possibilidade na redução da adubação nitrogenada, maior disponibilidade de nutrientes e maior complexação de metais.

FRANCHI (2002) e PORT (2002) observando a dinâmica do N, no solo, notaram que a taxa de nitrificação é favorecida pelo aumento das doses de esterco suíno, e, perceberam, também, que, praticamente todo o $N-NH_4$ aplicado sofre nitrificação nos primeiros dias após a aplicação dos dejetos (25 dias com temperatura média de 11,6° C e 16 dias com temperaturas médias de 20°C). Ainda observaram aumento de N mineral proporcional à dose aplicada e lixiviação de $N-NO_3$ abaixo de 60 cm de solo. PORT (2002) também reparou que o aumento de $N-NO_3$ é proporcional à queda de $N-NH_4$.

LANGE et al. (2006) trabalhando com N e palha em plantio direto

observaram aumento de carbono orgânico na camada de 0 a 2,5 cm e de K até os 20 cm. Os valores de Ca e Mg variaram de 3,9 e 1,4 $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$, na superfície, a 1,0 e 0,4 $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ nas camadas mais profundas, sendo que, nas doses mais elevadas de N foram observados os menores valores de Ca e Mg.

SILVA (2005), em estudo envolvendo plantio direto e diferentes doses de esterco e fertilizante mineral, observou ocorrência de gradiente da concentração de P, com rápido decréscimo em profundidade. Este autor comenta a expectativa de movimentação de P nestas condições de estudo devido à alta atividade biológica e ao grande número de bioporos, porém não observou transporte de P em subsuperfície. MOTTA et al. (2002) comenta que, devido à baixa mobilidade de P no solo e ao acúmulo devido à aplicação do P superficial em plantio direto, seja via fertilização mineral ou orgânica, faz com que seja comum acúmulo nas camadas superficiais do solo.

PARHAM et al. (2002) observando diferentes maneiras de fertilização do solo observou que entre 77 a 86% do P aplicado na forma inorgânica foi recuperado nas colheitas ou permaneceu nos 30 cm superficiais do solo, enquanto apenas 32% do P aplicado na forma de esterco foi recuperado. Sugerindo que o P aplicado na forma de esterco é relativamente mais móvel que o aplicado na forma inorgânica.

SILVA (2005) não obteve diferença significativa para o K quando observada a fertilização mineral, entretanto, para a fertilização com esterco bovino notou que esta afetou positivamente os teores de K até os 50 cm de profundidade.

SILVEIRA et al. (2000) observaram que os valores médios de pH, Ca, Mg, P e K são maiores na camada superficial do solo (0 a 5cm) em sistema plantio direto quando comparado com os sistemas com utilização de grade ou arado. Observaram, também, os menores valores de pH, Ca, Mg e K e os maiores valores de P nas camadas subsuperficiais (5 a 20 cm) para o sistema de plantio direto.

SILVEIRA et al. (2005) observou que a utilização de plantio direto contínuo contribuiu para o aumento de Ca, Mg, P, K e matéria orgânica na camada de 0 a 5 cm de profundidade.

2.2. CONTAMINAÇÃO DA ÁGUA

LAL e STEWART (1994) destacam que a atividade agrícola pode ter efeito na qualidade da água superficial como da água subterrânea. A água pode ser afetada devido à conversão de florestas para áreas agrícolas e ao aumento na utilização de insumos (fertilizantes minerais, esterco, pesticidas e outros resíduos orgânicos), os quais podem chegar aos rios através das enxurradas, na forma solúvel ou adsorvido nos sedimentos. Já, para as águas subterrâneas, destacam o transporte de elementos químicos via lixiviação e fluxo preferencial.

MERTEN e MINELLA (2002) discutem a contaminação dos recursos hídricos pela agricultura intensiva e pela atividade pecuária. Com relação à agricultura intensiva, o aumento da utilização de P nas formas prontamente solúveis tem levado a uma contaminação da água (lixiviação para água subterrânea e erosão do solo e enxurrada para água superficial. Com relação a atividade pecuária estes autores discutem que a produção de animais em sistema de confinamento provoca uma grande concentração de nutrientes numa área pequena.

KLADIVSKO et al. (1991) observaram, em um solo siltoso de Indiana, que as perdas de fósforo solúvel, potássio e amônio, quando drenadas subsuperficialmente foram pequenas e muito variáveis, enquanto o nitrato apresentou a maior perda entre os nutrientes estudados.

2.2.1. Contaminação por nutrientes

2.2.1.1. Nitrogênio

A contaminação da água pelo N tem recebido especial atenção já que este elemento é essencial ao crescimento de plantas e o mais utilizado na agricultura comercial. O N quando aplicado em excesso no solo, pode acabar sendo transportado para a água, contaminando-a. Além da contaminação ambiental, o excesso de N pode

levar à ocorrência de problemas de saúde animal, vegetal e humana. Entre tais impactos destacam-se a metahemoglobina, conhecida como síndrome do bebê azul, câncer, doenças pulmonares, desenvolvimento vegetativo excessivo e eutrofização dos rios (OWENS, 1994).

O N é associado com a acelerada eutrofização, porém, algumas plantas aquáticas têm capacidade de realizar a fixação biológica de N diminuindo, com isso, a necessidade de uma fonte externa, e, portanto, caracterizando o P como o principal responsável pela eutrofização (CORRELL, 1998; DANIEL, SHARPLEY e LEMUNYON, 1998). Perdas de N ao contrário do P, tem sido freqüentemente associadas com a lixiviação devido à alta mobilidade, especialmente na forma de nitrato.

BOTTCHER, MONKE e HUGGINS (1981) observam que a perda de N em subsuperfície é maior em solos arenosos devido ao maior movimento da água, e, em solos não cultivados devido a não absorção deste. Desse N total perdido por área, em torno de 90% é perdido por movimentação de água no interior do perfil do solo, não associada à perda de sedimentos superficiais. Complementando esta visão, FASSBENDER (1986) divide as formas de N no solo como formas orgânicas, com cerca de 97% do total, e inorgânicas (óxido nitroso, óxido nítrico, dióxidos, nitrito, amônia, nitrato e amônio), com menos dos 3% restantes, destacando as formas de nitrato e do amônio por serem formas disponíveis mais abundante para as plantas. De modo geral, as duas formas apresentam características distintas quanto à mobilidade. O cátion (NH_4) é menos móvel, e pode, na presença de minerais de argila 2:1, ficar retido entre as camadas deste, enquanto o ânion (NO_3) é altamente dependente das cargas positivas do solo sendo mais móvel. Apesar de constarem maiores perdas de N no solo na forma de nitrato, SMITH, SCHEPERS e PORTER (1990), indicam que perdas significativas de N nas formas de amônio podem ocorrer em solos arenosos devido à baixa CTC. Já PHILLIPS e BURTON (2005) atribuem a rápida lixiviação do N-NH_4 aos caminhos preferenciais.

Na comparação das diferentes formas de N do solo quanto à mobilidade, WHITE, HENG e MAGESAN (1998) indicam que a variação pode ser, também,

relacionada à infiltração de água no solo e ao sistema de manejo do solo – se plantio: direto, convencional ou mínimo. OWENS (1994) justifica a maior perda de $N-NO_3$ nos solos com plantio direto devido à maior presença de macroporos quando comparado ao plantio convencional. Isto é, o elemento movimenta-se em canais ou bioporos criados por raízes após decomposição e por macroorganismos como larva de coleópteros e anelídeos.

HERRMANN, PUST e POTT (2005) observaram que a percolação de amônio e nitrato não depende apenas da quantidade aplicada, mas também da umidade do solo e da precipitação. Assim, a variação na precipitação no decorrer do ano pode proporcionar mudança no grau de movimentação de nitrato (WHITE, HENG e MAGESAN, 1998). Os autores indicam que a movimentação de nitrato pode ocorrer até 180 cm de profundidade, quando aplicado na época de chuvas, enquanto, se aplicado na estação de menor precipitação a movimentação dificilmente passa dos 30 cm. Contudo, OWENS (1994) observou que a ocorrência de uma chuva leve ou de baixa intensidade transporta os solúveis para a matriz do solo reduzindo o potencial de transporte pelos macroporos nas chuvas subseqüentes.

BAKSH, KANWAR e KARLEN (2005) comentam que muitos estudos têm demonstrado um aumento da contaminação dos corpos de água com nitrato devido à aplicação dos fertilizantes nitrogenados. Estes autores também comentam que ainda não é conhecido como os elementos aplicados através do esterco se locomovem no perfil do solo, no entanto sabe-se que é mais complexo do que os fertilizantes minerais. GARG, JHA e KAR (2005) comentam que a aplicação de fertilizantes na atividade agrícola, aumenta a poluição da água principalmente na forma intensiva, propiciando acúmulo de nitrato tanto na superfície como na subsuperfície. Este acúmulo de nitrato desloca-se para os aquíferos, elevando os valores de nitrato na água potável para os valores superiores aos permitidos.

A legislação nacional estabelece os valores máximos permitidos de nitrogênio, nas formas de nitrato e amônio na água, através de alguns órgãos. Segundo a Resolução da ANVISA nº 54, de 15 de junho de 2000 (BRASIL, 2000), o valor máximo para nitrato é de 50 mg L^{-1} , aproximadamente 10 mg L^{-1} de $N-NO_3$, para água

mineral natural e água natural envasada, obtida diretamente de fontes naturais ou artificialmente captadas de origem subterrânea. O Ministério da Saúde através da Portaria nº 518, de 25 de março de 2004 (BRASIL, 2004) também admite como aceitável para consumo humano o padrão de 10 mg L^{-1} de N-NO_3 . Este valor de N-NO_3 é também exigido pelo CONAMA através da Resolução nº 357, de 17 de março de 2005 (BRASIL, 2005) para água doce em todas as suas classes.

Para o N-amoniaco total (N-NH_3 e N-NH_4), o CONAMA através da Resolução nº 357, de 17 de março de 2005 (BRASIL, 2005) admite valores de acordo com a classe e o pH das águas superficiais, sendo que, para a água doce classe especial, classe 1 e classe 2 estes valores são: $3,7 \text{ mg L}^{-1}$ para $\text{pH} \leq 7,5$; $2,0$ para pH entre 7,5 e 8,0; $1,0$ para pH entre 8,0 e 8,5; e $0,5$ para $\text{pH} \geq 8,5$. Já, o Ministério da Saúde, através da Portaria nº 518, de 25 de março de 2004 (BRASIL, 2004) admite para consumo humano até $1,5 \text{ mg L}^{-1}$ de NH_3 , o que equivale a $1,24 \text{ mg L}^{-1}$ de N-NH_3 .

2.2.1.2. Fósforo

A importância do P na poluição das águas é devido ao papel na eutrofização. Muitos trabalhos mostram a importância da erosão e enxurrada devido à relativa imobilidade do fósforo no solo (FAVARETTO, 2002; SHARPLEY, McDOWELL e KLEINMAN, 2001). A perda por lixiviação não tem sido motivo de preocupação, no entanto, existem situações onde as perdas em subsuperfície podem ser significativas, entre as quais a superfertilização e o uso excessivo de matéria orgânica (SIMS, SIMARD e JOERN, 1998).

O transporte de P do solo para a água pode ocorrer de duas maneiras bem distintas. A primeira via enxurrada e erosão (perdas superficiais) e a segunda, via lixiviação fluxo preferencial (perdas subterrâneas) (SHARPLEY, McDOWELL e KLEINMAN, 2001).

As perdas devido às enxurradas e erosão podem chegar a valores entre 75 e

90% das perdas de P e são influenciadas por diversos fatores, entre os quais: quantidade, tipo de fertilizante e método de aplicação; intensidade e tempo da chuva após a aplicação do P; cobertura vegetal. Com relação às perdas subterrâneas, estas são bem menores que as perdas superficiais podendo ser inferiores a 1% do P total aplicado (SHARPLEY e HALVORSON, 1994). FORTUNE (2005) comenta que as perdas de P por lixiviação são insignificantes em termos econômicos para o produtor, porém começam a ter importância em termos de eutrofização, já que valores de 0,20 a 0,03 mg de P L⁻¹ na água podem desencadear este processo.

Em relação ao P perdido por lixiviação, McDOWELL e SHARPLEY (2001) observaram que, quanto maior for a quantidade de P aplicado, maior será a perda deste por lixiviação, sendo a aplicação de esterco animal responsável pelo movimento do P no perfil do solo. SIMS, SIMARD e JOERN (1998) descrevem que a lixiviação de P pode ocorrer em solos arenosos e profundos, com alta quantidade de matéria orgânica ou mineral. No entanto, as perdas observadas devido a lixiviação são menores do que as observadas devido à enxurrada.

A aplicação de P, na forma inorgânica, fica limitada aos primeiros 40 cm do perfil do solo e os fatores responsáveis pela lixiviação do P são fatores intrínsecos aos solos como os mecanismos de transporte da água e a capacidade de sorção do P, além da presença de fluxo preferencial nos macroporos (BÖRLING, 2003; DJODJIC e BERGSTRO, 2005).

SHARPLEY e HALVORSON (1994) comentam que a disponibilidade do fósforo para as plantas depende da taxa de aplicação deste no solo. Esta taxa afeta as características de desorção, adsorção e difusão do P na matriz do solo. SHARPLEY e HALVORSON (1994) comentam da possibilidade de serem feitas altas adubações de fósforo ao invés de aplicações anuais. Também a aplicação de esterco, baseada na necessidade de nitrogênio, tem levado a um acúmulo de fósforo. Fato este devido à baixa necessidade de P quando comparado à necessidade de N pela planta e a presença de doses praticamente iguais no esterco (RAIJ, 1991). Como existe a produção durante diversos anos sem grande movimentação do solo, todos estes fatores levam a um

acúmulo de P, o qual, do ponto de vista da qualidade da água requer uma diminuição deste acúmulo, podendo, caso não evitado, levar a eutrofização de lagos e rios.

Os valores aceitos, pela legislação, através da Resolução do CONAMA nº 357 de 2005 (BRASIL, 2005), para água doce classe especial e classe 1 são divididos de acordo com o ambiente da água. Em ambientes lênticos, o CONAMA admite valores de $0,02 \text{ mg L}^{-1}$ de P total, em ambientes intermediários e tributários diretos, admite valores de $0,025 \text{ mg L}^{-1}$ de P total e, em ambientes lóticos e tributários de ambientes intermediários, admite valores de $0,1 \text{ mg L}^{-1}$ de P total. A água doce classe especial e classe 1 são destinadas ao consumo humano após desinfecção e tratamento simplificado, respectivamente.

2.3. EFEITO DO GESSO NO TRANSPORTE DE NUTRIENTES DO SOLO PARA A ÁGUA

O gesso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) é um mineral comumente utilizado na agricultura como fonte de Ca e condicionador do solo. Vantagens significativas podem ser obtidas da utilização do gesso no solo, entre as quais o fornecimento de cálcio e a diminuição da toxidez por alumínio. O uso do gesso não só aumenta a concentração de elementos na solução como também provém Ca à CTC do solo (SHAINBERG et al., 1989).

Diversos estudos (FAVARETTO, 2002; ALVA, PRAKASH e PARAMASIVAM, 1998; SHANIBERG et al., 1989; McPHARLIN et al., 1994) tem sido desenvolvidos para observar o efeito do gesso no perfil do solo. Aumento de Ca e decréscimo de Al no perfil do solo tem sido um resultado comum entre os trabalhos. O magnésio, e, eventualmente o K, são deslocados da camada superficial para a subsuperfície do solo, podendo ser completamente removido.

FAVARETTO (2002) aplicando gesso em um solo de textura siltosa observou menores concentrações de P e maiores concentrações de N-NH_4 , não observando diferença significativa para o N-NO_3 na água lixiviada quando comparado

com o tratamento sem aplicação de gesso. Já, McPHARLIN et al. (1994) ao comparar tratamentos sem e com aplicação de gesso, em um solo de textura arenosa, encontrou menores concentrações de P e de N-NH₄ na água lixiviada e não observou diferença significativa para o N-NO₃. ALVA, PRAKASH e PARAMASIVAM (1998) ao analisar o transporte das formas de N em um solo arenoso observou que a aplicação de gesso não influenciou a perda de N-NO₃ aplicado na forma de nitrato de cálcio, mas observou redução quando este foi aplicado na forma de nitrato de amônio além de aumento na concentração de N-NH₄ na água lixiviada.

3. MATERIAL E MÉTODOS

O presente trabalho foi realizado no Departamento de Solos e Engenharia Agrícola da Universidade Federal do Paraná, sendo as colunas indeformadas de solo coletadas da Fazenda Capão Alto, localizada em Castro, num experimento de campo da Fundação ABC para Assistência e Divulgação Técnica Agropecuária. O experimento de campo foi implantado em novembro de 1997 sobre um Latossolo Bruno Ácrico, A proeminente, textura argilosa, fase campo subtropical com relevo suave ondulado (EMBRAPA/ Fundação ABC).

A coleta das colunas foi feita em novembro de 2004, anterior ao plantio da cultura de verão e, portanto após sete anos de condução do experimento. Na área da coleta das colunas foi realizado um sistema de rotação utilizando sorgo, milho, aveia preta e azevém como descrito no QUADRO 1.

QUADRO 1 - ROTAÇÃO DE CULTURAS DE VERÃO E INVERNO NA ÁREA EXPERIMENTAL DE CAMPO, ENTRE 1997 E 2004

ANO	CULTURA DE VERÃO	PLANTIO (dia/ mês)	CULTURA DE INVERNO	PLANTIO (dia/ mês)
1997/1998	Sorgo (2005)	01 a 20/11	Aveia Preta (comum)	01 a 20/05
1998/1999	Milho (AG 9012)	20/09 a 10/10	Azevém (comum)	01 a 20/03
1999/2000	Milho (AG 9012)	20/09 a 10/10	Azevém (comum)	01 a 20/03
2000/2001	Sorgo (2005)	01 a 20/11	Aveia Preta (comum)	01 a 20/05
2001/2002	Milho (AG 9012)	20/09 a 10/10	Azevém (comum)	01 a 20/03
2002/2003	Milho (AG 9012)	20/09 a 10/10	Azevém (comum)	01 a 20/03
2003/2004	Sorgo (2005)	01 a 20/11	Aveia Preta (comum)	01 a 20/05

Fonte: Dados fornecidos pela Fundação ABC através do Eng^o Agr^o M. Sc. Volnei Pauletti (Com. Pessoal).

O experimento de campo realizado pela Fundação ABC consistiu de 12 tratamentos num esquema fatorial em parcelas subdivididas em três blocos. Os tratamentos consistiam de três doses de fertilizante mineral (0, 50 e 100%, da adubação de base recomendada para as culturas), e quatro doses de adubação orgânica (0, 30, 60 e 90 m³ ha⁻¹ ano de esterco líquido bovino).

A dose de esterco referente a cada tratamento foi dividida em duas aplicações, uma antes do plantio de verão e outra antes do plantio de inverno, em superfície, sem incorporação. O esterco utilizado foi proveniente da criação de gado leiteiro, em sistema intensivo de manejo em galpões de confinamento, onde os animais permanecem confinados durante todo o tempo, recebendo alimentação completa no cocho (silagem, ração e sal mineral).

A adição de fertilizante mineral no campo foi efetuada de acordo com a cultura utilizada. No QUADRO 2 encontram-se a quantidade aplicada para 100% da recomendação em função da cultura.

QUADRO 2 - FERTILIZANTE MINERAL APLICADO DE ACORDO COM A CULTURA PARA 100% DA RECOMENDAÇÃO

CULTURA	PLANTIO (kg ha ⁻¹)	FÓRMULA	COBERTURA (kg ha ⁻¹)	FÓRMULA
Sorgo (2005)	300	10-20-20+Zn	200	45-00-00
Milho (AG 9012)	300	10-20-20+Zn	200	45-00-00
Aveia Preta (comum)	200	10-20-20	150	25-0-25
Azevém (comum)	100	DAP	150/ corte	36-00-12

Fonte: Dados fornecidos pela Fundação ABC através do Eng^o Agr^o M. Sc. Volnei Pauletti (Com. Pessoal).

Desta área experimental foram coletadas as colunas indeformadas de solo para a condução do experimento de lixiviação em laboratório, sendo coletada uma coluna por parcela experimental do campo, ou seja, 12 tratamentos com três repetições.

Os dados apresentados no QUADRO 3 foram obtidos de SILVA (2005) e representam a área sob condição natural.

A análise mineralógica foi obtida por termogravimétrica (ATG) após desferrificação da argila. A proporção de minerais da fração argila encontra-se no

QUADRO 4 e representa a média dos três blocos de campo no tratamento testemunha nas respectivas profundidades.

QUADRO 3 - PARÂMETROS QUÍMICOS MÉDIOS DO SOLO ADJACENTE À ÁREA EXPERIMENTAL SOB CONDIÇÃO NATURAL (FASE FLORESTA OMBRÓFILA MISTA). AMOSTRA COLETADA EM 2004

PROFUNDIDADE (cm)	pH		H+Al	Al	K	Ca	Mg	P Mehlich	C	MO	V
	CaCl ₂	SMP									
0 a 5	4,2	5,1	9,7	2,7	0,21	0,5	0,15	8,2	49,8	85,7	8,1
5 a 10	4,1	5,0	10,5	3,4	0,10	0,1	0,10	3,5	38,9	66,9	1,9
10 a 30	4,2	5,2	9,0	3,3	0,07	0,1	0,0	2,3	36,5	62,8	0,9
30 a 50	4,3	5,6	6,7	2,6	0,04	0,0	0,0	1,5	26,9	46,3	0,6
50 a 80	4,4	5,5	7,2	2,3	0,04	0,0	0,0	2,8	23,2	39,9	0,6

Fonte: SILVA (2005)

QUADRO 4 - PROPORÇÃO MÉDIA DE MINERAIS NA FRAÇÃO ARGILA DO SOLO DE ACORDO COM A PROFUNDIDADE

Profundidade (cm)	Gibbsita (%)	Caulinita (%)	Outros (%)
0 a 5	33,45	66,55	0,00
5 a 10	29,16	49,91	20,93
10 a 20	31,92	62,78	5,29
20 a 40	30,23	61,98	7,79

O clima da região segundo Koppen é classificado como Cfb, clima mesotérmico, úmido e superúmido, sem estação seca, com verões frescos e geadas severas no inverno (MAACK, 1981). No QUADRO 5 encontram-se os dados climatológicos, médias dos 30 anos da região de Castro.

QUADRO 5 - PARÂMETROS QUÍMICOS MÉDIOS DO SOLO ADJACENTE À ÁREA EXPERIMENTAL SOB CONDIÇÃO NATURAL FASE FLORESTA OMBRÓFILA MISTA COLETADA EM 2004

PROFUNDIDADE (cm)	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
Prec. (mm)	193	156	142	111	125	127	90	84	126	146	116	158
Temp (°C)	20,4	19,8	19,6	17,1	14,2	12,5	12,0	13,7	14,1	16,3	16,6	17,5

Fonte: Dados fornecidos pela Fundação ABC através do Eng^o Agr^o M. Sc. Volnei Pauletti (Com. Pessoal).

3.1. COLETA E PREPARO DAS COLUNAS DE SOLO

A coleta das colunas indeformadas de solo (40 centímetros de altura por 10 centímetros de diâmetro) foi realizada em novembro de 2004, utilizando-se tubos de

PVC untados interna e externamente com óleo motor visando facilitar a penetração do tubo tanto no aparelho como no solo.

Após todos os tubos terem sido untados foi iniciada a retirada das colunas, utilizando-se um aparelho conectado ao hidráulico do trator (FOTO 1). Retiraram-se colunas indeformadas em cada tratamento nos três blocos, totalizando 36 colunas. Além destas retiraram-se mais três colunas no tratamento com a maior dose de adubação ($90 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ de esterco líquido bovino e 100% mineral) para testar o efeito do gesso nesta condição.

FOTO 1 - PREPARO DO TUBO DE PVC PARA INSERÇÃO NO APARELHO (ESQUERDA); APARELHO COLETANDO SOLO (CENTRO); TUBO DE PVC SENDO RETIRADO DO APARELHO APÓS COLETA DE SOLO (DIREITA)



As colunas retiradas do campo foram transportadas para o laboratório do Departamento de Solos e Engenharia Agrícola da UFPR onde foram preparadas para a condução do experimento de lixiviação. No laboratório, as colunas ficaram em repouso durante duas semanas para a secagem do solo nas colunas visando à formação de um espaço entre as colunas de solo e o tubo de PVC por onde foi aplicada a parafina derretida visando evitar o escoamento lateral da água a ser aplicada por gotejamento na superfície. Após a aplicação da parafina as extremidades do tubo foram protegidas. Na extremidade superior da coluna foi colocado um tecido voil, visando evitar o contato direto entre solo e areia. Sobre o tecido colocou-se uma camada de areia a qual foi anteriormente lavada com HCl 3% e água deionizada. Sobre a areia colocou-se uma folha de papel filtro. Tanto a areia como o papel filtro foram utilizados com o objetivo de melhorar a distribuição da água sobre a superfície do solo

(FOTO 2). Na extremidade inferior da coluna foi colocado o tecido voil sob o sombrite (colocado para suportar o peso da coluna de solo), e um funil cujo interior tinha areia (lavada com HCl 3% e água deionizada) envolta por tecido voil. Todo este conjunto foi fechado com aplicação de vedante hidráulico e fita adesiva (FOTO 3).

Concluída a etapa da preparação das colunas iniciou-se a saturação das mesmas por capilaridade com água deionizada. Como foi constatado vazamento em algumas colunas iniciou-se, então, a saturação via superfície, utilizando-se os gotejadores para saturar as colunas de solo. Estas foram saturadas durante o dia, ficando saturadas durante o período noturno, e drenadas pela manhã. Este procedimento foi repetido uma segunda vez.

FOTO 2 - PREPARAÇÃO DA PARTE SUPERIOR DAS COLUNAS ANTES DA APLICAÇÃO DOS TRATAMENTOS: ADIÇÃO DE PARAFINA (A); COLOCAÇÃO DO TECIDO VOIL (B); MEDIDA DE AREIA (C); AREIA SOBRE TECIDO VOIL (D); COLOCAÇÃO DO PAPEL FILTRO (E)



FOTO 3 - VISÃO DO EXPERIMENTO: INÍCIO DA LIXIVIAÇÃO (A); COLETA DA ÁGUA (B)



Após a segunda saturação e respectiva drenagem, as colunas foram submetidas aos tratamentos, os quais foram constituídos de uma combinação de quatro doses de esterco líquido bovino (0, 30, 60 e 90 m³ ha⁻¹) com três doses de fertilizante

mineral (0, 50 e 100% da recomendação de base para o milho na região). Recomenda-se para a cultura do milho na região: 120 kg N, 60 kg P₂O₅ e 60 kg de K₂O por hectare.

Além destes tratamentos incorporou-se um tratamento adicional com gesso equivalente a 5 Mg ha⁻¹, aplicado superficialmente no tratamento com 90 m³ ha⁻¹ de esterco e 100% de fertilizante mineral. Este tratamento adicional foi feito visando comparar o efeito do gesso, tanto na água percolada como no solo.

Na fertilização mineral utilizou-se: nitrato de amônio (NH₄NO₃); fosfato monoamônio (NH₄H₂PO₄) e cloreto de potássio (KCl). Aplicou-se na superfície na forma líquida. O esterco líquido bovino foi aplicado após a fertilização mineral de forma a obter os volumes de 30, 60 e 90 m³ ha⁻¹.

No QUADRO 6 encontra-se a quantidade do fertilizante mineral, do esterco e do gesso aplicada, por coluna, em cada tratamento.

QUADRO 6 - QUANTIDADE APLICADA, POR COLUNA, DOS FERTILIZANTES MINERAIS, GESSO, E ESTERCO LÍQUIDO BOVINO DE ACORDO COM OS TRATAMENTOS

FERTILIZANTE (%) ⁽¹⁾	ESTERCO (m ³ ha ⁻¹)	g coluna ⁻¹				ml coluna ⁻¹
		NH ₄ NO ₃ ⁽²⁾	NH ₄ H ₂ PO ₄ ⁽³⁾	KCl ⁽⁴⁾	Gesso	Esterco
0	0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	30	0,000	0,000	0,000	0,000	23,562
	60	0,000	0,000	0,000	0,000	47,124
	90	0,000	0,000	0,000	0,000	70,686
50	0	0,121	0,038	0,037	0,000	0,000
	30	0,121	0,038	0,037	0,000	23,562
	60	0,121	0,038	0,037	0,000	47,124
	90	0,121	0,038	0,037	0,000	70,686
100	0	0,243	0,076	0,075	0,000	0,000
	30	0,243	0,076	0,075	0,000	23,562
	60	0,243	0,076	0,075	0,000	47,124
	90	0,243	0,076	0,075	0,000	70,686
100% mineral, 90 m ³ ha ⁻¹ e Gesso		0,243	0,076	0,075	3,927	70,686

⁽¹⁾ Percentagem da dose recomendada pela fundação ABC para a região de Castro – PR

⁽²⁾ NH₄NO₃ - Nitrato de amônio (34,99% de N, sendo 7,88% de N-NH₄⁺ e 27,11% de N-NO₃⁻)

⁽³⁾ NH₄H₂PO₄ - Fosfato monoamônio (12,18% de N-NH₄⁺ e 26,93% de P)

⁽⁴⁾ KCl - Cloreto de potássio (52,45% de K)

No QUADRO 7 encontra-se a quantidade de N, P e K na forma total aplicados por coluna e por hectare, respectivamente. Já, a quantidade aplicada na forma solúvel encontra-se no QUADRO 8.

No QUADRO 9 encontram-se as características do esterco bovino, sendo

que os valores totais foram fornecidos pela Fundação ABC, os quais foram determinados por digestão via seca para P e K e via Kjeldahl para N total (HILDEBRAND, 1977). Os teores solúveis foram determinados no Departamento de Solos e Engenharia Agrícola por espectrofotometria de acordo com as metodologias de APHA (1995). As metodologias para a determinação do teor solúvel, no esterco, foram as mesmas que a água percolada e serão descritas com maiores detalhes no item 3.3. Para a determinação dos teores solúveis de N, P e K do esterco uma amostra foi diluída na proporção de 1:100 e filtrada em filtro 0,45 µm.

QUADRO 7 - QUANTIDADE APLICADA POR COLUNA E POR HECTARE DE NITROGÊNIO, FÓSFORO E POTÁSSIO TOTAL VIA FERTILIZAÇÃO MINERAL E ESTERCO DE ACORDO COM OS TRATAMENTOS

FERTILIZANTE (%)	ESTERCO (m ³ ha ⁻¹)	mg coluna ⁻¹								
		MINERAL ⁽¹⁾			ESTERCO ⁽²⁾			MINERAL + ESTERCO		
		N	P	K	N	P	K	N	P	K
0	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	30	0,00	0,00	0,00	18,20	8,69	38,13	18,20	8,69	38,13
	60	0,00	0,00	0,00	36,41	17,37	76,26	36,41	17,37	76,26
	90	0,00	0,00	0,00	54,61	26,06	114,39	54,61	26,06	114,39
50	0	47,12	10,28	19,56	0,00	0,00	0,00	47,12	10,28	19,56
	30	47,12	10,28	19,56	18,20	8,69	38,13	65,33	18,97	57,69
	60	47,12	10,28	19,56	36,41	17,37	76,26	83,53	27,66	95,82
	90	47,12	10,28	19,56	54,61	26,06	114,39	101,73	36,34	133,95
100	0	94,25	20,57	39,12	0,00	0,00	0,00	94,25	20,57	39,12
	30	94,25	20,57	39,12	18,20	8,69	38,13	112,45	29,25	77,25
	60	94,25	20,57	39,12	36,41	17,37	76,26	130,65	37,94	115,38
	90	94,25	20,57	39,12	54,61	26,06	114,39	148,86	46,63	153,51
100%, 90 m ³ ha ⁻¹ e Gesso		94,25	20,57	39,12	54,61	26,06	114,39	148,86	46,63	153,51
Fertilizante (%)	Esterco (m ³ ha ⁻¹)	kg ha ⁻¹								
		Mineral ⁽¹⁾			Esterco ⁽²⁾			Mineral + esterco		
		N	P	K	N	P	K	N	P	K
0	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	30	0,00	0,00	0,00	23,18	11,06	48,55	23,18	11,06	48,55
	60	0,00	0,00	0,00	22,12	97,10	97,10	466,35	22,12	97,10
	90	0,00	0,00	0,00	69,53	33,18	145,65	69,53	33,18	145,65
50	0	60,00	13,09	24,91	0,00	0,00	0,00	60,00	13,09	24,91
	30	60,00	13,09	24,91	23,18	11,06	48,55	83,18	24,15	73,45
	60	60,00	13,09	24,91	22,12	97,10	97,10	106,35	35,21	122,00
	90	60,00	13,09	24,91	69,53	33,18	145,65	129,53	46,27	170,55
100	0	120,00	26,19	49,81	0,00	0,00	0,00	120,00	26,17	49,81
	30	120,00	26,19	49,81	23,18	11,06	48,55	143,18	37,25	98,36
	60	120,00	26,19	49,81	22,12	97,10	97,10	166,35	48,30	146,91
	90	120,00	26,19	49,81	69,53	33,18	145,65	189,53	59,36	195,46
100%, 90 m ³ ha ⁻¹ e Gesso		120,00	26,19	49,81	69,53	33,18	145,65	189,53	59,36	195,46

⁽¹⁾ Valores obtidos através da multiplicação do teor total do nutriente no fertilizante pela área superficial.

⁽²⁾ Valores obtidos através da multiplicação do teor total do nutriente no esterco pela área superficial.

QUADRO 8 - QUANTIDADE APLICADA POR COLUNA DE NITROGÊNIO, FÓSFORO E POTÁSSIO SOLÚVEIS VIA FERTILIZAÇÃO MINERAL E ESTERCO DE ACORDO COM OS TRATAMENTOS

FERT. (%)	ESTERCO (m ³ ha ⁻¹)	ELEMENTO SOLÚVEL (mg coluna ⁻¹)											
		Mineral				Esterco				Mineral + Esterco			
		N-NH ₄	N-NO ₃	P	K	N-NH ₄	N-NO ₃	P	K	N-NH ₄	N-NO ₃	P	K
0	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	30	0,00	0,00	0,00	0,00	6,21	0,76	1,56	11,34	6,21	0,76	1,56	11,34
	60	0,00	0,00	0,00	0,00	12,42	1,52	3,12	22,68	12,42	1,52	3,12	22,68
	90	0,00	0,00	0,00	0,00	18,63	2,28	4,67	34,02	18,63	2,28	4,67	34,02
50	0	25,89	21,24	10,28	19,56	0,00	0,00	0,00	0,00	25,89	21,24	10,28	19,56
	30	25,89	21,24	10,28	19,56	6,21	0,76	1,56	11,34	32,10	22,00	11,84	30,90
	60	25,89	21,24	10,28	19,56	12,42	1,52	3,12	22,68	38,31	22,76	13,40	42,24
	90	25,89	21,24	10,28	19,56	18,63	2,28	4,67	34,02	44,52	23,52	14,96	53,58
100	0	51,77	42,47	20,57	39,12	0,00	0,00	0,00	0,00	51,77	42,47	20,57	39,12
	30	51,77	42,47	20,57	39,12	6,21	0,76	1,56	11,34	57,98	43,23	22,12	50,46
	60	51,77	42,47	20,57	39,12	12,42	1,52	3,12	22,68	64,20	43,99	23,68	61,80
	90	51,77	42,47	20,57	39,12	18,63	2,28	4,67	34,02	70,41	44,75	25,24	73,14
100%, 90m ³ e Gesso		51,77	42,47	20,57	39,12	18,63	2,28	4,67	34,02	70,41	44,75	25,24	73,14

QUADRO 9 - TEORES DE NITROGÊNIO, FÓSFORO E POTÁSSIO NA FORMA TOTAL E SOLÚVEL, TEOR DE ATÉRIA SECA E pH DO ESTERCO LÍQUIDO BOVINO

Forma total	Matéria seca (g kg ⁻¹)	Matéria úmida (g L ⁻¹)	Forma solúveis	Matéria seca (g kg ⁻¹)	Matéria úmida (g L ⁻¹)	Solubilidade (%)
N _{Kjeldahl}	32,100	0,806	N-NO ₃	1,340	0,034	4,2
P	15,318	0,385	N-NH ₄	10,952	0,275	34,1
K	67,243	1,689	P	2,748	0,069	17,9
Matéria Seca (g L ⁻¹) = 0,806			K	43,788	1,100	65,1
pH = 8,2						

3.2. LIXIVIAÇÃO

Concluída a etapa de adubação iniciou-se a lixiviação. O volume de água a ser adicionado por hora foi inicialmente calculado através da taxa de infiltração final obtida em duas colunas “testes” coletadas separadamente para a obtenção deste resultado (66 ml h⁻¹ ou 8,7 mm h⁻¹). O volume de poros foi calculado de acordo com a porosidade total do solo e do volume da coluna preenchida com solo (40 cm de altura de solo por 10 cm de diâmetro resultando em um volume total de solo da coluna de 3141,6 cm³). A porosidade total foi calculada utilizando-se a densidade de partículas, obtida em laboratório de 2,18 g cm⁻³, e densidade do solo de 1,2 g cm⁻³, da seguinte forma:

$$P_t = [(D_p - D_s) / D_p] \times 100, \text{ onde:}$$

P_t = porosidade total (%)

D_s = densidade do solo (g cm^{-3})

D_p = densidade de partículas (g cm^{-3})

Substituindo-se D_p e D_s pelos respectivos valores, obtém-se:

$$P_t = [(2,18 - 1,20) / 2,18] \times 100$$

$$P_t = 44,95\%$$

Sendo a base da coluna igual a Πr^2 e o raio (r) igual a 5 cm obtém-se a área ($3,1415 \times 5^2 = 78,54 \text{ cm}^2$), e multiplicando-se pela altura (40 cm) obtém-se o volume ($78,54 \times 40 = 3.141,6 \text{ cm}^3$);

Multiplicando-se a porosidade total (P_t) pelo volume da coluna, obtém-se o volume total de poros, o qual é:

$$P_t \times \text{volume (cm}^3) = \text{volume de poros totais (cm}^3)$$

$$(0,4495 \times 3.141,6) = 1.412,15 \text{ cm}^3$$

O volume de poros calculado (conforme demonstrado acima) foi de 1.412,15 ml, no entanto, utilizou-se o valor de 1.350 ml para facilitar as coletas. As coletas foram feitas dividindo-se o primeiro volume em três coletas de 450 ml, ou seja, três turnos de um terço do volume de poros. Para o segundo e terceiro volume de poros foi realizado apenas um turno de coleta de 1.350 ml cada. O total coletado (cinco turnos) equivaleu a três volumes de poros, ou seja, 4.050 ml (QUADRO 10).

QUADRO 10 -RELAÇÃO ENTRE TURNOS DE LIXIVIAÇÃO, VOLUME DE POROS E ÁGUA INFILTRADA ACUMULADA

TURNOS DE LIXIVIAÇÃO	L I	L II	L III	L IV	L V
Volume de poros	1° (1/3)	1° (2/3)	1° (3/3)	2°	3°
Água infiltrada acumulada (ml coluna^{-1})	450	900	1350	2700	4050
Água infiltrada acumulada (mm)	57,3	114,6	171,9	343,8	515,7

A lixiviação foi feita de forma ininterrupta sendo que o tempo previsto inicial para a coleta de todos os turnos de lixiviação (4.050 ml) foi de 72 horas, baseado na taxa final de infiltração obtida nas colunas testes conforme já descrito. De acordo com os cálculos iniciais os turnos L I, L II e L III (450 ml cada) seriam coletados a cada 7 horas, e os turnos de lixiviação L IV e L V (1.350 ml cada) seriam coletados a cada 21 horas. No entanto, em função das variações entre as colunas, o tempo de coleta não foi

uniforme, e as médias para cada tratamento estão descritas no QUADRO 11.

Após cada coleta, a água percolada foi homogeneizada, separada em um frasco de 250 ml, e imediatamente armazenada em geladeira.

QUADRO 11 -RELAÇÃO ENTRE TURNOS DE LIXIVIAÇÃO, VOLUME DE POROS E ÁGUA INFILTRADA ACUMULADA

FERTILIZANTE (%)	ESTERCO (m ³ ha ⁻¹)	TURNOS (horas: minutos)					TEMPO TOTAL DE LIXIVIAÇÃO
		L I	L II	L III	L IV	L V	
0	0	9:52	7:30	10:14	27:32	82:50	138:00
	30	5:45	8:24	8:59	31:00	73:23	127:31
	60	10:36	6:26	7:58	34:31	66:34	126:06
	90	8:12	11:06	9:04	34:28	75:38	138:29
50	0	10:35	5:14	9:40	32:40	81:33	139:43
	30	11:50	8:44	15:25	104:30	100:36	241:06
	60	10:00	7:43	11:07	58:48	84:14	171:54
	90	31:26	46:19	65:29	32:04	88:11	263:30
100	0	9:33	5:35	9:20	114:31	97:50	236:50
	30	10:47	9:26	10:27	49:23	66:35	146:39
	60	7:50	6:23	24:26	67:20	123:23	229:23
	90	11:09	6:48	8:53	49:58	107:35	184:24
100%, 90 m ³ ha ⁻¹ e Gesso		11:00	7:27	8:29	22:19	64:11	113:27
Média Geral		11:26	10:33	15:21	50:42	85:35	173:37

Após, aproximadamente uma semana, as amostras foram subdivididas em duas: uma filtrada com filtro de 0,45 µm e submetida ao congelamento, e outra não filtrada mantida na geladeira. As amostras não filtradas foram analisadas após o término de todas as lixiviações, e as amostras filtradas foram analisadas aproximadamente dois meses após a coleta, sendo que as amostras eram retiradas do congelador na noite anterior ao dia da análise.

3.3. ANÁLISES QUÍMICAS

3.3.1. Análises da água percolada pelas colunas de solo

Com relação à parte não filtrada esta foi utilizada para análises de condutividade elétrica, pH e transmitância. A condutividade elétrica foi lida

diretamente através do condutivímetro (1 cm); o pH através do potenciômetro e a transmitância foi lida no espectrofotômetro a 420 λ , utilizando-se água deionizada como referência de 100% de transmitância.

As amostras filtradas foram utilizadas para analisar a concentração de nitrogênio, nas formas de nitrato e amônio, fósforo e potássio solúveis em água.

As análises do amônio e nitrato foram de acordo com APHA (1995), sendo ambos os elementos determinados por espectrofotometria. A descrição destas metodologias encontra-se a seguir.

O N-NH₄ solúvel foi determinado em espectrofotômetro, sob comprimento de onda de 640 λ , pelo método do fenato de acordo com APHA (1995). O método está baseado no princípio de que em meio alcalino e na presença do catalizador nitroprussiato, o amônio reage com o fenol e com o hipoclorito sódico, formando o azul de indofenol, tornando-se suscetível à determinação por colorimetria. O espectrofotômetro foi calibrado para a leitura das amostras, através de uma curva de calibração de nove pontos, com concentração crescente de N-NH₄. O r² da equação de 1º grau gerada com os valores da absorbância dos pontos da curva foi de 0,9936. Para a leitura das amostras no espectrofotômetro, estas foram preparadas com 5 ml da amostra, 0,2 ml da solução de fenol, 0,2 ml da solução de nitroprussato sódico e 0,5 ml da solução oxidante. No caso das leituras, com concentração superior à curva, estas foram diluídas para uma concentração de N-NH₄ que estivesse dentro do intervalo de concentração da curva de calibração.

O N-NO₃ solúvel foi determinado por colorimetria em espectrofotômetro conforme APHA (1995). De acordo com esta metodologia, na preparação das amostras para a leitura deve-se adicionar HCl 1N na proporção de 1:5 (ácido:amostra). O espectrofotômetro foi calibrado para a leitura das amostras, através de uma curva de calibração de nove pontos, com concentração crescente de N-NO₃. O r² da equação de 1º grau gerada com os valores da absorbância dos pontos da curva foi de 0,9983. As leituras das amostras foram efetuadas sob comprimento de onda de 221 λ . Ainda de acordo com a metodologia, para se obter a concentração real de N-NO₃, deve-se fazer

a leitura das amostras também a 275 λ . Neste comprimento de onda obtém-se os resultados das interferências, e, portanto estes valores devem ser subtraídos das leituras a 221 λ para a obtenção da concentração real de N-NO₃ na amostra.

O teor de P solúvel foi determinado em espectrofotômetro sob comprimento de ondas de 882 λ , através do método do teste do ácido ascórbico de acordo com APHA (1995). O método se baseia na redução do complexo fosfatomolibídico de amônio pelo ácido ascórbico na presença do antimônio. O espectrofotômetro foi calibrado para a leitura das amostras, através de uma curva de calibração de seis pontos, com concentração crescente de P. O r² da equação de 1º grau gerada com os valores da absorbância dos pontos da curva foi de 0,9989. Para a leitura das amostras estas foram preparadas com 1,5 ml da amostra (três vezes mais do que o recomendado devido à baixa concentração nas leituras iniciais) 0,5 ml de Reagente B (adição de ácido ascórbico ao Reagente A – molibdato de amônio, tartarato de potássio e antimônio e H₂SO₄) e 3,0 ml de água deionizada.

O potássio foi determinado pelo fotômetro de emissão de chamas sendo as leituras efetuadas diretamente da amostra. O aparelho foi calibrado com solução de K.

O cálculo das perdas dos elementos foi feito multiplicando-se a concentração de cada tratamento na sua respectiva lixiviação pelo volume lixiviado, sendo, então somadas. O valor obtido desta operação representa a quantidade total do elemento a qual foi comparada com o valor aplicado gerando a porcentagem de perda do elemento de acordo com os tratamentos. As porcentagens de perda foram obtidas dividindo-se o valor perdido pelo aplicado e multiplicando-se o resultado por 100. É interessante ressaltar que neste calculo não se considera transformação ou outras perdas além da lixiviação. Outro aspecto a ser ressaltado é a inclusão da quantidade lixiviada no tratamento testemunha (0 m³ ha⁻¹ e 0%) como teor aplicado considerando, portanto, o teor nativo do solo no cálculo de perdas.

3.3.2. Análises do solo

Para as análises de solo inicialmente foi necessária a remoção destes dos tubos de PCV. Para tal as colunas ficaram em repouso visando secagem natural das mesmas. Após dois meses em repouso ainda foi constatada alta umidade nas colunas as quais foram levadas à estufa a 60°C por três dias. Após a secagem o solo foi retirado com as colunas ainda aquecidas (devido ao fato da parafina estar semiliquefeita, facilitando o arraste do solo para fora do tubo de PCV).

Durante a retirada do solo do interior do tubo de PCV, este era fatiado e separado nas profundidades de 0 a 5 cm, 5 a 10 cm, 10 a 20 cm e 20 a 40 cm. Tal procedimento está demonstrado na foto 4.

FOTO 4 - PROCEDIMENTO DE MOVIMENTAÇÃO DO SOLO DA COLUNA DE PVC: SECAGEM EM ESTUFA (A); MEDIÇÃO DO VÃO SUPERIOR (B); MEDIÇÃO APÓS DESLOCAMENTO PARCIAL PARA OBTENÇÃO DA PRIMEIRA FRAÇÃO DA COLUNA – 0 a 5 cm (C); CORTE DA FRAÇÃO – 0 a 5 cm (D); MEDIÇÃO PARA FRAÇÃO – 5 a 10 cm (E); MEDIÇÃO PARA FRAÇÃO – 10 a 20 cm (F)



Cada fração do solo era então preparada para as análises, sendo secas, moídas, peneiradas, ensacadas e marcadas. Após isso, iniciava-se a rotina laboratorial, de acordo com PAVAN et al. (1992) sendo feitas análises de pH em CaCl_2 , 0,01 M, e índice SMP, do qual se obtém $\text{H} + \text{Al}$ – potenciômetro; cálcio e magnésio – extraído com KCl 1N e

determinado por espectrofotometria de absorção atômica; alumínio – extraído com KCl 1 N e determinado por titulação com Na(OH); fósforo – extraído via Melhich e carbono – extraído via dicromato de potássio – ambos determinado por colorimetria; potássio e sódio – extraído via Melhich e determinado com fotômetro de chamas.

As determinações de nitrato e amônio no solo foram feitas utilizando KCl 2M como extrator, de acordo com MULVANEY (1996). Para a comparação do efeito da aplicação do gesso, além das análises químicas já descritas anteriormente também foram feitas extrações utilizando-se água deionizada, ao invés de KCl 2M para N-NO₃, N-NH₄ e ao invés de Melhich, para o P de acordo com e MULVANEY (1996) e SELF-DAVES, MOORE e JOERN (2000), respectivamente. As extrações do N-NH₄ e N-NO₃ foram feitas adicionando-se solo e extrator na proporção de 1:10. Após este procedimento a alíquota contendo solo mais água ou KCl 2M foi agitada por 30 minutos, em centrífuga a 200 rpm. Após a centrifugação as amostras permaneceram em repouso por 30 minutos possibilitando uma melhor decantação, sendo então separadas as alíquotas para posterior análise, sem filtragem do material. A determinação destes elementos extraídos com água ou KCl 2M foi a mesma utilizada para a água percolada conforme descrito anteriormente.

3.4. ANÁLISES ESTATÍSTICAS

As análises estatísticas foram realizadas utilizando-se o software MSTAT-C (FREED, 1994). Inicialmente foi feita a avaliação da homogeneidade das variâncias e quando necessário os dados foram transformados. Em seguida foi feita a análise de variância (ANOVA) para delineamento inteiramente casualizado com parcelas subdivididas. Os fatores esterco e fertilização mineral referem-se à parcela e o turno de lixiviação ou a profundidade do solo refere-se à subparcela.

Para a água percolada, além da análise de concentração de elementos minerais em solução que envolveu os fatores esterco, fertilização mineral e turnos de lixiviação,

efetuou-se também uma análise da perda total do elemento. Esta análise, portanto, envolveu somente os fatores esterco e fertilização mineral, utilizando-se o delineamento fatorial inteiramente casualizado. Na análise de variância (ANOVA) referente ao efeito do gesso (comparar o tratamento com 90 m³ de esterco e 100% de fertilizante mineral com e sem aplicação de gesso) considerou-se a aplicação de gesso como parcela e os turnos de lixiviação, na água percolada, ou a profundidade, no solo, como subparcelas.

Para todas as variáveis, a comparação de médias foi efetuada através do Teste de Tukey ao nível de 5%. No entanto, a comparação de médias das variáveis analisadas na água percolada e no solo entre aplicação e não aplicação de gesso na ausência de interação com os turnos de lixiviação e profundidade de solo, respectivamente, foi de acordo com o teste F da análise de variância.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. ANÁLISE DA ÁGUA PERCOLADA

4.1.1. Nitrogênio na forma de amônio (N-NH₄)

Na análise da concentração do N-NH₄ observou-se interação entre a aplicação de esterco bovino e turnos de lixiviação (TABELA 1). As maiores concentrações de N-NH₄ ocorreram no quarto turno de lixiviação (segundo volume de poros) para todas as doses de esterco, ocorrendo acentuada redução nos valores de N-NH₄ no quinto turno de lixiviação para as doses de 0 e 30 m³ ha⁻¹. Já nos tratamentos com 60 e 90 m³ ha⁻¹ de esterco foi observada uma tendência de diminuição na concentração do N-NH₄ do quarto para o quinto turno, no entanto, sem significância estatística, mostrando o efeito tamponante do esterco em relação ao N-NH₄, ou seja, o efeito do esterco na retenção e liberação do N-NH₄ no solo. Os resultados também mostram que este efeito ocorre de forma crescente em relação às doses de esterco. O prolongamento do potencial de lixiviação do amônio pela aplicação de esterco líquido

também foi observado por BERTOL et al. (2005).

A maior concentração de amônio dentre os dois primeiros volumes de poros está de acordo com ALVA, PRAKASH e PARAMASIVAM (1998) e FAVARETTO (2002), em trabalhos com adubação mineral e aplicação de gesso. Nestes experimentos também foi observado o efeito tamponante do gesso, ou seja, uma liberação lenta do amônio durante o período de lixiviação, o mesmo comportamento observado com a aplicação de esterco, conforme já mencionado. Enquanto no gesso, a liberação gradativa de amônio ocorre pela substituição do N-NH₄ pelo Ca no complexo de trocas (KOENIG e PAN, 1996), no esterco, esta liberação gradativa provavelmente ocorre pelo processo de mineralização do N orgânico bem como pela capacidade das frações orgânicas de reter e liberar o N-NH₄, inclusive o aplicado via fertilizante mineral (KIRCHMANN, 1994).

Com relação as doses de esterco dentro de cada turno de lixiviação, observa-se que a concentração de amônio foi similar nos quatro turnos iniciais, com exceção do primeiro turno. Entre as doses observou-se maior concentração de N-NH₄ no tratamento com 60 e 90 m³ ha⁻¹ somente no quinto turno de lixiviação, ou seja, no terceiro volume de poros. É interessante observar que não houve diferença na concentração de amônio em nenhum dos turnos de lixiviação entre a testemunha (sem aplicação de esterco) e a aplicação de 30 m³ ha⁻¹. Isto caracteriza que, entre estes tratamentos, o comportamento não foi alterado durante a infiltração de três volumes de poros ou 516 mm. A semelhança de comportamento também ocorreu entre os tratamentos com 60 e 90 m³ ha⁻¹, uma vez que ambos apresentaram concentrações estatisticamente iguais de N-NH₄ durante todos os turnos de lixiviação.

TABELA 1 - CONCENTRAÇÃO MÉDIA DE N-NH₄ (mg L⁻¹) DE ACORDO COM A APLICAÇÃO DE ESTERCO BOVINO E TURNOS DE LIXIVIAÇÃO

TURNOS DE LIXIVIAÇÃO	ESTERCO (m ³ ha ⁻¹)			
	0	30	60	90
L I	0,29 AB (ab) ⁽¹⁾	0,41 B (a)	0,28 C (b)	0,30 B (ab)
L II	0,29 AB (a)	0,39 B (a)	0,38 BC (a)	0,27 B (a)
L III	0,20 B (a)	0,30 B (a)	0,21 C (a)	0,27 B (a)
L IV	0,73 A (a)	0,95 A (a)	0,92 A (a)	1,39 A (a)
L V	0,24 B (b)	0,18 C (b)	0,66 AB (a)	0,94 A (a)

⁽¹⁾ Médias seguidas de mesma letra maiúscula dentro da coluna e pela mesma letra minúscula dentro da linha não diferem pelo teste de Tukey a 5%.

As concentrações médias ponderadas para o N-NH₄ variaram de 0,34 a 1,30 mg L⁻¹ (TABELA 2), enquanto as concentrações (médias de três repetições) de cada turno de lixiviação em seu respectivo tratamento variaram de 0,05 a 1,93 mg L⁻¹ (dados não apresentados), sendo esta última a única concentração acima do permitido pelo Ministério da Saúde (Brasil, 2004) que é de 1,23 mg L⁻¹ de N-NH₃. Todas as demais concentrações estão abaixo do permitido pela legislação tanto do Ministério da Saúde (Brasil, 2004) como do CONAMA (Brasil, 2005).

TABELA 2 - CONCENTRAÇÃO MÉDIA PONDERADA DE N-NH₄, N-NO₃, P E K EM CINCO TURNOS DE LIXIVIAÇÃO DE ACORDO COM A APLICAÇÃO DE FERTILIZANTE MINERAL E ESTERCO BOVINO

MINERAL (%)	ESTERCO (m ³ ha ⁻¹)	CONCENTRAÇÃO MÉDIA PONDERADA (mg L ⁻¹) ⁽¹⁾			
		N-NH ₄	N-NO ₃	P	K
0	0	0,36	7,16	0,0162	0,028
	30	0,34	9,20	0,0209	0,030
	60	0,50	11,51	0,0191	0,035
	90	1,30	10,04	0,0221	0,049
50	0	0,37	13,93	0,0119	0,028
	30	0,68	10,09	0,0155	0,028
	60	0,73	11,16	0,0295	0,032
	90	0,52	14,41	0,0173	0,039
100	0	0,51	18,44	0,0118	0,032
	30	0,48	19,94	0,0137	0,029
	60	0,64	16,32	0,0193	0,103
	90	0,80	12,11	0,0242	0,070

⁽¹⁾ Concentração média ponderada obtida da seguinte forma: [(L I + L II + L III)/3 + L IV + L V]/3

Com relação à perda total média de N-NH₄ após os cinco turnos de lixiviação foi constatada interação entre fertilizante e esterco. A maior perda de N-NH₄ foi constatada no tratamento com 90 m³ ha⁻¹ de esterco sem fertilização mineral (TABELA 3 4). Os resultados de perda mostram retenção do N-NH₄ aplicado ao solo via fertilizante mineral no tratamento com 90 m³ ha⁻¹. Nas demais doses de esterco não ocorreram diferenças na perda de N-NH₄ entre as doses de fertilizante. É interessante apontar que a aplicação de 90 m³ ha⁻¹ de esterco representa uma adição de 18,6 mg por coluna de N-NH₄ solúvel e de 54,61 mg por coluna de N total, enquanto que 100% de fertilizante mineral representa uma adição de 51,77 mg coluna de N-NH₄ solúvel. No entanto, no tratamento com 90 m³ ha⁻¹ e 100% de fertilizante, mesmo aplicando-se

mais N-NH₄, a perda foi menor que no tratamento com 90 m³ ha⁻¹.

TABELA 3 - PERDA TOTAL MÉDIA DE N-NH₄ (mg coluna⁻¹) DE ACORDO COM A APLICAÇÃO DE FERTILIZANTE MINERAL E ESTERCO BOVINO

ESTERCO (m ³ ha ⁻¹)	FERTILIZANTE MINERAL (%)		
	0	50	100
0	1,44 B (a) ⁽¹⁾	1,48 A (a)	2,07 A (a)
30	1,37 B (a)	2,76 A (a)	1,94 A (a)
60	2,04 B (a)	2,98 A (a)	2,58 A (a)
90	4,05 A (a)	2,38 A (ab)	2,04 A (b)

⁽¹⁾ Médias seguidas de mesma letra maiúscula dentro da coluna e pela mesma letra minúscula dentro da linha não diferem pelo teste de Tukey a 5%.

A perda percentual do N-NH₄ em relação ao aplicado, desconsiderando o tratamento testemunha, foi inferior a 20,18% do N-NH₄ aplicado na forma solúvel e 4,76% do N aplicado na forma total (TABELA 4). É interessante observar que no cálculo de perdas considerou-se a quantidade perdida no tratamento testemunha (0% de fertilizante e 0 m³ ha⁻¹ de esterco), adicionando-se na quantidade efetivamente aplicada no solo, para representar o N-NH₄ nativo do solo. No Quadro 5, observa-se ainda, que as perdas de N-NH₄, na forma solúvel no tratamento com 0% de fertilizante, variam de 14,71 a 20,18% enquanto nos tratamentos com 50 e 100% de aplicação do fertilizante variam de 2,83 a 8,24%. Estes dados, em concordância com as perdas em mg por coluna (TABELA 3), mostram que a mobilidade do N-NH₄ nos tratamentos com esterco e sem fertilizante mineral foi maior que nos tratamentos com adição de fertilizante mineral. Perdas percentuais de N-NH₄ variando de 10 a 38% do N-NH₄ aplicado via fertilizante mineral foram obtidas por FAVARETTO (2002) em tratamentos envolvendo aplicação de gesso, e em torno de 20% por BERTOL et al. (2005) em tratamentos envolvendo adubação mineral e orgânica. Segundo Smith et al. (1990) as menores perdas de N-NH₄, quando comparadas ao N-NO₃, ocorrem devido à capacidade de adsorção do N-NH₄ no complexo de cargas negativas do solo, principalmente em solos com elevada capacidade de troca de cátions. No entanto, em solos com baixa capacidade de adsorção, como em solos arenosos, a mobilidade é muito maior, chegando a perdas de 60 a 83% do aplicado (ALVA, PRAKASH e PARAMASIVAM, 1998).

TABELA 4 - PERDAS PERCENTUAIS DE N-NH₄ E N-NO₃ EM RELAÇÃO AO N APLICADO NA FORMA SOLÚVEL E TOTAL, DE ACORDO COM AS DOSES DE FERTILIZANTE MINERAL E ESTERCO BOVINO

MINERAL	ESTERCO	SOLÚVEL (mg coluna ⁻¹)						TOTAL (mg coluna ⁻¹)			
		Aplicado		Perdido		% Perda ⁽¹⁾		Aplicado	Perdido		% Perda ⁽¹⁾
		N-NH ₄	N-NO ₃	N-NH ₄	N-NO ₃	N-NH ₄	N-NO ₃	N	N-NH ₄	N-NO ₃	N ⁽²⁾
0	0	0	0	1,44	29,01	100	100	0	4,73	95,27	100
	30	6,21	0,76	1,37	37,25	17,87	125,15	18,2	2,81	76,57	79,4
	60	12,42	1,52	2,04	46,61	14,71	152,69	36,41	3,05	69,72	72,8
	90	18,63	2,28	4,05	40,66	20,18	129,97	54,61	4,76	47,81	52,6
50	0	25,89	21,24	1,48	56,4	5,42	112,26	47,12	1,91	72,71	74,6
	30	32,1	22	2,76	40,87	8,24	80,13	65,33	2,89	42,67	45,6
	60	38,31	22,76	2,98	45,18	7,49	87,29	83,53	2,61	39,64	42,3
	90	44,52	23,52	2,38	58,34	5,17	111,08	101,73	1,8	44,14	45,9
100	0	51,77	42,47	2,07	74,67	3,9	104,46	94,25	1,66	59,88	61,5
	30	57,98	43,23	1,94	80,75	3,26	111,78	112,45	1,36	56,51	57,9
	60	64,2	43,99	2,58	66,09	3,93	90,54	130,65	1,6	41,03	42,6
	90	70,41	44,75	2,04	49,03	2,83	66,47	148,86	1,14	27,34	28,5

⁽¹⁾No cálculo de perdas, o tratamento com 0% de fertilizante mineral e 0 m³ ha⁻¹ de esterco teve o valor perdido, de cada elemento, acrescido ao efetivamente aplicado para representar a contribuição do teor nativo do solo, e portanto, neste tratamento as perdas são de 100%.

⁽²⁾N perdido nas formas de N-NH₄ + N-NO₃ em relação ao N total.

4.1.2. Nitrogênio na forma de nitrato (N-NO₃)

A concentração do N-NO₃ na água percolada variou em função dos turnos de lixiviação e da aplicação de fertilizante mineral (TABELA 5). Ao contrário do que foi observado para o N-NH₄, ocorreu um rápido decréscimo no teor de N-NO₃ nos sucessivos turnos de lixiviação. A rápida perda do N-NO₃ é esperada em função do efeito pistão, característico de elementos com pouca capacidade de adsorção, como é o caso do N-NO₃ (JURY et al., 1991). As concentrações foram decrescentes já a partir do primeiro turno de lixiviação, ou seja, antes mesmo de completar o primeiro volume de poros, fato não esperado, no entanto, a maneira de saturação das colunas, a qual foi via superfície, aliada ao alto teor nativo de N-NO₃, provavelmente acelerou o processo de lixiviação.

Em relação as doses, observa-se que, somente no primeiro e quinto turnos de lixiviação as concentrações são iguais entre si. Nos demais turnos, o tratamento com 100% de fertilizante foi superior, comportamento esperado em função da quantidade aplicada e da elevada mobilidade do N-NO₃ no solo.

TABELA 5 - CONCENTRAÇÃO MÉDIA DE N-NO₃ (mg L⁻¹) DE ACORDO COM A APLICAÇÃO DE FERTILIZANTE MINERAL E TURNOS DE LIXIVIAÇÃO

TURNOS DE LIXIVIAÇÃO	FERTILIZANTE MINERAL (%)		
	0	50	100
L I	28,99 A (a) ⁽¹⁾	33,48 A (a)	37,42 A (a)
L II	14,73 B (b)	30,57 A (a)	34,64 A (a)
L III	8,22 C (b)	13,13 B (b)	23,15 B (a)
L IV	5,16 C (b)	6,26 C (b)	11,93 C (a)
L V	5,96 C (a)	3,19 C (a)	6,63 D (a)

⁽¹⁾ Médias seguidas de mesma letra maiúscula dentro da coluna e pela mesma letra minúscula dentro da linha não diferem pelo teste de Tukey a 5%.

As concentrações médias ponderadas de N-NO₃ variaram de 7,16 a 19,94 mg L⁻¹ (TABELA 2), enquanto que as concentrações (médias de três repetições) de cada turno de lixiviação em seu respectivo tratamento variaram de 0,65 a 44,00 mg L⁻¹ (dados não apresentados), valores estes na maioria acima do permitido pelo Ministério da Saúde (Brasil, 2004) bem como pelo CONAMA (Brasil, 2005), que é de 10 mg L⁻¹ de N-NO₃ em ambas as legislações. Tal fato foi também constatado por diversos autores (BERTOL et al., 2005; FAVARETTO, 2002; KLADIVSKO et al., 1991; KYE-HAN e SHIBU, 2005). Somente os tratamentos sem aplicação de fertilizante e com 0 ou 30 m³ ha⁻¹ de esterco, tiveram concentrações medias ponderadas abaixo do permitido.

Para a perda total de N-NO₃ percebe-se interação entre os tratamentos com esterco e fertilizante. Comparando-se as médias de esterco, no tratamento sem aplicação de fertilizante, nota-se menor perda nos tratamentos com 0 e 30 m³ ha⁻¹ de esterco quando comparado com os tratamentos com 60 e 90 m³ ha⁻¹ (TABELA 6). No tratamento com 50 e 100% de fertilizante não foi possível visualizar diferenças devido a maior ou menor aplicação de esterco, comportamento semelhante ao do N-NH₄. Estes dados evidenciam a menor mobilidade tanto do N-NH₄ como do N-NO₃ do solo nos tratamentos com fertilização mineral. BAKHSH, KANWAR e KARLEN (2005) concluiu que a aplicação de N-NO₃, a partir do esterco teve maior lixiviação quando comparado com fertilizante mineral, já BERTOL et al. (2005) observou uma rápida perda de N-NO₃ quanto aplicado via fertilizante mineral. A maior influência do fertilizante mineral em relação ao orgânico na perda do N-NO₃ fica evidente na TABELA 6, resultado esperado em razão da maior aplicação de N-NO₃ via fertilizante

do que via esterco. A aplicação de $90 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ de esterco representa uma adição de 2,28 mg por coluna de N-NO_3 solúvel e de 54,61 mg por coluna de N total, enquanto que 100% de fertilizante representa uma adição de 42,47 mg por coluna de N-NO_3 solúvel.

TABELA 6 - PERDA MÉDIA DE N-NO_3 (mg coluna^{-1}) DE ACORDO COM A APLICAÇÃO DE ESTERCO BOVINO E FERTILIZANTE MINERAL

ESTERCO ($\text{m}^3 \text{ ha}^{-1}$)	FERTILIZANTE MINERAL (%)		
	0	50	100
0	29,01 B (b) ⁽¹⁾	56,40 A (a)	74,70 A (a)
30	37,25 B (b)	40,87 A (b)	80,80 A (a)
60	46,61 A (a)	45,18 A (a)	80,80 A (a)
90	40,66 A (a)	58,34 A (a)	49,00 A (a)

⁽¹⁾ Médias seguidas de mesma letra maiúscula dentro da coluna e pela mesma letra minúscula dentro da linha não diferem pelo teste de Tukey a 5%.

As perdas percentuais do N-NO_3 , em alguns casos, foram superiores ao aplicado, mesmo se considerando na quantidade aplicada o teor do elemento nativo no solo anterior à lixiviação (TABELA 2). No entanto, mesmo neste cálculo, o teor nativo do solo, pode estar subestimado. É interessante observar que este solo, de textura argilosa, com presença mineralógica basicamente de gibbsita (30%) e caulinita (60%) tem grande capacidade de reter o N-NO_3 . Outro fator que deve ser considerado é a possibilidade de nitrificação do N-NH_4 aplicado como do mineralizado pela adição de esterco. Este processo de nitrificação pode ter ocorrido em função da duração prolongada do experimento.

4.1.3. Fósforo (P)

Para a concentração do P foi constatada interação tanto do fertilizante mineral quanto do esterco com os turnos de lixiviação. Para a interação entre doses de esterco e turnos de lixiviação observa-se de modo geral que as maiores doses de esterco proporcionaram as maiores concentrações (TABELA 7). Já, para a interação entre fertilizante e turnos de lixiviação, de modo geral não se observa diferenças significativas entre as doses, com exceção do segundo e terceiro turno de lixiviação onde a aplicação de fertilizante reduziu a concentração (TABELA 8), comportamento este sem

justificativa. MOTTA et al. (2002) comenta a respeito da rápida adsorção inicial do P nas primeiras horas após a aplicação do P no solo e que esta é influenciada pela concentração. Tal velocidade inicial de adsorção do P pode ter sido o fator diferencial entre a aplicação via fertilização mineral e esterco bovino, já que, a quantidade de P aplicado na forma de fertilizante mineral foi expressivamente maior do que a quantidade aplicada na forma solúvel via esterco. A aplicação de 90 m³ ha⁻¹ de esterco adicionou 4,67 mg por coluna de P solúvel e 26,06 mg por coluna de P total, enquanto que 100% de fertilizante representa uma adição de 20,57 mg por coluna de P total.

TABELA 7- CONCENTRAÇÃO MÉDIA DE P (mg L⁻¹) DE ACORDO COM A APLICAÇÃO DE ESTERCO BOVINO

TURNOS DE LIXIVIAÇÃO	ESTERCO (m ³ ha ⁻¹)			
	0	30	60	90
L I	0,016 AB (a) ⁽¹⁾	0,017 A (a)	0,016 AB (a)	0,020 AB (b)
L II	0,021 A (a)	0,020 A (a)	0,020 A (a)	0,029 A (a)
L III	0,007 C (b)	0,013 A (ab)	0,013 B (ab)	0,019 A (b)
L IV	0,011 BC (c)	0,014 A (bc)	0,028 A (a)	0,023 AB (ab)
LV	0,014 ABC (a)	0,019 A (a)	0,024 A (a)	0,017 A (b)

⁽¹⁾ Médias seguidas de mesma letra maiúscula dentro da coluna e pela mesma letra minúscula dentro da linha não diferem pelo teste de Tukey a 5%.

TABELA 8- CONCENTRAÇÃO MÉDIA DE P (mg L⁻¹) DE ACORDO COM A APLICAÇÃO DE FERTILIZANTE MINERAL

TURNOS DE LIXIVIAÇÃO	FERTILIZANTE MINERAL (%)		
	0	50	100
L I	0,015 B (a) ⁽¹⁾	0,018 A (a)	0,019 A (a)
L II	0,028 A (a)	0,022 A (ab)	0,018 A (b)
L III	0,018 AB (a)	0,011 B (b)	0,010 B (b)
L IV	0,019 AB (a)	0,022 A (a)	0,017 A (a)
L V	0,020 AB (a)	0,017 AB (a)	0,019 A (a)

⁽¹⁾ Médias seguidas de mesma letra maiúscula dentro da coluna e pela mesma letra minúscula dentro da linha não diferem pelo teste de Tukey a 5%.

Para o P, as concentrações médias ponderadas variaram de 0,0196 a 0,0491 mg L⁻¹ (TABELA 2), enquanto as concentrações (médias de três repetições) de cada turno de lixiviação em seu respectivo tratamento variaram de 0,0068 a 0,0757 mg L⁻¹ (dados não apresentados). O CONAMA através da Resolução 357 de 2005 (Brasil, 2005) delimita o valor de 0,02 mg L⁻¹ de P total como sendo o máximo permitido em água superficial lântica (água parada) de classe 1, o qual corresponde ao valor mais rigoroso estabelecido nesta resolução. De acordo com FORTUNE et al. (2005) acima 0,02 mg L⁻¹ de P total o

processo de eutrofização pode ser desencadeado. Ainda de acordo com esta resolução do CONAMA (Brasil, 2005), $0,1 \text{ mg L}^{-1}$ de P total é o valor máximo permitido para água superficial lótica (água em movimento) de classe 1. Este valor não foi superado em nenhum turno de lixiviação. Médias ponderadas superiores a $0,02 \text{ mg L}^{-1}$ de P solúvel foram observados em 1/3 dos tratamentos (TABELA 2), porém na avaliação do potencial de contaminação deve-se considerar que as colunas não alcançaram o lençol freático e que o P é altamente retido neste solo devido à adsorção específica do P pela gibbsita e caulinita (MOTTA et al., 2002). No entanto, deve-se considerar o potencial de contaminação em grandes profundidades em função da presença de macroporos, típicos em sistema de plantio direto, os quais podem favorecer o deslocamento de P no perfil do solo via fluxo preferencial (JENSEN et al., 1998; GEOHRING et al., 2001). Obviamente, nesta avaliação, deve-se considerar que o P determinado no presente trabalho refere-se a fração solúvel, e que mesmo em subsuperfície podemos ter sedimentos, o qual contribuirá no teor de P total. No entanto a concentração de sedimentos varia em função das condições de estudo. McDOWELL e SHARPLEY (2001) em colunas indeformadas de solo observaram que o P solúvel representou 80% do P total, já FAVARETTO (2002) observou em colunas deformadas de solo que 71 a 85% do P foi transportado na forma particulada, ou seja, ligada ao sedimento. Perdas de P em subsuperfície é somente um risco se o P perdido alcançar a superfície, portanto na avaliação do potencial de contaminação deve-se considerar qual é a contribuição da água infiltrada no fluxo superficial de um determinado curso d'água, a qual em muitos casos é extremamente significativa como observado por McDOWELL e SHARPLEY (2001), onde 80% do fluxo superficial era devido a contribuição do fluxo subsuperficial.

Para as perdas totais de P foi observado que, em concordância com a concentração (TABELA 9), quanto maior a aplicação de esterco, maior a perda. Estes dados contrariam os observados por BERTOL et al. (2005) que, com dejetos líquidos de suínos, percebeu maior retenção do P aplicado via dejetos, mas estão de acordo com PARHAM et al. (2002) que observaram maior mobilidade do P aplicado via esterco quando comparado com o P aplicado na forma inorgânica, e com REDDY et al. (1980)

e SHARPLEY, SMITH e BAIN (1993) onde a menor capacidade de adsorção do P esteve diretamente relacionada com o aumento das doses de esterco.

TABELA 9 - PERDA MÉDIA DE P (mg coluna⁻¹) DE ACORDO COM A APLICAÇÃO DE ESTERCO

ESTERCO (m ³ ha ⁻¹)	PERDA MÉDIA DE P (mg coluna ⁻¹)
0	0,029 B ⁽¹⁾
30	0,029 B
60	0,056 A
90	0,053 A

⁽¹⁾ Médias seguidas de mesma letra maiúscula dentro da coluna não diferem pelo teste de Tukey a 5%.

As perdas de P em relação ao aplicado foram muitas baixas, sendo inferiores a 5,2% em relação ao solúvel aplicado e a 1% em relação ao total aplicado (TABELA 10), demonstrando retenção do P no solo. A adsorção de P é extremamente relacionada com a textura do solo, e, portanto, era esperado, na condição do experimento, com solo de textura argilosa, baixas perdas percentuais de P em subsuperfície. De acordo com SIMS, SIMARD e JOERN. (1998), mesmo uma pequena quantidade de minerais de argilas e/ou óxidos de Fe e Al pode reduzir grandemente a mobilidade do P. De acordo com SHARPLEY e HALVORSON (1994), mesmo as perdas superficiais de P são muito baixas, em torno de 5% do aplicado. As perdas subsuperficiais, ainda de acordo com estes autores, ficam em torno de 1%, em concordância com os obtidos em vários outros trabalhos (BERTOL et al., 2005; FAVARETTO, 2002; LI, ALVA e CALVERT, 1999).

TABELA 10 - PERDAS PERCENTUAIS DE P EM RELAÇÃO AO P APLICADO NA FORMA SOLÚVEL E TOTAL, DE ACORDO COM AS DOSES DE FERTILIZANTE MINERAL E ESTERCO BOVINO

MINERAL	ESTERCO	SOLÚVEL (mg coluna ⁻¹)			TOTAL (mg coluna ⁻¹)	
		Aplicado	Perdido	% Perda ⁽¹⁾	Aplicado	% Perda ⁽¹⁾
0	0	0,00	0,07	100	0,00	100
	30	1,56	0,08	5,20	8,69	0,97
	60	3,12	0,08	2,43	17,37	0,44
	90	4,67	0,09	1,89	26,06	0,34
50	0	10,28	0,05	0,47	10,28	0,47
	30	11,84	0,06	0,53	18,97	0,33
	60	13,40	0,12	0,89	27,66	0,43
	90	14,96	0,07	0,47	36,34	0,19
100	0	20,57	0,05	0,23	20,57	0,23
	30	22,12	0,06	0,25	29,25	0,19
	60	23,68	0,08	0,33	37,94	0,21
	90	25,24	0,10	0,39	46,63	0,21

⁽¹⁾ No cálculo de perdas, o tratamento com 0% de fertilizante mineral e 0 m³ ha⁻¹ de esterco teve o valor perdido de P, acrescido ao efetivamente aplicado para representar a contribuição do teor nativo do solo, e portanto, neste tratamento as perdas são de 100%.

4.1.4. Potássio (K)

A concentração do K demonstrou interação tanto do fertilizante como do esterco com os turnos de lixiviação. Nos dois casos (TABELAS 11 e 12), observa-se a maior concentração no quarto turno de lixiviação, comportamento parecido com o do N-NH₄, porém, sem mostrar o efeito tamponante. Com relação à concentração de K e doses de fertilizante percebe-se médias iguais no primeiro turno de lixiviação, após os quais os tratamentos com 0% e 50% ficam sempre inferiores ao tratamento com 100% (TABELA 12). Para o esterco a maior concentração foi percebida nos tratamentos com 60 e 90 m³ ha⁻¹ a partir do segundo turno (TABELA 11), fato esperado devido ao K não fazer parte de compostos orgânicos.

TABELA 11 - CONCENTRAÇÃO MÉDIA DE K (mg L⁻¹) DE ACORDO COM A APLICAÇÃO DE ESTERCO BOVINO E TURNOS DE LIXIVIAÇÃO

ESTERCO (m ³ ha ⁻¹)	TURNOS DE LIXIVIAÇÃO			
	0	30	60	90
L I	0,040 AB(a) ⁽¹⁾	0,037 AB (a)	0,040 B (a)	0,050 AB (a)
L II	0,034 AB (b)	0,024 C (b)	0,071 A (a)	0,053 AB (a)
L III	0,026 B (b)	0,027 BC (b)	0,050 AB (a)	0,039 B (ab)
L IV	0,041 A (b)	0,041 A (b)	0,069 A (a)	0,067 A (a)
L V	0,013 C (b)	0,016 C (b)	0,047 B (a)	0,044 B (A)

⁽¹⁾ Médias seguidas de mesma letra maiúscula dentro da coluna e pela mesma letra minúscula dentro da linha não diferem pelo teste de Tukey a 5%.

TABELA 12 - CONCENTRAÇÃO MÉDIA DE K (mg L⁻¹) DE ACORDO COM A APLICAÇÃO DE FERTILIZANTE MINERAL E TURNOS DE LIXIVIAÇÃO

ESTERCO (m ³ ha ⁻¹)	TURNOS DE LIXIVIAÇÃO		
	0	50	100
L I	0,039 AB(a) ⁽¹⁾	0,041 A (a)	0,045 B (a)
L II	0,034 AB (b)	0,031 A (b)	0,072 B (a)
L III	0,025 C (b)	0,032 A (b)	0,049 B (a)
L IV	0,048 A (b)	0,044 A (b)	0,071 A (a)
L V	0,026 C (b)	0,016 B (c)	0,049 B (A)

⁽¹⁾ Médias seguidas de mesma letra maiúscula dentro da coluna e pela mesma letra minúscula dentro da linha não diferem pelo teste de Tukey a 5%.

Os dados da TABELA 13 mostram que tratamentos com maiores doses resultam em perdas maiores de K. A aplicação de 100% do fertilizante mineral e 60 e 90 m³ ha⁻¹ de esterco proporcionaram médias significativamente maiores que os demais. O comportamento nas perdas de N-NH₄ e K foram semelhantes, tanto que o

coeficiente de correlação (r) para as perdas referentes ao fertilizante mineral foi de 0,67 e ao esterco foi de 0,73.

TABELA 13 - PERDA TOTAL MÉDIA DE K (mg L⁻¹) DE ACORDO COM A APLICAÇÃO DE ESTERCO BOIVNO E FERTILIZANTE MINERAL

ESTERCO (m ³ ha ⁻¹)	TURNOS DE LIXIVIAÇÃO		
	0	50	100
0	33,48 A (a) ⁽¹⁾	33,70 A (a)	35,68 B (a)
30	34,74 A (a)	33,25 A (a)	34,00 B (a)
60	35,59 A (b)	35,69 A (b)	63,93 A (a)
90	44,24 A (ab)	39,53 A (b)	53,04 A (a)

⁽¹⁾ Médias seguidas de mesma letra maiúscula dentro da coluna e pela mesma letra minúscula dentro da linha não diferem pelo teste de Tukey a 5%.

O K teve uma perda total, em porcentagem, um pouco maior do que o N-NH₄, porém, em nenhum caso tal perda foi superior a 18,5% (TABELA 14). Perdas pequenas de potássio e N-NH₄, também foram observadas por JAKOBSEN (1996).

TABELA 14 - PERDAS PERCENTUAIS DE K EM RELAÇÃO AO K APLICADO NA FORMA SOLÚVEL E TOTAL, DE ACORDO COM AS DOSES DE FERTILIZANTE MINERAL E ESTERCO BOVINO

Mineral	Esterco	Solúvel (mg coluna ⁻¹)			Total (mg coluna ⁻¹)	
		Aplicado	Perdido	% Perda ⁽¹⁾	Aplicado	% Perda ⁽¹⁾
0	0	0,00	4,45	100	0,00	100
	30	11,34	4,74	16,19	38,13	11,13
	60	22,68	5,56	10,27	76,26	6,89
	90	34,02	7,78	9,86	114,39	6,55
50	0	19,56	4,45	18,52	19,56	18,52
	30	30,9	4,39	8,98	57,69	7,06
	60	42,24	4,97	6,75	95,82	4,96
	90	53,58	6,11	6,21	133,95	4,42
100	0	39,12	4,97	11,41	39,12	11,41
	30	50,46	4,53	6,63	77,25	5,55
	60	61,8	16,2	17,38	115,38	13,52
	90	73,14	11,12	9,41	153,51	7,04

⁽¹⁾ No cálculo de perdas, o tratamento com 0% de fertilizante mineral e 0 m³ ha⁻¹ de esterco teve o valor perdido de K, acrescido ao efetivamente aplicado para representar a contribuição do teor nativo do solo, e portanto, neste tratamento as perdas são de 100%.

4.1.5. Condutividade Elétrica (CE), Transmitância e pH

Com relação à CE observa-se um pequeno aumento do primeiro para o segundo

turno de lixiviação, a partir do qual a CE entra em queda tanto para a aplicação de esterco como para a aplicação de fertilizante chegando aos menores valores no quarto turno (GRÁFICO 1). Este comportamento também foi observado por BERTOL et al. (2005), o qual constatou no primeiro turno de água lixiviada que os valores foram iguais entre si e superiores aos demais. FAVARETTO (2002) não constatou diferença no primeiro volume de poros, mas sim entre o primeiro e segundo. Observa-se, também, que a CE média dos cinco turnos de lixiviação tem aumento gradual da menor até a maior aplicação de esterco ou de fertilizante. Os dados evidenciam que a CE foi influenciada pelo N-NO₃, já que o coeficiente de correlação (r) entre estes dois parâmetros foi de 0,9 0 (GRÁFICO 2). De maneira similar ao observado para a CE o pH também teve relação com o N-NO₃, já que o coeficiente de correlação (r) entre pH e concentração de N-NO₃ foi de 0,83 (GRÁFICO 3).

GRÁFICO 1 - CONDUTIVIDADE ELÉTRICA (CE) DE ACORDO COM A APLICAÇÃO DE ESTERCO BOVINO (A), FERTILIZANTE MINERAL (B) E OS TURNOS DE LIXIVIAÇÃO

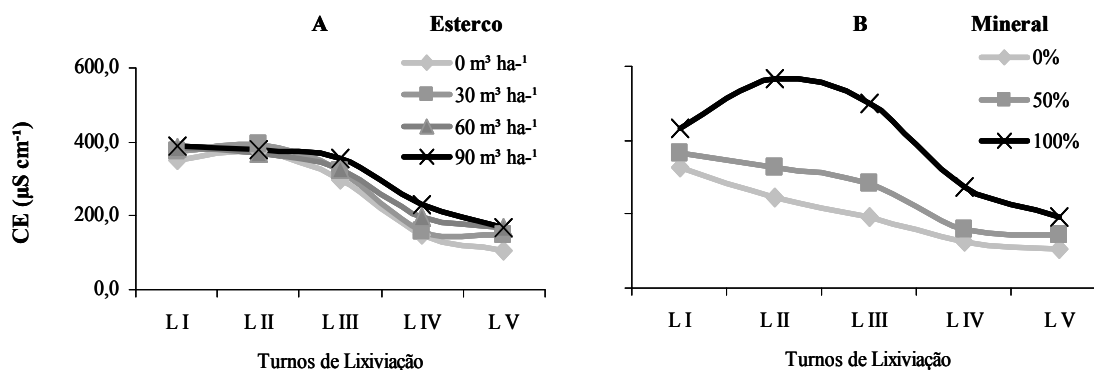
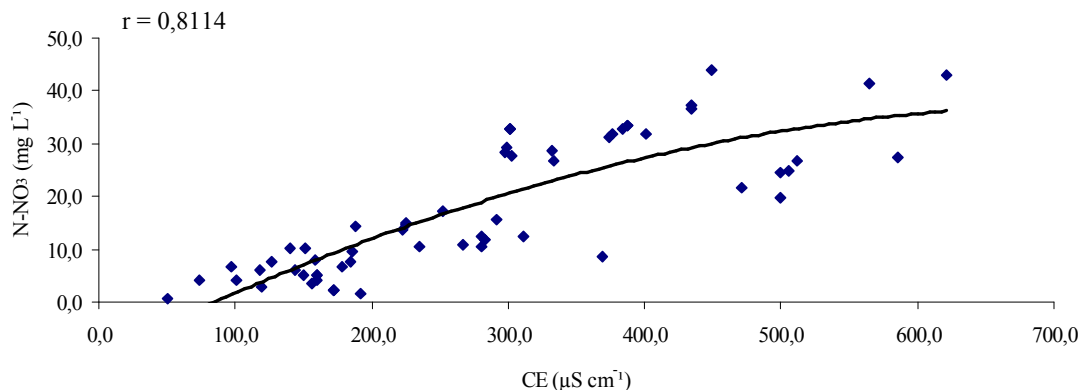
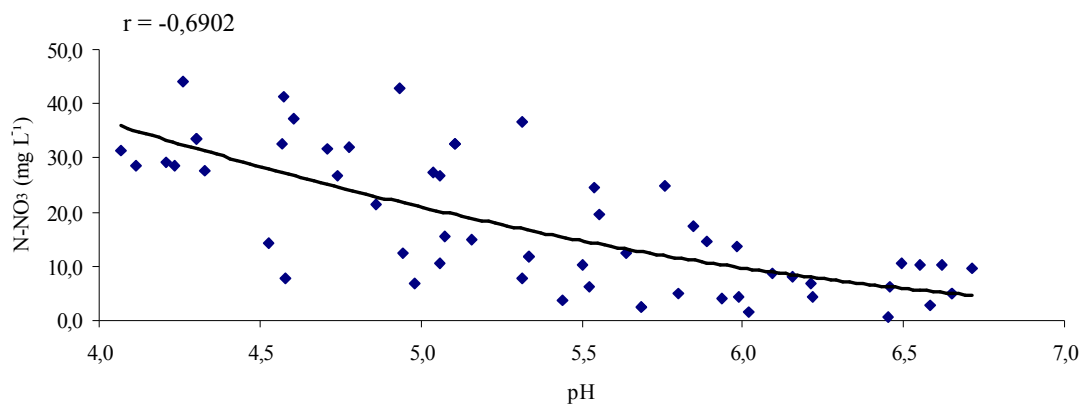


GRÁFICO 2 - CORRELAÇÃO ENTRE CONDUTIVIDADE ELÉTRICA (CE) E CONCENTRAÇÃO DE N-NO₃ DE ACORDO COM A APLICAÇÃO DE FERTILIZANTE MINERAL, ESTERCO BOVINO E TURNOS DE LIXIVIAÇÃO



Para a transmitância foi constatada diferença nos tratamentos com aplicação de esterco e fertilizante (GRÁFICO 4). Para o esterco com aplicação de 60 e 90 m³ ha⁻¹, as médias de transmitância da água lixiviada, até o quarto e quinto turnos, foram significativamente inferiores as demais. A partir destes turnos, a transmitância não demonstrou diferença nos tratamentos com 0 e 30 m³ ha⁻¹. Já, para a aplicação de fertilizante, nos primeiros quatro turnos foi percebida menor transmitância para os tratamentos sem aplicação de fertilizante em relação aos tratamentos com 50 e 100%. Tal fato demonstra o efeito do fertilizante mineral na floculação de argilas, o que se espera em função do efeito na dupla camada difusa (SPARKS, 1995) e evidencia a possibilidade do efeito dispersivo do esterco ou então do transporte de material orgânico em subsuperfície, o qual pela sua coloração, diminuiria a transmitância.

GRÁFICO 3 - CORRELAÇÃO ENTRE pH E CONCENTRAÇÃO DE N-NO₃ DE ACORDO COM A APLICAÇÃO DE FERTILIZANTE MINERAL, ESTERCO BOVINO E TURNOS DE LIXIVIAÇÃO



Para o pH foi observada diferença estatística nos tratamentos com aplicação de fertilizante mineral e turnos de lixiviação. Para todas as doses de fertilizante mineral, a água percolada nos três primeiros turnos apresentou valores estatísticos menores do que a água percolada nos demais turnos (GRÁFICO 5). É interessante ressaltar que, de maneira similar ao observado para a CE, o pH também teve relação com o N-NO₃ lixiviado do solo. Esta relação foi inversa ($r = -0,6902$) (GRÁFICO 3).

GRÁFICO 4 - TRANSMITÂNCIA MÉDIA DE ACORDO COM AS DOSES DE ESTERCO BOVINO (A) E DE FERTILIZANTE MINERAL (B) NOS TURNOS DE LIXIVIAÇÃO

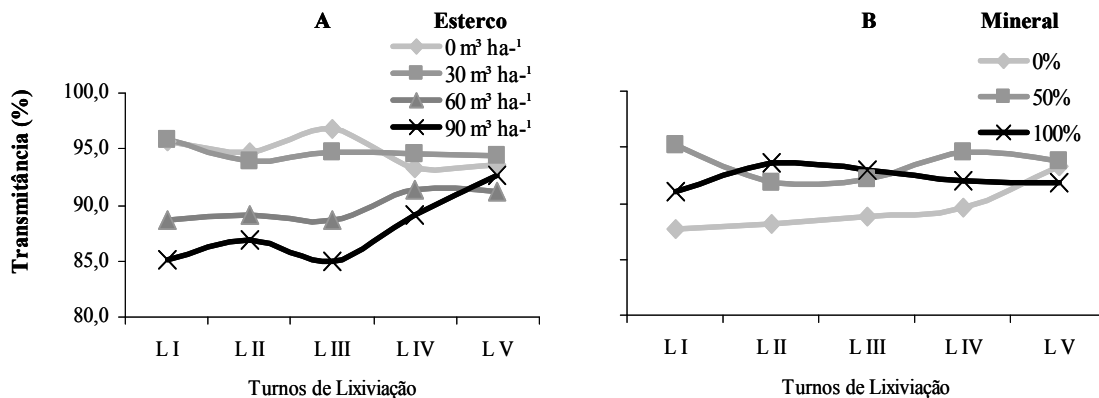
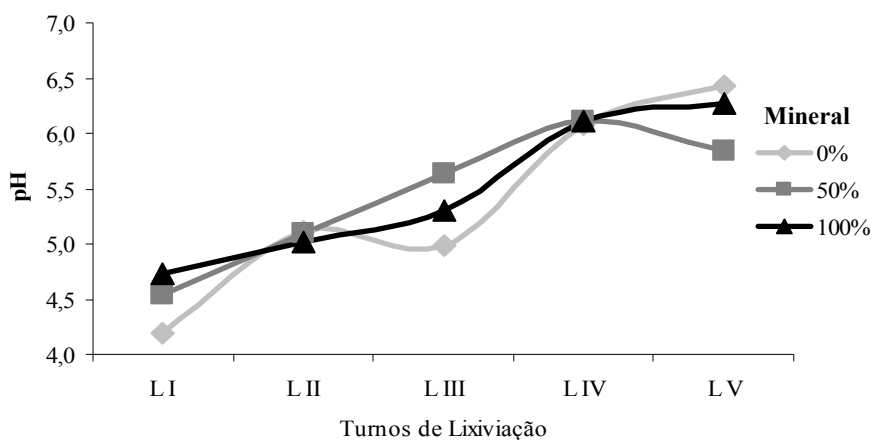


GRÁFICO 5 - pH MÉDIO DE ACORDO COM AS DOSES DE FERTILIZANTE MINERAL E OS TURNOS DE LIXIVIAÇÃO



4.2. ANÁLISE DO SOLO

4.2.1. pH, Acidez Potencial e Alumínio

Para o pH e os teores de Al no solo não ocorreram interações entre nenhum dos fatores (fertilizante mineral, esterco bovino e profundidade do solo). Em relação ao pH também não foi observada diferença estatística devido a profundidade, contrariando tanto KHAN et al. (2006), que observaram aumento de pH e LANGE et al. (2006) que observaram queda de pH com o aumento da profundidade. A ausência

de variação pode ter ocorrido devido à adição de esterco bovino (WALKER, CLEMENTE e BERNAL, 2004) ou devido a uma correção profunda do solo anteriormente ao início do experimento.

A aplicação de esterco bovino teve influência significativa no pH do solo em CaCl_2 e na concentração de Al (TABELA 15). Para o pH foi observado aumento estatístico gradual juntamente com as doses de esterco, fato este também observado por WALKER, CLEMENTE e BERNAL (2004). A dose de $90 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ proporcionou maior valor de pH em relação à testemunha, estando em concordância com os teores de Al, os foram diminuídos com o aumento das doses de esterco. Para o Al foi observado que, apesar do tratamento sem aplicação de esterco ter tido uma concentração 100% maior do que os demais tratamentos, este não foi estatisticamente diferente dos tratamentos com 30 e $90 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$. Tal fato pode ser explicado pelo alto coeficiente de variação observado nesta análise que foi de 160,97.

TABELA 15 - TEORES MÉDIOS DE N-NH_4 , pH, CaCl_2 , Al E K, NO SOLO, APÓS A LIXIVIAÇÃO DE ACORDO COM AS DOSES DE APLICAÇÃO DE ESTERCO BOVINO

ESTERCO ($\text{m}^3 \text{ ha}^{-1}$)	N-NH_4 (mg dm^{-3})	pH CaCl_2	Al ($\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$)	K ($\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$)
0	2,15 AB ⁽¹⁾	4,85 B	0,17 A	0,08 C
30	1,90 B	5,01 AB	0,06 AB	0,11 BC
60	1,92 B	5,10 AB	0,04 B	0,18 AB
90	2,50 A	5,16 A	0,07 AB	0,20 A

⁽¹⁾ Médias seguidas de mesma letra maiúscula dentro da coluna não diferem pelo teste de Tukey a 5%.

A aplicação do fertilizante mineral influenciou tanto o pH quanto o Al (TABELA 16), sendo que as maiores aplicações resultaram em maiores valores para o Al e menores valores para o pH. Os resultados concordam com SILVA (2005) o qual explica o decréscimo do pH pelo efeito ácido da nitrificação do amônio presente nos fertilizantes, tal fato também pode ser visto como responsável pelo aumento do Al disponível no solo.

TABELA 16 - TEORES MÉDIOS DE N-NH_4 , pH, CaCl_2 , Al E K, NO SOLO, APÓS A LIXIVIAÇÃO DE ACORDO COM AS DOSES DE FERTILIZANTE MINERAL

FERTILIZANTE (%)	N-NH_4 (mg dm^{-3})	pH CaCl_2	AL ($\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$)
0	1,88 B ⁽¹⁾	5,90 A	0,03 B
50	2,12 AB	5,11 B	0,07 AB
100	2,35 A	5,08 C	0,16 AB

⁽¹⁾ Médias seguidas de mesma letra maiúscula dentro da coluna não diferem pelo teste de Tukey a 5%.

Comparando-se os valores de pH obtidos neste experimento (aproximadamente 5) (Tabela 15 e 16) com os da área adjacente à área experimental (aproximadamente 4) (Quadro 3) observa-se uma melhoria na acidez do solo. No entanto, comparando-se com os valores obtidos por SILVA (2005), em relação ao ano anterior da coleta, observa-se queda do pH do solo devido a intensa lixiviação.

Para os valores de H+Al não foram constatadas diferenças estatísticas para nenhum fator avaliado. Os valores médios, de H+Al, variaram de 6,21 a 5,86 cmol_c dm⁻³ em relação a profundidade do solo (0 a 40 cm). Note-se que estes valores são bem inferiores aos observados no solo adjacente à área experimental (QUADRO 3), os quais variaram de 6,7 a 10,5 cmol_c dm⁻³. Para todos os tratamentos foi observada queda da acidez potencial em relação à área adjacente, porém, maiores valores quando comparados com os obtidos por SILVA (2005), no ano anterior.

4.2.2. Cálcio, Magnésio e Potássio

O fator profundidade do solo, isoladamente, influenciou significativamente a concentração de Ca, Mg e K no solo (TABELA 17). Estes elementos apresentaram redução da concentração com o aumento da profundidade do solo, fato também observado por SILVA (2005) o qual estudou a mesma área a campo em 2003, ou seja, no ano anterior à coleta do solo e, portanto, sem o efeito da lixiviação.

As diferentes doses, tanto de fertilizante mineral quanto de esterco bovino, não influenciaram significativamente as concentrações de Ca e Mg do solo.

TABELA 17 - TEORES MÉDIOS DE N-NH₄, N-NO₃, K, Ca, Mg E C, NO SOLO, APÓS A LIXIVIAÇÃO DE ACORDO COM A PROFUNDIDADE

PROFUNDIDADE (cm)	N-NO ₃	N-NH ₄	K	Ca	Mg	C
	(mg dm ⁻³)		(cmol _c dm ⁻³)			(g dm ⁻³)
0 a 5	0,55 A ⁽¹⁾	2,4 A	0,26 A	4,3 A	1,3 A	28,9 A
5 a 10	0,54 A	2,2 A	0,19 B	4,4 A	1,0 AB	25,1 B
10 a 20	0,43 AB	2,1 AB	0,13 C	4,4 A	0,9 B	22,6 B
20 a 40	0,33 B	1,7 B	0,04 D	3,7 B	1,0 AB	18,8 C

⁽¹⁾ Médias seguidas de mesma letra maiúscula dentro da coluna não diferem pelo teste de Tukey a 5%.

Diferentemente do Ca e do Mg, para o K foi observada não somente a diminuição deste com a profundidade do solo (TABELA 17) como também o aumento de acordo com as doses de esterco bovino (TABELA 15). Tal diferença possivelmente foi devido a maior quantidade de K aplicada via esterco bovino em relação à via fertilizante mineral. A adição de $30 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ de esterco bovino represente, praticamente, a quantidade de K aplicada via fertilizante mineral (100%) (QUADRO 7).

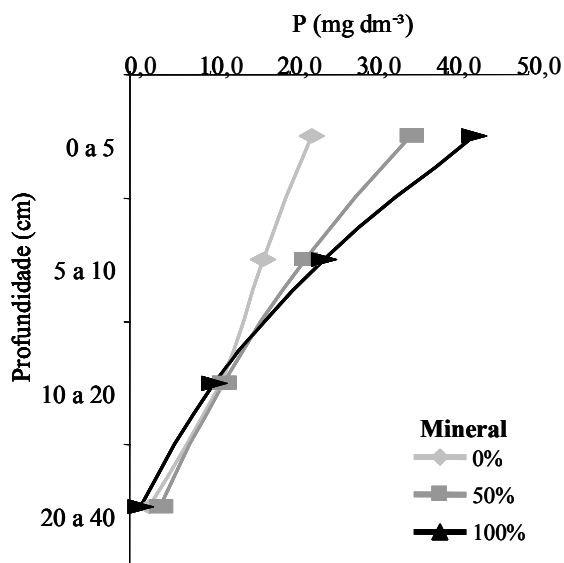
Também se deve ressaltar a diferença observada nos teores de Ca, Mg e K em relação a área adjacente. Nota-se que, mesmo após intensa lixiviação, o solo continua apresentando teores bem superiores aos observados na área adjacente ao experimento (QUADRO 3).

4.2.3. Fósforo

O P foi o único elemento que apresentou interação, a qual envolveu as doses de fertilizante mineral e as camadas de solo. Este elemento apresentou maior concentração nas camadas superficiais (0 a 10 cm) com aplicação de 50 e 100% de fertilizante mineral e queda acentuada em profundidade (GRÁFICO 6). PARHAM et al. (2002) também observou acúmulo de P na superfície do solo com queda acentuada em profundidade.

Um fator que merece destaque foi a concentração de P obtida em todos os tratamentos que não o testemunha. Estes, mesmo após o processo de lixiviação, apresentaram maiores concentrações do que os observados por SILVA (2005), não importando a profundidade analisada.

GRÁFICO 6- TEORES MÉDIOS DE P, NO SOLO, APÓS A LIXIVIAÇÃO DE ACORDO COM A APLICAÇÃO DE FERTILIZANTE MINERAL E PROFUNDIDADE DO SOLO



4.2.4. Carbono

Os diferentes tipos, bem como as diferentes doses de fertilizantes. Não influenciaram a concentração de C no solo. Apenas a profundidade do solo ocasionou diferença significativa nos resultados (TABELA 17). Tal fato também foi observado por SILVA (2005) que não obteve diferença significativa com a aplicação de esterco bovino e/ou fertilizante mineral. Este autor observou valores que variaram de alto a médio até a profundidade de 80 cm e atribuiu isto a características do solo (Latosolo Bruno), presença de raízes e movimentação de matéria orgânica no perfil do solo devido à ação de macro e microorganismos, através dos bioporos, em função do sistema de plantio direto.

4.2.5. Amônio e Nitrato

Tanto para o N-NH₄ como para o N-NO₃ que as médias foram significativamente inferiores na última profundidade analisada (20 a 40 cm) em

relação às camadas superiores do solo (TABELA 17).

Nota-se que, tanto para o N-NO₃ como para o N-NH₄ o fator profundidade foi relevante, já que, para o primeiro houve redução de 40% na concentração enquanto, no segundo, houve redução de 29%, desde a camada superficial (0 a 5cm) até a camada de 20 a 40 cm de profundidade (TABELA 17).

Para o N-NH₄ observa-se que, de maneira geral tanto o esterco bovino (TABELA 15) como o fertilizante mineral (TABELA 16) aumentou a concentração deste elemento no solo. Tal fato está de acordo com FRANCHI (2001) e PORT (2002). É interessante notar que as concentrações de N-NH₄ são bem inferiores às concentrações de K (TABELA 17), demonstrando preferência deste solo pela adsorção de K. Tal fato levanta algumas possibilidades, entre as quais a aplicação excessiva de K, aplicação deficiente de N-NH₄ e rápida nitrificação sendo o N-NO₃ lixiviado, desequilibrando a solução do solo a favor do K.

Ressalta-se ainda que, o solo, pela série liotrófica, tem capacidade similar de retenção do N-NH₄ e do K, no entanto a mineralização pode interferir na fixação, favorecendo o K. Também é interessante ressaltar que a proporção entre K e N-NH₄ diminui com a profundidade do solo, mostrando menor mobilidade do K em profundidade.

Com relação ao N-NO₃ observam-se menores concentrações do que as de N-NH₄. Tal fato se deve à alta lixiviação de N-NO₃, observado pelas altas perdas, até 95% do N total aplicado, enquanto os valores de perda de N-NH₄ foram sempre inferiores a 5% do N total aplicado (TABELA 4).

4.3. EFEITO DO GESSO NA ÁGUA PERCOLADA E NO SOLO APÓS A LIXIVIAÇÃO

Neste item serão apresentados os resultados referentes ao efeito do gesso dos parâmetros analisados na água percolada e no perfil do solo. É interessante lembrar

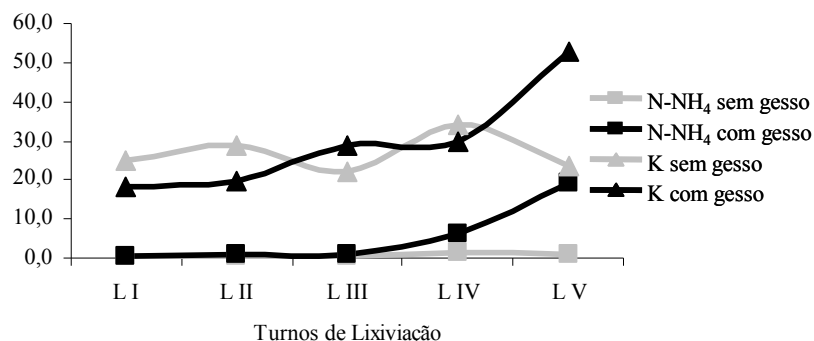
que estes resultados referem-se à comparação entre a aplicação ou não de gesso no solo com $90 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ de esterco bovino e 100% de fertilizante mineral.

4.3.1. Análise da água percolada

A aplicação de gesso ou não com $90 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ de esterco e 100% de fertilizante mineral influenciou a concentração de íons na água percolada, a qual será apresentada e discutida a seguir.

Tanto para o N-NH_4 como para o K ocorreram interações entre a aplicação de gesso e os turnos de lixiviação (GRÁFICO 7). A adição de gesso fez com que ocorresse aumento da concentração dos elementos, sendo que, para o N-NH_4 a diferença estatística ocorre após o terceiro turno de lixiviação e para o K somente no quinto turno de lixiviação, confirmando a maior capacidade de retenção do K no solo em relação ao N-NH_4 . A maior concentração destes elementos é devido a grande adição de íons Ca no sistema, que, seguindo a serie liotrófica, remove os íons N-NH_4 e K do solo, deslocando-os para a solução do solo, e, conseqüentemente facilitando a lixiviação dos mesmos. É interessante lembrar que o CaSO_4 (gesso), ao contrário do calcário apresenta alta solubilidade (SHAINBERG et al., 1989). Diversos autores também encontraram maiores perdas tanto de N-NH_4 (FAVARETTO, 2002; ALVA, PRAKASH e PARAMASIVAM, 1998) como de K (LÓPEZ, ESPEJO e VIDAL, 2002; ALVA e GASGHO, 1991) nos tratamentos com aplicação de gesso quando comparados com os tratamentos sem adição do mesmo.

GRÁFICO 7 - CONCENTRAÇÃO MÉDIA DE N-NH₄ E K NA ÁGUA PERCOLADA EM FUNÇÃO DA APLICAÇÃO DE GESSO E TURNOS DE LIXIVIAÇÃO



Os valores de pH e N-NO₃ não foram influenciados pela adição de gesso, sendo importante apenas o turno de lixiviação, apresentando um comportamento similar ao observado nas demais colunas de lixiviação e já abordado nos itens anteriores.

Com relação a concentração de P na água percolada, não observou-se efeito significativo do gesso e nem dos turnos de lixiviação, no entanto é importante ressaltar que na análise estatística sobre o efeito do gesso, poucos tratamentos estão envolvidos, o que pode dificultar o aparecimento de diferenças significativas. O que se observa, no entanto, é uma tendência ($P < 0,07$) (ANEXO 4) de menores valores de P com a aplicação de gesso (GRÁFICO 8).

GRÁFICO 8 - MÉDIAS DE P NA ÁGUA PERCOLADA EM FUNÇÃO DA APLICAÇÃO DE GESSO E TURNOS DE LIXIVIAÇÃO

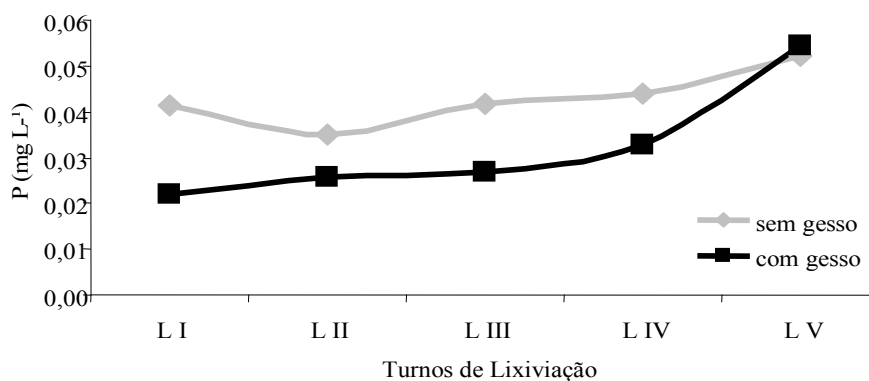
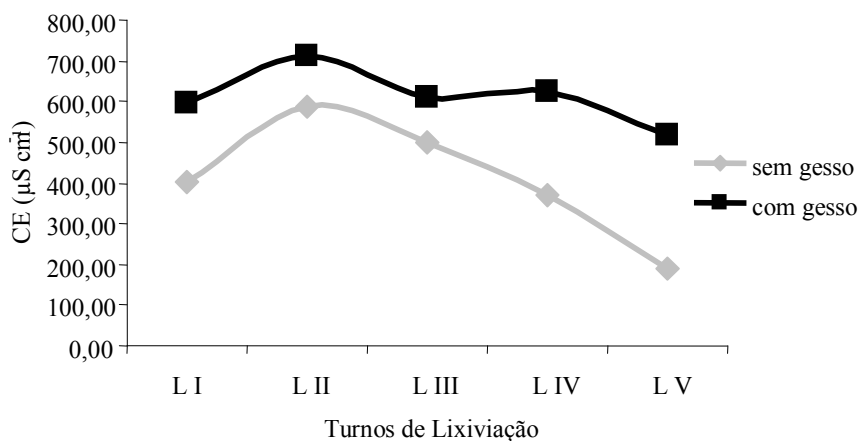
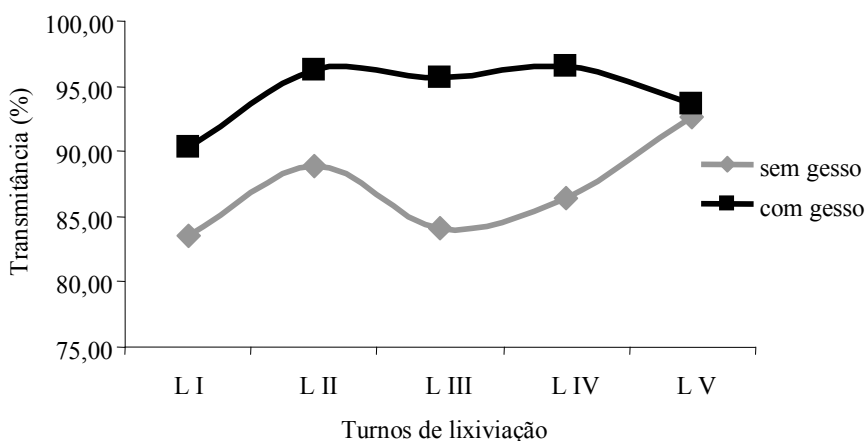


GRÁFICO 9 - MÉDIAS DE CONDUTIVIDADE ELÉTRICA NA ÁGUA PERCOLADA EM FUNÇÃO DA APLICAÇÃO DE GESSO E TURNOS DE LIXIVIAÇÃO



A aplicação de gesso elevou significativamente a CE (GRÁFICO 9) e a transmitância (GRÁFICO 10). O aumento da CE é devido ao aumento de íons na água percolada causado pela adição do gesso, o qual desloca íons como N-NH₄ e K para a solução do solo, devido à adição de Ca no sistema. A maior transmitância é devido à floculação das argilas causada pelo gesso (FAVARETTO, 2002; SHAINBERG et al., 1981).

GRÁFICO 10 - MÉDIAS DA TRANSMITÂNCIA NA ÁGUA PERCOLADA EM FUNÇÃO DA APLICAÇÃO DE GESSO E TURNOS DE LIXIVIAÇÃO

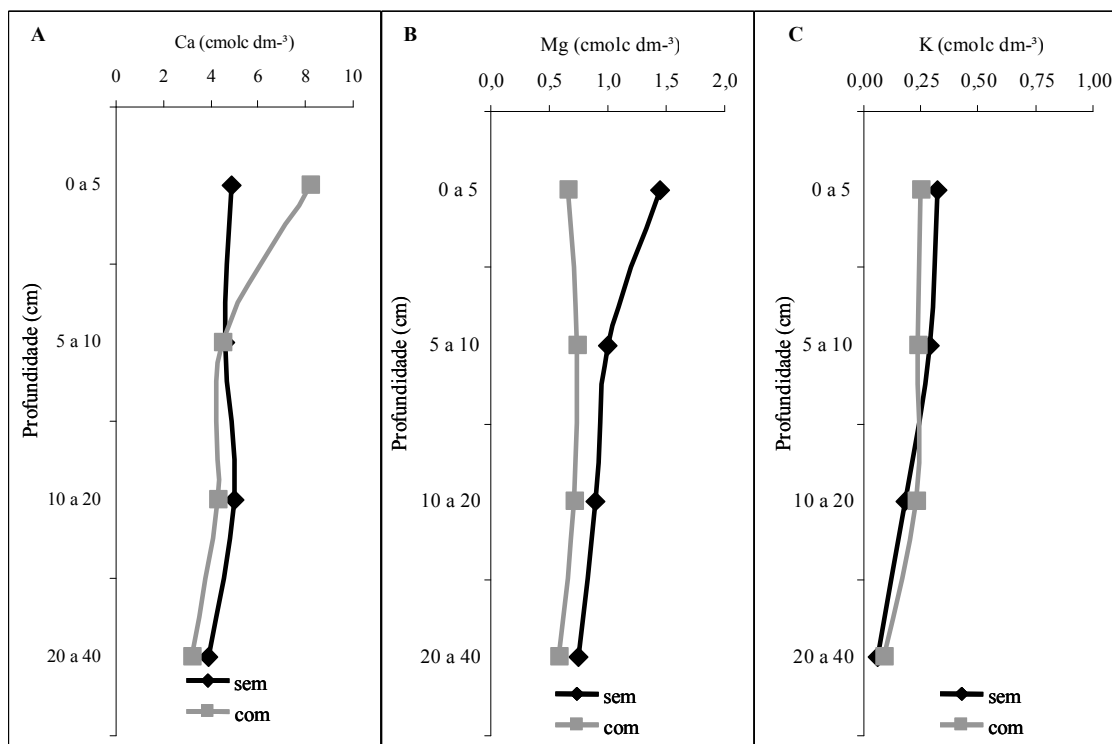


4.3.2. Análise do solo das colunas

A adição de gesso fez com que ocorresse acúmulo de Ca na camada superficial, diminuindo os valores de Mg e K (GRÁFICO 11), devido a menor capacidade de retenção em relação ao Ca. Resultados similares são apresentados por SHAINBERG et al. (1989). Para o K ocorreu uma distribuição no perfil do solo (GRÁFICO 11), indicando a remoção deste por lixiviação devido a adição do gesso, o que pode ser observado no GRÁFICO 7.

Com relação ao pH, em CaCl_2 , não foi observada diferença devido à aplicação ou não de gesso, fato esperado devido a este ser um sal neutro (FAVARETTO, 2002). Diversos autores demonstraram resultados envolvendo aumento, queda, ou pouco efeito, devido à aplicação de gesso, no solo (FAVARETTO, 2002; ALVA et al. 1990; SHAINBERG et al., 1989, PAVAN, BINGHAM e PRATT, 1982).

GRÁFICO 11 - TEORES MÉDIOS DE Ca (A), Mg (B), E K (C) NO SOLO EM FUNÇÃO DA PROFUNDIDADE E APLICAÇÃO DE GESSO APÓS A LIXIVIAÇÃO



Os teores de P extraído via água e de N-NH₄ e N-NO₃, tanto os extraídos via água como via KCl 2M, não foram afetados pela aplicação do gesso. No caso do P extraído via Mehlich observou-se interação entre gesso e profundidade, já que, até a profundidade de 10 cm o tratamento com adição de gesso demonstrou maiores teores de P do que o tratamento sem adição de gesso (GRÁFICO 12).

Apesar de não ter sido feita análise estatística comparando os extratores observou-se uma relação de 6,5 vezes entre os teores de N-NO₃ (a extração via KCl resultou um valor médio de 3,9 mg dm⁻³ enquanto que via água foi de 0,6 mg dm⁻³). De maneira parecida ao observado para o N-NO₃ foi constatada que a extração via água também resultou em menores concentrações para o N-NH₄ e P (GRÁFICO 13), porém, para estes foram observadas maiores diferenças nas camadas superficiais, fato que não ocorreu para o N-NO₃.

GRÁFICO 12 - TEORES MÉDIOS DE P NO SOLO EM FUNÇÃO DO EXTRATOR UTILIZADO E PROFUNDIDADE DO SOLO

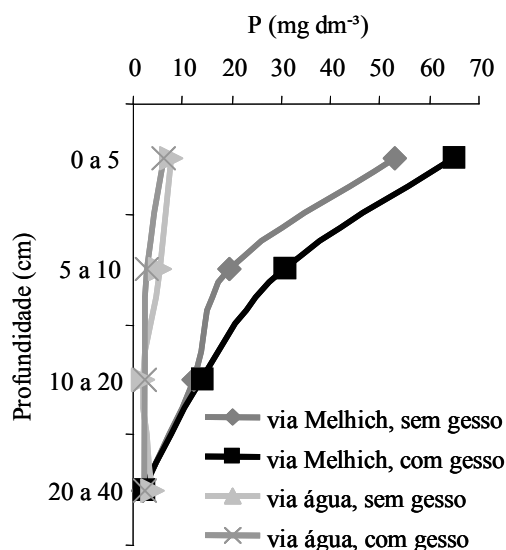
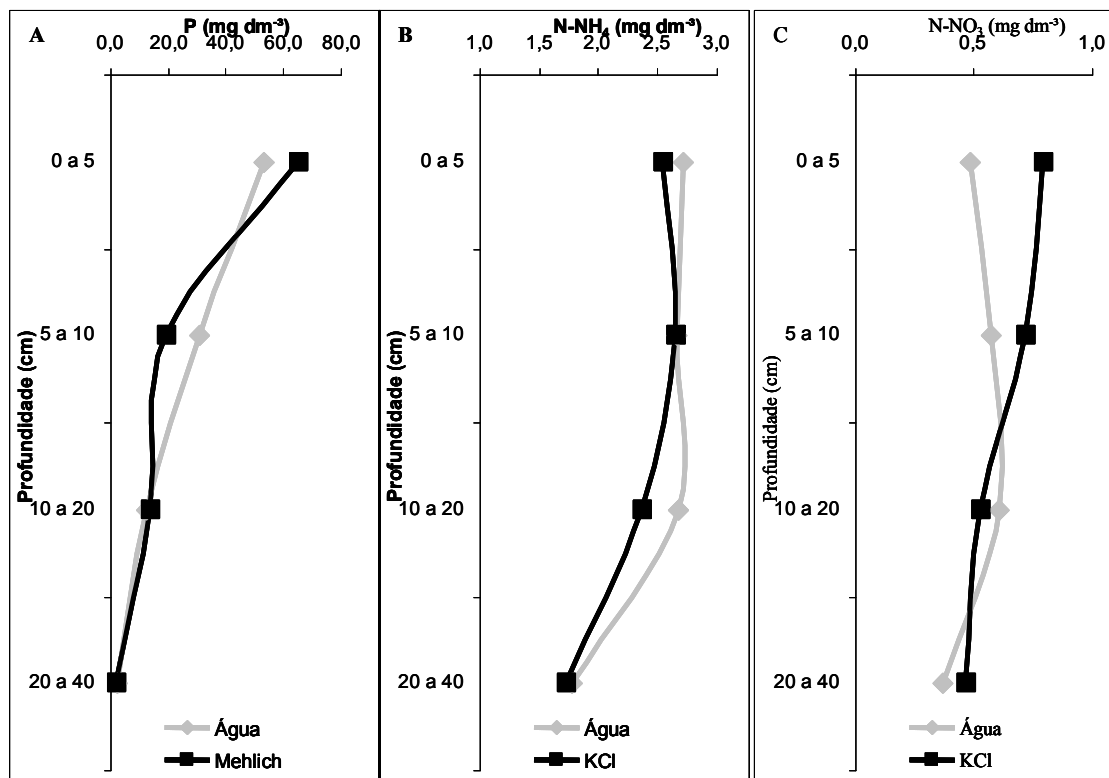


GRÁFICO 13 - TEORES MÉDIOS DE P (A), N-NH₄ (B) E N-NO₃ (C) DO SOLO DOS TRATAMENTOS COM E SEM APLICAÇÃO DE GESSO EM FUNÇÃO DA PROFUNDIDADE E EXTRATOR APÓS A LIXIVIAÇÃO



5. CONCLUSÕES

A maior dose de esterco resultou em maiores concentrações de N-NH₄ e P, na água percolada, tendo sido mais acentuado no quinto turno de lixiviação. Ainda com relação ao N-NH₄ sua lixiviação foi tanto mais lenta quando maior a dose de fertilizante mineral. Para o K, na água percolada, foi observado que, tanto o fertilizante mineral como o esterco bovino afetou a concentração – maiores doses correspondem a maiores concentrações, a partir do segundo turno. A concentração de N-NO₃ na água percolada foi afetada apenas pelo fertilizante mineral – maiores doses resultaram em maiores concentrações.

De modo geral, com exceção do N-NO₃, as concentrações tanto de N-NH₄ como de P estiveram abaixo do limite máximo permitido pela legislação Brasileira.

As perdas médias de N-NH₄, N-NO₃, P e K, em relação ao total aplicado, foram respectivamente de 4,4%, 52,5%, 0,4% e 8,8% e, em relação ao solúvel foram respectivamente de 8,5%, 106,5%, 1,2% e 11,1%.

No solo houve redução do teor de N-NO₃, N-NH₄, K, C, Mg, P e Ca com a profundidade. Para o N-NH₄, N-NO₃ e Ca observou-se uma redução significativa a partir dos 20 cm de profundidade enquanto que para o K, C, Mg e P a redução ocorreu desde os 5 cm de profundidade. Para o P esta queda foi acentuada nas maiores doses de fertilizante mineral. Para o esterco bovino, no solo, foi observado aumento de N-NH₄, K e pH e queda de Al com o aumento das doses. Para o fertilizante mineral, no solo, foi observado efeito similar exceto para o K.

A aplicação de gesso proporcionou maior transmitância e condutividade elétrica bem como maior concentração de K e N-NH₄ na água percolada, não tendo efeito sobre o N-NO₃, P e pH. Já, no solo, a aplicação de gesso promoveu acúmulo de Ca na camada superficial, deslocando Mg e K para camadas mais profundas, e, para o N-NH₄, N-NO₃ e P, não foi observado efeito devido a adição de gesso.

REFERÊNCIAS

- ALVA, A. K.; GASGHO, G. J. Differential leaching of cations and sulfate in gypsum amended soils. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, Monticello, v. 22, n. 11/12, p. 1195-1206, 1991.
- ALVA, A. K.; PRAKASH, O.; PARAMASIVAM, S. Transport of nitrogen forms in sandy entisol with coal combustion by-product gypsum amendment. **Journal of Environmental Science Health**, Monticello, v. A33, n. 6, p. 1023-1039, 1998.
- ALVA, A. K.; SUMMER, M. E.; MILLER, W. P. Reactions of gypsum or phosphogypsum in highly weathered acid subsoils. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, Madison, v 54, p. 993-998, 1990.
- APHA – American Public Health Association. **Standart methods for the examination of water and wastewater**. 19th, Washington, AWWA, 1995
- BAKHSH, A.; KANWAR, R. S.; KARLEN, D. L. Effects of liquid swine manure applications on NO₃-N leaching losses to subsurface drainage water from loamy soils in Iowa. **Agriculture Ecosystems and Environment**, Amsterdam, v.109, p. 118-128, 2005.
- BASSO, B.; RITCHIE, J. T. Impact of compost, manure and inorganic fertililzer on nitrate leaching and yield for a 6-years maize-alfafa rotations on Michigan. **Agriculture Ecosystems and Environment**, Amsterdam, v. 108, p. 329-341, 2005.
- BERTOL, O.J.; RIZZI, N.E.; FAVARETTO, N.; LAVORANTI, O.J. Perdas de nitrogênio via superfície e subsuperfície em sistema de semeadura direta. **Revista Floresta**, Curitiba, v. 35, n. 3, p.429-443, 2005.
- BÖRLING, K. **Phosphorus sorption, accumulation and leaching – Effects of long-term inorganic fertilization of cultivated soils**. Uppsala, 2003. 39p. Tese (Doctoral of Agricultural Sciences). Swedish University of Agricultural Sciences.
- BOTTCHER, A. B.; MONKE, E. J.; HUGGINS, L. F. Nutrients and sediment loading from a subsurface drainage system. **Transaction of ASAE (American Society of Agricultural Engineers)**, St. Joseph, v. 24, n. 5, p. 1221-1226, 1981.
- BRASIL - Agência Nacional de Vigilância Sanitária. **Resolução - RDC nº 54, de 15 de junho de 2000** - DO de 19/6/2000.
- BRASIL - Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Resolução nº 357, de 17 de março de 2005**. Diário Oficial da União de 18/03/2005. Brasília, 2005.
- BRASIL - Ministério da Saúde - **Portaria nº 518, de 25 de março de 2004** - D.O.U. - Diário Oficial da União; Poder Executivo, de 26 de março de 2004.
- CORRELL, D. L. The role of phosphorus in the eutrophication of receiving waters: a review. **Journal of Environmental Quality**, Madison, v. 27, 9. 261-266, March-April, 1998.
- DANIEL, T. C.; SHARPLEY, A. N.; LEMUNYON, J. L. Agricultural phosphorus and eutrophication. **Journal of Environmental Quality**, Madison, v. 27, n. 2, p. 251-257, 1998.
- DJODJIC, F; BERGSTRO, L. M. Phosphorus losses from arable fields in Sweden - effects of field-specific factors and long-term trends. **Environmental Monitoring and Assessment**, Dordrecht, v. 102, p. 103-117, 2005.

EMBRAPA/ Fundação ABC. **Mapa do Levantamento semidetalhado de solos:** Município de Castro. Elaborado por: Fasolo, P.J., A.P. Carvalho, I.A. Bognola, R.O. Pötter. EMBRAPA/Fundação ABC, 2001.

FASSBENDER, H. W. **Química del suelos.** San José, Instituto Interamericano de Cooperacion para la Agricultura. 1986. Cap. 5, 9,12.

FAVARETTO, N. **Gypsum amendment and exchangeable calcium and magnesium related to water quality and plant nutrition.** West Lafayette, 2002. 125 p. Tese (Doctor of philosophy). Universidade de Purdue.

FONTES, M. P. F. **Mineralogia do Solo.** Viçosa: UFV, Departamento de Solos, 1996.

FORTUNE, S. et al - Assessment of phosphorus leaching losses from arable land. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 269, p. 99-108, 2005.

FRANCHI, E. A. G. **Dinâmica do nitrogênio no solo e produtividade de milho, aveia e ervilhaca com o uso de dejetos de suínos em sistema plantio direto.** Santa Maria, 2001. 87 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia). Universidade Federal de Santa Maria.

FREED, R. – MSTAT-C – Department of Crop and Soil Sciences, Michigan State University, East Lansing, 1994. Disponível em <http://www.msu.edu/~freed/disks.htm>

GARG, K. K.; JHA, M. K.; KAR, S. Field investigation of water movement and nitrate transport under Perched water table conditions – SW. **Soil and Water – Biosystems Engineering**, Kharagpur, v.92, n. 1, p. 69-84, 2005.

GEOHRING, L. D.; McHUGH, O. V.; WALTER, M. T.; STRRNHUIS, T. S.; AKHTAN, M. S.; WALTER, M. F. Phosphorus transport into subsurface drains by macropores after manure applications: implications for best manure management practices. **Soil Sciences**, v. 12, p. 898-909, 2001.

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 and Soil**, Dordrecht, v. 273, p. 129-137, 2005.

HILDEBRAND, C. **Manual de análise química de solo e plantas.** Curitiba: UFPR, 1977, 225p.

JAKOBSEN, S. T. Leaching of nutrients from pots with and without applied compost. **Resources Conservation and Recycling**, Amsterdam, v. 17, p. 1-11, 1996.

JENSEN, M. B.; JORGENSEN, P. R.; HANSEN, H. C. B.; NIELSEN, N. E. Biopore mediated subsurface transport of dissolved orthophosphate. **Journal of Environmental Quality**, Madison, v. 27, p. 1130-1137, 1998.

JURY, W. A.; GARDNER, W. R.; GARDNER, W. H. **Soil physics.** 5th ed. New York: John Wiley e Sons, 1991.

KEMKA, N.; NJINÉ, T.; TOGOUET, S. H. Z; MENBOHAN, S. F.; NOLA, M. MONKIEDJE, A.; NIYITEGEKA, D.; COMPERE, P. Eutrophication of lakes in urbanized areas: The case of Yaunde Municipal Lake in Cameroon, Central Africa. **Lakes e Reservoirs Research and Management**, Carlton South, v. 11, n. 1, p. 47-55, Mar. 2006.

KHAN, M. S. H., MIAN, A. M. J.; AFRIAN-AKTER, A.; KHOSRUZZAMAN, M. Physico-chemical changes of paddy soils under long-term intensive fertilization. **Asian Journal of Plant Sciences**, v. 5, n. 1, p. 105-111, 2006.

KIRCHMANN, H. Animal and municipal organic wastes and water quality. In: LAL, R. & STEWART, B.A. eds. **Soil processes and water quality**, Boca Raton, Lewis Publishers, 1994. p.163-232.

KLADIVSKO, E. J.; SCOYOC, van G. E.; MONKE, E. J.; OATES, K. M.; PASK, W. Pesticide and nutrient movement into subsurface tile drains on a silt loam soil in Indiana. **Journal of environment quality**, Madison, v. 20, p. 264-270, 1991.

KOENIG, R.T.; PAN, W.L. Calcium effects on quantity-intensity relationships and plant availability of ammonium. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, Madison, v.60, p. 492-497, 1996.

KYE-HAN, L.; SHIBU, J. Nitrate leaching in cottonwood and loblolly pine biomass plantations along a nitrogen fertilization gradient. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, Amsterdam, v. 105, p. 615-623, 2005.

LAL, R.; MOKMA, D.; LOWERY, B. 1998. Relation between soil quality and erosion. In: LAL, R. (Ed.). **Soil erosion and soil quality**, Boca Raton, CRC Press, 1998, p. 237-258.

LAL, R.; STEWART, B.A. Soil processes and water quality. In: LAL, R. & STEWART, B.A., eds. **Soil process and water quality. Advances in soil science**, Boca Raton, Lewis Publishers, 1994. p.1-6.

LANGE, A.; CARVALHO, J. L. N. de.; DAMIN, V.; CRUZ, J. C.; MARQUES, J. J. Alterações em atributos do solo decorrentes da aplicação de nitrogênio e palha em sistema semeadura direta na cultura do milho. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 36, n. 2, p. 460-467, Mar./Apr, 2006.

LI, Y.C.; ALVA, A.K., CALVERT, D.V. Transport of phosphorus and fractionation of residual phosphorus in various horizons of a spodosol. **Water, Air and Soil Pollution**, Dordrecht, v. 109 p:303-312, 1999.

LÓPEZ, A.; ESPEJO, R.; VIDAL, M. Study of ammonium contamination in leachates from na ultisol following application of varios types of amendment. **Water Air and Soil Pollution**, Dordrecht, v. 133, p. 133-143, 2002.

MAACK, R. **Geografia Física do Estado do Paraná**, 2. ed. Rio de Janeiro: Ed. J. Olympoi, 1981. 450 p.

McDOWELL, R., SHARPEY, A. N. Phosphorus losses in subsurface flow before and after manure application to intensively farmed land. **Science of Total Environment**, Shannon, v. 278, n. 1/3, p. 113-1252, 2001.

McPHARLIN, R.; JEFFERY, R. C.; TOUSSAINT, L. F.; COOPER, M. Phosphorus, nitrogen, and radionuclide retention and leaching from a joel sand amended with red mud/gypsum. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, Monticello, v. 25, n. 17/18, p. 2925-2944, 1994.

MERTEN, G. H.; MINELLA, J. P. Qualidade da água em bacias hidrográficas rurais: um desafio atual para a sobrevivência futura. **Agroecol. e Desenvol. Rul. Sustent**, v.3, n. 4, p. 33-38, Out./Dez., 2002.

MOTTA, P. E. F.; CURI, N.; SIQUEIRA, J. O.; RAIJ, van B.; FURTINI NETO, A. E.; LIMK, J. M. Adsorção e formas de fósforo em latossolos: Influencia da mineralogia e histórico de uso. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, Campinas, v. 26, n. 2, p. 349-359, 2002.

MULVANEY, R. L. Nitrogen: inorganic forms. In: SPARKS, D. L. et al. (Ed.). **Methods od Soil Analysis**, Madison: SSA Book, 1996. p. 1123-1184.

OWENS, L. B. Impacts of soil N management on the quality of surface and subsurface water. In: LAL, R.; STEWART, B. A. (Eds.). **Advances in soil science**. Soil processes and water quality, Boca Raton, Lewis Publishers, 1994, p. 137-162.

PARHAM, J. A.; DENG, S. P.; RAUN, W. R.; JOHNSON, G. V. Long-term cattle manure application in soil. I. Effect on soil phosphorus levels, microbial biomass C, and dehydrogenase and phosphatase activities. **Biol. Fertil. Soils**, v. 35, p. 328-337, 2002.

PAVAN, A. M.; BINGHAM, F. T.; PTATT, P. F. Toxicity of aluminium to coffee in ultisols and oxisols amended with CaCO_3 , MgCO_3 and $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, Madison, v. 46, p. 1201-1207, 1982.

PAVAN, M. A.; BLOCH, M. F.; ZEMPULSKI, H. C.; MIYAZAWA, M.; ZOCOLER, D. C. **Manual de análise química de solo e controle de qualidade**. Londrina, Instituto Agrônomo do Paraná, 1992. 38p. (Circular, 76)

PHILLIPS, I.; BURTON, E. Nutrient leaching in undisturbed cores of an acidic sandy Podsol following simultaneous potassium chlorides and di-ammonium phosphate application. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, Dordrecht, v. 73, p. 328-337, 2002.

PIERZYNSKY, G. M.; SIMNS, J. T.; VANCE, G. F. 2000. **Soils and environmental quality**. 2ed. New York: CRC press. 459 p.

PORT, O. **Uso de dejetos de suínos em sistema plantio direto: volatilização de amônia, N mineral no solo, fornecimento de nutrientes e produtividade de plantas de cobertura e de milho**. Santa Maria, 2002. 132 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia). Universidade Federal de Santa Maria.

PREVEDELLO, C. L. Física do solo com problemas resolvidos. Curitiba, SAEAFS, 1996, 446 p.

RAIJ, van B. **Fertilidade do solo e adubação**. São Paulo, Ceres, 1991, 343 p.

REDDY, K. R.; OVERCASH, M. R.; KHALEEL, R.; WESTERMAN, P. W. Phosphorus adsorption-desorption characteristics of two soils utilized for disposal of animal wastes. **Journal of Environmental quality**, Madison, v. 9, p. 86-92, 1980.

SELF-DAVIS, M. L., MOORE, P. A. JOERN B. C. 2000. Determination of water-and/or dilute salt-extractable phosphorus. p. 24-26. In: G.M. PIERZYNSKI (Ed.) **Methods of phosphorus analysis for soils, sediments, residuals, and waters**. Southern Cooperative Ser. Bull. 396. SERA-IEG 17. Disponível em:
http://www.soil.ncsu.edu/sera17/publications/sera17-2/pm_cover.htm

SHAINBERG, I.; SUMMER, M. E.; MILLER, W. P.; FARINA, M. P. W.; PAVAN, M. A.; FEY, M. V. Use of gypsum on soils: a Review. In: STEWART, B. A. (Ed.) **Advances in soil sciences**, Boca Raton, Lewis Publishers, 1989.

SHARPLEY, A. N.; HALVORSON, A. D. The management of soil phosphorus availability and its transport in agricultural runoff. In Lal, R. (ed.) **Soil processes and water quality**, Boca Raton, Lewis Publishers, p.1-84, 1994.

SHARPLEY, A. N.; MCDOWELL, R. W.; KLEINMAN, P. J. A. Phosphorus loss from land to water: integrating agricultural and environment management. **Plant and Soil**, Dordrecht, v.237, p. 287-307, 2001

SHARPLEY, A. N.; SMITH, S. J.; BAIN, W. R. Nitrogen and phosphorus fate from long-term poultry litter applications to Oklahoma soils. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, Madison, v. 57, p. 1131-1137, 1993.

- SILVA, J. C. P. M. da. **Esterco líquido de gado de leite e fertilização mineral influenciando a produção de silagem e propriedades químicas do solo na região dos campos gerais do Paraná.** Curitiba, 2005. Dissertação (Mestrado em Ciências do Solo). Universidade Federal do Paraná.
- SILVEIRA, P. M.; SILVEIRA NETO, A. N.; STONE, L. F.; OLIVEIRA, L. F. C. Efeito do preparo e da rotação de culturas em alguns atributos químicos de um Latossolo Vermelho Distrófico. **Biosc. J.**, Uberlândia, v. 21, n. 3, p. 85-91, set./dez., 2005.
- SILVEIRA, P. M.; ZIMMERMANN, F. J. O.; SILVA, S. C.; CUNHA, A. A. Amostragem e variabilidade espacial de características químicas de um latossolo submetido a diferentes sistemas de preparo. **Pesq. Agropec. Bras.**, Brasília, v. 35, n., 10, p. 2057-2064, 2000.
- SIMS, J. T.; SIMARD, R. R.; JOERN, B. C. Phosphorus loss in agricultural drainage: Historical perspective and current research. **Journal of Environmental Quality**, Madison, v. 27, n. 2, p. 277-293, 1998.
- SMITH, S. J.; SCHEEPERS, J. S.; PORTER, L. K. Assessing and managing agricultural nitrogen losses to the environment. In: LAL, R.; STEWART, B. A. (Eds.). **Advances in soil science**, Chelsea, Lewis Publishers, 1990, 398p.
- SPARKS, D.L. **Environmental soil chemistry**. San Diego, Academic Press, 1995. 267p.
- TOMÉ, JR., J. B. **Manual para interpretação de análise do solo**. Guaíba: Agropecuária, 1997. 247 p.
- TUNDISI, J. G. **Água no século XXI: Enfrentando a escassez**. Instituto Internacional de Ecologia, São Carlos – SP, Editora RIMA, 2003.
- WALKER, D. J.; CLEMENTE, R.; BERNAL, M.P. Contrasting effects of manure and compost on soil pH, heavy metal availability and growth of *Chenopodium album* L. in a soil contaminated by pyritic mine waste. **Chemosphere**, Oxon, v. 57, n. 3, p. 215-224, Oct. 2004.
- WHITE, R. E.; HENG, L. K.; MAGESAN, G. N. Nitrate leaching from a drained, sheep-grazer pasture. II. Modelling nitrate leaching losses. **Australian Journal of Soil Research**. Collingwood, v.36, p. 963-77, 1998.
- ZHOU, A.; TANG, H. WANG, D. Phosphorus adsorption on natural sediments: Modeling and effects of pH and sediment composition. **Water Research**, Oxon, v. 39, n. 7n p. 1245-1254. April, 2005.

ANEXOS

ANEXO 1 - ANÁLISES DE VARIÂNCIA DA ÁGUA PERCOLADA DE ACORDO COM A APLICAÇÃO DE ESTERCO BOVINO, FERTILIZANTE MINERAL E TURNOS DE LIXIVIAÇÃO.

Fonte:	G.L.	RAIZ (N-NO ₃ ⁻)			LOG (1000*N-NH ₄ ⁺)			100*RAIZ(P)			100*RAIZ(K)		
		S.Q.	Q.M.	Prob.	S.Q.	Q.M.	Prob.	S.Q.	Q.M.	Prob.	S.Q.	Q.M.	Prob.
Esterco Bovino (A)	3	5300,282	1766,761		1,062	0,354	0,036	366,084	122,028	0,005	1299,568	433,189	0,000
Fertilizante Mineral (B)	2	416425,460	208212,730	0,000	0,455	0,228	0,138	102,676	51,338	0,118	951,849	475,925	0,000
AB	6	174295,433	29049,239	0,054	1,404	0,234	0,077	209,684	34,947	0,193	762,047	127,008	0,021
Erro	24	284005,773	11833,574		2,538	0,106		527,732	21,989		975,577	40,649	
Volume Lixiviado (C)	4	3489862,365	872465,591	0,000	5,911	1,478	0,000	605,221	151,305	0,000	1095,010	273,753	0,000
AC	12	59269,107	4939,092		5,019	0,418	0,000	357,718	29,810	0,021	389,148	32,429	0,002
BC	8	220398,958	27549,870	0,000	1,732	0,216	0,097	244,151	30,519	0,035	361,004	45,126	0,001
ABC	24	204958,167	8539,924	0,193	3,886	0,162	0,179	388,907	16,204	0,295	376,216	15,676	0,149
Erro	96	636219,686	6627,288		11,871	0,124		1336,815	13,925		1105,943	11,520	
Total	179	5490735,230			33,877			4138,988			7316,364		
Coeficiente de Variação:		21,30%			14,28%			22,39%			17,56%		
Fonte:	G.L.	100*LOG (CONDUTIVIDADE)			100*EXP (TRANSMITÂNCIA/ 100)			100*RAIZ (pH)					
		S.Q.	Q.M.	Prob.	S.Q.	Q.M.	Prob.	S.Q.	Q.M.	Prob.			
Esterco Bovino (A)	3	7353,075	2451,025	0,000	12185,280	4061,760	0,000	4389,458	1463,153	0,404			
Fertilizante Mineral (B)	2	27673,467	13836,734	0,000	2433,067	1216,534	0,002	173,924	86,962				
AB	6	3788,723	631,454	0,024	221,913	36,985		1951,133	325,189				
Erro	24	5032,758	209,698		3561,971	148,415		34664,997	1444,375				
Volume Lixiviado (C)	4	52427,097	13106,774	0,000	855,090	213,773	0,050	34576,969	8644,242	0,000			
AC	12	2738,888	228,241	0,000	3637,272	303,106	0,000	2108,548	175,712	0,411			
BC	8	3981,376	497,672	0,000	1878,830	234,854	0,010	3100,361	387,545	0,026			
ABC	24	2208,403	92,017	0,145	2999,016	124,959	0,110	3077,353	128,223				
Erro	96	6463,158	67,325		8330,512	86,776		16069,586	167,392				
Total	179	111666,944			36102,950			100112,330					
Coeficiente de Variação:		3,42%			3,72%			5,58%					

ANEXO 2 - ANÁLISES DE VARIÂNCIA DA PERDA MÉDIA OCORRIDA NA ÁGUA PERCOLADA DE ACORDO COM A APLICAÇÃO DE ESTERCO BOVINO E FERTILIZANTE MINERAL.

FONTE:	G.L.	N-NO ₃ ⁻			N-NH ₄ ⁺			100*RAIZ(P)			100*RAIZ(K)		
		S.Q.	Q.M.	Prob.	S.Q.	Q.M.	Prob.	S.Q.	Q.M.	Prob.	S.Q.	Q.M.	Prob.
Esterco Bovino (A)	3	91,737	30,579		7,175	2,392	0,038	433,408	144,469	0,004	1197,052	399,017	0,000
Fertilizante Mineral (B)	2	5197,280	2598,600	0,000	0,374	0,187		37,991	18,996		845,574	422,797	0,000
AB	6	2755,410	459,230	0,022	11,644	1,941	0,040	250,402	41,734	0,173	944,051	157,341	0,001
Erro	24	3559,020	148,290		17,501	0,729		602,050	25,085		662,365	27,599	
Total	35	11603,400			36,695			1323,851			3649,043		
Coefficiente de Variação:		23,39%			37,78%			14,40%			13,16%		

ANEXO 3 - ANÁLISES DE VARIÂNCIA DO SOLO, DE ACORDO COM A APLICAÇÃO DE ESTERCO BOVINO, FERTILIZANTE MINERAL E PROFUNDIDADE (continua)

FONTE:	G.L.	100*N-NH ₄ ⁺			100*N-NO ₃ ⁻			RAIZ (100*P)			RAIZ (100*K)		
		S.Q.	Q.M.	Prob.	S.Q.	Q.M.	Prob.	S.Q.	Q.M.	Prob.	S.Q.	Q.M.	Prob.
Esterco Bovino (A)	3	83224,114	27741,370	0,006	20,071	6,690	0,144	1545,931	515,310	0,095	65,433	21,811	0,000
Fertilizante Mineral (B)	2	54656,521	27328,260	0,013	21,831	10,915	0,057	710,345	355,173	0,215	3,279	1,639	
AB	6	26428,540	4404,757		22,477	3,746	0,386	1165,289	194,215		24,369	4,061	0,081
Erro	24	126476,660	5269,861		81,067	3,378		5192,161	216,340		44,686	1,862	
Profundidade (C)	3	83254,224	27751,410	0,000	67,821	22,607	0,000	37557,060	12519,020	0,000	190,713	63,571	0,000
AC	9	41255,568	4583,952	0,042	14,067	1,563		485,638	53,960	0,352	9,747	1,083	0,105
BC	6	9964,488	1660,748		25,909	4,318	0,053	1636,563	272,761	0,000	1,423	0,237	
ABC	18	64053,843	3558,547	0,079	35,644	1,980	0,462	1058,508	58,806	0,259	14,816	0,823	0,221
Erro	72	158540,300	2201,949		141,510	1,965		3432,905	47,679		45,942	0,638	
Total	143	647854,26			430,396			52784,4			400,408		
Coefficiente de Variação:		22,17%			20,77%			18,85%			21,45%		

continua

ANEXO 3 - ANÁLISES DE VARIÂNCIA DO SOLO, DE ACORDO COM A APLICAÇÃO DE ESTERCO BOVINO, FERTILIZANTE MINERAL E PROFUNDIDADE (continuação)

FONTE:	G.L.	100*pH SMP			100*pH CaCl ₂			100*Al			100* (H+Al)		
		S.Q.	Q.M.	Prob.	S.Q.	Q.M.	Prob.	S.Q.	Q.M.	Prob.	S.Q.	Q.M.	Prob.
Esterco Bovino (A)	3	9124,306	3041,435	0,354	19290,969	6430,323	0,026	3805,556	1268,519	0,039	222818,715	74272,905	0,241
Fertilizante Mineral (B)	2	13616,667	6808,333	0,100	13543,057	6771,528	0,035	3843,056	1921,528	0,016	247705,554	123852,780	0,104
AB	6	2661,111	443,519		6206,946	1034,491		2056,944	342,824		59949,981	9991,664	
Erro	24	64216,667	2675,694		42099,998	1754,167		9366,667	390,278		1192833,190	49701,383	
Profundidade (C)	3	1829,861	609,954	0,177	1318,750	439,583	0,276	138,889	46,296		28718,746	9572,915	0,325
AC	9	3950,694	438,966	0,299	4739,581	526,620	0,138	1755,556	195,062	0,436	97334,020	10814,891	0,237
BC	6	1105,556	184,259		1912,498	318,750		756,944	126,157		20449,996	3408,333	
ABC	18	5505,556	305,864		6670,833	370,602	0,361	3765,278	209,182	0,381	125872,213	6992,901	
Erro	72	25983,333	360,880		24033,330	333,796		13833,330	192,130		585499,979	8131,944	
Total	143	127993,750			119815,960			39322,220			2581182,390		
Coefficiente de Variação:		3,28%			3,63%			160,97%			15,05%		
FONTE:	G.L.	100*Ca			100*Mg			100*C					
		S.Q.	Q.M.	Prob.	S.Q.	Q.M.	Prob.	S.Q.	Q.M.	Prob.			
Esterco Bovino (A)	3	108444,870	36148,290		48411,752	16137,250	0,103	227,565	75,855				
Fertilizante Mineral (B)	2	40663,513	20331,760		9973,935	4986,968		200,400	100,200				
AB	6	52054,472	8675,745		43286,612	7214,435	0,432	958,434	159,739	0,431			
Erro	24	892205,270	37175,220		168632,370	7026,349		3727,217	155,301				
Profundidade (C)	3	120358,250	40119,420	0,000	19581,131	6527,044	0,023	6656,738	2218,913	0,000			
AC	9	43761,639	4862,404	0,352	6772,138	752,460		360,056	40,006				
BC	6	19330,467	3221,745		8534,994	1422,499		491,491	81,915	0,424			
ABC	18	69157,546	3842,086		21533,336	1196,296		1919,643	106,647	0,203			
Erro	72	309140,390	4293,616		138662,900	1925,874		5821,512	80,854				
Total	143	1655116,400			465389,160			20363,060					
Coefficiente de Variação:		15,60%			41,72%			24,94%					

ANEXO 4 - ANÁLISES DE VARIÂNCIA DA ÁGUA PERCOLADA COMPARANDO O EFEITO OU NÃO DE GESSO NO TRATAMENTO COM 90 m³ DE ESTERCO E 100% DO FERTILIZANTE MINERAL

FONTE:	G.L.	RAIZ (100*N-NO ₃ ⁻)			LOG (100*N-NH ₄ ⁺)			RAIZ (100*P)			100*K		
		S.Q.	Q.M.	Prob.	S.Q.	Q.M.	Prob.	S.Q.	Q.M.	Prob.	S.Q.	Q.M.	Prob.
Gesso (A)	1	488,571	488,571	0,090	2,975	2,975	0,079	1,163	1,163	0,076	5,208	5,208	
Erro	4	395,705	98,926		2,169	0,542		0,817	0,204		160,033	40,008	
Lixiviação (B)	4	8911,463	2227,866	0,000	5,187	1,297	0,000	0,566	0,141	0,202	71,300	17,825	0,016
AxB	4	106,758	26,689		1,874	0,468	0,006	0,328	0,082		97,167	24,292	0,005
Erro	16	1153,132	72,071		1,390	0,087		1,342	0,084		67,133	4,196	
Total	29	11055,630			13,595			4,216			400,842		
Coefficiente de Variação:		20,20%			15,63%			16,87%			28,38%		
FONTE:	G.L.	CONDUTIVIDADE			TRANSMITÂNCIA			pH					
		S.Q.	Q.M.	Prob.	S.Q.	Q.M.	Prob.	S.Q.	Q.M.	Prob.			
Gesso (A)	1	227914,685	227914,685	0,040	414,425	414,425	0,006	0,787	0,787				
Erro	4	102040,787	25510,197		57,773	14,443		10,133	2,533				
Lixiviação (B)	4	440179,909	110044,977	0,006	125,806	31,451	0,146	12,481	3,120	0,000			
AxB	4	19538,920	4884,730		93,638	23,409	0,256	1,474	0,368	0,316			
Erro	16	324151,780	20259,486		253,572	15,848		4,576	0,286				
Total	29	1113826,080			945,214			29,452					
Coefficiente de Variação		28,66%			4,39%			10,05%					

ANEXO 5 - ANÁLISES DE VARIÂNCIA DO SOLO COMPARANDO O EFEITO OU NÃO DE GESSO NO TRATAMENTO COM 90 m³ DE ESTERCO E 100% DO FERTILIZANTE MINERAL

Fonte:	G.L.	SMP			CaCl ₂			Al			H+Al			Ca		
		S.Q.	Q.M.	Prob.	S.Q.	Q.M.	Prob.	S.Q.	Q.M.	Prob.	S.Q.	Q.M.	Prob.	S.Q.	Q.M.	Prob.
Gesso (A)	1	0,120	0,120		0,220	0,220		0,082	0,082		2,220	2,220		1,096	1,096	0,238
Erro	4	0,573	0,143		1,087	0,272		0,987	0,247		13,007	3,252		2,279	0,570	
Profundidade (B)	3	0,048	0,016		0,341	0,114	0,031	0,210	0,070	0,098	1,338	0,446		27,562	9,187	0,000
AxB	3	0,048	0,016		0,025	0,008		0,035	0,012		0,955	0,318		16,755	5,585	0,000
Erro	12	0,247	0,021		0,327	0,027		0,320	0,027		5,480	0,457		4,157	0,346	
Total	23	1,036			2,000			1,633			23,000			51,849		
Coefficiente de Variação:		2,53%			3,34%			97,98%			10,43%			12,20%		
Fonte:	G.L.	Mg			C			100*K			N-NH ₄ ⁺ (KCl 2M)			N-NH ₄ ⁺ (água)		
		S.Q.	Q.M.	Prob.	S.Q.	Q.M.	Prob.	S.Q.	Q.M.	Prob.	S.Q.	Q.M.	Prob.	S.Q.	Q.M.	Prob.
Gesso (A)	1	0,730	0,730	0,257	0,198	0,198		3,704	3,704		0,113	0,113		0,519	0,519	0,095
Erro	4	1,674	0,418		1,767	0,442		1519,568	379,892		1,638	0,409		0,439	0,110	
Profundidade (B)	3	0,464	0,155	0,011	2,630	0,877	0,300	2438,176	812,725	0,000	3,352	1,117	0,028	0,537	0,179	0,414
AxB	3	0,405	0,135	0,017	1,052	0,351		169,864	56,621	0,027	0,077	0,026		0,621	0,207	0,354
Erro	12	0,318	0,027		7,703	0,642		156,449	13,037		3,128	0,261		2,083	0,174	
Total	23	3,590			13,351			4287,761			8,307			4,199		
Coefficiente de Variação:		19,22%			0,329			8,29%			21,40%			27,32%		
Fonte:	G.L.	N-NO ₃ ⁻ (KCl 2M)			10 * N-NO ₃ ⁻ (água)			P (Mehlich)			100* Raiz P (água)					
		S.Q.	Q.M.	Prob.	S.Q.	Q.M.	Prob.	S.Q.	Q.M.	Prob.	S.Q.	Q.M.	Prob.			
Gesso (A)	1	0,077	0,077	0,330	0,312	0,312	0,361	0,027	0,027		982,128	982,128				
Erro	4	0,253	0,063		3,459	0,865		3,971	0,993		4250,991	1062,748				
Profundidade (B)	3	0,202	0,067	0,017	0,040	0,013	0,019	126,039	42,013	0,000	10156,093	3385,364	0,164			
AxB	3	0,109	0,036	0,088	1,244	0,415	0,599	2,604	0,868	0,042	2008,409	669,470				
Erro	12	0,158	0,013		8,310	0,692		2,797	0,233		20074,311	1672,859				
Total	23	0,799			13,366			135,438			37471,933					
Coefficiente de Variação:		20,31%			28,83%			11,07%			40,02%					