

DAVID FARIA DA SILVA

**MICRONUTRIENTES E METAIS PESADOS EM FOSFOGESSO –
ACÚMULO, MOBILIDADE E FATOR DE TRANSFERÊNCIA EM
LATOSSOLOS DO CERRADO**

Dissertação apresentada à
Universidade Federal de Viçosa, como
parte das exigências do Programa de
Pós-Graduação em Solos e Nutrição
de Plantas, para obtenção do título de
Magister Scientiae.

VIÇOSA
MINAS GERAIS – BRASIL
2009

DAVID FARIA DA SILVA

**MICRONUTRIENTES E METAIS PESADOS EM FOSFOGESSO –
ACÚMULO, MOBILIDADE E FATOR DE TRANSFERÊNCIA EM
LATOSSOLOS DO CERRADO**

Dissertação apresentada à
Universidade Federal de Viçosa, como
parte das exigências do Programa de
Pós-Graduação em Solos e Nutrição
de Plantas, para obtenção do título de
Magister Scientiae.

Aprovada: 21 de Julho de 2009

Prof. Reinaldo Bertola Cantarutti
(Co-orientador)

Prof. Walter Antônio Pereira Abrahão
(Co-orientador)

Prof^a. Vanusa Maria Feliciano Jacomino

Dr. Juscimar da Silva

Prof. Jaime Wilson Vargas de Mello
(Orientador)

Aos meus queridos pais, João Marçal da Silva e
Maria de Lourdes Sousa Faria da Silva, pelo amor e
exemplo de vida.

Dedico.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por sempre iluminar os meus caminhos.

À universidade Federal de Viçosa – UFV, pela oportunidade de realização deste curso.

À Fosfertil S/A e ao CNPq pelo suporte financeiro.

Ao meu pai pelo exemplo de vida.

À minha mãe pelo amor, confiança e apoio sempre presentes.

Ao meu irmão Alexandre, avós, tios e primos, pelo incentivo e apoio.

Ao Prof. Dr. Jaime Wilson Vargas de Mello, pela orientação, amizade, apoio, confiança e ensinamentos durante o curso e na elaboração deste trabalho.

À Prof^{fa}. Dr^a. Vanusa Feliciano Jacomino, pelo incentivo, amizade e ensinamentos.

Aos grandes parceiros, Kerley Alberto Pereira de Oliveira, à Dr^a. Maria Helena Tirollo Taddei, Maria Célia Siqueira e todos envolvidos no presente trabalho.

Aos professores Reinaldo Bertola Cantarutti e Walter Antônio Pereira Abrahão, pela co-orientação, críticas, sugestões e ensinamentos.

Aos professores do Departamento de Solos da Universidade Federal de Viçosa que contribuíram para minha formação profissional.

A todos os funcionários, técnicos e estagiários do Departamento de Solos/UFV, pelo suporte no desenvolvimento deste trabalho e pela amizade.

Aos estagiários Lorenza, Gisely, Luiz e Leandro pelo imprescindível suporte na condução deste trabalho, além da amizade.

Aos amigos e companheiros da Pós Graduação: Alexandre, Amanda, Breno, Bruno, Dalton, Daniel, Diogo, Fabrício, Fernanda, Fernando, Flancer, Gislane, Guilherme, Helton, Henrique, Hugo, Igor, Ítalo, Ivan, Jarbas, Jocimar, Juscimar, Joaquin, Kleberson, Leonardus, Márcio, Marcus, Maurel, Michelle, Pacheco, Ricardo, Sandro, Thiago, e aos demais colegas, não citados, pelas sugestões, amizade e convivência.

A todos que de uma forma ou de outra, contribuíram para a execução deste trabalho, o meu muito obrigado.

BIOGRAFIA

DAVID FARIA DA SILVA, filho de João Marçal da Silva e Maria de Lourdes Sousa Faria da Silva, nasceu em 07 de julho de 1983, em São Paulo, SP.

Em março de 2007, graduou-se no curso de Agronomia pela Universidade Federal de Viçosa.

Em março de 2007, iniciou o mestrado no Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas, na Universidade Federal de Viçosa, sob orientação do professor Jaime Wilson Vargas de Mello.

CONTEÚDO

	Página
LISTA DE QUADROS	vi
LISTA DE FIGURAS	x
RESUMO	xv
ABSTRACT	xvii
1. INTRODUÇÃO	1
2. MATERIAL E MÉTODOS	5
2.1. Fosfogesso.....	5
2.1.1. Classificação do resíduo fosfogesso conforme ABNT.....	6
2.1.1.1. Testes de lixiviação e solubilização.....	6
2.2. Solo.....	8
2.3. Experimentos em casa de vegetação.....	10
2.4. Teores de metais pesados nos solos.....	11
2.5. Teores de metais pesados no material vegetal.....	14
2.6. Fatores de transferência.....	15
3. RESULTADO E DISCUSSÃO	15
3.1. Teores semi-totais de metais pesados nos solos.....	15
3.1.1. Ensaio com a cultura do milho.....	15
3.1.2. Ensaio com a cultura da soja.....	22
3.2. Fator de transferência.....	26
3.3. Contaminação das águas de lixiviação por metais pesados.....	34
3.3.1. Ensaio com a cultura do milho.....	34
3.3.2. Ensaio com a cultura da soja.....	46
4. CONCLUSÕES	66
5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	67
6. APÊNDICE	73

LISTA DE QUADROS

Quadro 2.1. Teores semi-totais de metais pesados em amostras compostas de fosfogesso utilizadas nos experimentos.....	6
Quadro 2.2. Teores de elementos e formas químicas obtidas por lixiviação em amostras de fosfogesso obtido na fabricação de H ₃ PO ₄ a partir da rocha de Tapira, MG, com os respectivos limites máximos permitidos pela ABNT.....	7
Quadro 2.3. Teores de elementos e formas químicas obtidas por solubilização em amostras de fosfogesso obtido na fabricação de H ₃ PO ₄ com rocha de Tapira, MG, com os respectivos limites máximos permitidos pela ABNT.....	8
Quadro 2.4. Caracterização química e física do Latossolos Vermelho-amarelo de Sete Lagoas-MG e do Latossolo Amarelo de Três Marias-MG.....	9
Quadro 2.5. Quantidades de fosfogesso utilizadas como condicionador de solos no Latossolo Vermelho-Amarelo e no Latossolo Amarelo, estimadas segundo Sousa et al. (1992).....	11
Quadro 2.6. Descrição das condições operacionais do espectrômetro de emissão ótica em plasma induzido – ICP OES Perkin Elmer Optima 3300 DV.....	13
Quadro 2.7. Comprimentos de onda selecionados, limites de detecção e quantificação obtidos por ICP OES Perkin Elmer Optima 3300 DV para determinação, dos elementos abaixo relacionados, em solo.....	13
Quadro 2.8. Comprimentos de onda selecionados, limites de detecção e quantificação praticável obtidos por ICP OES Perkin Elmer Optima 3300 DV para determinação de metais pesados em material vegetal.....	14

Quadro 3.1. Teores semi-totais de Pb,Cd, Cu,Cr, Fe, Mn, Ni, Ti, V e Zn nos solos tratados com fosfogesso na profundidade de 0-18 cm, após o cultivo com milho.....	16
Quadro 3.2. Teores semi-totais de Pb, Cd, Cu, Cr, Fe, Mn, Ni, Ti, V e Zn nos solos na profundidade de 18-25 cm, após o cultivo com milho.....	18
Quadro 3.3. Concentração de metais nas amostras de fosfogesso e alguns valores orientadores.....	19
Quadro 3.4. Estimativa dos teores de metais pesados adicionados aos solos, pelos fosfogessos na dose recomendada de 1,0 NG.....	19
Quadro 3.5. Valores orientadores estabelecidos pela CETESB.....	21
Quadro 3.6. Estimativa do número máximo de aplicações, com base na contribuição teórica dos fosfogessos e nos valores orientadores para contaminação dos solos.....	22
Quadro 3.7. Teores semi-totais de Pb,Cd, Cu,Cr, Fe, Mn, Ni, Ti, V e Zn nos solos tratados com fosfogesso na profundidade de 0-18 cm, após o cultivo com Soja.....	24
Quadro 3.8. Teores semi-totais de Pb, Cd, Cu, Cr, Fe, Mn, Ni, Ti, V e Zn nos solos na profundidade de 18-25 cm, após o cultivo com soja.....	25
Quadro 3.9. Faixa de produção, matéria seca dos grãos de soja e milho.....	26
Quadro 3.10. Teores de Cu, Fe, Mn, Pb, Ti, V e Zn na camada de 0-18 cm de profundidade extraídos por Mehlich 3, antes do cultivo com milho.....	27
Quadro 3.11. Teores de Cu, Fe, Mn, Pb, Ti, V e Zn na camada de 0-18 cm de profundidade extraídos por Mehlich 3, antes do cultivo com soja.....	28

Quadro 3.12. Teores semi-totais de Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb, Ti e V nos solos (LVA e LA) antes do cultivo com as culturas de milho e soja, tratados com os fosfogessos A e B.....	29
Quadro 3.13. Teores de Pb, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Ti e V nos grãos de milho e soja cultivadas em dois solos (LVA e LA) tratados com os fosfogessos A e B.....	31
Quadro 3.14. Fator de transferência solo-grão para Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb, Ti e V nas culturas de milho e soja cultivadas em dois solos (LVA e LA) tratados com os fosfogessos A e B.....	32
Quadro 3.15. Média dos teores de Cd, Pb, Cr e Ni na cultura do milho em 5 lixiviações filtrada em filtro de membrana milipore de 0,45 µm.....	64
Quadro 3.16. Média dos teores de Cd, Pb, Cr e Ni na cultura da soja em 5 lixiviações filtrada em filtro de membrana milipore de 0,45 µm.....	64
Quadro 1A. Quadrado médio da análise de variância para os teores semi-totais de Pb,Cd, Cu,Cr, Fe, Mn, Ni, Ti, V e Zn nos solos tratados com fosfogesso, na profundidade de 0-18 cm, após o cultivo com milho.....	74
Quadro 2A. Quadrado médio da análise de variância para teores os semi-totais de Pb, Cd, Cu, Cr, Fe, Mn, Ni, Ti, V e Zn nos solos, na profundidade de 18-25 cm, após o cultivo com milho.....	75
Quadro 3A. Quadrado médio da análise de variância para os teores semi-totais de Pb, Cd, Cu, Cr, Fe, Mn, Ni, Ti, V e Zn nos solos tratados com fosfogesso, na profundidade de 0-18 cm, após o cultivo com soja.....	76
Quadro 4A. Quadrado médio da análise de variância para os teores semi-totais de Pb, Cd, Cu, Cr, Fe, Mn, Ni, Ti, V e Zn nos solos, na profundidade de 18-25 cm, após o cultivo com soja.....	77

Quadro 5A. Quadrado médio da análise de variância para os teores de Cu, Fe, Mn, Ti, V e Zn extraídos pelo extrator Mehlich 3 nos solos antes do cultivo com milho.....	78
Quadro 6A. Quadrado médio da análise de variância para os teores de Cu, Fe, Mn, Ti, V e Zn extraídos pelo extrator Mehlich 3 nos solos antes do cultivo com soja.....	78
Quadro 7A. Quadrado médio da análise de Variância para os fatores de transferência de Cr, Fe, Mn e Ti na cultura do milho cultivada em dois solos (LVA e LA) tratados com os fosfogessos A e B.....	79
Quadro 8A. Quadrado médio da análise de Variância para os fatores de transferência de Cu, Fe, Mn, Ni e V na cultura da soja cultivada em dois solos (LVA e LA) tratados com os fosfogessos A e B.....	79
Quadro 9A. Quadrado médio da análise de variância para o conteúdo de Cd, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb, Ti, V e Zn nos extratos lixiviados dos solos cultivados com milho e tratados com os fosfogessos A e B após 90 dias de experimentação.....	80
Quadro 10A. Quadrado médio da análise de variância para o conteúdo de Pb, Cd, Cu, Cr, Fe, Mn, Ni, Ti, V e Zn nos extratos lixiviados dos solos cultivados com soja e tratados com os fosfogessos A e B após 90 dias de experimentação.....	81

LISTA DE FIGURAS

- Figura 3.1. Teores de Mn e V acumulado nos lixiviados coletados na base dos vasos em que se cultivou milho ao longo de 90 dias no Latossolo Vermelho-Amarelo e no Latossolo Amarelo de Sete Lagoas-MG e Três Marias-MG, respectivamente, tratado com os fosfogessos A e B.....37
- Figura 3.2. Teores de Mn nos lixiviados coletados na base dos vasos em que se cultivou milho ao longo de 90 dias no Latossolo Vermelho-Amarelo e no Latossolo Amarelo de Sete Lagoas-MG e Três Marias-MG, respectivamente, tratado com os fosfogessos A e B.....38
- Figura 3.3. Teores de V nos lixiviados coletados na base dos vasos em que se cultivou milho ao longo de 90 dias no Latossolo Vermelho-Amarelo e no Latossolo Amarelo de Sete Lagoas-MG e Três Marias-MG, respectivamente, tratado com os fosfogessos A e B.....39
- Figura 3.4. Teores de Cd nos lixiviados coletados na base dos vasos em que se cultivou milho ao longo de 90 dias no Latossolo Vermelho-Amarelo e no Latossolo Amarelo de Sete Lagoas-MG e Três Marias-MG, respectivamente, tratado com os fosfogessos A e B.....40
- Figura 3.5. Teores de Cu nos lixiviados coletados na base dos vasos em que se cultivou milho ao longo de 90 dias no Latossolo Vermelho-Amarelo e no Latossolo Amarelo de Sete Lagoas-MG e Três Marias-MG, respectivamente, tratado com os fosfogessos A e B.....41

Figura 3.6. Teores de Fe nos lixiviados coletados na base dos vasos em que se cultivou milho ao longo de 90 dias no Latossolo Vermelho-Amarelo e no Latossolo Amarelo de Sete Lagoas-MG e Três Marias-MG, respectivamente, tratado com os fosfogessos A e B.....	42
Figura 3.7. Teores de Zn nos lixiviados coletados na base dos vasos em que se cultivou milho ao longo de 90 dias no Latossolo Vermelho-Amarelo e no Latossolo Amarelo de Sete Lagoas-MG e Três Marias-MG, respectivamente, tratado com os fosfogessos A e B.....	43
Figura 3.8. Teores de Cr nos lixiviados coletados na base dos vasos em que se cultivou milho ao longo de 90 dias no Latossolo Vermelho-Amarelo e no Latossolo Amarelo de Sete Lagoas-MG e Três Marias-MG, respectivamente, tratado com os fosfogessos A e B.....	44
Figura 3.9. Teores de Ti nos lixiviados coletados na base dos vasos em que se cultivou milho ao longo de 90 dias no Latossolo Vermelho-Amarelo e no Latossolo Amarelo de Sete Lagoas-MG e Três Marias-MG, respectivamente, tratado com os fosfogessos A e B.....	45
Figura 3.10. Teores de Pb e Fe acumulados nos lixiviados coletados na base dos vasos em que se cultivou soja ao longo de 90 dias no Latossolo Vermelho-Amarelo e no Latossolo Amarelo de Sete Lagoas-MG e Três Marias-MG, respectivamente, tratado com os fosfogessos A e B.....	47
Figura 3.11. Teores de Mn e Ni acumulados nos lixiviados coletados na base dos vasos em que se cultivou soja ao longo de 90 dias no Latossolo Vermelho-Amarelo e no Latossolo Amarelo de Sete Lagoas-MG e Três Marias-MG, respectivamente, tratado com os fosfogessos A e B.....	48

Figura 3.12. Teor Zn acumulado nos lixiviados coletados na base dos vasos em que se cultivou soja ao longo de 90 dias no Latossolo Vermelho-Amarelo e no Latossolo Amarelo de Sete Lagoas-MG e Três Marias-MG, respectivamente, tratado com os fosfogessos A e B.....	49
Figura 3.13. Teores de Pb nos lixiviados coletados na base dos vasos em que se cultivou soja ao longo de 90 dias no Latossolo Vermelho-Amarelo e no Latossolo Amarelo de Sete Lagoas-MG e Três Marias-MG, respectivamente, tratado com os fosfogessos A e B.....	51
Figura 3.14. Teores de Fe nos lixiviados coletados na base dos vasos em que se cultivou soja ao longo de 90 dias no Latossolo Vermelho-Amarelo e no Latossolo Amarelo de Sete Lagoas-MG e Três Marias-MG, respectivamente, tratado com os fosfogessos A e B.....	52
Figura 3.15. Teores de Mn nos lixiviados coletados na base dos vasos em que se cultivou soja ao longo de 90 dias no Latossolo Vermelho-Amarelo e no Latossolo Amarelo de Sete Lagoas-MG e Três Marias-MG, respectivamente, tratado com os fosfogessos A e B.....	53
Figura 3.16. Teores de Ni nos lixiviados coletados na base dos vasos em que se cultivou soja ao longo de 90 dias no Latossolo Vermelho-Amarelo e no Latossolo Amarelo de Sete Lagoas-MG e Três Marias-MG, respectivamente, tratado com os fosfogessos A e B.....	54
Figura 3.17. Teores de Zn nos lixiviados coletados na base dos vasos em que se cultivou soja ao longo de 90 dias no Latossolo Vermelho-Amarelo e no Latossolo Amarelo de Sete Lagoas-MG e Três Marias-MG, respectivamente, tratado com os fosfogessos A e B.....	55

Figura 3.18. Teores de Ti nos lixiviados coletados na base dos vasos em que se cultivou soja ao longo de 90 dias no Latossolo Vermelho-Amarelo e no Latossolo Amarelo de Sete Lagoas-MG e Três Marias-MG, respectivamente, tratado com os fosfogessos A e B.....	56
Figura 3.19. Teores de Cr nos lixiviados coletados na base dos vasos em que se cultivou soja ao longo de 90 dias no Latossolo Vermelho-Amarelo e no Latossolo Amarelo de Sete Lagoas-MG e Três Marias-MG, respectivamente, tratado com os fosfogessos A e B.....	57
Figura 3.20. Teores de Cu nos lixiviados coletados na base dos vasos em que se cultivou soja ao longo de 90 dias no Latossolo Vermelho-Amarelo e no Latossolo Amarelo de Sete Lagoas-MG e Três Marias-MG, respectivamente, tratado com os fosfogessos A e B.....	58
Figura 3.21. Teores de Cd nos lixiviados coletados na base dos vasos em que se cultivou soja ao longo de 90 dias no Latossolo Vermelho-Amarelo e no Latossolo Amarelo de Sete Lagoas-MG e Três Marias-MG, respectivamente, tratado com os fosfogessos A e B.....	59
Figura 3.22. Teores de V nos lixiviados coletados na base dos vasos em que se cultivou soja ao longo de 90 dias no Latossolo Vermelho-Amarelo e no Latossolo Amarelo de Sete Lagoas-MG e Três Marias-MG, respectivamente, tratado com os fosfogessos A e B.....	60
Figura 3.23. Valores de pH nos lixiviados coletados na base dos vasos em que se cultivou milho ao longo de 90 dias no Latossolo Vermelho-Amarelo e Latossolo Amarelo de Sete Lagoas-MG e Três Marias-MG, respectivamente, tratado com os fosfogessos A e B.....	61

Figura 3.24. Valores de pH nos lixiviados coletados na base dos vasos em que se cultivou soja ao longo de 90 dias no Latossolo Vermelho-Amarelo e Latossolo Amarelo de Sete Lagoas-MG e Três Marias-MG, respectivamente, tratado com os fosfogessos A e B.....62

RESUMO

Silva, David Faria da, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, julho de 2009.
Micronutrientes e metais pesados em fosfogesso – acúmulo, mobilidade e fator de transferência em Latossolos de Cerrado.
Orientador: Jaime Wilson Vargas de Mello. Co-orientadores: Reinaldo Bertola Cantarutti e Walter Antônio Pereira Abrahão.

O sulfato de cálcio dihidratado ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), fosfogesso, também denominado de gesso agrícola, é um dos principais resíduos gerados na produção de fertilizantes fosfatados por meio do processo de solubilização da rocha fosfática com ácido sulfúrico. A taxa de geração é de ,aproximadamente, 4,8 t para cada tonelada de ácido fosfórico produzido, sendo sua principal forma de descarte o empilhamento em áreas ao redor das fábricas. No entanto, esse tipo de disposição final pode gerar impactos ao meio ambiente, como por exemplo, a lixiviação e escoamento superficial de elementos tóxicos, como F^- e metais pesados, resultando na contaminação dos recursos hídricos e na liberação de aerossóis causados por erosão eólica nas pilhas. Uma das maneiras de minimizar tais impactos é a reciclagem deste resíduo, utilizando-o, por exemplo, na agricultura. Nesse sentido, o uso de fosfogesso como condicionador de solos tem se mostrado uma alternativa viável para o aproveitamento desse resíduo na agricultura. Entretanto, é necessário considerar os teores de alguns metais pesados e outros elementos tóxicos nesse material, que pode limitar o seu uso. É importante ressaltar que o gesso é classificado como resíduo sólido de classe IIA – não perigoso e não inerte, por apresentar teores de arsênio, fluoretos, alumínio, ferro, manganês e sulfatos acima do limite máximo permitido nos testes de solubilização, de acordo com a Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. Em vista do exposto, este trabalho teve como objetivo avaliar a utilização de fosfogesso, proveniente de uma empresa de produção de ácido fosfórico, bem como avaliar a contaminação das plantas, dos solos e da água de drenagem. Foram coletadas amostras de fosfogesso de uma pilha ativa regularmente utilizada para aplicação direta na agricultura. Amostras dos 30 pontos de coleta foram secas em estufa a 60 °C, peneiradas em malha de 0,250 mm (60 Mesh) e analisadas. Foram realizados cultivos com milho e soja em vasos de 25 dm³

contendo solos tratados com doses crescentes do condicionador aplicado na camada superficial (0-18 cm de profundidade). Foram utilizadas amostras de um Latossolo Vermelho-Amarelo e um Latossolo Amarelo, provenientes das cidades de Sete Lagoas e Três Marias, ambas regiões do Cerrado do Estado de Minas Gerais. As soluções lixiviadas dos vasos de milho e soja, foram coletadas periodicamente e analisadas para a determinação da concentração de metais pesados. A partir dos resultados obtidos pode-se concluir que não se verificou contaminação expressiva de solos, plantas e águas de drenagem, a curto prazo, em decorrência da utilização do fosfogesso. Não obstante, recomenda-se que as reaplicações devam ser criteriosamente avaliadas, do ponto de vista ambiental, principalmente em solos arenosos e com lençol freático muito próximo à superfície.

ABSTRACT

Silva, David Faria da, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, July, 2009.
Environmental evaluation on the use of the residue from the processing of phosphate rock in soils of Cerrado. Adviser: Jaime Wilson Vargas de Mello. Co-advisers: Reinaldo Bertola Cantarutti and Walter Antônio Pereira Abrahão

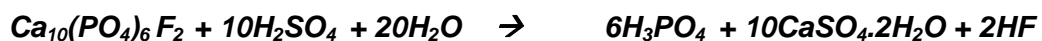
The calcium sulphate dihydrate ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), phosphogypsum, also known as agricultural gypsum, is one of the major residues generated in the production of phosphate fertilizers by means of solubilization process of phosphate rock with sulfuric acid. The generation rate is approximately 4.8 t for each ton of phosphoric acid produced, and its main disposal form is the stacking in nearby the factories. However, this type of final disposal can lead to environmental impacts, such as leaching and superficial outflow of toxic elements, such as F^- and heavy metals, resulting in contamination of water resources and releasing of aerosols caused by wind erosion in the stacks. One way to minimize such impacts is by recycling this residue would be its use in agriculture. The use of phosphogypsum as a soil conditioner in subsurface has been a viable alternative for the utilization of this residue in agriculture. However, it is necessary to consider the content of some heavy metals as well other toxic elements in this material, which may limit its use. It is important to highlight that the gypsum is classified as Class IIA, that is, it is neither hazardous nor inert, since it presents levels of arsenic, fluoride, aluminum, iron, manganese and sulfates above the maximum limit allowed in solubilization tests according to the 'Associação Brasileira de Normas Técnicas' - ABNT. The objective of this work was to evaluate the use of phosphogypsum, from a company which produces phosphoric acid, as well as to evaluate the contamination of plants, soils and drained water. Phosphogypsum samples were collected from an active stack regularly used for direct application in soil. Samples of the 30 collection points were dried in oven at 60 °C. Afterwards the samples were sieved in 0,250 mm (sieve 60 mesh), and then analyzed. Cultivation of corn and soybeans was performed in pots of 25 dm³ containing soil treated with increasing doses of the conditioner applied to the superficial layer (0-18 cm depth). The samples of soils utilized were of Red-Yellow oxysoil and Yellow Oxisoil, originated from the towns of Sete Lagoas and Três Marias,

both in the 'Cerrado' region of Minas Gerais. The leaching solutions of the pots of corn and soybeans were periodically collected and analyzed for the determination of heavy metals. With these results it can be concluded that there was no significant contamination of soils, plants and water drainage after the short term use of phosphogypsum. Nevertheless, it is recommended that further reapplication must be carefully evaluated, from an environmental standpoint, particularly in sandy soil with groundwater near the surface.

1. INTRODUÇÃO

A principal matéria prima da indústria nacional de fertilizantes fosfatados são os minérios apatíticos provenientes da rocha fosfata. As principais reservas naturais estão distribuídas nos Estados de Minas Gerais, com 73,8%, Goiás, com 8,3% e São Paulo, com 7,3% das reservas totais do país, seguidos dos Estados de Santa Catarina, Ceará, Pernambuco, Bahia e Paraíba (Souza, 2001). Cerca de 80% das jazidas fosfatadas naturais brasileiras são de origem ígnea (Canut, 2006).

O processo mais utilizado na produção de fertilizantes fosfatados é o ataque da rocha fosfática com ácido sulfúrico concentrado e água. Neste caso, o principal produto da reação química é o ácido fosfórico. Como resíduo ou subproduto do processo de beneficiamento têm-se o sulfato de cálcio dihidratado (fosfogesso) e o ácido fluorídrico, conforme reações abaixo (Malavolta, 1991):



A taxa de geração de fosfogesso é de aproximadamente 4,8 t para cada tonelada de ácido fosfórico produzido. A produção mundial anual pode ser estimada em 150 milhões de toneladas. Deste total, cerca de 12 milhões toneladas são produzidos no Brasil (Mazzilli et al., 2000), sendo a maior parte gerada no Estado de Minas Gerais, mais especificamente, na região de Uberaba.

A forma mais comum de descarte dos resíduos do beneficiamento e processamento das rochas fosfatadas é a sua disposição em pilhas nas áreas próximas às fábricas. Entretanto, esta prática pode representar um risco potencial ao ambiente circunvizinho, principalmente para o ar, solo e para as fontes de água localizadas nas proximidades das pilhas.

Embora o fosfogesso seja composto principalmente por sulfato de cálcio dihidratado, ele pode apresentar teores elevados de impurezas provenientes da rocha fosfática matriz. Parte das impurezas insolúveis (ou solubilizadas em meio ácido), como os metais pesados e metalóides (por exemplo, Cd, As e Zn), os fluoretos e os nuclídeos radioativos são transferidas para o fosfogesso (Santos et al., 2006).

Os possíveis impactos ambientais associados à disposição do fosfogesso em pilhas são: lixiviação e escoamento superficial de elementos tóxicos (F^- e metais pesados), SO_4^{2-} e rádio (^{226}Ra e ^{228}Ra) na forma solúvel resultando na contaminação dos recursos hídricos; liberação de aerossóis causados por erosão eólica nas pilhas; irradiação gama direta da pilha e inalação do gás ^{222}Rn (Fernandes et al., 2004, Santos et al., 2006). Os dois últimos afetam, principalmente, os operários que trabalham diretamente com as pilhas de fosfogesso.

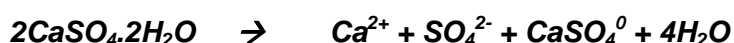
As indústrias que se dedicam à fabricação do ácido fosfórico têm se preocupado em encontrar aplicações para o fosfogesso e, assim, evitar a disposição deste resíduo nos próprios locais de produção. A estocagem de grandes quantidades de fosfogesso requer grandes áreas para o armazenamento e em virtude da sua natureza ácida pode causar impactos ao meio ambiente, conforme mencionado anteriormente. É importante ressaltar que as leis de proteção ao meio ambiente, tornam-se cada vez mais rigorosas no que se refere aos cuidados na estocagem de materiais com estas características.

A pesquisa visando o desenvolvimento de possíveis usos do fosfogesso torna-se cada vez mais importante, tanto do ponto de vista econômico, como tecnológico e ambiental. O fosfogesso pode ser considerado como um resíduo abundante, de baixo custo e cujo aproveitamento evitaria o comprometimento ambiental de grandes áreas onde este produto é armazenado. Além disso, o seu reaproveitamento contribuiria para a preservação de reservas naturais de gesso, garantindo assim, um dos princípios básicos do desenvolvimento sustentável, ou seja, a preservação de recursos naturais para as gerações futuras.

Várias pesquisas têm sido realizadas visando avaliar o uso do fosfogesso na agricultura, como condicionador de horizontes subsuperficiais em solos do Cerrado. Sousa et al. (2001) obteve a produção de matéria seca de estilosantes Mineirão de 13,4 e 19,4 t/ha em um Latossolo Vermelho, sem e com a aplicação de fosfogesso, respectivamente. Tais solos são pobres em cálcio e magnésio, elementos diretamente envolvidos no desenvolvimento das raízes; possuem baixa disponibilidade de fósforo para as plantas e apresentam teores elevados de alumínio trocável em subsuperfície (Mello, 1989).

O fosfogesso apresenta, em média, umidade livre de 15-17 %, 26-28 % de CaO, 15-16 % de S; 0,6 - 0,75 % de P₂O₅, 1,26 % de SiO₂ insolúveis; 0,63 % de fluoretos e 0,37 % de óxidos de Al e Fe (Vitti et al., 1985).

De acordo com EMBRAPA (2000), o uso do fosfogesso, sob a ótica agrônômica, se justifica em duas situações, principalmente: a) onde há necessidade de fornecimento de cálcio e de enxofre e, b) na diminuição de concentrações tóxicas do alumínio trocável nas camadas subsuperficiais com conseqüente aumento de cálcio nessas camadas, visando-se "melhorar" o ambiente para o crescimento radicular. Ainda nas camadas superficiais do solo, ocorre a dissociação do fosfogesso e conseqüente lixiviação dos íons Ca²⁺ e SO₄²⁻ e do par iônico CaSO₄⁰ (Sousa et al., 2007).



O Ca²⁺, uma vez na solução do solo, pode interagir com o complexo de troca do solo, deslocando cátions, como, por exemplo, Al³⁺, K⁺ e Mg²⁺, que podem reagir com o SO₄²⁻ formando o par iônico AlSO₄⁺, forma menos tóxica às plantas, e os pares iônicos neutros K₂SO₄⁰, CaSO₄⁰ e MgSO₄⁰ que apresentam elevada mobilidade no perfil do solo devido à sua neutralidade. A atividade do Al ainda é diminuída pela formação de complexo com o F⁻, constiuinte do fosfogesso. Vale ressaltar, que a principal rocha utilizada na

produção do ácido fosfórico, do qual o fosfogesso é um subproduto, é a fluorapatita.

A tomada de decisão sobre o uso do fosfogesso deve sempre ser feita com base no conhecimento de algumas características químicas e físicas das camadas subsuperficiais do solo (20 a 40 cm e 30 a 60 cm). Haverá maior probabilidade de resposta ao uso do fosfogesso quando a saturação por Al^{3+} for maior que 30 %, ou o teor de Ca, menor que $0,4 \text{ cmol}_c/\text{dm}^3$. Deve ser salientado que esta é uma situação comum nos solos da região do Cerrado.

Vale ressaltar, no entanto, que as avaliações meramente agronômicas podem deixar a desejar do ponto de vista ambiental. Tendo em vista a presença de metais pesados no fosfogesso, sua utilização como condicionador de horizontes subsuperficiais no solo requer a realização de estudos adicionais que permitam a avaliação da mobilidade de metais pesados no solo, contaminação das águas de drenagem e sua absorção pelas plantas.

Metais pesados como Cd, Cr, Pb e Hg, incluindo os micronutrientes Fe, Cu, Zn e Mn podem ser introduzidos na cadeia alimentar pela adição de fertilizantes, principalmente fosfatados (Sharpley & Menzel, 1987). Isso é resultado da ocorrência natural de vários metais pesados em rochas fosfáticas, que não são eliminados no processo de manufatura. Vários estudos têm demonstrado que a contaminação do solo por metais pesados provocada pela aplicação de fertilizantes não é significativa, mas requer um monitoramento, pois seu uso é mais amplamente disseminado do que outros agroquímicos (Amaral Sobrinho et al., 1996). Deve ser ressaltado que metais como Fe, Cu, Zn e Mn são essenciais no metabolismo biológico, enquanto que mercúrio, chumbo e cádmio não são essenciais e, portanto, são tóxicos, mesmo em níveis de traço (USEPA, 1989). Os metais essenciais podem também produzir efeitos tóxicos quando em concentrações elevadas (Tüzen, 2003).

Uma preocupação importante que se deve ter, é em relação a quantidade de fosfogesso a ser aplicada ao solo, principalmente, em solos onde se tem um elevado potencial de movimentação de bases, para evitar a contaminação do lençol freático. Sendo assim, deve se ter maiores cuidados

em solos de textura arenosa, com baixa CTC e baixa capacidade de adsorção de sulfato.

Em vista do exposto, o presente trabalho teve por objetivo, avaliar a presença de alguns elementos químicos em plantas, solos e água de drenagem, decorrente da utilização do fosfogesso, como condicionador em solos cultivados com milho e soja.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Fosfogesso

Foram utilizadas amostras de fosfogesso derivadas da produção de ácido fosfórico a partir das rochas fosfatadas de Tapira, MG (fosfogesso A) e Catalão, GO (fosfogesso B) em plantas de produção localizadas em Uberaba, MG e Cubatão, SP, respectivamente.

A amostragem foi realizada segundo recomendações da EPA (1998) coletando-se 30 amostras em pontos regularmente espaçados em uma pilha em que o fosfogesso vinha sendo retirado regularmente para aplicação na agricultura (pilha operacional ou ativa), em uma área aproximada de 300 m².

As amostras foram embaladas em sacos plásticos, devidamente identificadas e enviadas para o laboratório.

As amostras de fosfogesso, foram secas em estufa a 60 °C por 48 horas, ou até atingirem massa constante e, em seguida, foram peneiradas em malha de 0,250 mm (60 Mesh) e homogeneizadas para a formação de amostras de trabalho. Posteriormente, os teores de metais pesados foram determinados, por espectrometria de emissão óptica, com indução de plasma (ICP-OES), nas amostras compostas de fosfogesso de ambas as plantas de produção do ácido fosfórico (Quadro 2.1), conforme o método SW-846 3051a da Environmental Protection Agency (U.S.EPA, 1996).

Quadro 2.1. Teores semi-totais de metais pesados em amostras compostas de fosfogesso utilizadas nos experimentos

Elemento	Fosfogesso ‡	
	A	B
	mg kg ⁻¹	
Cd	0,93 ± 0,32	0,75 ± 0,03
Co	n.d.	n.d.
Cr	n.d.	1,56 ± 0,31
Cu	n.d.	n.d.
Mn	27,55 ± 2,60	27,79 ± 2,5
Ni	15,7 ± 1,50	13,48 ± 1,37
Pb	14,67 ± 2,81	16,17 ± 2,00
V	15,94 ± 1,98	9,79 ± 0,31
Zn	n.d.	n.d.
	g kg ⁻¹	
Fe	2,12 ± 0,14	2,59 ± 0,14
Ti	1,43 ± 0,12	0,73 ± 0,07

‡ Média de 3 repetições ± Desvio padrão; e n.d. = não detectado, SW-846 3051a (USEPA, 1996)

2.1.1. Classificação do resíduo fosfogesso conforme a ABNT

2.1.1.1. Testes de lixiviação e solubilização

Foram realizados testes de lixiviação (ABNT 10005:2004) e solubilização (ABNT 10006:2004) nas amostras de trabalho, obtidas a partir das 30 amostras simples coletadas na pilha do fosfogesso que teve como material de origem a rocha de Tapira, no laboratório SGS Geossol (Oliveira, 2008), para a classificação do resíduo, conforme as normas da ABNT (2004). Esta norma classifica os resíduos quanto aos seus riscos potenciais ao meio ambiente e à saúde pública, para que possa ser gerenciado adequadamente.

As normas citadas acima mencionam os ensaios de lixiviação e solubilização de resíduos. O primeiro consiste na retirada de certas substâncias contidas nos resíduos industriais, por meio de lavagem ou percolação. Já o ensaio de solubilização de resíduos é a identificação dos constituintes solubilizados em concentrações superiores ao padrão da água. Os resultados de ambos devem ser comparados aos limites máximos obtidos nos anexos da NBR 10004:2004.

O fosfogesso gerado na planta de Uberaba foi classificado como Classe II A - não perigoso, não inerte, não corrosivo e não reativo pelo fato dos limites para o teste de toxicidade por solubilização terem sido ultrapassados para arsênio, flúor, alumínio, ferro, manganês e sulfatos (Quadros 2.2 e 2.3).

Quadro 2.2. Teores de elementos e formas químicas obtidas por lixiviação em amostras de fosfogesso obtido na fabricação de H_3PO_4 a partir da rocha de Tapira, MG, com os respectivos limites máximos permitidos pela ABNT

Elementos	Limite máximo permitido	Concentração no Lixiviado
	.....mg L ⁻¹	
Arsênio	1	0,001
Bário	70	< 0,005
Cádmio	0,5	< 0,001
Chumbo	1	< 0,01
Cromo Total	5	0,02
Fluoretos	150	17
Mercúrio	0,1	< 0,0002
Prata	5	< 0,02
Selênio	1	< 0,01

Fonte: Oliveira (2008)

Quadro 2.3. Teores de elementos e formas químicas obtidas por solubilização em amostras de fosfogesso obtido na fabricação de H₃PO₄ com rocha de Tapira, MG, com os respectivos limites máximos permitidos pela ABNT

Elementos	Limite máximo	Concentração no extrato
	permitido	Solubilizado
	.....mg L ⁻¹	
Arsênio	0,01	0,05
Bário	0,7	<0,005
Cádmio	0,005	<0,001
Chumbo	0,01	<0,04
Cianeto	0,07	<0,01
Cromo Total	0,05	0,04
Fenóis Totais	0,01	<0,001
Fluoretos	1,5	52
Merúrio	0,0001	<0,0002
Nitrato	10	<0,05
Prata	0,05	0,01
Selênio	0,01	<0,01
Alumínio	0,2	3,91
Cloreto	250	3,9
Cobre	2	0,33
Ferro	0,3	2,43
Manganês	0,1	2,66
Sódio	200	48,7
Surfactantes	0,5	0,33
Sulfato	250	1535
Zinco	5	0,44

Fonte: Oliveira (2008)

2.2. Solo

Amostras de um Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA) de textura muito argilosa e um Latossolo Amarelo (LA) de textura arenosa, coletadas na profundidade de 0-20 cm, nos municípios de Sete Lagoas e Três Marias respectivamente, ambos na região de cerrado, no Estado de Minas Gerais.

As amostras foram secas ao ar, destorroadas e passadas em peneira de 2,0 mm de abertura de malha (ABNT 50), obtendo-se a terra fina seca ao ar (TFSA). Posteriormente, as amostras foram homogeneizadas e retiradas sub-amostras para as análises de caracterização dos solos (Quadro 2.4).

As análises de caracterização química e física realizadas foram: pH em H₂O, P, K, Ca²⁺, Mg²⁺, Al³⁺, H+Al, soma de bases (SB), capacidade de troca de cátions efetiva (t) e a pH 7,0 (T), cálculo da saturação por bases (V), saturação por alumínio (m), matéria orgânica (MO), granulometria (EMBRAPA, 1997) e fósforo remanescente (P-rem) (Alvarez, 2000). As análises em ambos os solos foram realizadas em triplicata.

Quadro 2.4. Caracterização química e física do Latossolo Vermelho-amarelo de Sete Lagoas-MG e do Latossolo Amarelo de Três Marias-MG

Característica [‡]	LVA (Sete Lagoas-MG)	LA (Três Marias-MG)
pH H ₂ O	5,2	5,3
P (mg dm ⁻³)	1,5	0,4
K (mg dm ⁻³)	6	16
Ca ²⁺ (cmol _c dm ⁻³)	0,89	0,11
Mg ²⁺ (cmol _c dm ⁻³)	0,06	0,02
Al ³⁺ (cmol _c dm ⁻³)	0,48	0,1
H + Al (cmol _c dm ⁻³)	8,3	3,2
SB (cmol _c dm ⁻³)	0,97	0,17
(t) (cmol _c dm ⁻³)	1,45	0,27
(T) (cmol _c dm ⁻³)	9,27	3,37
V (%)	10,5	5
m (%)	33,1	37
P-rem (mg L ⁻¹)	11,2	30,7
MO (dag kg ⁻¹)	4,43	1,17
Areia Grossa (dag kg ⁻¹)	6	16
Areia Fina (dag kg ⁻¹)	3	63
Silte (dag kg ⁻¹)	8	5
Argila (dag kg ⁻¹)	83	16
Equivalente de umidade (kg kg ⁻¹)	0,303	0,071
Classe Textural	Muito Argilosa	Franco-Arenosa

[‡] Média de três repetições; pH em água relação 1:25; P, K: Extrator Mehlich 1; Ca²⁺, Mg²⁺ e Al³⁺: Extrator KCl 1mol L⁻¹; H + Al: Extrator Acetato de Cálcio 0,5 mol L⁻¹ a pH = 7,0; SB: Soma de Bases; CTC (t): Capacidade de Troca Catiônica Efetiva; CTC (T): Capacidade de Troca Catiônica a pH = 7,0; V: Índice de Saturação de Bases; m: Índice de Saturação de Alumínio; P-rem: Fósforo Remanescente; e MO: Matéria Orgânica.

2.3. Experimentos em casa de vegetação

Nos ensaios realizados foram cultivadas plantas de soja, variedade Conquista, e de milho, híbrido AG 2060, em vasos com capacidade máxima de 25 dm³, contendo 19 dm³ de solo. Escolheu-se estas culturas por serem de ciclo curto e representativas da agricultura do cerrado.

A água lixiviada dos vasos foi coletada periodicamente durante a condução do experimento. Para tanto, foram instalados drenos no fundo dos vasos, que direcionavam a solução lixiviada para recipientes de polietileno, por meio de mangueiras plásticas. Para facilitar a drenagem da água percolada foram colocados no fundo dos vasos 1 dm³ de pedra britada tipo zero, com diâmetro máximo de 9,5 mm, 1 dm³ de pedra britada tipo 1 (um), com diâmetro entre 9,5 e 19 mm e 1 dm³ de areia lavada no fundo de cada vaso.

As amostras de solo receberam calagem com calcário comercial, conforme recomendado por Ribeiro et al. (1999) e foram mantidas com umidade próxima à capacidade de campo por 15 dias. Em seguida, foram feitas as misturas com as doses de fosfogesso, na camada de 0-18 cm de profundidade (13 dm³), correspondente à metade, uma e duas vezes a necessidade de gessagem (SOUSA et al., 1992), além do tratamento sem a aplicação de fosfogesso. Nesta ocasião foi adicionado aos solos, 300 mg dm⁻³ de P (ALVAREZ, 1974) na forma de (NH₄)₂HPO₄.

Para um dos ensaios foram semeadas 5 sementes de milho e para o outro, 15 de soja por vaso. Decorridos 15 dias após o plantio, procedeu-se o desbaste, mantendo-se 2 plantas de milho e 10 plantas de soja por vaso.

Após o plantio foram realizadas adubações com 100 mg dm⁻³ de N; 150 mg dm⁻³ de K; 0,81 mg dm⁻³ de B; 1,33 mg dm⁻³ de Cu; 1,56 mg dm⁻³ de Fe; 3,66 mg dm⁻³ de Mn; 0,15 mg dm⁻³ de Mo e 4,00 mg dm⁻³ de Zn (ALVAREZ, 1974), divididas em quatro aplicações. A primeira adubação foi realizada no ato do plantio e as demais em cobertura depois de decorridos 30, 60 e 90 dias após o plantio.

Cada cultura correspondeu a um experimento, em casa-de-vegetação, com delineamento em blocos casualizados e tratamento compreendidos pelo fatorial (2 x 2 x 4), em três repetições, sendo:

- Dois solos (LVA e LA);
- Dois fosfogessos (A e B); e
- Quatro doses do fosfogesso: 0,0; 0,5; 1,0 e 2,0 vezes a necessidade de gessagem (Quadro 2.5).

Ao vasos foram irrigados diariamente de modo a restabelecer a umidade dos solos próxima à capacidade de campo. Periodicamente a irrigação era realizada com excesso de água, de modo a se obter 1 L de solução lixiviada, a qual era coletada a cada 30 dias. Alíquotas das soluções lixiviadas foram armazenadas a baixa temperatura (aproximadamente 4 °C) em frascos de polietileno, para posterior análise. As concentrações de Cd, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb, Ti, V e Zn foram determinadas nos lixiviados por espectrometria de emissão óptica, com indução de plasma (ICP-OES).

Quadro 2.5. Quantidades de fosfogesso utilizadas como condicionador de solos no Latossolo Vermelho-Amarelo e no Latossolo Amarelo, estimadas segundo Sousa et al. (1992).

Solo	Dose (NG)		
	0,5	1,0	2,0
Fosfogesso (t ha ⁻¹)			
LVA Sete Lagoas-MG	0,50	0,99	1,98
LA Três Marias-MG	0,22	0,44	0,88

2.4. Teores de metais pesados nos solos

Amostras dos solos foram coletadas nos vasos antes do plantio e após a incubação dos solos com seus respectivos tratamentos (camada superficial, 0-18 cm) e depois do cultivo das plantas nas camadas de 0-18 e 18-25 cm de profundidade. Aproximadamente 2,0 g de solo foram trituradas em almofariz de ágata, passadas em peneira de 0,149 mm de abertura de malha (ABNT 100), secas em estufa de circulação de ar forçada a 35 °C por 24 h e armazenadas em dessecador até atingir temperatura ambiente.

Em seguida, foram determinados os teores semi-totais de Cd, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb, Ti, V e Zn nos extratos de ataque ácido das amostras com solubilização em forno microondas (marca CEM, modelo MDS 2000), conforme

método SW-846 3051a da Environmental Protection Agency (U.S.EPA, 1996). Para tanto foram pesadas frações de 0,200 g de solo e transferidos para os tubos de digestão onde adicionou-se 9 mL de ácido nítrico 65 % v v⁻¹ e 3 mL de ácido clorídrico 37 % v v⁻¹, todos de marca (Merck, Darmstadt, Alemanha). A mistura foi submetida a alta pressão, 150 PSI, em tubos de Teflon® de 120 mL, fechados e aquecidos por radiação de microondas por dez minutos a uma potência de 600 W. Este programa foi aplicado para um rotor com seis frascos de reação. Após resfriamento, o extrato foi filtrado e vertido para balões volumétricos de 25 mL, completando-se o volume com água ultrapura (Milli-Q Water System, Millipore, Berford, EUA). Os extratos foram armazenados em recipientes de polietileno em geladeira para posterior análise.

A determinação dos elementos químicos no extrato foi obtida por espectrometria de emissão óptica, com indução de plasma (ICP-OES), marca PERKIN ELMER, modelo Optima 3300 DV. As condições de operação do aparelho e alguns parâmetros das determinações realizadas por ICP-OES estão descritas nos Quadros 2.6 e 2.7. O limite de detecção (LD) e o limite de quantificação praticável (LQP) foram calculados a partir das seguintes expressões:

$$LD = 3 \sigma (\text{tg } \alpha)^{-1} \quad \text{e} \quad LQP = LD \cdot FD$$

Onde: σ - desvio padrão de dez leituras do branco;

α - ângulo de inclinação da curva de calibração;

FD - fator de diluição das amostras após digestão.

Quadro 2.6. Descrição das condições operacionais do espectrômetro de emissão ótica em plasma induzido – ICP OES Perkin Elmer Optima 3300 DV

Gerador de frequência (MHz)	1300
Modo de observação	axial
Sistema de difração	Policromador Echelle
Detector	Dispositivo de carga acoplada (SCD)
Potência de radio frequência (kW)	1,3
Nebulizador	Concêntrico
Câmara de nebulização	Ciclônica
Vazão do gás de geração do plasma (L min ⁻¹)	15
Vazão do gás auxiliar (L min ⁻¹)	0,7
Vazão do gás de nebulização (L min ⁻¹)	0,5
Repetições	2
Tempo de leitura da repetição	3 s
Tempo para estabilização	35 s
Tempo de integração (s)	5

Quadro 2.7. Comprimentos de onda selecionados, limites de detecção e quantificação obtidos por ICP OES Perkin Elmer Optima 3300 DV para determinação, dos elementos abaixo relacionados, em solo

Elemento	λ	LD ⁽¹⁾	LQP ⁽²⁾
	nm	$\mu\text{g L}^{-1}$	mg kg^{-1}
Cd	214,440	4,437	0,555
Cr	267,716	3,519	0,44
Cu	324,752	32,516	4,064
Fe	238,204	48,12	6,015
Mn	259,372	1,328	0,166
Ni	231,604	9,505	1,188
Pb	220,353	32,392	4,049
Ti	334,940	2,077	0,26
V	290,880	5,361	0,67
Zn	213,857	11,258	1,407

(1) Limite de detecção = $3 \sigma (\text{tg } \alpha)^{-1}$

(2) Limite de quantificação praticável = LD x fator diluição

2.5. Teores de metais pesados no material vegetal

Depois de completo o ciclo das plantas, a parte aérea foi colhida e os grãos separados. O material vegetal foi seco em estufa de circulação de ar forçada a 45 °C por 72 horas ou até massa constante, moídos em moinho tipo Willey e preparadas para as determinações analíticas.

Foram determinados os teores de Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb, Ti e V nos grãos após digestão nítrico-perclórica em chapa aquecedora. Para tanto, foram pesadas frações de aproximadamente 0,500 g de material vegetal moído e transferidos para erlenmeyer de 125 mL, onde adicionou-se 7 mL de de ácido nítrico 65 % v v⁻¹ e 2 mL de ácido perclórico 70 % v v⁻¹, todos de marca (Merck, Darmstadt, Alemanha). Após solubilização e resfriamento, o extrato foi filtrado e vertido para balões volumétricos de 25 mL, completando-se o volume com água ultrapura (Milli-Q Water System, Millipore, Berford, EUA). Os extratos foram armazenados em recipientes de polietileno em geladeira, para posterior análise.

A determinação dos elementos químicos no extrato foi obtida por espectrometria de emissão óptica, com indução de plasma (ICP-OES), marca PERKIN ELMER, modelo Optima 3300 DV. As condições de operação do aparelho e alguns parâmetros associados às determinações realizadas por ICP-OES estão descritas nos Quadros 2.6 e 2.8.

Quadro 2.8. Comprimentos de onda selecionados, limites de detecção e quantificação praticável obtidos por ICP OES Perkin Elmer Optima 3300 DV para determinação de metais pesados em material vegetal

Elemento	λ	LD ⁽¹⁾	LQP ⁽²⁾
	ηm	$\mu\text{g L}^{-1}$	mg kg^{-1}
Cr	267.716	3,519	0,176
Cu	324.752	32,516	1,626
Fe	238.204	48,12	2,406
Mn	259.372	1,328	0,066
Ni	231.604	9,505	0,475
Pb	220.353	32,392	1,62
Ti	334.940	2,077	0,104
V	290.880	5,361	0,268

⁽¹⁾ Limite de detecção = $3 \sigma (\text{tg } \alpha)^{-1}$

⁽²⁾ Limite de quantificação praticável = LD x fator diluição

2.6. Fatores de transferência

Foi calculado o fator de transferência (FT), o qual é definido como a razão entre as concentrações do elemento na planta e as concentrações no solo. Neste cálculo foram considerados os teores semi-totais dos elementos no solo da camada superficial, onde se aplicou os fosfogessos e os teores totais encontrados nos grãos de milho e soja.

3. RESULTADO E DISCUSSÃO

3.1. Teores semi-totais de metais pesados nos solos

3.1.1. Ensaio com a cultura do milho

Os solos após o cultivo com a cultura do milho apresentaram teores semi-totais na faixa de 0,59 a 1,38 mg kg⁻¹ de Cd; 21,06 a 80,05 mg kg⁻¹ de Cr; 19,29 a 27,80 mg kg⁻¹ de Cu; 75,41 a 303,98 mg kg⁻¹ de Mn; 34,65 a 43,96 mg kg⁻¹ de Ni; 4,32 a 31,89 mg kg⁻¹ de Pb; 503,59 a 625,08 mg kg⁻¹ de Ti; 52,05 a 180,49 mg kg⁻¹ de V; 12,10 a 88,90 mg kg⁻¹ de Zn e 16,12 a 61,20 g kg⁻¹ de Fe (Quadro 3.1), na camada de 0-18 cm de profundidade, onde foi aplicado o fosfogesso. Os teores de Cd, Cr, Cu, Ni, Pb e Zn estão abaixo dos valores de intervenção para área agrícola, conforme a CETESB (2005), que seriam: Cd, 3 mg kg⁻¹; Cr, 150 mg kg⁻¹; Cu, 200 mg kg⁻¹; Ni, 70 mg kg⁻¹; Pb, 180 mg kg⁻¹ e Zn, 450 mg kg⁻¹. Para o Fe, Mn, Ti e V a CETESB não apresenta os valores de intervenção para cenários de exposição agrícola.

Vale ressaltar que, os teores encontrados no presente trabalho, em alguns casos são inferiores às concentrações naturais de alguns solos. Campos et al. (2003) em um trabalho com 19 Latossolos brasileiros, reportaram as seguintes concentrações (média ± desvio padrão) de elementos-traço, pelo método USEPA-3051a: Cd, 0,66 ± 0,19 mg kg⁻¹; Cu, 65,0 ± 7,4 mg kg⁻¹; Ni, 18 ± 12 mg kg⁻¹; Pb, 22 ± 9 mg kg⁻¹ e Zn, 39 ± 24 mg kg⁻¹.

Quadro 3.1. Teores semi-totais de Pb,Cd, Cu,Cr, Fe, Mn, Ni, Ti, V e Zn nos solos tratados com fosfogesso na profundidade de 0-18 cm, após o cultivo com milho

solo	Fosfogesso	Dose (NG)	Pb	Cd	Cr	Cu	Mn	Ni	Ti	V	Zn	Fe
			.....mg kg ⁻¹									g kg ⁻¹
LVA	A	0,0	27,78 ± 2,73	1,04 ± 0,38	71,78 ± 9,30	19,29 ± 5,62	290,32 ± 8,46	37,48 ± 6,42	506,76 ± 104,30	174,98 ± 5,56	80,42 ± 16,95	59,85 ± 1,35
		0,5	30,23 ± 2,13	0,83 ± 0,48	72,73 ± 2,77	22,13 ± 5,80	298,25 ± 6,16	35,95 ± 3,87	554,27 ± 56,22	180,49 ± 3,10	88,90 ± 15,15	60,96 ± 1,18
		1,0	28,43 ± 1,61	1,12 ± 0,07	70,20 ± 8,05	24,04 ± 5,45	303,98 ± 15,46	41,50 ± 10,83	542,39 ± 105,13	179,93 ± 8,00	77,68 ± 1,33	61,20 ± 2,44
		2,0	28,63 ± 1,04	1,38 ± 0,41	80,05 ± 8,24	27,80 ± 7,30	297,43 ± 6,92	43,96 ± 13,47	587,74 ± 74,39	178,13 ± 2,53	77,03 ± 12,99	60,95 ± 0,76
	B	0,0	32,93 ± 3,88	0,71 ± 0,10	71,88 ± 4,50	23,82 ± 9,06	295,13 ± 9,77	39,04 ± 5,61	589,82 ± 93,38	177,06 ± 5,94	71,94 ± 9,22	61,07 ± 0,86
		0,5	28,68 ± 3,68	1,03 ± 0,23	72,30 ± 1,70	22,83 ± 9,27	293,60 ± 9,51	41,67 ± 8,07	574,62 ± 68,90	176,43 ± 2,78	74,27 ± 9,54	60,45 ± 1,46
		1,0	30,43 ± 1,71	1,13 ± 0,13	78,40 ± 6,35	25,66 ± 8,24	294,46 ± 6,95	34,65 ± 4,06	625,08 ± 55,20	176,16 ± 2,76	75,82 ± 9,51	60,08 ± 1,64
		2,0	31,89 ± 2,79	1,05 ± 0,04	78,74 ± 10,89	26,04 ± 4,84	299,36 ± 6,37	35,58 ± 4,55	616,45 ± 65,27	178,27 ± 3,59	77,36 ± 7,12	61,10 ± 2,58
LA	A	0,0	5,83 ± 2,13	n.d.	21,06 ± 0,50	n.d.	76,38 ± 3,36	n.d.	521,80 ± 16,60	52,74 ± 0,82	28,89 ± 7,52	16,49 ± 0,12
		0,5	4,76 ± 1,06	n.d.	21,95 ± 1,25	n.d.	76,29 ± 5,99	n.d.	526,47 ± 29,03	54,68 ± 1,71	25,25 ± 15,02	17,05 ± 0,92
		1,0	5,66 ± 1,83	n.d.	22,17 ± 0,32	n.d.	78,03 ± 3,84	n.d.	556,41 ± 37,87	53,64 ± 2,26	19,42 ± 6,04	16,45 ± 0,96
		2,0	4,32 ± 1,49	n.d.	21,83 ± 0,95	n.d.	76,79 ± 15,00	n.d.	503,59 ± 61,61	55,22 ± 1,15	18,13 ± 6,75	17,07 ± 1,04
	B	0,0	5,47 ± 1,13	0,65 ± 0,43	22,80 ± 2,23	n.d.	75,88 ± 10,20	n.d.	542,20 ± 72,39	53,40 ± 2,58	12,10 ± 6,33	16,60 ± 0,84
		0,5	5,09 ± 1,05	0,59 ± 0,34	22,38 ± 4,21	n.d.	76,62 ± 14,38	n.d.	531,59 ± 72,25	52,05 ± 5,08	17,91 ± 5,29	16,12 ± 1,98
		1,0	6,68 ± 1,89	1,10 ± 0,63	23,05 ± 1,66	n.d.	79,79 ± 1,59	n.d.	557,08 ± 21,61	53,97 ± 1,40	18,41 ± 8,11	16,71 ± 0,72
		2,0	5,30 ± 3,06	0,68 ± 0,28	23,33 ± 2,56	n.d.	75,41 ± 18,95	n.d.	506,28 ± 132,50	54,54 ± 3,32	17,93 ± 1,54	17,18 ± 1,11

n.d.: Não detectado pela técnica analítica utilizada

Foram obtidas diferenças significativas entre os solos para os teores semi-totais de Pb, Cd, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, V e Zn na camada de 0-18 cm de profundidade. Por outro lado, as doses de fosfógeno, não proporcionaram alterações significativas nos teores dos elementos em estudo nos solos (Quadro 3.1). As diferenças entre solos se mantêm significativas para a camada sub-superficial (18-25 cm de profundidade) (Quadro 3.2). Estes resultados sugerem que, apesar de conterem Pb, Cd, Cr, Fe, Mn, Ti e V (Quadro 2.1), os fosfogessos não contribuem para a contaminação dos solos com estes metais pesados.

Os resultados encontrados, para os teores semi-totais dos elementos em estudo, indicam que as diferenças entre solos são decorrências naturais dos fatores de formação, possivelmente com ênfase para o material de origem. Por fim, baseado nos resultados de análise de solo, pode-se dizer que não houve movimentação no perfil seguida por adsorção desses elementos em camadas mais profundas dos solos.

Com exceção do Ti que em ambos os solos estudados apresentam valores bem próximos, os teores dos demais elementos tóxicos encontrados nos solos após o cultivo, são muito superiores no Latossolo Vermelho Amarelo de Sete Lagoas em relação ao Latossolo Amarelo de Três Marias (Quadro 3.1). A quantidade destes elementos adicionados aos solos (Quadro 3.4) por meio dos condicionadores foram maiores no LVA, devido à maior quantidade de fosfógeno utilizada como condicionador neste solo. Não houve grande disparidade para os teores de nenhum dos elementos analisados entre os fosfogessos (A e B), embora para a sua produção tenham sido utilizadas matéria-prima de duas regiões distintas. Com exceção do Fe e Ti, todos os demais encontram-se com teores a nível de traço, ou seja, menor que 1 g kg^{-1} (Quadro 3.3).

Quadro 3.2. Teores semi-totais de Pb, Cd, Cu, Cr, Fe, Mn, Ni, Ti, V e Zn nos solos na profundidade de 18-25 cm, após o cultivo com milho

solo	Fosfogesso	Dose (NG)	Pb	Cd	Cr	Cu	Mn	Ni	Ti	V	Zn	Fe
			.....mg kg ⁻¹									g kg ⁻¹
LVA	A	0,0	27,02 ± 2,10	0,88 ± 0,22	83,25 ± 2,84	20,31 ± 2,98	297,76 ± 3,43	36,33 ± 2,74	616,71 ± 27,55	179,25 ± 3,80	74,03 ± 4,80	60,29 ± 0,79
		0,5	29,91 ± 3,60	1,21 ± 0,06	77,85 ± 6,87	20,02 ± 5,98	302,04 ± 10,82	35,85 ± 0,98	619,62 ± 22,51	181,52 ± 6,00	70,43 ± 3,25	60,47 ± 1,02
		1,0	28,15 ± 3,05	0,58 ± 0,33	80,28 ± 14,74	14,97 ± 6,95	288,45 ± 13,93	30,66 ± 6,50	506,63 ± 123,65	175,18 ± 6,22	67,25 ± 20,89	59,59 ± 1,21
		2,0	29,82 ± 29,82	1,29 ± 0,55	69,01 ± 2,98	17,30 ± 3,26	293,40 ± 4,88	33,38 ± 1,71	567,84 ± 33,94	176,28 ± 1,63	68,37 ± 3,53	59,33 ± 0,08
	B	0,0	26,75 ± 5,75	1,11 ± 0,08	66,18 ± 5,35	20,00 ± 6,43	289,24 ± 7,60	31,91 ± 9,84	643,86 ± 15,94	173,39 ± 6,26	70,06 ± 6,79	60,07 ± 0,75
		0,5	25,61 ± 3,89	1,11 ± 0,50	72,59 ± 0,85	24,19 ± 2,76	293,30 ± 5,74	37,70 ± 2,39	632,31 ± 28,10	176,45 ± 2,88	74,32 ± 0,88	58,40 ± 1,54
		1,0	28,69 ± 2,31	1,14 ± 0,30	76,94 ± 4,92	21,42 ± 3,05	295,46 ± 8,91	36,76 ± 4,48	604,94 ± 8,84	178,64 ± 4,47	75,93 ± 16,28	60,05 ± 0,60
		2,0	27,98 ± 5,55	0,94 ± 0,43	77,99 ± 8,91	20,71 ± 2,71	291,76 ± 11,77	35,68 ± 3,80	650,88 ± 39,25	177,59 ± 9,34	71,33 ± 2,44	59,77 ± 3,02
LA	A	0,0	4,68 ± 2,70	1,30 ± 0,75	22,31 ± 3,14	n.d.	78,17 ± 11,85	n.d.	536,47 ± 40,40	50,23 ± 0,93	16,80 ± 0,18	15,36 ± 0,84
		0,5	4,62 ± 2,67	0,69 ± 0,40	21,73 ± 1,19	n.d.	64,09 ± 1,50	n.d.	465,98 ± 25,86	53,75 ± 3,64	14,96 ± 8,78	16,15 ± 1,21
		1,0	n.d.	0,89 ± 0,51	22,53 ± 0,89	n.d.	79,60 ± 9,42	n.d.	540,48 ± 8,41	51,85 ± 2,14	17,70 ± 8,73	16,03 ± 0,74
		2,0	4,68 ± 2,70	n.d.	20,92 ± 0,39	n.d.	75,44 ± 5,79	n.d.	520,62 ± 39,89	50,92 ± 1,09	18,60 ± 9,88	15,57 ± 0,49
	B	0,0	4,09 ± 2,36	n.d.	21,26 ± 1,37	n.d.	68,02 ± 15,83	n.d.	562,21 ± 31,55	52,25 ± 0,48	8,89 ± 1,03	15,95 ± 0,46
		0,5	6,34 ± 1,40	0,94 ± 0,54	24,67 ± 1,07	n.d.	81,20 ± 13,44	n.d.	522,96 ± 69,43	53,51 ± 3,16	13,28 ± 3,40	16,49 ± 0,95
		1,0	10,50 ± 6,06	n.d.	20,60 ± 0,56	n.d.	67,55 ± 5,23	n.d.	462,84 ± 63,33	49,40 ± 2,03	11,59 ± 2,47	15,02 ± 0,34
		2,0	n.d.	0,96 ± 0,56	22,35 ± 0,73	n.d.	78,01 ± 10,39	n.d.	566,72 ± 47,43	54,18 ± 2,04	13,65 ± 2,15	16,58 ± 0,69

n.d.: Não detectado pela técnica analítica utilizada

Quadro 3.3. Concentração de metais nas amostras de fosfogesso e alguns valores orientadores

Elemento	CETESB		Limites MAPA	Fosfogesso A	Fosfogesso B
	(1) (mg/kg)	(2) (kg/ha)	(3) (mg/kg)	(mg/kg)	(mg/kg)
Cd	85	1,9	8	0,93 ± 0,11	0,75 ± 0,03
Cr	-	-	500	<0,44	1,65 ± 0,30
Cu	4300	75	-	<4,06	<4,06
Fe	-	-	-	2120 ± 13,04	2590 ± 14,21
Mn	-	-	-	27,55 ± 2,60	27,79 ± 2,50
Ni	420	21	175	15,70 ± 1,50	13,48 ± 1,34
Pb	840	15	300	14,67 ± 2,81	16,16 ± 2,00
Ti	-	-	-	1429,86 ± 115,37	730 ± 66,72
V	-	-	-	15,94 ± 1,98	9,79 ± 0,31
Zn	7500	140	-	<1,41	<1,41

(1) CETESB (1999): Teores máximos, expressos em mg/kg, de metais pesados permitidos no biossólido ou lodo de esgoto para que o mesmo possa ser usado na agricultura;

(2) CETESB (1999): Teores máximos, expressos em kg ha⁻¹, de metais pesados a serem adicionados anualmente pela aplicação ao solo de biossólido.

(3) Limite de metais para corretivos e fertilizantes estabelecido pelo Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA) na Instrução Normativa Nº 35, de 04 de julho de 2006.

Os resultados encontrados para os teores de metais nos solos sugerem que a contribuição de ambos os fosfogessos na contaminação dos solos foi semelhante, independente da matéria prima utilizada na produção do ácido fosfórico (Quadro 3.1).

Os resultados indicam que, de modo geral, não houve contaminação preocupante por metais pesados tóxicos ou nocivos ao meio ambiente como consequência da aplicação do fosfogesso em curto prazo.

A título de comparação também foram considerados os limites máximos de metais pesados permitidos no biossólido ou lodo de esgoto (Quadro 3.3) para a sua utilização na agricultura (CETESB, 1999), já que os limites para o fosfogesso ainda não foram determinados. Os teores de metais encontrados no fosfogesso estão abaixo do limite máximo permitido em biossólidos ou lodo de esgoto para incorporação nos solos, por meio da agricultura (Quadro 3.3).

Estes resultados revelam um panorama relativamente favorável e seguro, do ponto de vista ambiental, para a utilização do fosfogesso na agricultura como condicionador de solos em subsuperfície. No entanto, vale ressaltar que o presente estudo teve duração de cerca de 4 meses apenas. Sendo assim, mesmo que os resultados possam ser considerados satisfatórios

a curto prazo, há que se considerar a possibilidade de acúmulo destes metais nos solos pelo uso continuado por longo prazo, em um mesmo local. Para avaliar esta possibilidade, foram calculados os teores destes elementos adicionados aos solos a partir das doses recomendadas (1 NG) dos condicionadores (Quadro 2.5) e dos teores de Cd, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb, Ti, V e Zn encontrado nos mesmos (Quadro 3.3). Estas estimativas revelam contribuições dos fosfogessos relativamente pequenas (Quadro 3.4).

Com base nesta contribuição teórica dos fosfogessos e partindo-se da hipótese de acúmulo de 100 % da carga destes elementos adicionados aos solos, sem considerar a possibilidade de lixiviação, pode-se calcular o número máximo de aplicações dos fosfogessos em um mesmo local necessário para se atingir os valores orientadores. Para tanto, foram considerados os valores de prevenção e de intervenção em áreas agrícolas para contaminação por metais pesados estabelecidos pela CETESB (2005) (Quadro 3.5).

De acordo com estas estimativas, o Cd é o mais limitante entre os elementos em estudo, para a aplicação de fosfogesso a longo prazo, haja visto que necessita de menor número de aplicações para atingir os valores orientadores estabelecidos pela CETESB. Verifica-se que serão necessárias 954 aplicações do fosfogesso A e 1183 aplicações do fosfogesso B para se atingir o valor de prevenção no LVA, e respectivamente 4117 e 5116 aplicações no solo LA (Quadro 3.6). Para atingir o valor de intervenção estabelecido pela CETESB seriam necessárias 4449 aplicações do fosfogesso A e 5765 aplicações do fosfogesso B no LVA e respectivamente, 12410 e 15419 aplicações no LA.

Diante do critério adotado e das estimativas, e tendo em vista que a aplicação de fosfogesso de modo geral não são realizadas anualmente, pode-se considerar que o uso dos fosfogessos é seguro, do ponto de vista ambiental, para prazos de centenas de anos.

Tais estimativas, entretanto, devem ser revistas para cada caso em particular, posto que também dependem dos teores de metais pesados originalmente presentes nos solos e não somente da carga de metais pesados adicionada aos solos por meio dos fosfogessos.

Quadro 3.4. Estimativa dos teores de metais pesados adicionados aos solos, pelos fosfogessos na dose recomendada de 1,0 NG

Elemento	LVA Sete Lagoas-MG		LA Três Marias-MG	
	Fosfogesso A	Fosfogesso B	Fosfogesso A	Fosfogesso B
	.....µg kg ⁻¹			
Pb	7,262	8,004	3,227	3,557
Cd	0,460	0,371	0,205	0,165
Cr	n.d.	0,772	n.d.	0,343
Cu	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Mn	13,637	13,756	6,061	6,114
Ni	7,772	6,673	3,454	2,966
Ti	707,85	361,350	314,600	160,600
V	7,890	4,846	3,507	2,154
Zn	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
	.....mg kg ⁻¹			
Fe	1,049	1,282	0,466	0,5700

Média de 3 repetições; n.d. = não detectado, devido aos teores encontrados nos fosfogessos estarem abaixo do limite detectável pela técnica analítica utilizada

Quadro 3.5. Valores orientadores estabelecidos pela CETESB

Elemento	CETESB		
	(1) (mg/kg)	(2) (mg/kg)	(3) (mg/kg)
Cd	<0,5	1,3	3
Cr	40	75	150
Cu	35	60	200
Fe	-	-	-
Mn	-	-	-
Ni	13	30	70
Pb	17	72	180
Ti	-	-	-
V	275	-	-
Zn	60	300	450

(1) CETESB (2005): Valor de referência de qualidade, expresso em mg/kg, para áreas contaminadas

(2) CETESB (2005): Valor de prevenção, expresso em mg/kg.

(3) CETESB (2005): Valor de intervenção, expresso em mg/kg, para cenários de exposição agrícola-área de proteção máxima.

Quadro 3.6. Estimativa do número máximo de aplicações, com base na contribuição teórica dos fosfogessos e nos valores orientadores para contaminação dos solos

Solo	Elemento	Valores Orientadores			
		Prevenção		Intervenção	
		Fosfogesso A	Fosfogesso B	Fosfogesso A	fosfogesso B
LVA;	Cd	954	1183	4649	5765
	Cr	n.d. ^{/2}	n.d. ^{/3}	n.d. ^{/2}	94611
	Cu	n.d. ^{/2}	n.d. ^{/2}	n.d. ^{/2}	n.d. ^{/2}
	Ni	n.d. ^{/3}	n.d. ^{/3}	4412	5139
	Pb	6389	5797	21261	19290
	V	n.d. ^{/4}	n.d. ^{/4}	n.d. ^{/4}	n.d. ^{/4}
	Zn	n.d. ^{/2}	n.d. ^{/2}	n.d. ^{/2}	n.d. ^{/2}
LA	Cd	4117	5116	12410	15419
	Cr	n.d. ^{/2}	143889	n.d. ^{/2}	362548
	Cu	n.d. ^{/2}	n.d. ^{/2}	n.d. ^{/2}	n.d. ^{/2}
	Ni	8685	10114	20266	23600
	Pb	21137	19176	54605	49539
	V	n.d. ^{/4}	n.d. ^{/4}	n.d. ^{/4}	n.d. ^{/4}
	Zn	n.d. ^{/2}	n.d. ^{/2}	n.d. ^{/2}	n.d. ^{/2}

^{/1} Valor de intervenção calculado com a utilização de procedimentos de avaliação de riscos à saúde humana para cenários de exposição Agrícola-Área de Proteção Máxima – APM_{Max}, Residencial e Industrial.

^{/2} Não estimado, posto que os teores não foram detectados no fosfogesso pela técnica analítica utilizada.

^{/3} Não estimados, posto que os teores originais no solo já eram superior ao valor em questão.

^{/4} Não estimada, posto que a CETESB não estipula o valor orientador em questão.

3.1.2. Ensaio com a cultura da soja

No experimento realizado com a cultura da soja foram encontrados nos solos teores semi-totais na faixa de 4,04 a 5,49 mg kg⁻¹ de Cd; 18,00 a 134,63 mg kg⁻¹ de Cr; 26,13 a 43,38 mg kg⁻¹ de Cu; 47,42 a 329,79 mg kg⁻¹ de Mn; 36,88 a 41,11 mg kg⁻¹ de Ni; 5,68 a 28,43 mg kg⁻¹ de Pb; 358,17 a 627,93 mg kg⁻¹ de Ti; 36,25 a 179,39 mg kg⁻¹ de V; 7,95 a 66,38 mg kg⁻¹ de Zn e 11,42 a 63,67 g kg⁻¹ de Fe (Quadro 3.7) na camada de 0-18 cm de profundidade, onde foi aplicado o fosfogesso. Os teores de Cd, Cr, Cu, Ni, Pb e Zn estão abaixo dos teores permissíveis para área agrícola, conforme a CETESB (2005), que seriam: Cr, 150, mg kg⁻¹; Cu, 200 mg kg⁻¹; Ni, 70 mg kg⁻¹; Pb, 180 mg kg⁻¹ e Zn, 450 mg kg⁻¹, no entanto, o Cd apresentou teor acima do valor de intervenção estabelecido pela CETESB (2005) que seria: 3 mg kg⁻¹.

No experimento onde se cultivou a soja, situação semelhante foi observada ao encontrado com a cultura do milho. Foram observadas diferenças significativas entre solos para os elementos Pb, Cd, Cu, Cr, Fe, Mn, Ni, Ti, V e Zn tanto na camada superior (0-18 cm de profundidade), quanto na camada inferior (18-25 cm de profundidade). Entretanto, não houve diferença significativa para estes elementos entre as doses aplicadas de fosfogesso em nenhuma das camadas estudadas (Quadros 3.7 e 3.8).

Estes resultados sugerem que a utilização do fosfogesso não contribui para a contaminação dos solos por metais pesados. Isso se deve às baixas concentrações da maioria dos elementos em estudo nos fosfogessos e, portanto, pequena incorporação nos solos. Conforme mencionado anteriormente, as diferenças significativas entre solos se devem principalmente à diferença entre os materiais de origem dos solos, sendo que o LVA de Sete Lagoas é proveniente de uma área de predominância de rochas calcárias e o LA de Três Marias tem como material de origem o arenito. Segundo Faure (1991) a composição química das rochas carbonáticas podem possuir teores mais elevados de alguns metais pesados como, por exemplo, Cd, Cu, Mn, Ni e Zn em relação aos arenitos.

Com exceção do Pb e Cd, que apresentaram diferenças significativas a 5 % de probabilidade na camada de 0-18 cm de profundidade, os demais elementos não apresentaram diferenças significativas entre os fosfogessos, confirmando contribuição semelhante para ambos os fosfogessos, independente da matéria prima utilizada na produção do ácido fosfórico.

Quanto às projeções de contaminação em longo prazo, considerando o uso continuado do fosfogesso em um mesmo local, o mesmo comentário feito para o experimento com a cultura do milho é válido para o ensaio com a cultura da soja (Quadro 3.6).

Quadro 3.7. Teores semi-totais de Pb,Cd, Cu,Cr, Fe, Mn, Ni, Ti, V e Zn nos solos tratados com fosfogesso na profundidade de 0-18 cm, após o cultivo com Soja

solo	Fosfogesso	Dose (NG)	Pb	Cd	Cr	Cu	Mn	Ni	Ti	V	Zn	Fe
			.....mg kg ⁻¹									g kg ⁻¹
LVA	A	0,0	28,10 ± 1,50	5,03 ± 0,14	121,29 ± 14,48	28,20 ± 11,24	324,24 ± 18,26	39,96 ± 2,39	575,21 ± 55,26	174,80 ± 7,25	63,83 ± 5,36	61,00 ± 2,29
		0,5	27,48 ± 3,44	4,54 ± 0,61	112,11 ± 17,30	43,38 ± 25,98	329,79 ± 29,00	40,24 ± 5,93	571,64 ± 115,52	165,67 ± 26,74	63,31 ± 16,45	57,79 ± 9,54
		1,0	27,81 ± 2,02	5,25 ± 0,03	134,63 ± 7,72	29,52 ± 10,43	319,72 ± 11,72	41,11 ± 1,16	627,93 ± 21,75	179,39 ± 6,24	66,38 ± 7,06	62,73 ± 3,20
		2,0	28,43 ± 0,93	5,16 ± 0,10	118,02 ± 19,84	26,13 ± 4,14	320,75 ± 17,51	36,88 ± 6,53	537,19 ± 183,44	172,37 ± 7,45	55,19 ± 12,42	61,15 ± 2,32
	B	0,0	25,36 ± 4,42	5,14 ± 2,97	116,15 ± 8,74	30,81 ± 7,46	302,36 ± 20,38	37,85 ± 2,61	613,80 ± 61,63	173,61 ± 5,92	63,16 ± 3,77	61,84 ± 2,56
		0,5	25,35 ± 3,39	4,96 ± 2,86	103,03 ± 21,28	28,05 ± 11,30	316,60 ± 25,77	40,48 ± 0,66	588,70 ± 126,43	174,59 ± 6,79	65,19 ± 6,96	63,67 ± 3,38
		1,0	24,24 ± 3,69	4,94 ± 2,85	111,91 ± 17,67	36,87 ± 1,70	302,58 ± 22,91	38,69 ± 6,85	577,64 ± 110,63	170,92 ± 6,21	59,52 ± 8,66	60,85 ± 3,03
		2,0	25,64 ± 1,94	4,87 ± 2,81	113,75 ± 26,50	35,92 ± 8,52	312,38 ± 10,90	37,72 ± 2,97	621,08 ± 35,36	176,72 ± 9,01	63,92 ± 5,26	62,75 ± 5,42
LA	A	0,0	6,45 ± 3,73	4,55 ± 0,49	21,51 ± 3,93	n.d.	67,73 ± 15,54	n.d.	457,05 ± 54,30	44,62 ± 0,43	15,63 ± 2,44	13,70 ± 0,67
		0,5	6,15 ± 3,55	4,04 ± 2,33	21,09 ± 4,18	n.d.	72,82 ± 25,76	n.d.	410,78 ± 92,28	41,69 ± 2,04	15,62 ± 2,83	13,30 ± 0,44
		1,0	5,68 ± 3,28	4,13 ± 2,39	19,04 ± 1,43	n.d.	53,54 ± 7,00	n.d.	358,73 ± 51,84	36,25 ± 7,00	7,95 ± 5,28	11,42 ± 2,88
		2,0	6,67 ± 3,85	4,84 ± 2,79	20,96 ± 7,10	n.d.	99,53 ± 6,57	n.d.	441,65 ± 97,47	41,97 ± 5,32	11,69 ± 3,48	13,18 ± 1,27
	B	0,0	6,47 ± 3,73	4,89 ± 2,82	19,64 ± 2,26	n.d.	69,36 ± 17,20	n.d.	409,31 ± 42,05	40,20 ± 2,21	10,26 ± 1,32	12,84 ± 1,36
		0,5	7,02 ± 4,06	5,49 ± 3,17	21,08 ± 6,07	n.d.	67,68 ± 23,64	n.d.	469,60 ± 80,99	42,61 ± 3,65	13,67 ± 5,99	13,60 ± 0,85
		1,0	6,38 ± 3,68	5,22 ± 3,01	24,17 ± 5,50	n.d.	63,04 ± 22,48	n.d.	414,55 ± 66,19	42,88 ± 2,86	11,88 ± 4,40	13,56 ± 0,15
		2,0	n.d.	n.d.	18,00 ± 1,16	n.d.	47,42 ± 3,50	n.d.	358,17 ± 51,56	43,05 ± 4,56	13,60 ± 6,62	13,04 ± 0,46

n.d.: Não detectado pela técnica analítica utilizada

Quadro 3.8. Teores semi-totais de Pb, Cd, Cu, Cr, Fe, Mn, Ni, Ti, V e Zn nos solos na profundidade de 18-25 cm, após o cultivo com soja

solo	Fosfogesso	Dose (NG)	Pb	Cd	Cr	Cu	Mn	Ni	Ti	V	Zn	Fe
			.....mg kg ⁻¹									g kg ⁻¹
LVA	A	0,0	23,80 ± 1,25	1,09 ± 0,30	105,82 ± 23,63	20,46 ± 8,71	288,01 ± 7,88	35,57 ± 3,43	631,92 ± 47,03	178,27 ± 5,81	64,80 ± 8,41	60,81 ± 2,73
		0,5	22,19 ± 0,50	n.d.	98,23 ± 18,77	22,60 ± 5,02	284,33 ± 21,51	34,61 ± 2,60	582,20 ± 55,59	173,99 ± 10,71	57,87 ± 5,17	60,53 ± 2,55
		1,0	30,89 ± 2,97	0,79 ± 0,45	93,29 ± 15,38	21,02 ± 8,20	298,39 ± 16,03	34,20 ± 6,09	551,54 ± 95,79	182,36 ± 10,47	59,94 ± 10,94	62,09 ± 5,03
		2,0	25,32 ± 0,98	1,41 ± 0,82	99,11 ± 21,69	23,94 ± 14,94	304,54 ± 24,45	36,66 ± 7,79	605,32 ± 98,95	189,64 ± 13,40	64,55 ± 10,56	63,90 ± 3,24
	B	0,0	26,46 ± 2,42	1,31 ± 0,97	93,62 ± 18,69	23,14 ± 10,72	292,07 ± 10,68	35,74 ± 4,53	631,21 ± 44,30	180,54 ± 8,28	60,35 ± 5,16	60,81 ± 4,44
		0,5	28,45 ± 5,21	0,63 ± 0,36	100,36 ± 8,22	27,84 ± 6,58	296,85 ± 5,82	39,01 ± 1,85	679,86 ± 7,14	182,97 ± 5,23	67,59 ± 5,73	62,44 ± 2,04
		1,0	25,12 ± 2,49	0,66 ± 0,38	115,20 ± 27,72	23,75 ± 5,41	291,31 ± 11,15	34,21 ± 8,64	569,24 ± 199,42	178,58 ± 5,30	59,57 ± 11,50	62,76 ± 0,89
		2,0	29,53 ± 4,08	1,46 ± 0,84	99,61 ± 33,84	25,71 ± 8,87	324,07 ± 58,93	36,91 ± 3,16	633,13 ± 53,72	178,07 ± 6,00	68,47 ± 5,90	62,38 ± 2,55
LA	A	0,0	5,67 ± 3,27	n.d.	20,30 ± 1,50	n.d.	64,02 ± 1,95	n.d.	508,23 ± 3,84	48,02 ± 2,29	10,67 ± 4,45	14,88 ± 0,69
		0,5	6,93 ± 1,44	n.d.	21,41 ± 0,55	n.d.	70,75 ± 14,10	n.d.	514,11 ± 89,13	54,12 ± 1,98	11,98 ± 2,34	16,26 ± 0,85
		1,0	n.d.	0,70 ± 0,40	21,54 ± 1,96	n.d.	58,22 ± 10,80	n.d.	469,45 ± 109,98	48,86 ± 3,94	13,16 ± 5,02	15,09 ± 1,26
		2,0	n.d.	n.d.	14,68 ± 12,74	n.d.	46,92 ± 40,77	n.d.	546,51 ± 57,56	48,81 ± 4,69	20,16 ± 7,81	10,97 ± 9,46
	B	0,0	n.d.	n.d.	26,39 ± 6,71	n.d.	66,41 ± 12,77	n.d.	526,49 ± 40,43	49,13 ± 4,97	15,33 ± 8,31	15,46 ± 1,76
		0,5	n.d.	n.d.	22,00 ± 3,24	n.d.	66,89 ± 10,10	n.d.	551,59 ± 36,26	50,46 ± 5,96	10,94 ± 3,64	15,92 ± 1,99
		1,0	4,17 ± 2,41	n.d.	20,97 ± 1,58	n.d.	63,92 ± 6,30	n.d.	519,26 ± 30,17	48,61 ± 2,60	13,33 ± 5,51	15,24 ± 1,14
		2,0	n.d.	n.d.	22,06 ± 3,09	n.d.	62,57 ± 14,07	n.d.	521,78 ± 95,54	50,67 ± 5,25	10,26 ± 0,55	15,91 ± 1,80

n.d.: Não detectado pela técnica analítica utilizada

3.2. Fator de transferência

No quadro 3.9 pode ser visto a faixa de produção de matéria seca dos grãos de milho e soja. Vale ressaltar que os extremos de produção não correspondem à menor e maior dose de fosfogesso, haja visto que neste trabalho o aumento das doses de fosfogessos não proporcionaram alterações significativas na produção.

De modo geral, não houve incremento dos teores de metais disponíveis, extraídos por mehlich 3 em ambos os solos após a aplicação do fosfogesso, ou com o aumento das doses aplicadas em ambas as culturas (Quadros 3.10 e 3.11).

Além da baixa carga de metais pesados adicionados ao solo por meio do fosfogesso, a ausência de significância observada na análise de variância pode ser explicada pela não alteração do pH do solo com a sua utilização, por se tratar de um sal neutro. Um dos principais fatores que afetam a solubilidade e a disponibilidade dos metais é o pH do solo, como, por exemplo, o Zn que tem sua solubilidade aumentada em 100 vezes para cada decréscimo de uma unidade no pH (Mortvedt et al., 1991).

A menor discrepância entre os solos, para os teores de metais disponíveis em relação aos teores semi-totais, pode ser explicado em parte pela possível presença de frações mais estáveis e de menor solubilidade, podendo ocorrer a formação de complexos de elevada estabilidade com a matéria orgânica do solo (formação de complexos por meio da ligação dos metais aos grupos carboxílicos e OH-fenólicos), com os óxidos de Fe e Al (preferencialmente por adsorção específica, com a formação de ligações de coordenação dos metais com O e OH na superfície dos óxidos) (McBride, 1989; Amaral Sobrinho et al., 1997).

Quadro 3.9. Faixa de produção, matéria seca dos grãos de soja e milho

Cultura	Soja		Milho	
	Fosfogesso A	Fosfogesso B	Fosfogesso A	Fosfogesso B
Solo	.....g/vaso.....			
LVA	23,83-30,28	27,47-29,51	63,64-72,75	53,48-73,76
LA	19,10-26,22	17,44-24,92	63,29-80-70	57,97-83,02

Quadro 3.10. Teores de Cu, Fe, Mn, Pb, Ti, V e Zn na camada de 0-18 cm de profundidade extraídos por Mehlich 3, antes do cultivo com milho

Elemento	Dose (NG)	LVA		LA	
		Fosfogesso A	Fosfogesso B	Fosfogesso A	Fosfogesso B
.....mg kg-1.....					
Cu	0,0	0,029	0,007	0,017	0,013
	0,5	0,030	0,029	0,015	0,018
	1,0	0,027	0,029	n.d.	0,016
	2,0	0,025	0,031	0,018	0,060
Fe	0,0	13,105	11,856	17,213	16,625
	0,5	11,991	12,319	16,005	17,203
	1,0	12,165	11,841	16,813	14,397
	2,0	11,831	11,935	16,243	16,947
Mn	0,0	5,457	5,714	2,540	2,480
	0,5	5,647	5,578	2,527	2,292
	1,0	5,735	5,607	2,486	2,036
	2,0	5,835	5,799	2,472	2,394
Pb	0,0	0,061	0,038	0,016	0,033
	0,5	0,033	0,036	0,051	0,033
	1,0	0,058	0,043	0,016	0,033
	2,0	0,020	0,018	0,033	0,016
Ti	0,0	0,279	0,149	0,073	0,073
	0,5	0,153	0,141	0,075	0,112
	1,0	0,161	0,145	0,088	0,077
	2,0	0,152	0,149	0,073	0,094
V	0,0	0,040	0,027	0,101	0,087
	0,5	0,038	0,030	0,089	0,107
	1,0	0,036	0,027	0,088	0,095
	2,0	0,037	0,029	0,101	0,100
Zn	0,0	0,146	0,157	0,103	0,098
	0,5	0,143	0,161	0,097	0,094
	1,0	0,185	0,137	0,099	0,081
	2,0	0,142	0,150	0,087	0,100

n.d.: Não detectado pela técnica analítica utilizada

Quadro 3.11. Teores de Cu, Fe, Mn, Pb, Ti, V e Zn na camada de 0-18 cm de profundidade extraídos por Mehlich 3, antes do cultivo com soja

Elemento	Dose (NG)	LVA		LA	
		Fosfогesso A	Fosfогesso B	Fosfогesso A	Fosfогesso B
.....mg kg-1.....					
Cu	0,0	0,024	0,013	n.d.	n.d.
	0,5	0,035	0,028	n.d.	n.d.
	1,0	0,021	0,015	n.d.	n.d.
	2,0	0,031	0,023	n.d.	n.d.
Fe	0,0	11,475	10,934	16,638	15,295
	0,5	11,896	12,294	16,812	16,026
	1,0	12,776	11,559	15,078	15,405
	2,0	11,201	11,400	15,021	15,927
Mn	0,0	5,404	5,703	2,501	2,284
	0,5	5,513	5,710	2,650	2,405
	1,0	5,673	5,536	2,322	2,333
	2,0	6,001	5,802	2,271	2,461
Pb	0,0	0,046	0,015	0,024	0,015
	0,5	0,019	0,016	0,037	n.d.
	1,0	n.d.	0,049	0,019	0,020
	2,0	0,018	0,031	0,031	0,021
Ti	0,0	0,162	0,132	0,083	0,116
	0,5	0,186	0,190	0,067	0,082
	1,0	0,234	0,143	0,069	0,093
	2,0	0,138	0,143	0,068	0,099
V	0,0	0,027	0,033	0,097	0,088
	0,5	0,033	0,029	0,096	0,100
	1,0	0,028	0,029	0,096	0,101
	2,0	0,034	0,030	0,091	0,098
Zn	0,0	0,144	0,167	0,090	0,103
	0,5	0,155	0,163	0,091	0,085
	1,0	0,158	0,152	0,091	0,087
	2,0	0,176	0,159	0,087	0,099

n.d.: Não detectado pela técnica analítica utilizada

Quadro 3.12. Teores semi-totais de Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb, Ti e V nos solos (LVA e LA) antes do cultivo com as culturas de milho e soja, tratados com os fosfogessos A e B

Cultura	solo	Fosfogesso	Dose (NG)	Pb	Cr	Cu	Mn	Ni	Ti	V	Fe
				.....mg kg ⁻¹							g kg ⁻¹
Milho	LVA	A	0,0	28,7	74,5	25,4	296,4	37,8	684,4	180,9	61,9
			0,5	26,8	68,9	26,8	291,3	37,0	628,5	176,5	60,4
			1,0	29,3	100,0	26,7	300,8	37,4	677,3	185,8	64,0
			2,0	26,0	99,4	25,2	280,5	34,0	639,8	175,4	61,7
		B	0,0	25,3	99,8	24,9	293,1	35,3	601,4	181,4	61,5
			0,5	28,8	103,3	26,8	287,5	36,6	655,1	180,3	62,7
			1,0	24,5	90,1	27,1	291,4	36,7	633,9	180,9	62,5
			2,0	29,9	73,1	26,5	293,5	35,4	654,9	178,0	60,7
	LA	A	0,0	1,5	22,4	n.d.	70,7	n.d.	552,6	54,2	17,0
			0,5	n.d.	19,0	n.d.	65,0	n.d.	510,2	47,1	15,2
			1,0	n.d.	22,5	n.d.	70,8	n.d.	516,0	54,0	17,5
			2,0	n.d.	22,8	n.d.	69,1	n.d.	517,1	56,2	17,8
		B	0,0	1,7	22,9	n.d.	81,5	n.d.	604,4	56,6	18,2
			0,5	1,5	23,5	n.d.	73,4	n.d.	554,3	56,5	18,1
			1,0	n.d.	19,7	n.d.	61,8	n.d.	523,3	47,4	14,8
			2,0	2,3	21,6	n.d.	50,8	n.d.	416,4	47,5	14,8
Soja	LVA	A	0,0	21,9	63,2	9,5	248,1	31,9	516,9	131,5	45,9
			0,5	24,1	79,5	18,1	286,9	36,7	549,5	147,6	54,5
			1,0	23,6	73,0	19,5	282,3	34,6	582,6	143,4	55,0
			2,0	26,0	81,1	27,9	299,3	38,8	645,9	151,9	55,6
		B	0,0	26,5	70,3	22,7	284,9	37,8	576,0	150,4	51,7
			0,5	23,4	65,7	19,4	264,2	34,4	539,8	132,1	49,2
			1,0	25,2	77,1	17,2	281,5	37,5	557,8	144,4	51,7
			2,0	23,8	81,9	19,7	282,9	33,8	584,0	141,1	57,4
	LA	A	0,0	5,8	28,5	n.d.	91,5	n.d.	466,7	48,7	15,0
			0,5	6	28,8	n.d.	90,6	n.d.	505,3	48,8	15,1
			1,0	6,3	29,5	n.d.	92,5	n.d.	507,8	52,0	15,9
			2,0	5,8	25,1	n.d.	81,6	n.d.	401,8	42,1	12,9
		B	0,0	6,2	28,7	n.d.	94,1	n.d.	483,2	48,0	14,5
			0,5	6,4	28,7	n.d.	95,5	n.d.	536,3	49,7	15,0
			1,0	6,2	25,5	n.d.	79,7	n.d.	493,3	47,4	14,3
			2,0	6,1	31,7	n.d.	98,1	n.d.	480,9	50,3	15,5

n.d.: Não detectado pela técnica analítica utilizada

No quadro 3.13, encontram-se os teores de alguns metais pesados nos grãos de milho e soja e no quadro 3.14 pode ser observado o fator de transferência (FT) dos solos para os grãos.

Foi verificada diferença significativa nos fatores de transferência de Cr, Fe, Mn e Ti para a cultura do milho (Quadro 3.14) e de Cu, Fe, Mn, Ni e V para a cultura da soja (Quadro 3.14) apenas entre solos. De modo geral, foram obtidos valores mais altos para o solo arenoso (LA). Isto indica que os fatores de transferência dependem do poder tampão dos solos, quanto menor o poder tampão ou fator capacidade, maior será o FT, não sendo afetados pela adição de fosfógeno e, de modo geral, independente dos teores disponíveis nos solos. Para a cultura do milho, os fatores de transferência foram sempre maiores para o solo mais arenoso (LA), com menor capacidade de retenção de metais catiônicos neste solo. O mesmo ocorreu para o Fe, Mn e V na cultura da soja. Os FT's não foram calculados para Cu e Ni na cultura da soja cultivada no LA, pois que os teores semi-totais nos solos ficaram abaixo do limite de detecção da técnica.

Os maiores valores de FT para o LA podem ser atribuídos ao menor teor de matéria orgânica e CTC neste solo em relação ao LVA (Quadro 2.4), o que confere menor capacidade de retenção dos metais no complexo de troca do LA, disponibilizando-os, portanto, com maior facilidade para as plantas.

Como pode ser observado no Quadro 3.14, onde é mostrado o FT solo-grão, nem todos os metais são igualmente impedidos ou retidos pelas raízes das diferentes espécies, o que sugere que a tolerância a um determinado elemento não garante, necessariamente, a tolerância a outro (Antosiewicz, 1992). Fatores como estágio de desenvolvimento da planta, tempo de exposição ao elemento e as diferentes espécies químicas dos elementos interferem nos teores dos elementos nas diferentes partes das plantas (Alloway, 1995).

A regulação da absorção de metais pesados na rizosfera, o acúmulo desses nas raízes, desde que preservada sua integridade e funções primárias, e a baixa translocação para a parte aérea são considerados mecanismos pelos quais o sistema radicular pode contribuir para a tolerância de espécies vegetais aos metais pesados (Arduini et al., 1996).

Quadro 3.13. Teores de Pb, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Ti e V nos grãos de milho e soja cultivadas em dois solos (LVA e LA) tratados com os fosfogessos A e B.

Cultura	solo	Fosfogesso	Dose (NG)	Pb	Cr	Cu	Fe	Mn	Ni	Ti	V
				.....mg kg ⁻¹							
Milho	LVA	A	0,0	n.d.	2,5	n.d.	33,6	9,2	n.d.	1,6	n.d.
			0,5	n.d.	2,5	n.d.	22,1	9,7	n.d.	1,6	n.d.
			1,0	n.d.	2,4	n.d.	16,5	9,6	n.d.	1,6	n.d.
			2,0	n.d.	2,4	n.d.	20,7	8,9	n.d.	1,5	n.d.
		B	0,0	n.d.	2,3	n.d.	14,0	8,7	n.d.	1,5	n.d.
			0,5	n.d.	2,3	n.d.	28,3	8,9	n.d.	1,6	n.d.
			1,0	n.d.	2,4	n.d.	14,9	9,2	n.d.	1,5	n.d.
			2,0	n.d.	2,4	n.d.	17,5	9,8	n.d.	1,5	n.d.
	LA	A	0,0	n.d.	2,6	n.d.	24,1	9,5	n.d.	1,7	n.d.
			0,5	n.d.	2,4	n.d.	21,0	9,3	n.d.	1,5	n.d.
			1,0	n.d.	2,4	n.d.	22,7	9,6	n.d.	1,5	n.d.
			2,0	n.d.	2,3	n.d.	25,6	8,9	n.d.	1,6	n.d.
		B	0,0	n.d.	2,9	n.d.	27,6	10,2	n.d.	1,9	n.d.
			0,5	n.d.	2,3	n.d.	27,0	9,6	n.d.	1,4	n.d.
			1,0	n.d.	2,3	n.d.	33,5	10,3	n.d.	1,6	n.d.
			2,0	n.d.	2,3	n.d.	28,9	9,5	n.d.	1,4	n.d.
Soja	LVA	A	0,0	n.d.	n.d.	9,2	66,9	80,4	8,3	n.d.	1,9
			0,5	n.d.	n.d.	7,9	60,7	70,5	6	n.d.	1,7
			1,0	n.d.	n.d.	10,3	61,0	65,1	4,2	n.d.	1,8
			2,0	n.d.	n.d.	9,7	63,2	57,9	6,1	n.d.	1,9
		B	0,0	n.d.	n.d.	8,2	81,0	67,0	5,1	n.d.	2,2
			0,5	n.d.	n.d.	7,5	58,6	67,5	4,1	n.d.	1,9
			1,0	n.d.	n.d.	8,7	82,2	65,6	5,1	n.d.	2,1
			2,0	n.d.	n.d.	8,7	91,3	61,7	2	n.d.	2,1
	LA	A	0,0	n.d.	n.d.	5,7	74,3	76,9	6,5	n.d.	2,1
			0,5	n.d.	n.d.	4,5	100,4	74,4	5	n.d.	2,1
			1,0	n.d.	n.d.	2,8	57,9	63,4	6,4	n.d.	1,8
			2,0	n.d.	n.d.	7,7	88,0	88,6	5,6	n.d.	2,1
		B	0,0	n.d.	n.d.	3,9	71,6	61,6	0	n.d.	1,8
			0,5	n.d.	n.d.	2,7	42,3	66,6	3,4	n.d.	1,6
			1,0	n.d.	n.d.	2,3	34,4	59,8	5,1	n.d.	1,3
			2,0	n.d.	n.d.	3,4	45,8	66,0	3,9	n.d.	1,5

n.d.: Não detectado pela técnica analítica utilizada

Quadro 3.14. Fator de transferência solo-grão para Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb, Ti e V nas culturas de milho e soja cultivadas em dois solos (LVA e LA) tratados com os fosfogessos A e B.

Cultura	solo	Fosfoesso	Dose (NG)	Pb	Cr	Cu	Fe	Mn	Ni	Ti	V
kg kg ⁻¹											
Milho	LVA	A	0,0	n.d.	3,3 10 ⁻²	n.d.	5,4 10 ⁻⁴	3,1 10 ⁻²	n.d.	2,3 10 ⁻³	n.d.
			0,5	n.d.	3,6 10 ⁻²	n.d.	3,7 10 ⁻⁴	3,3 10 ⁻²	n.d.	2,5 10 ⁻³	n.d.
			1,0	n.d.	2,4 10 ⁻²	n.d.	2,6 10 ⁻⁴	3,2 10 ⁻²	n.d.	2,3 10 ⁻³	n.d.
			2,0	n.d.	2,4 10 ⁻²	n.d.	3,4 10 ⁻⁴	3,2 10 ⁻²	n.d.	2,4 10 ⁻³	n.d.
		B	0,0	n.d.	2,3 10 ⁻²	n.d.	2,3 10 ⁻⁴	3,0 10 ⁻²	n.d.	2,5 10 ⁻³	n.d.
			0,5	n.d.	2,2 10 ⁻²	n.d.	4,5 10 ⁻⁴	3,1 10 ⁻²	n.d.	2,5 10 ⁻³	n.d.
			1,0	n.d.	2,7 10 ⁻²	n.d.	2,4 10 ⁻⁴	3,2 10 ⁻²	n.d.	2,3 10 ⁻³	n.d.
			2,0	n.d.	3,3 10 ⁻²	n.d.	2,9 10 ⁻⁴	3,3 10 ⁻²	n.d.	2,3 10 ⁻³	n.d.
	LA	A	0,0	n.d.	1,2 10 ⁻¹	n.d.	1,4 10 ⁻³	1,3 10 ⁻¹	n.d.	3,0 10 ⁻³	n.d.
			0,5	n.d.	1,3 10 ⁻¹	n.d.	1,4 10 ⁻³	1,4 10 ⁻¹	n.d.	2,9 10 ⁻³	n.d.
			1,0	n.d.	1,1 10 ⁻¹	n.d.	1,3 10 ⁻³	1,4 10 ⁻¹	n.d.	2,9 10 ⁻³	n.d.
			2,0	n.d.	1,0 10 ⁻¹	n.d.	1,4 10 ⁻³	1,3 10 ⁻¹	n.d.	3,0 10 ⁻³	n.d.
		B	0,0	n.d.	1,2 10 ⁻¹	n.d.	1,5 10 ⁻³	1,3 10 ⁻¹	n.d.	3,2 10 ⁻³	n.d.
			0,5	n.d.	1,0 10 ⁻¹	n.d.	1,5 10 ⁻³	1,3 10 ⁻¹	n.d.	2,6 10 ⁻³	n.d.
			1,0	n.d.	1,2 10 ⁻¹	n.d.	2,3 10 ⁻³	1,7 10 ⁻¹	n.d.	3,1 10 ⁻³	n.d.
			2,0	n.d.	1,1 10 ⁻¹	n.d.	2,0 10 ⁻³	1,9 10 ⁻¹	n.d.	3,4 10 ⁻³	n.d.
Soja	LVA	A	0,0	n.d.	n.d.	9,6 10 ⁻¹	1,5 10 ⁻³	3,2 10 ⁻¹	2,6 10 ⁻¹	n.d.	1,4 10 ⁻²
			0,5	n.d.	n.d.	4,4 10 ⁻¹	1,1 10 ⁻³	2,5 10 ⁻¹	1,6 10 ⁻¹	n.d.	1,2 10 ⁻²
			1,0	n.d.	n.d.	5,3 10 ⁻¹	1,1 10 ⁻³	2,3 10 ⁻¹	1,2 10 ⁻¹	n.d.	1,3 10 ⁻²
			2,0	n.d.	n.d.	3,5 10 ⁻¹	1,1 10 ⁻³	2,0 10 ⁻¹	1,6 10 ⁻¹	n.d.	1,2 10 ⁻²
		B	0,0	n.d.	n.d.	3,6 10 ⁻¹	1,6 10 ⁻³	2,4 10 ⁻¹	1,7 10 ⁻¹	n.d.	1,5 10 ⁻²
			0,5	n.d.	n.d.	3,9 10 ⁻¹	1,2 10 ⁻³	2,6 10 ⁻¹	1,5 10 ⁻¹	n.d.	1,4 10 ⁻²
			1,0	n.d.	n.d.	5,0 10 ⁻¹	1,6 10 ⁻³	2,3 10 ⁻¹	1,7 10 ⁻¹	n.d.	1,4 10 ⁻²
			2,0	n.d.	n.d.	4,4 10 ⁻¹	1,6 10 ⁻³	2,2 10 ⁻¹	1,7 10 ⁻¹	n.d.	1,5 10 ⁻²
	LA	A	0,0	n.d.	n.d.	n.d.	4,9 10 ⁻³	8,4 10 ⁻¹	n.d.	n.d.	4,3 10 ⁻²
			0,5	n.d.	n.d.	n.d.	6,6 10 ⁻³	8,2 10 ⁻¹	n.d.	n.d.	4,2 10 ⁻²
			1,0	n.d.	n.d.	n.d.	3,6 10 ⁻³	6,9 10 ⁻¹	n.d.	n.d.	3,5 10 ⁻²
			2,0	n.d.	n.d.	n.d.	6,8 10 ⁻³	10,9 10 ⁻¹	n.d.	n.d.	4,9 10 ⁻²
		B	0,0	n.d.	n.d.	n.d.	4,9 10 ⁻³	6,5 10 ⁻¹	n.d.	n.d.	3,7 10 ⁻²
			0,5	n.d.	n.d.	n.d.	2,8 10 ⁻³	7,0 10 ⁻¹	n.d.	n.d.	3,2 10 ⁻²
			1,0	n.d.	n.d.	n.d.	2,4 10 ⁻³	7,5 10 ⁻¹	n.d.	n.d.	2,8 10 ⁻²
			2,0	n.d.	n.d.	n.d.	3,0 10 ⁻³	6,7 10 ⁻¹	n.d.	n.d.	3,0 10 ⁻²

n.d.: Não detectado pela técnica analítica utilizada

Não foi possível o Cálculo dos FT's para o Pb devido aos teores destes elementos estarem muito baixos (abaixo do limite de detecção) nos grãos de ambas as culturas (milho e soja) e em ambos solos.

De acordo com o Decreto N° 55.871, de 26 de março de 1965 (ANVISA, 1965), ainda em vigor, os limites máximos de tolerância (LMT) em alimentos (matéria seca) para os elementos Cu, Cr, Ni e Pb são, respectivamente, 30,0; 0,1; 5,0 e 0,5 mg kg⁻¹. Segundo a Associação Brasileira das Indústrias de Alimentação (ABIA, 1985), os LMT de Cu e Pb permitidos em grãos são de 30,0 e 8,0 mg kg⁻¹, respectivamente. Com base nessas informações, observou-se que os teores de Cu e Pb (Quadro 3.13) em todos os tratamentos e para as duas culturas, encontram-se abaixo do LMT de ambas as instituições. Já os teores de Cr encontrados na cultura do milho e Ni na cultura da soja ficaram acima do LMT, estabelecido pela Anvisa.

No caso do Mn, Kabata-Pendias & Pendias (2001) estabeleceram, como faixa crítica, para os grãos produzidos em áreas contaminadas com esse elemento, teores entre e 15 e 18 mg kg⁻¹. Verifica-se que, para o experimento com a cultura da soja, o teor de Mn em todos os tratamentos (Quadro 3.13), encontrou-se bem acima do limite superior estabelecido pelos autores. Quanto ao Fe, Ti e V não foram encontrados valores de referência que pudessem ser comparados com os teores obtidos neste trabalho.

Em todos os casos, de maneira geral, observa-se que o fosfogesso não contribuiu para o incremento do teor dos metais no solo e, principalmente, na planta. Contudo, foi observado que para alguns elementos, o maior acúmulo depende da natureza do solo e da cultura em questão.

Ainda que existam muitas incertezas sobre a especificidade dos mecanismos de absorção dos metais pesados, sobretudo daqueles não essenciais, geralmente o teor e o acúmulo do elemento, nos tecidos da planta, ocorre em função da sua disponibilidade na solução do solo, e os teores nas raízes e na parte aérea aumentam com a elevação da concentração de elementos na solução do solo (Gussarsson et al., 1995).

Através dos resultados encontrados para os teores de Fe nos grãos, observa-se que no experimento onde se cultivou a soja tem-se maior concentração desse elemento quando comparado com a cultura do milho. De acordo com os resultados encontrados por Silva et al. (2007) em um trabalho

realizado com a cultura do arroz, o Fe se acumula no tecido radicular em proporção muito superior ao acumulado na parte aérea. Segundo Berton (2000), as raízes de gramíneas podem liberar os chamados fitossideróforos, que complexam fortemente o Fe, impedindo que chegue em maiores quantidades à parte aérea.

No presente trabalho não se observou acúmulo de Pb nos grãos em ambos experimentos, tanto para a soja quanto para o milho. Uma possível explicação para tal resultado pode ser o translocação deste metal pesado para outras partes da planta, como, por exemplo, para a raiz. Soares et al. (2001) relacionam o acúmulo de Pb nas raízes com a imobilização desse elemento, por meio de complexos orgânicos insolúveis presentes no tecido. E ainda segundo Kabata-Pendias & Pendias (2001), o Pb é o metal que apresenta, no solo, a maior afinidade por compostos orgânicos.

A absorção pelas plantas, em um solo com diversos metais pesados, pode ser diferente da verificada com elementos isolados, em razão das diversas interações entres esses, que podem ser independentes, antagonistas ou sinérgicas, e as respostas das espécies ao excesso de metais pesados deve ser diferenciada, em consequência da especiação desses elementos no solo (Barceló & Poschenrieder, 1992). Por exemplo, a absorção de Cu pode ser inibida em solos com elevada contaminação por Zn, uma vez que existe uma relação de antagonismo na absorção desses dois elementos (ALLOWAY, 1995).

3.3. Contaminação das águas de lixiviação por metais pesados

3.3.1. Ensaio com a cultura do milho

Os resultados obtidos no presente estudo para a contaminação por elementos tóxicos nas águas de percolação indicam que, de maneira geral, a mobilidade dos metais pesados em ambos os solos estudados foi baixa.

Os resultados analíticos encontrados no ensaio com a cultura do milho para os elementos em estudo, quando acima do limite de detecção, estiveram na faixa de: Cd, 0,007 a 0,033 mg L⁻¹; Cr, 0,010 a 0,045 mg L⁻¹; Cu, 0,04 a 0,14 mg L⁻¹; Fe, 0,14 a 0,72 mg L⁻¹; Mn, 0,095 a 8,07 mg L⁻¹; V, 0,001 a 0,14 mg L⁻¹; Ti, 0,003 a 0,068 mg L⁻¹ e Zn, 0,003 a 0,228 mg L⁻¹.

Deve ser salientado que o processo envolvendo a mobilidade de metais no solo é muito complexo e depende de inúmeras variáveis, com destaque para as características físicas, químicas e biológicas do solo. Vários autores têm demonstrado que características do solo como pH, granulometria, composição mineralógica e conteúdo de matéria orgânica, entre outras influenciam a mobilidade de elementos traços nos solos (Ellis & Knezek, 1977; Ellis et al., 1983). Quando presentes no solo, os metais podem formar complexos com a matéria orgânica, a qual possui elevado poder de adsorção de íons. Tal complexação possui uma grande influência na mobilidade desses elementos no perfil do solo.

Os estudos sobre mobilidade de metais pesados em solos têm sido objeto de inúmeras pesquisas (Biddappa et al., 1982; Khan & Frankland, 1983; Williams et al. 1985; Welch & Lund, 1989; Alloway, 1990; Amaral Sobrinho, 1993; Amaral Sobrinho et al., 1998; Corrêa, 2006).

A mobilidade dos metais pesados no solo é influenciada por vários fatores, como o potencial iônico (razão entre a unidade de valência e o raio iônico), o pH, o potencial de oxiredução do ambiente e, principalmente a especificidade dos sítios de adsorção (Bruggenwert, 1979).

Muitas das formas tóxicas dos metais catiônicos, por exemplo, Ag^+ , Cu^{+2} , Cr^{+3} e Pb^{2+} , apresentam baixa mobilidade no solo, por formarem fortes complexos de esfera-interna (adsorção específica) com os minerais. Esse comportamento ficou bem evidenciado para adsorção de Pb em Latossolos brasileiros, em um estudo realizado por Pierangeli et al. (2001a), enquanto que para Cd, a adsorção foi predominantemente não-específica (formação de complexos de esfera externa), o que torna esse elemento-traço mais móvel nesses Latossolos, em comparação com o Pb. É interessante ressaltar que esta capacidade de formar complexos fortes, que geralmente é a responsável pela alta toxicidade de alguns elementos-traço, permitindo que eles alterem algumas funções metabólicas normais, pode também torná-los menos disponíveis no solo, pois as reações com os minerais passam a prevalecer (Hayes & Traina, 1998).

Foram observadas, no presente trabalho, diferenças significativas entre doses de fosfogesso aplicadas aos solos para os teores de Mn e V nos lixiviados (Figuras 3.1, 3.2 e 3.3). Estes resultados implicam que a aplicação do

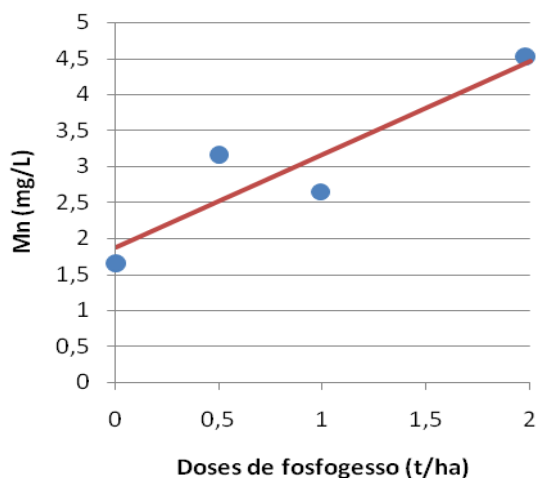
fosfogesso, embora não venha a contribuir com grandes quantidades de elementos tóxicos (Quadro 3.3), pode levar ao aumento da mobilidade e lixiviação de metais que já estejam presentes nos solos, com possibilidade de contaminação das águas subterrâneas. Vale ressaltar que a contribuição da aplicação de fosfogesso para os teores semi-totais de Mn e V nos solos não foi perceptível. Neste sentido a análise dos lixiviados se revela mais sensível para detectar possíveis problemas de contaminação por metais pesados e outros elementos tóxicos, devido à não necessidade de diluição do extrato obtido durante a percolação das águas.

Para o Mn, os teores encontrados nos lixiviados variaram de 0,09 a 8,07 mg L⁻¹ (Figura 3.2), nos diferentes tratamentos ao longo dos 90 dias de ensaio e apresentaram tendência de queda com o decorrer do tempo. No entanto, houve um aumento na concentração nas soluções lixiviadas, em resposta ao aumento das doses de fosfogesso aplicadas aos solos. O limite máximo de Mn nas águas Classe II, que são destinadas ao abastecimento para consumo humano, após tratamento convencional e à irrigação dentre outras possíveis utilidades é de 0,01 mg L⁻¹, limite este que foi ultrapassado nas águas percoladas em todos os tratamentos.

Já os teores de Cd, Cu, Fe, V e Zn, quando ultrapassado o seu limite de detecção, mantiveram-se entre 0,007 e 0,033 mg L⁻¹; 0,04 e 0,14 mg L⁻¹; 0,02 e 0,72 mg L⁻¹; 0,001 e 0,14 mg L⁻¹ e 0,003 e 0,228 mg L⁻¹ (Figuras 3.4, 3.5, 3.6, 3.3 e 3.7), respectivamente, só ultrapassaram os limites estabelecidos pelo CONAMA (2005) de 0,001 mg L⁻¹, 0,009 mg L⁻¹, 0,3 mg L⁻¹, 0,1 mg L⁻¹ e 0,18 mg L⁻¹, em alguns casos isolados, enquanto os teores de Pb, Cr e Ni, mantiveram abaixo de seus limites de detecção (Figuras 3.8), se mantendo dentro do limite permitido de 0,01, 0,05 e 0,025 mg L⁻¹, respectivamente. Vale ressaltar que a Resolução do CONAMA não estabelece limites para o Ti (Figura 3.9).

Considerando a possibilidade de que o fosfogesso seja aplicado em áreas próximas de cursos d'água e que estas possam vir a abastecer reservatórios, de onde se retire água para o consumo humano e irrigação, pode haver o risco de contaminação por estes elementos nocivos à saúde humana e animal.

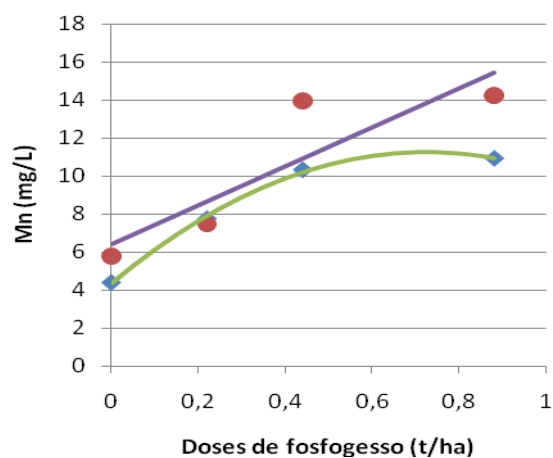
a) LVA (Sete Lagoas-MG)



• $\hat{Y} = 1,8725 + 1,2925 \cdot X$ $R^2 = 0,8304$

◆ Fosfógeno A

b) LA (Três Marias-MG)

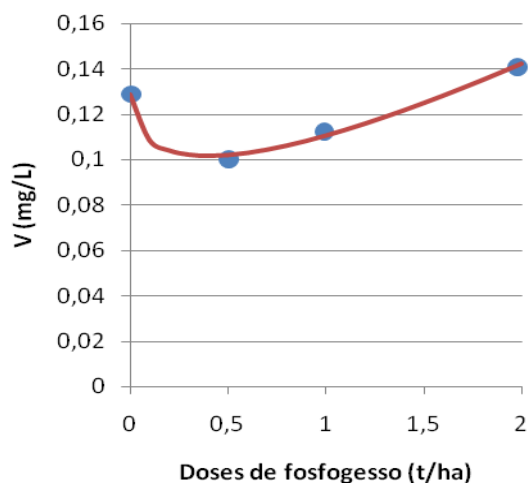


◆ $\hat{Y} = 4,3654 + 19,0383 \cdot X - 13,1487 \cdot X^2$ $R^2 = 0,9984$

• $\hat{Y} = 6,3803 + 10,2908 \cdot X$ $R^2 = 0,7846$

• Fosfógeno B

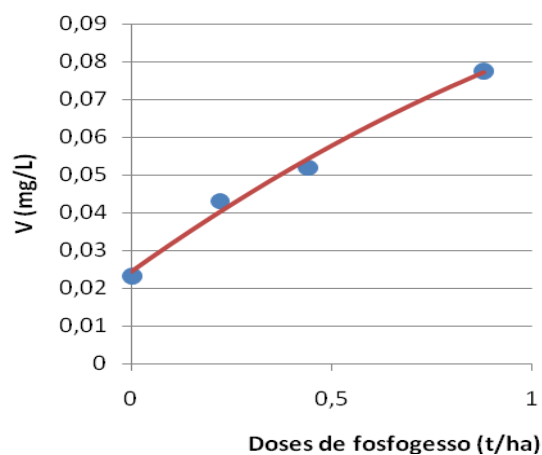
c) LVA (Sete Lagoas-MG)



• $\hat{Y} = 0,1286 + 0,0671 \cdot X - 0,0853 \cdot \sqrt{X}$ $R^2 = 0,9912$

◆ Fosfógeno A

d) LA (Três Marias-MG)



• $\hat{Y} = 0,0243 + 0,0756 \cdot X - 0,0176 \cdot X^2$ $R^2 = 0,9900$

• Fosfógeno B

° e *, coeficientes significativos a 10 e 5 % de probabilidade, respectivamente.

Figura 3.1. Teores de Mn e V acumulado nos lixiviados coletados na base dos vasos em que se cultivou milho ao longo de 90 dias no Latossolo Vermelho-Amarelo e no Latossolo Amarelo de Sete Lagoas-MG e Três Marias-MG, respectivamente, tratado com os fosfógenos A e B.

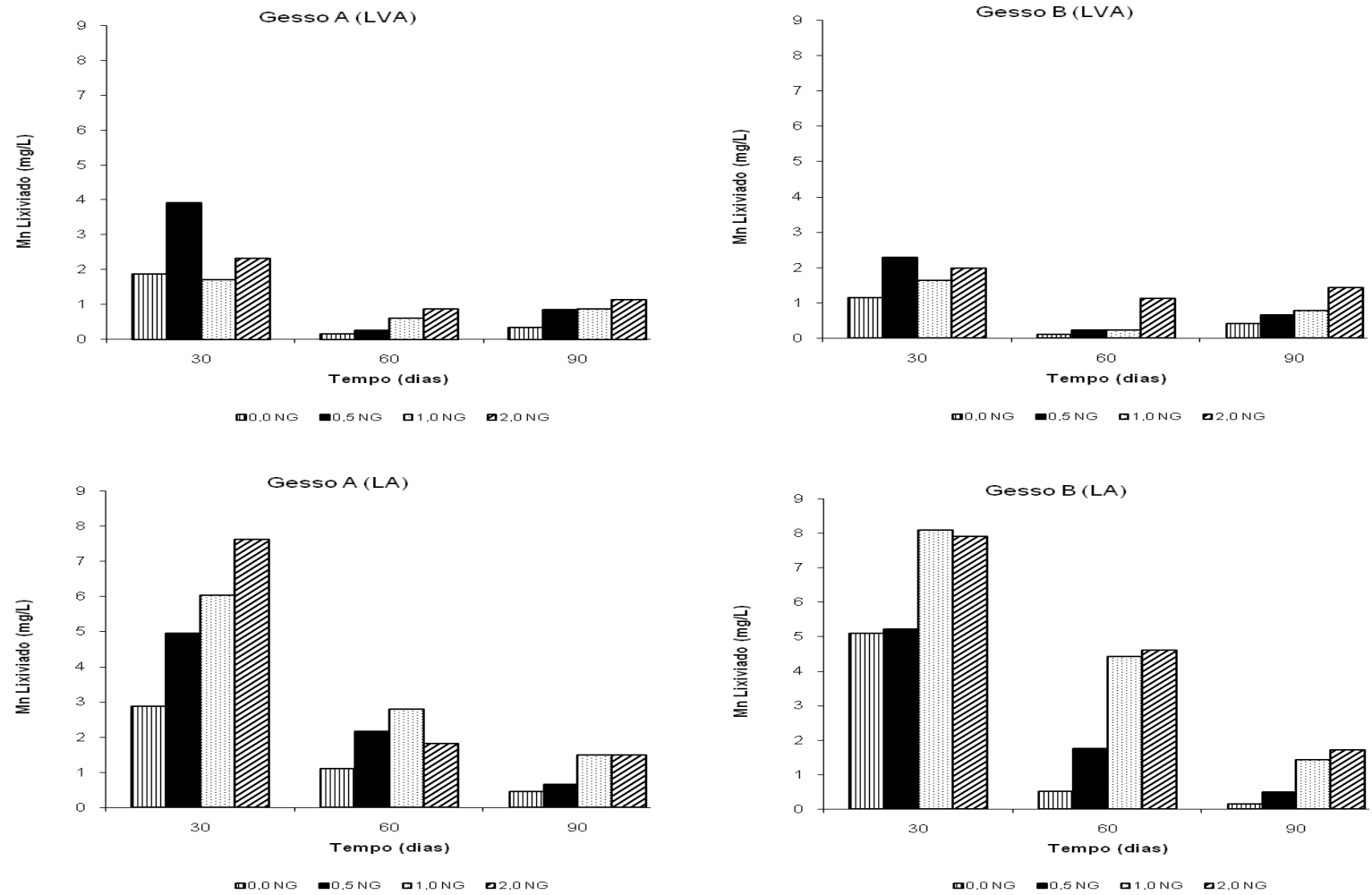


Figura 3.2. Teores de Mn nos lixiviados coletados na base dos vasos em que se cultivou milho ao longo de 90 dias no Latossolo Vermelho-Amarelo e no Latossolo Amarelo de Sete Lagoas-MG e Três Marias-MG, respectivamente, tratado com os fosfogessos A e B

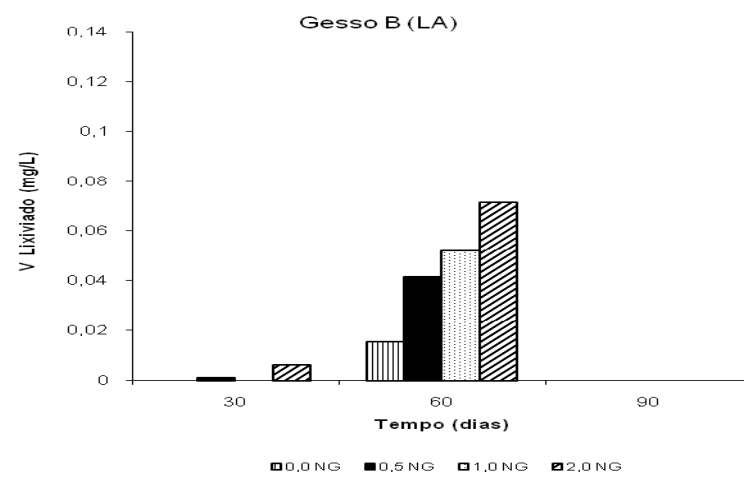
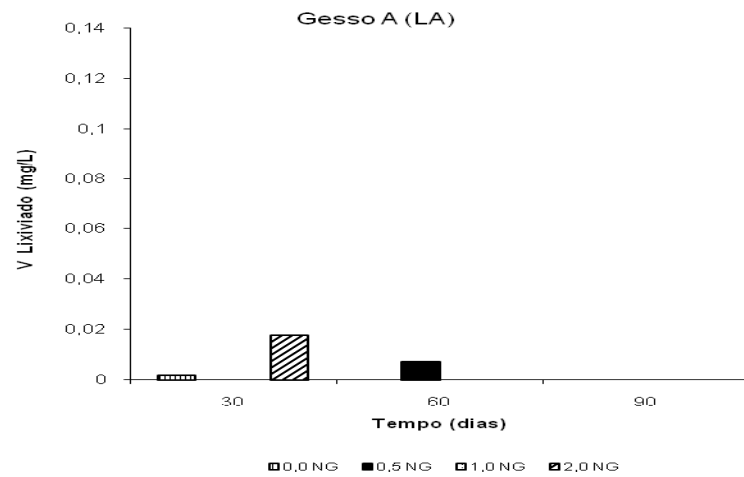
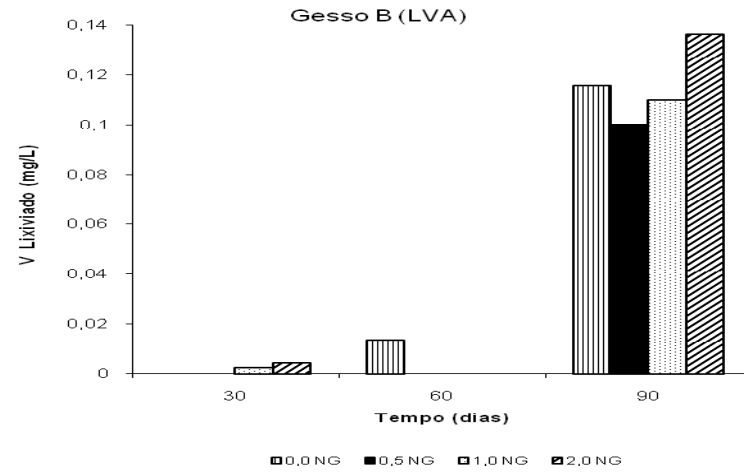
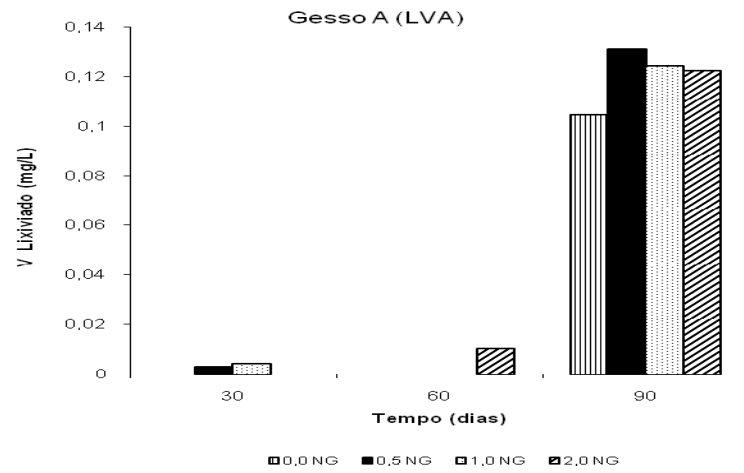


Figura 3.3. Teores de V nos lixiviados coletados na base dos vasos em que se cultivou milho ao longo de 90 dias no Latossolo Vermelho-Amarelo e no Latossolo Amarelo de Sete Lagoas-MG e Três Marias-MG, respectivamente, tratado com os fosfogessos A e B

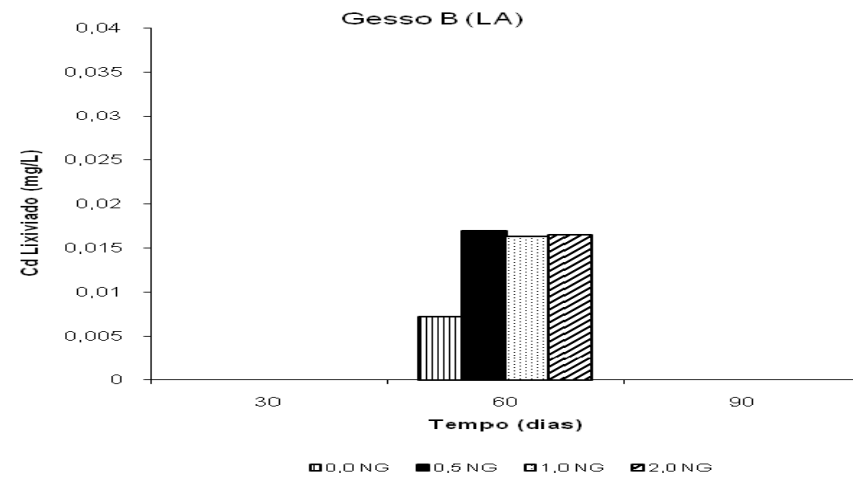
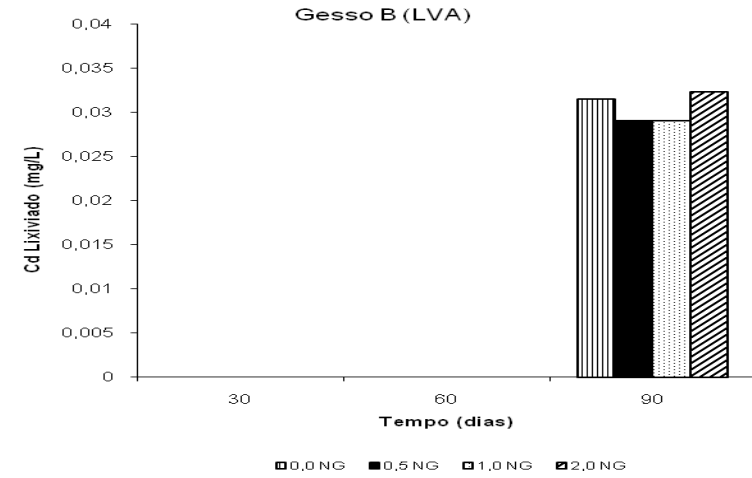
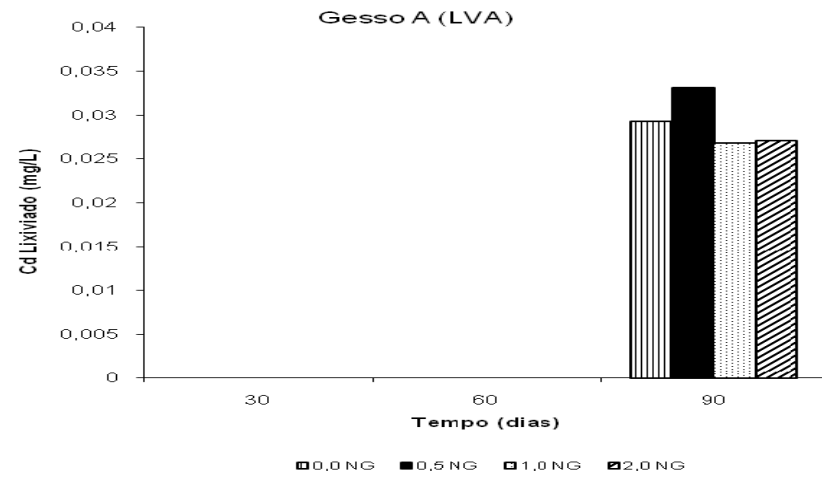


Figura 3.4. Teores de Cd nos lixiviados coletados na base dos vasos em que se cultivou milho ao longo de 90 dias no Latossolo Vermelho-Amarelo e no Latossolo Amarelo de Sete Lagoas-MG e Três Marias-MG, respectivamente, tratado com os fosfogessos A e B

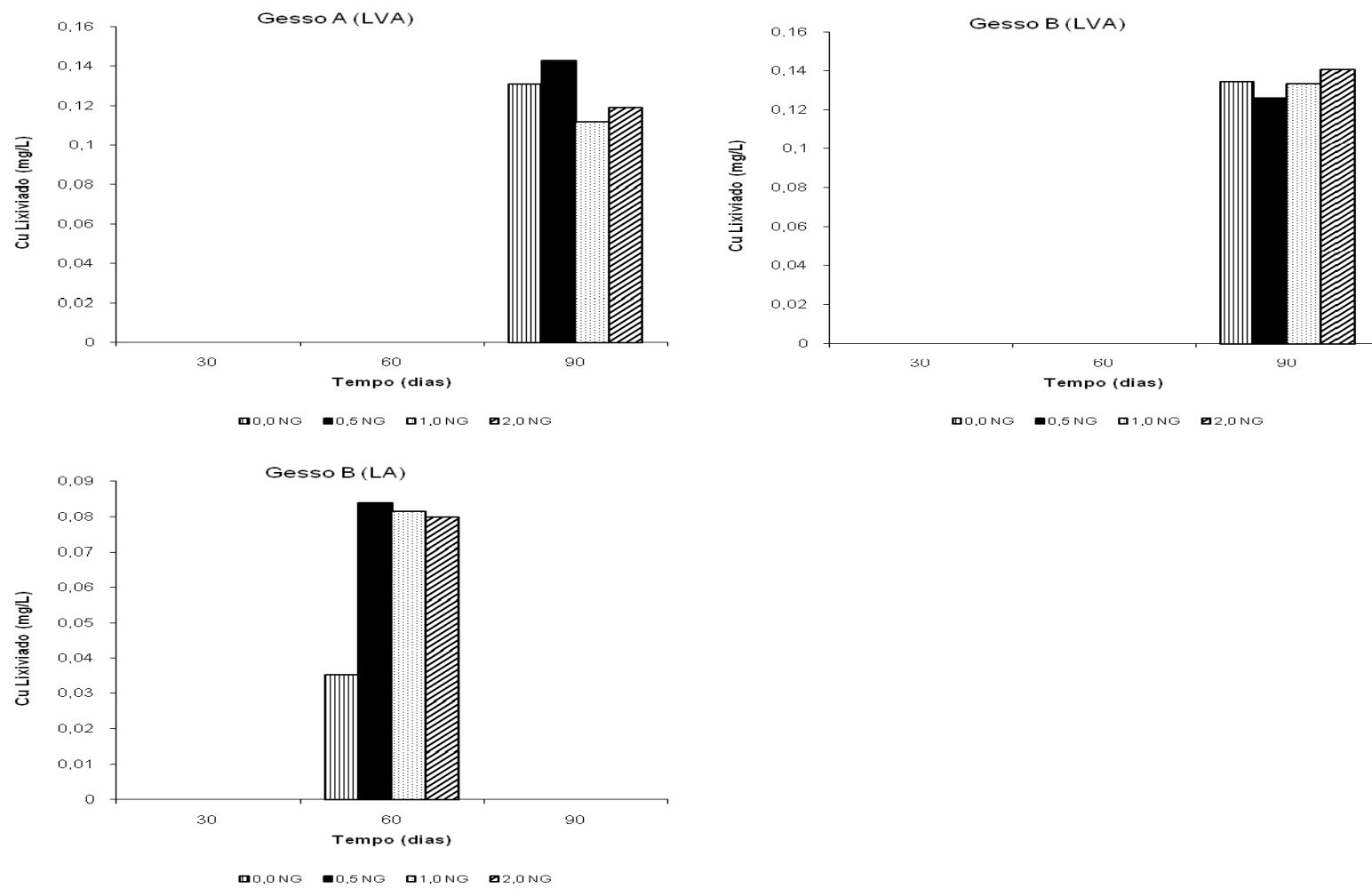


Figura 3.5. Teores de Cu nos lixiviados coletados na base dos vasos em que se cultivou milho ao longo de 90 dias no Latossolo Vermelho-Amarelo e no Latossolo Amarelo de Sete Lagoas-MG e Três Marias-MG, respectivamente, tratado com os fosfogessos A e B

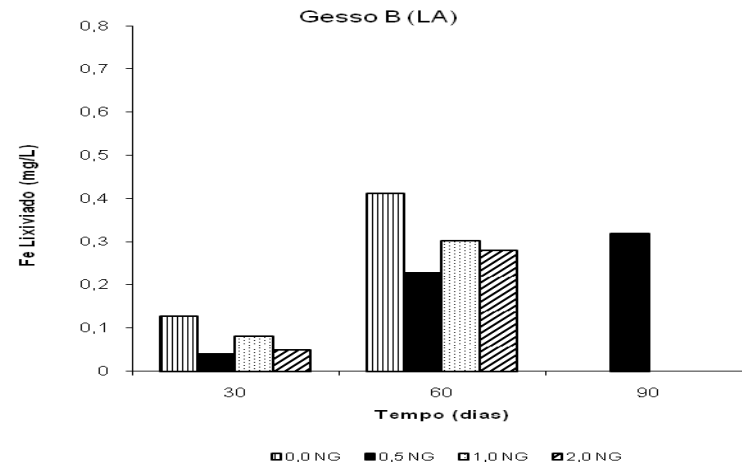
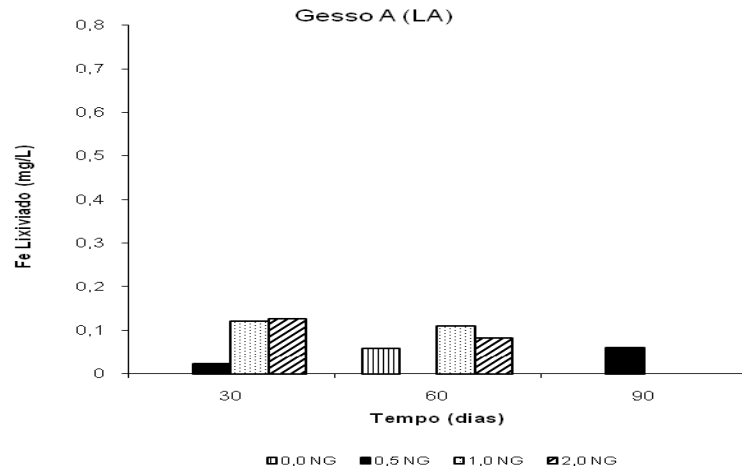
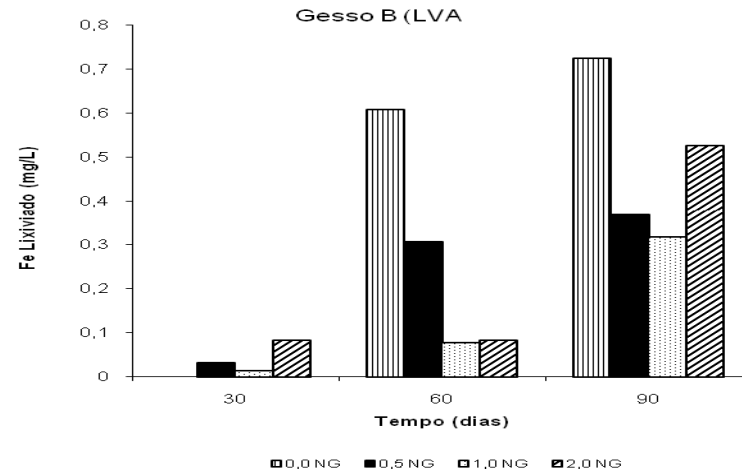
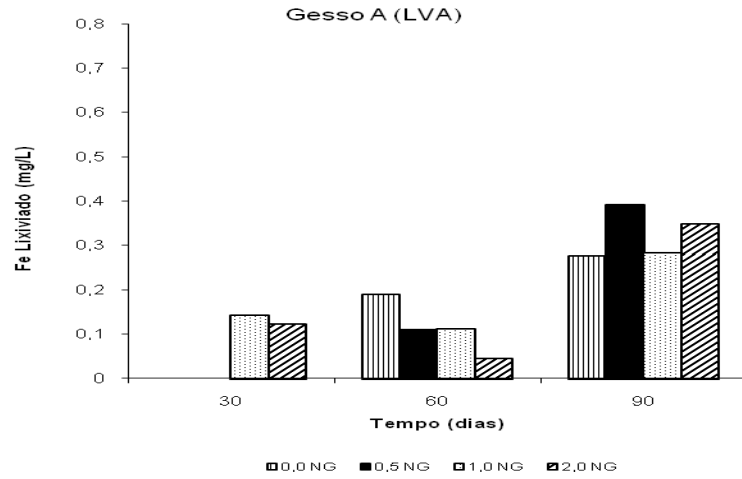


Figura 3.6. Teores de Fe nos lixiviados coletados na base dos vasos em que se cultivou milho ao longo de 90 dias no Latossolo Vermelho-Amarelo e no Latossolo Amarelo de Sete Lagoas-MG e Três Marias-MG, respectivamente, tratado com os fosfogessos A e B

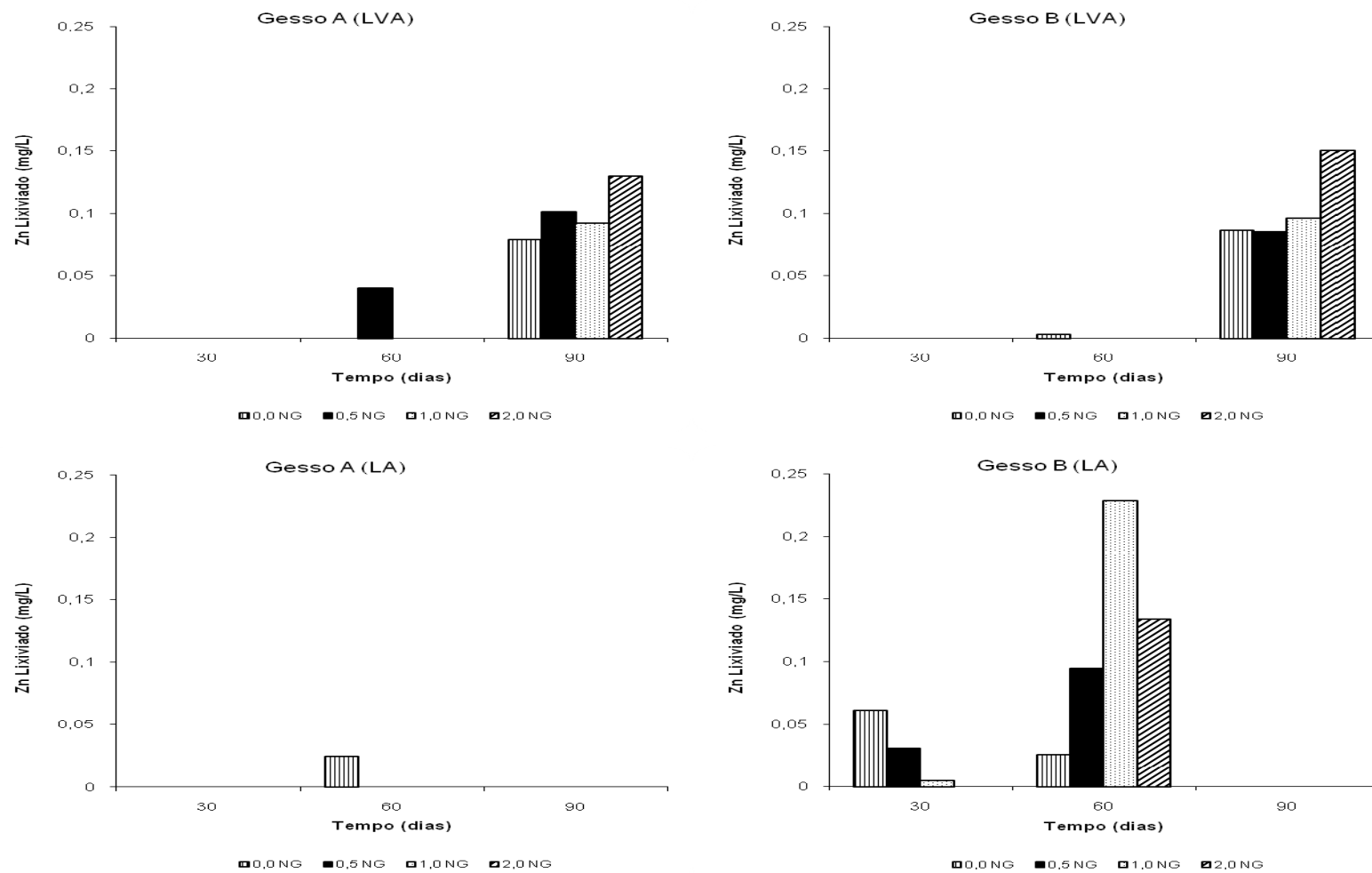


Figura 3.7. Teores de Zn nos lixiviados coletados na base dos vasos em que se cultivou milho ao longo de 90 dias no Latossolo Vermelho-Amarelo e no Latossolo Amarelo de Sete Lagoas-MG e Três Marias-MG, respectivamente, tratado com os fosfogessos A e B

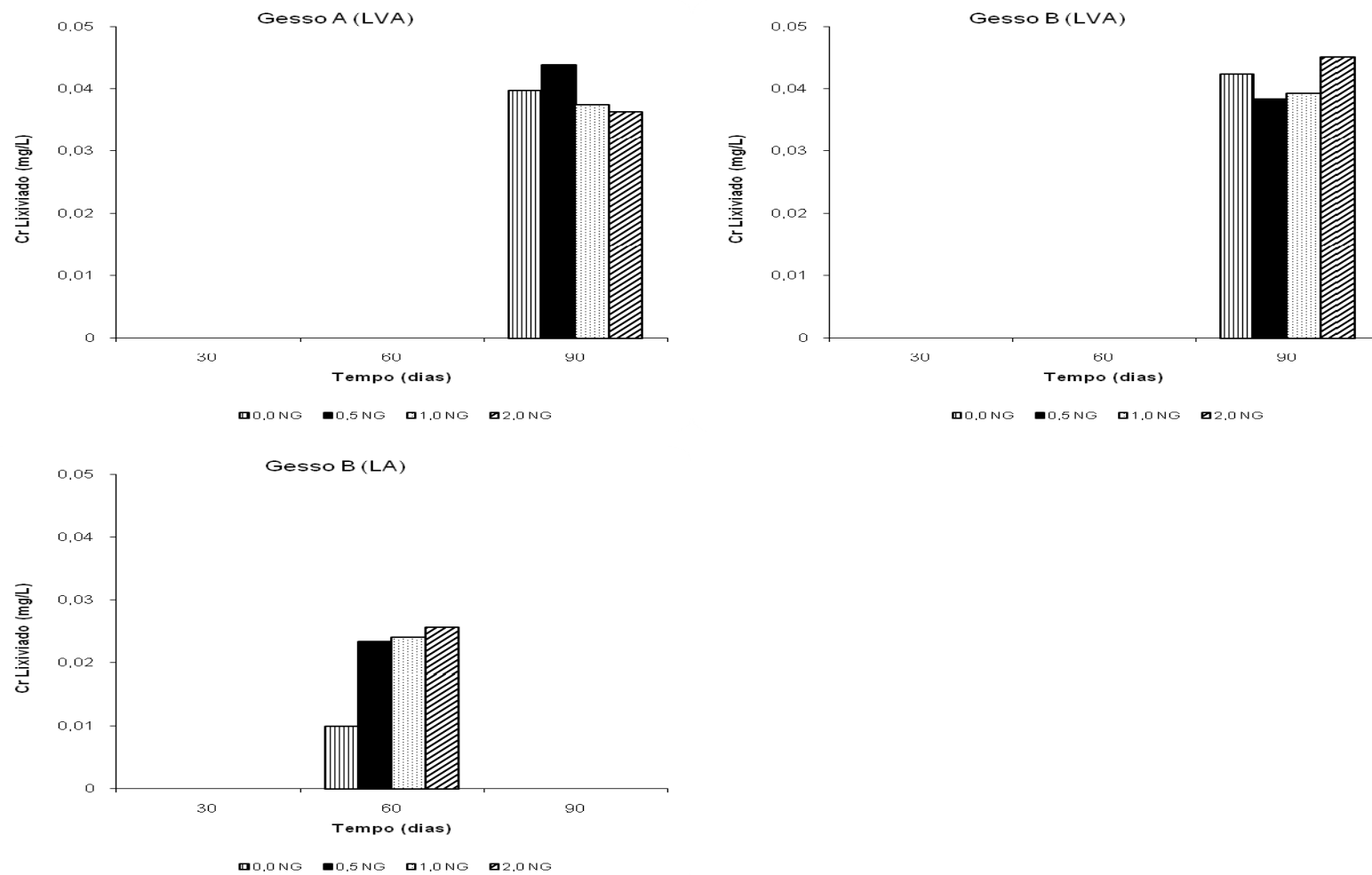


Figura 3.8. Teores de Cr nos lixiviados coletados na base dos vasos em que se cultivou milho ao longo de 90 dias no Latossolo Vermelho-Amarelo e no Latossolo Amarelo de Sete Lagoas-MG e Três Marias-MG, respectivamente, tratado com os fosfogessos A e B

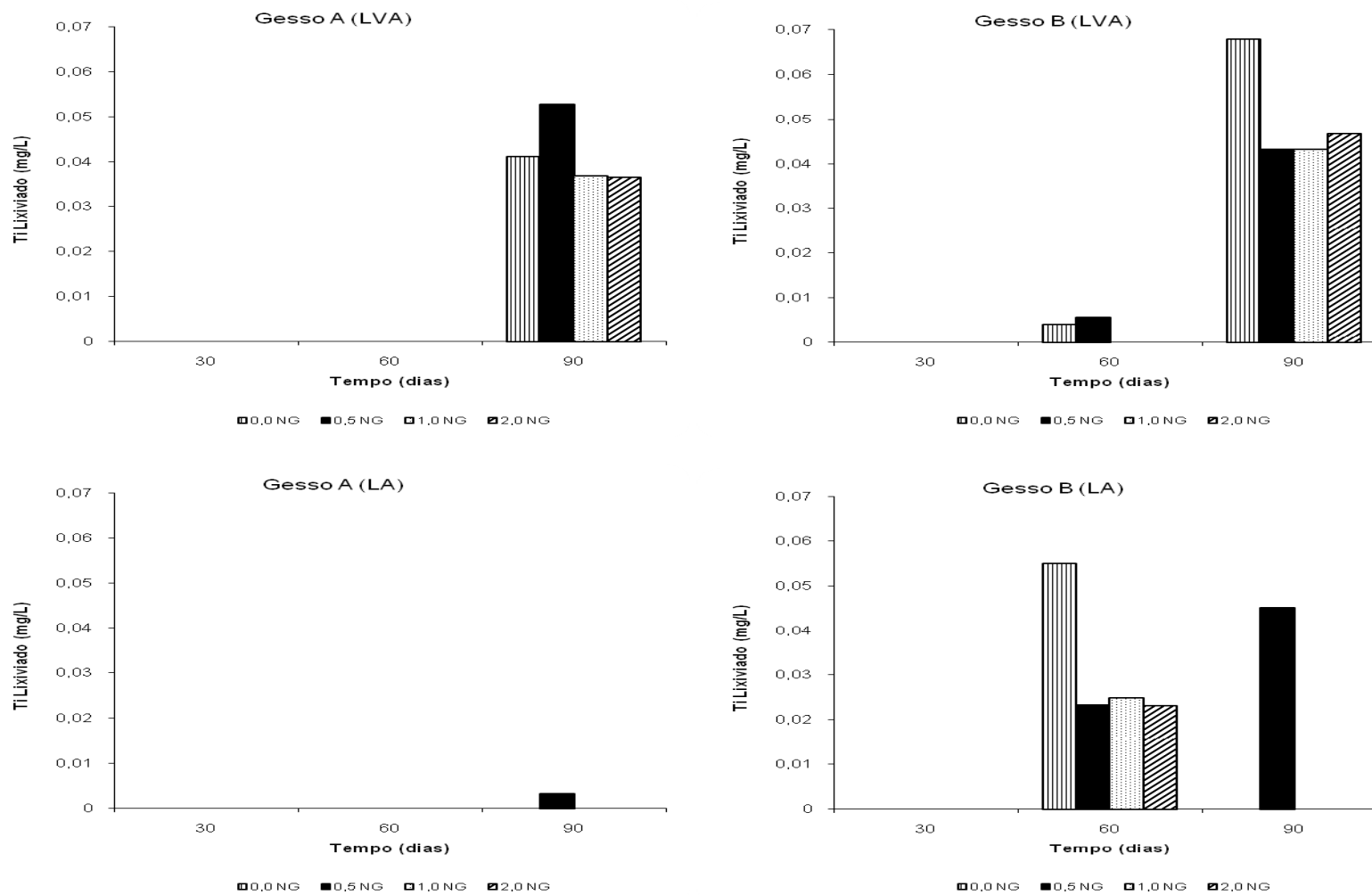


Figura 3.9. Teores de Ti nos lixiviados coletados na base dos vasos em que se cultivou milho ao longo de 90 dias no Latossolo Vermelho-Amarelo e no Latossolo Amarelo de Sete Lagoas-MG e Três Marias-MG, respectivamente, tratado com os fosfogessos A e B

3.3.2. Ensaio com a cultura da soja

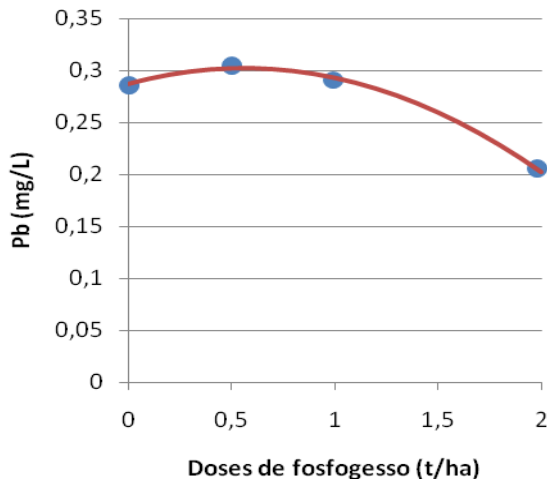
No ensaio realizado com a cultura da soja, foram observadas diferenças significativas entre solos para os teores totais de Pb, Fe, Mn e Zn. De modo geral, houve maior lixiviação quando se utilizou o LVA em relação ao LA. Como já mencionado anteriormente, a contribuição dos fosfogessos com estes elementos não é de grande intensidade (Quadro 3.3). Logo seria lícito supor que a maior parte dos metais presentes na solução lixiviada são de origem dos solos. No entanto, foi verificado o efeito de dose para os teores de Pb, Fe, Mn, Ni e Zn nos lixiviados (Figuras 3.10, 3.11, 3.12, 3.13, 3.14, 3.15, 3.16 e 3.17), confirmando o fato observado com o experimento onde se cultivou o milho. A despeito de não se ter detectado aumento expressivo nos teores semi-totais da maioria dos elementos no solo, pode se sugerir que o fosfogesso possa contribuir para um acréscimo na mobilidade dos metais pesados nos solos, com possibilidade de contaminação das águas pelo uso continuado.

Os resultados analíticos encontrados no ensaio com a cultura da soja para os elementos em estudo, quando acima do limite de detecção, estiveram na faixa de: Cd, 0,018 a 0,039 mg L⁻¹; Cr, 0,024 a 0,052 mg L⁻¹; Cu, 0,08 a 0,18 mg L⁻¹; Fe, 0,17 a 10,66 mg L⁻¹; Mn, 1,10 a 20,13 mg L⁻¹; Ni, 0,03 a 0,37 mg L⁻¹; Pb, 0,02 a 0,14 mg L⁻¹; V, 0,002 a 0,17 mg L⁻¹; Ti, 0,003 a 0,084 mg L⁻¹ e Zn, 0,17 a 1,97 mg L⁻¹ (Figuras 3.13, 3.14, 3.15, 3.16, 3.17, 3.18, 3.19, 3.20, 3.21 e 3.22).

Com exceção do Ti (Figura 3.18), que não têm os seus limites estabelecidos, os demais elementos em estudo, em algum momento do ensaio, ultrapassaram os limites estabelecido pelo CONAMA (2005), para as águas de classe II, de 0,001 mg L⁻¹ para Cd; 0,05 mg L⁻¹ para Cr; 0,009 mg L⁻¹ para Cu; 0,3 mg L⁻¹ para Fe; 0,01 mg L⁻¹ para Mn; 0,025 mg L⁻¹ para Ni; 0,015 mg L⁻¹ para Pb; 0,18 mg L⁻¹ para Zn; e 0,1 mg L⁻¹ para V.

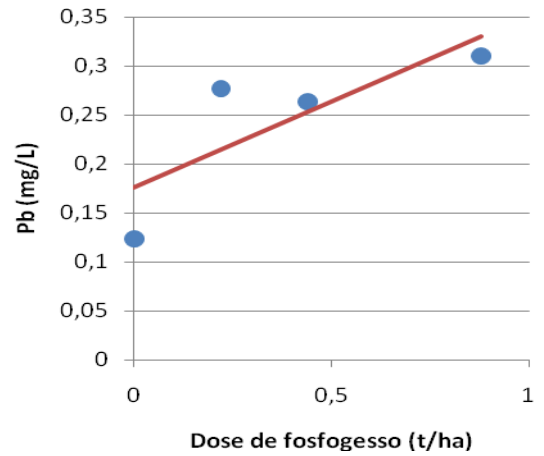
Dentre as reações que controlam a solubilidade, disponibilidade e a mobilidade de elementos em solos estão adsorção e dessorção, precipitação e dissolução, e complexação (Barrow, 1989).

a) LVA (Sete Lagoas-MG)



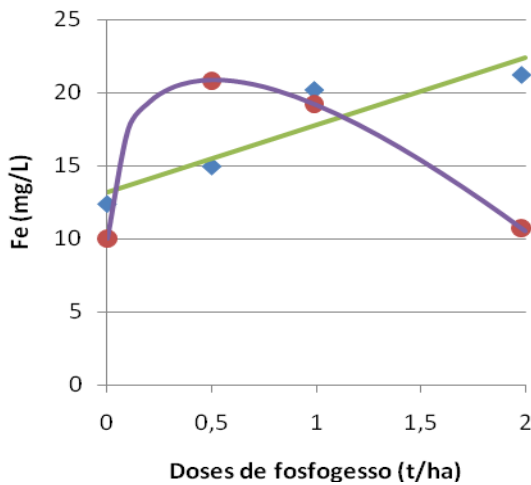
• $\hat{Y} = 0,2870 + 0,0540^{\circ}X - 0,0481^{\circ}X^2$ $R^2 = 0,9970$

b) LA (Três Marias-MG)



• $\hat{Y} = 0,1754 + 0,1755^{\circ}X$ $R^2 = 0,6513$

c) LVA (Sete Lagoas-MG)



◆ $\hat{Y} = 13,2243 + 4,5689^{\circ}X$ $R^2 = 0,8484$

● $\hat{Y} = 10,0037 - 211698^{\circ}X + 30,3090^{\circ}X^2$ $R^2 = 0,9999$

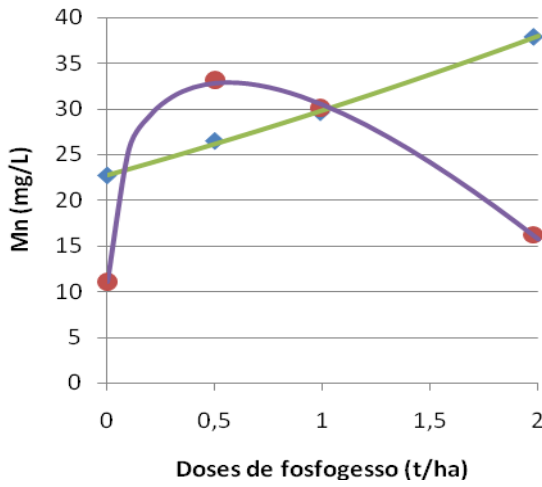
◆ Fosfogesso A

● Fosfogesso B

°, * e ** coeficientes significativos a 10, 5 e 1 % de probabilidade, respectivamente.

Figura 3.10. Teores de Pb e Fe acumulados nos lixiviados coletados na base dos vasos em que se cultivou soja ao longo de 90 dias no Latossolo Vermelho-Amarelo e no Latossolo Amarelo de Sete Lagoas-MG e Três Marias-MG, respectivamente, tratado com os fosfogessos A e B.

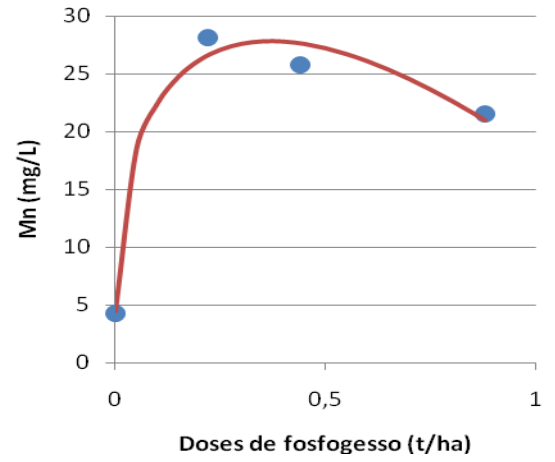
a) LVA (Sete Lagoas-MG)



◆ $\hat{Y} = 22,7645 + 6,6005 \cdot X + 0,5198 X^2$ $R^2 = 0,9990$

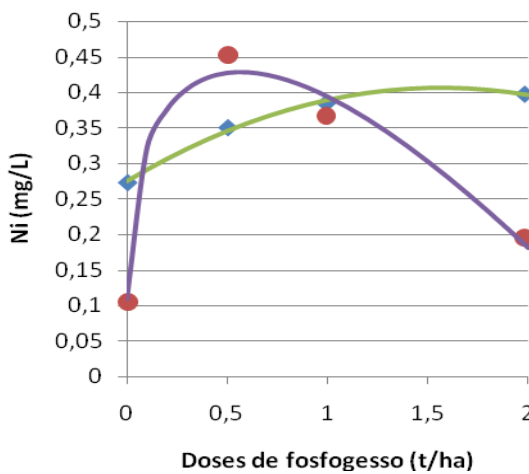
● $\hat{Y} = 11,0493 - 38,8114 \cdot X + 58,1754 \cdot \sqrt{X}$ $R^2 = 0,9989$

b) LA (Três Marias-MG)



● $\hat{Y} = 4,4464 - 63,1509 \cdot X + 76,8641 \cdot \sqrt{X}$ $R^2 = 0,9819$

c) LVA (Sete Lagoas-MG)



● $\hat{Y} = 0,0065 - 1,6078 \cdot X + 1,7529 \cdot \sqrt{X}$ $R^2 = 0,9663$

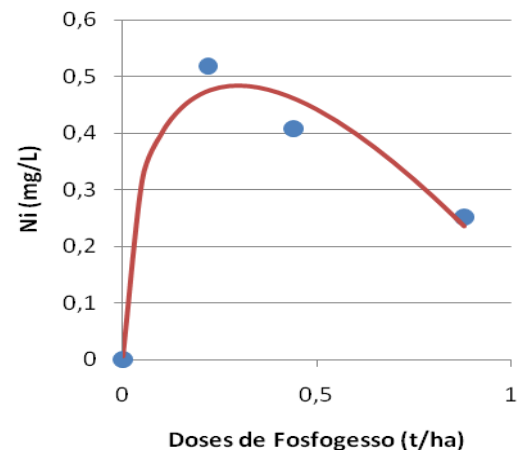
◆ $\hat{Y} = 0,1080 - 0,5667 \cdot X + 0,8532 \cdot \sqrt{X}$ $R^2 = 0,9794$

◆ Fosfogesso A

● Fosfogesso B

° e * coeficientes significativos a 10 e 5 % de probabilidade, respectivamente.

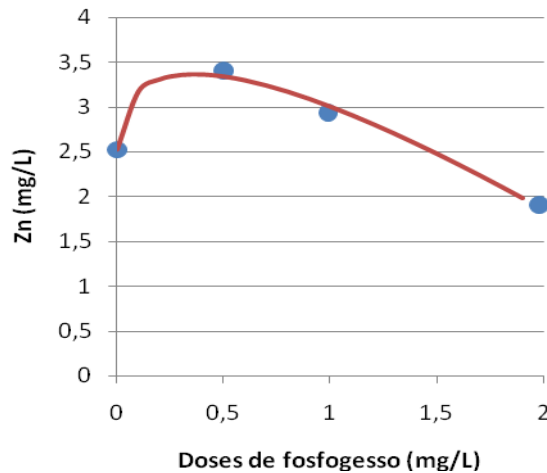
b) LA (Três Marias-MG)



◆ $\hat{Y} = 0,2745 + 0,1679 \cdot X - 0,0537 \cdot X^2$ $R^2 = 0,9900$

Figura 3.11. Teores de Mn e Ni acumulados nos lixiviados coletados na base dos vasos em que se cultivou soja ao longo de 90 dias no Latossolo Vermelho-Amarelo e no Latossolo Amarelo de Sete Lagoas-MG e Três Marias-MG, respectivamente, tratado com os fosfogessos A e B.

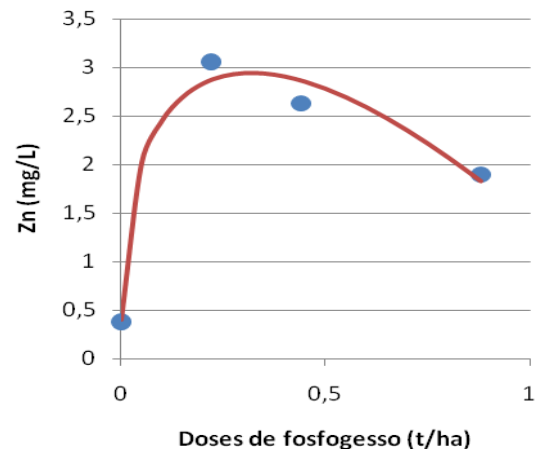
a) LVA (Sete Lagoas-MG)



$$\bullet \hat{Y} = 2,5273 - 2,3042^{\circ}X + 2,7810^{\circ}\sqrt{X} \quad R^2 = 0,9910$$

◆ Fosfogesso A

b) LA (Três Marias-MG)



$$\bullet \hat{Y} = 0,40666 - 7,9577^{\circ}X + 8,9806^{\circ}\sqrt{X} \quad R^2 = 0,9770$$

● Fosfogesso B

° e * coeficientes significativos a 10 e 5 % de probabilidade, respectivamente.

Figura 3.12. Teor Zn acumulado nos lixiviados coletados na base dos vasos em que se cultivou soja ao longo de 90 dias no Latossolo Vermelho-Amarelo e no Latossolo Amarelo de Sete Lagoas-MG e Três Marias-MG, respectivamente, tratado com os fosfogessos A e B.

Esses processos são influenciados por diferentes atributos, sendo o pH e o potencial redox os mais relevantes (Kabata-Pendias & Pendias, 2001), pois além de influenciarem diretamente as reações supracitadas (Harter, 1983; Barrow, 1985; Basta & Tabatabai, 1992; McBride, 1989; Hesterberg, 1998; Pierangeli, 2001b), são também os principais fatores que controlam a especiação dos elementos-traço em solução.

Embora os ensaios com as culturas de milho e soja tenham sido conduzidos de forma análoga, a rigor, os dados não podem ser comparados, visto que as culturas foram conduzidas em experimentos distintos. Não obstante, pode-se verificar uma clara tendência de maior lixiviação de metais nos solos onde se cultivou a soja e os lixiviados apresentaram valores menores de pH. Assim como ocorre em solos, o pH tem grande influência no comportamento dos metais na água. Para cátions metálicos, a concentração na forma dissolvida sofre um incremento com a decréscimo do pH, já que as

formas precipitadas e adsorvidas são desfavorecidas em pH's mais ácidos. Em parte, o menor valor do pH no ensaio com a cultura da soja em relação ensaio com a cultura do milho, pode ser atribuído a uma possível maior acidificação da rizosfera pelas plantas de soja, o que é sugerido pelo menor valor de pH nos extratos de lixiviação (Figuras 3.23 e 3.24).

O fator mais importante referente à alteração do pH na rizosfera é o desbalanço na proporção entre cátions e ânions absorvidos pelas raízes e a correspondente extrusão de H^+ e HCO_3^- (ou OH^-), visando manter a neutralidade no balanço de cargas (Marschner, 1995; Hisinger et al., 2003). Se houver uma predominância na absorção de cátions pela planta, haverá maior extrusão de H^+ e conseqüente acidificação da rizosfera.(Dakora & Phillips, 2002). Com essa maior extrusão de H^+ , os metais têm sua solubilidade aumentada à medida que o pH decresce, podendo atingir níveis tóxicos.

Como o nitrogênio é o nutriente exigido em maior quantidade pelas plantas, a forma na qual é absorvido é a grande determinante das mudanças de pH na rizosfera. A fixação biológica do nitrogênio em leguminosa leva à extrusão de H^+ , o que pode aumentar a solubilidade destes metais. Quando o nitrogênio é absorvido na forma amoniacal, a absorção do $N-NH_4^+$ resulta na acidificação do ambiente radicular.

Conforme mencionado anteriormente, a mobilidade dos metais tem sido há algum tempo objeto de estudo de vários pesquisadores. Tais estudos têm demonstrado que o Pb, o Cr e o Cu apresentam baixa mobilidade, acumulando-se na superfície dos solos contaminados, enquanto o Mn, o Ni e o Zn são relativamente mais móveis, apresentando maior risco de contaminação das águas subterrâneas (Sheppard & Thibault, 1992). Tal fato pode ser observado, pois o Mn, Ni e Zn (Figuras 3.15, 3.16 e 3.17), apresentaram maior concentração nas águas durante a primeira lixiviação e uma tendência de queda nas lixiviações seguintes, comprovando uma rápida solubilidade e conseqüente maior mobilidade. Por outro lado, a concentração de Pb, Cr e Cu nos lixiviados (Figuras 3.13, 3.19 e 3.20) permaneceram praticamente constante durante os 90 dias de ensaio, apresentando lenta solubilização.

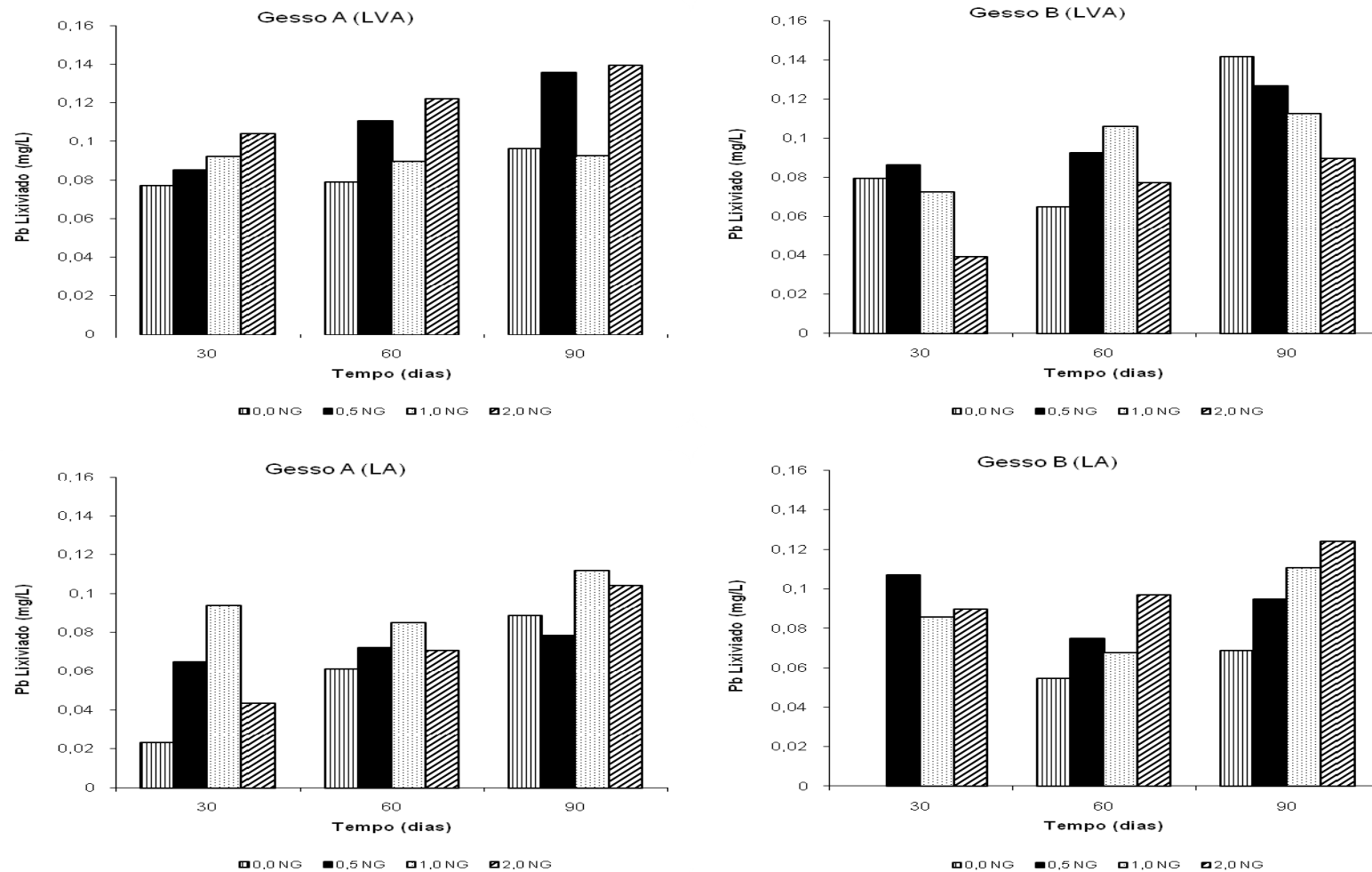


Figura 3.13. Teores de Pb nos lixiviados coletados na base dos vasos em que se cultivou soja ao longo de 90 dias no Latossolo Vermelho-Amarelo e no Latossolo Amarelo de Sete Lagoas-MG e Três Marias-MG, respectivamente, tratado com os fosfogessos A e B

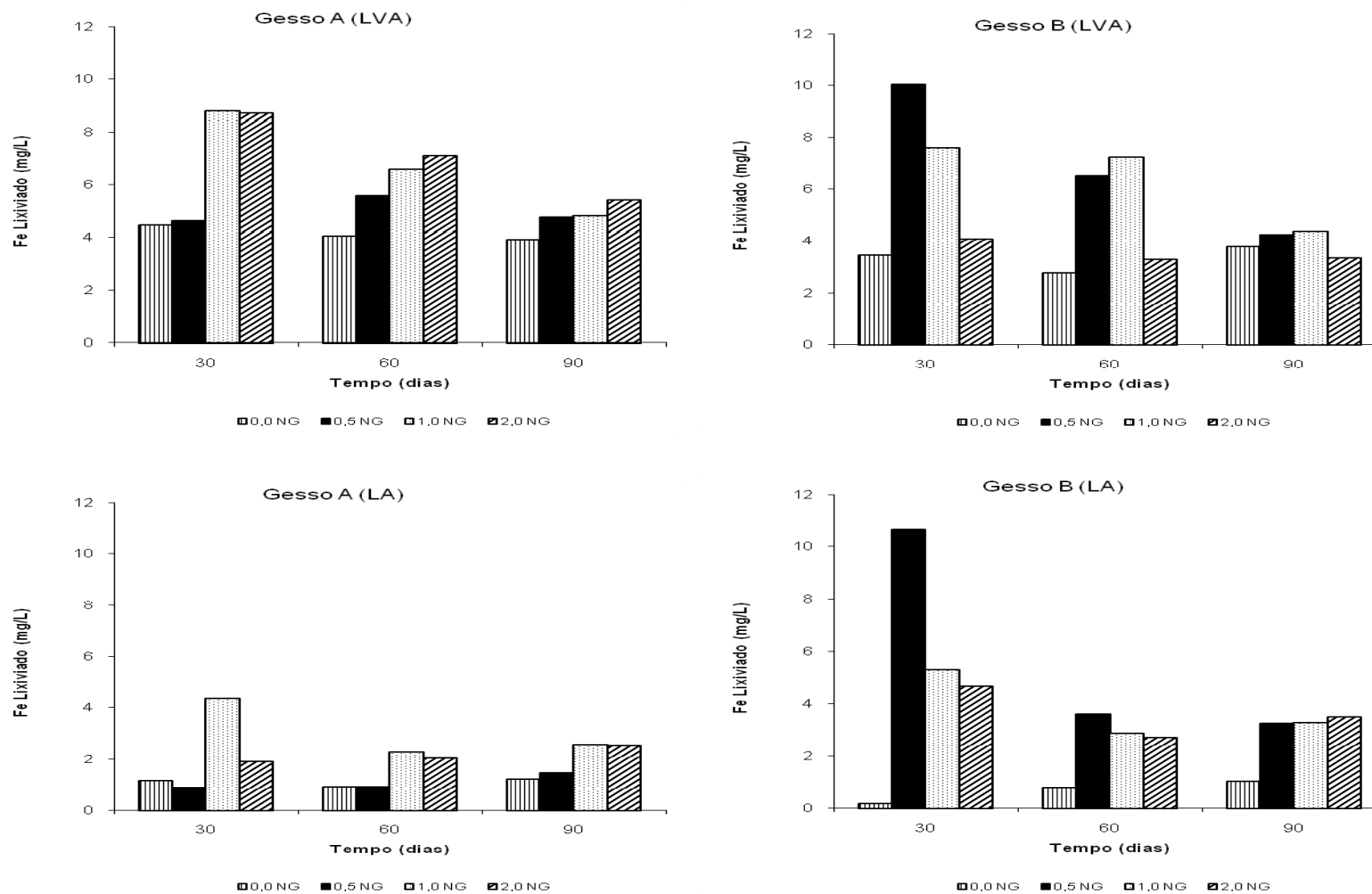


Figura 3.14. Teores de Fe nos lixiviados coletados na base dos vasos em que se cultivou soja ao longo de 90 dias no Latossolo Vermelho-Amarelo e no Latossolo Amarelo de Sete Lagoas-MG e Três Marias-MG, respectivamente, tratado com os fosfogessos A e B

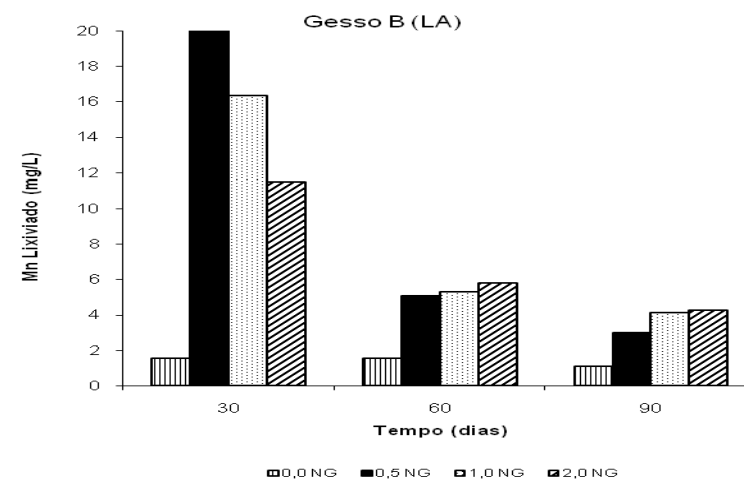
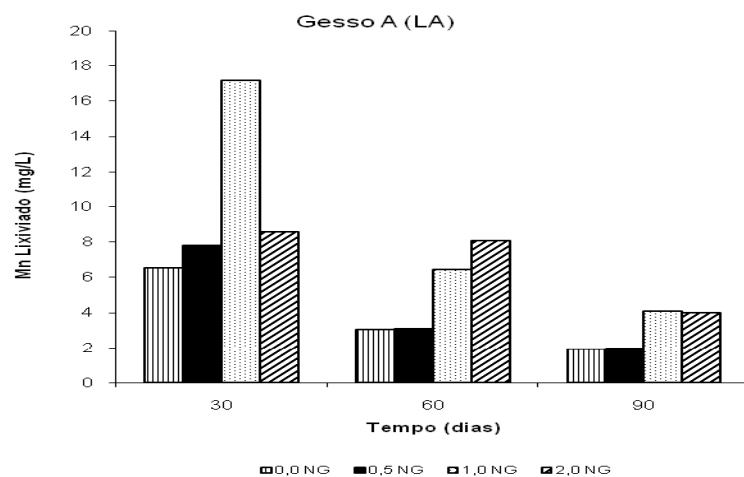
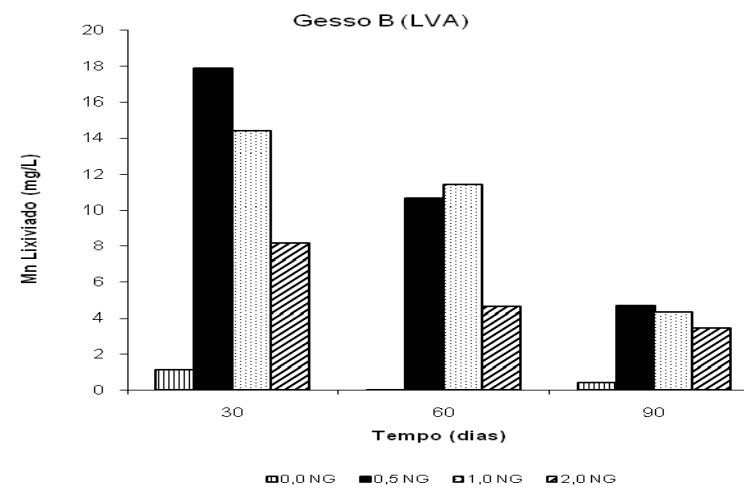
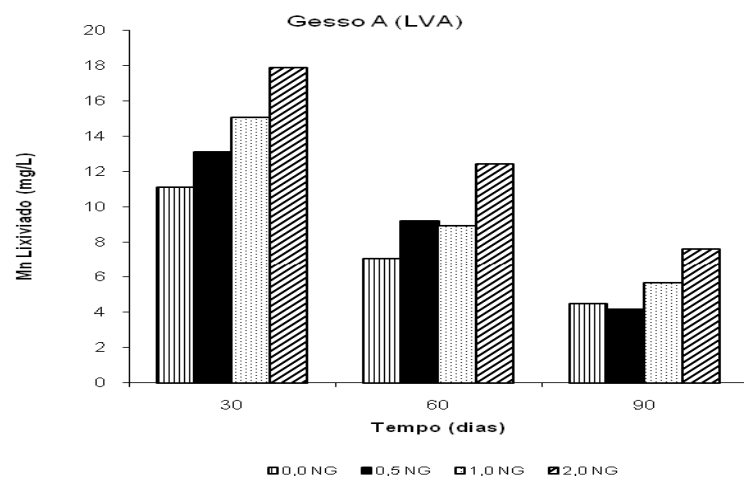


Figura 3.15. Teores de Mn nos lixiviados coletados na base dos vasos em que se cultivou soja ao longo de 90 dias no Latossolo Vermelho-Amarelo e no Latossolo Amarelo de Sete Lagoas-MG e Três Marias-MG, respectivamente, tratado com os fosfogessos A e B

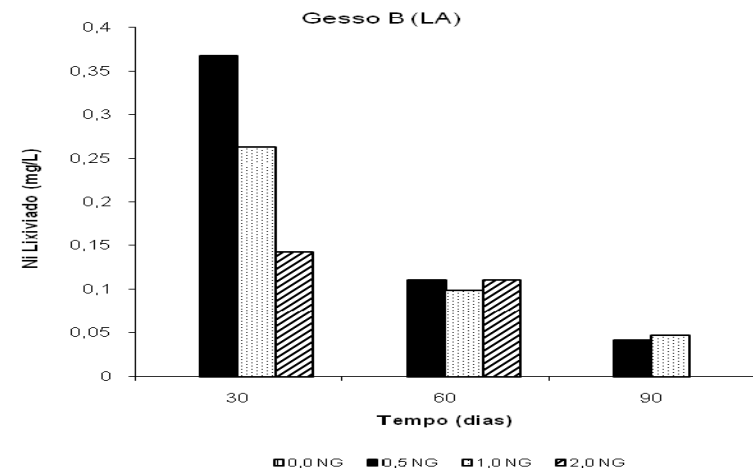
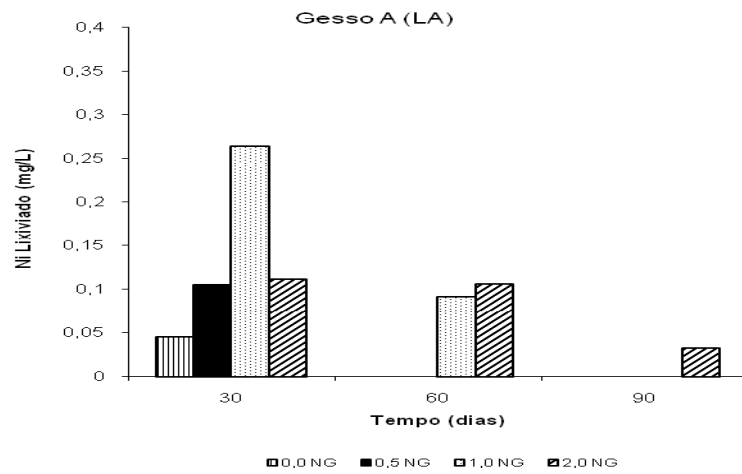
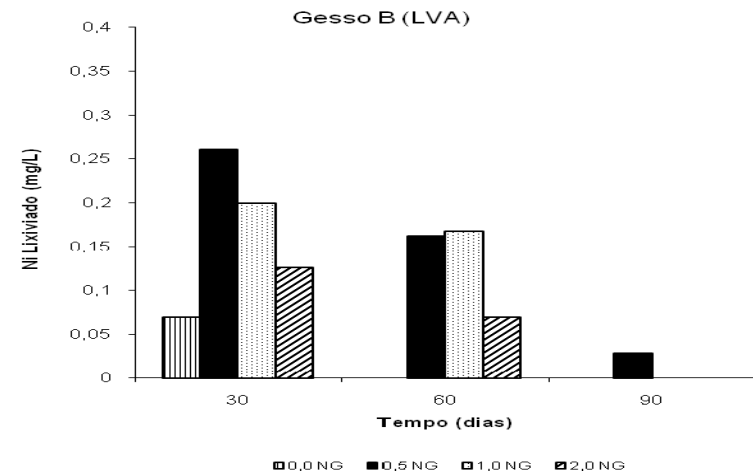
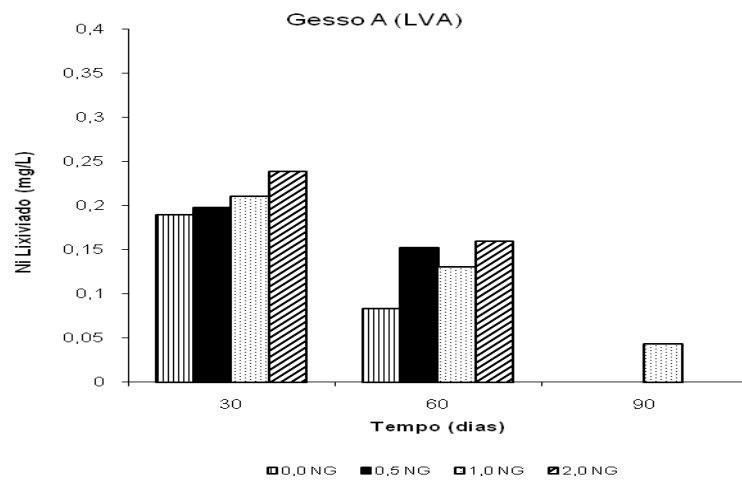


Figura 3.16. Teores de Ni nos lixiviados coletados na base dos vasos em que se cultivou soja ao longo de 90 dias no Latossolo Vermelho-Amarelo e no Latossolo Amarelo de Sete Lagoas-MG e Três Marias-MG, respectivamente, tratado com os fosfogessos A e B

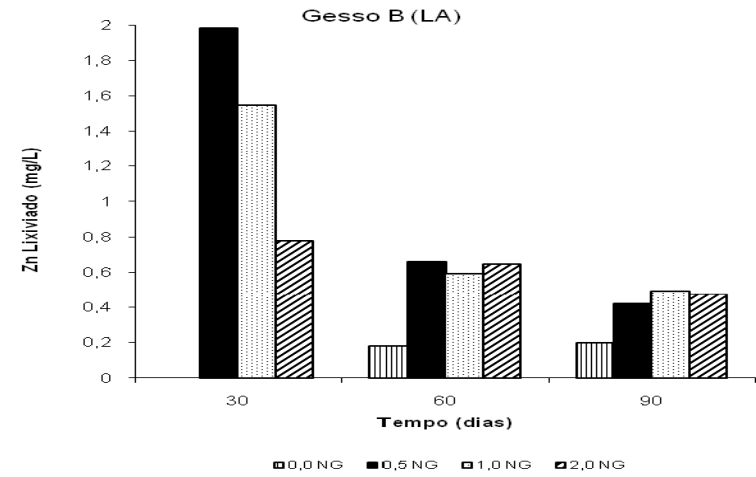
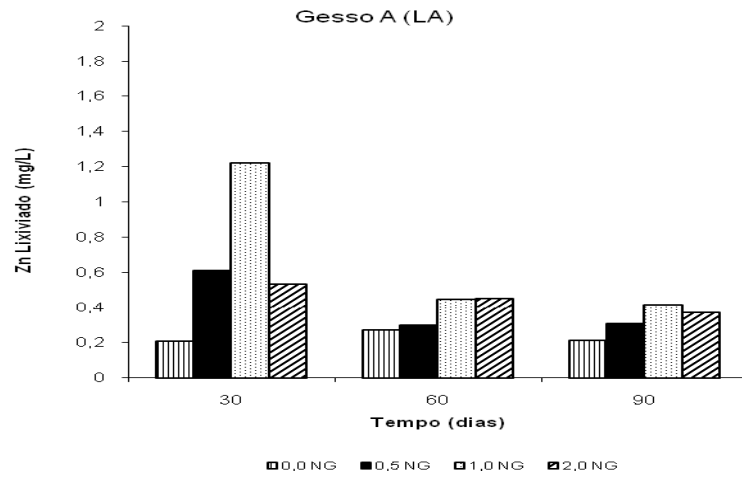
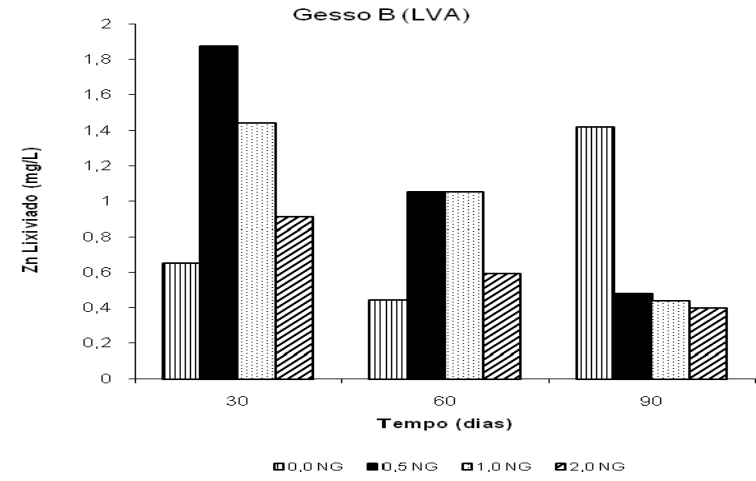
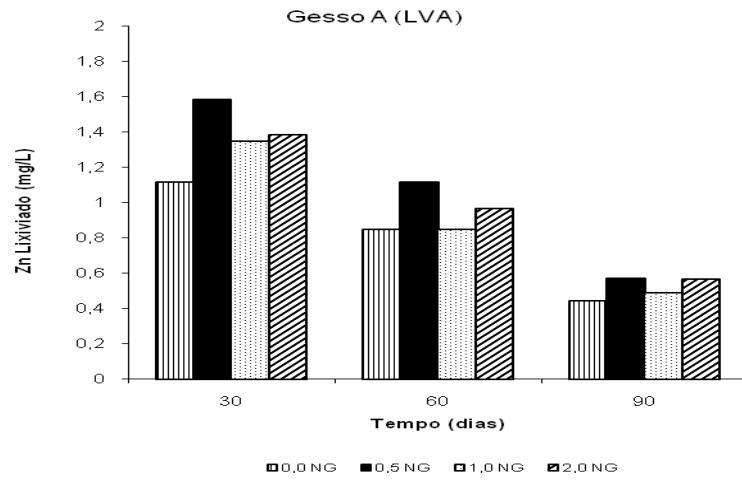


Figura 3.17. Teores de Zn nos lixiviados coletados na base dos vasos em que se cultivou soja ao longo de 90 dias no Latossolo Vermelho-Amarelo e no Latossolo Amarelo de Sete Lagoas-MG e Três Marias-MG, respectivamente, tratado com os fosfogessos A e B

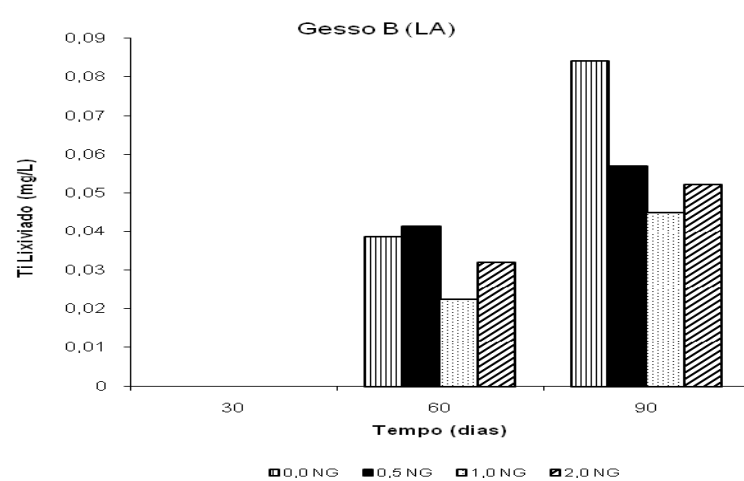
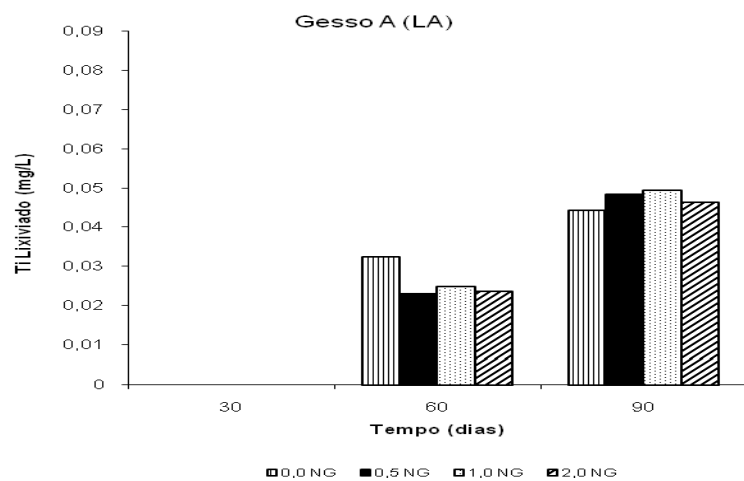
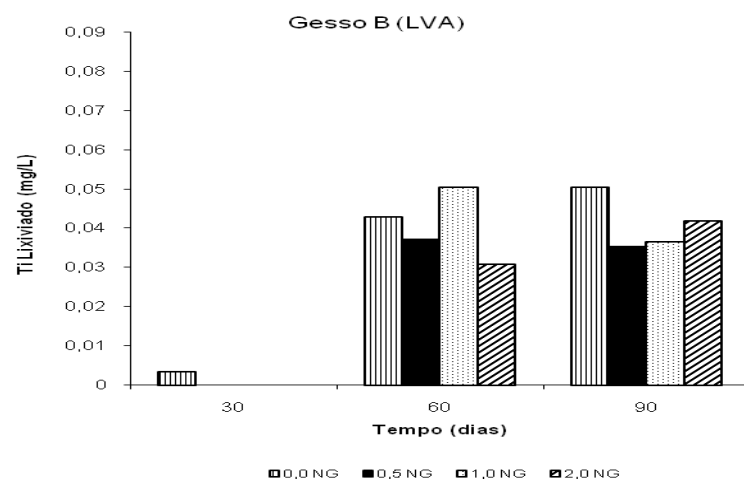
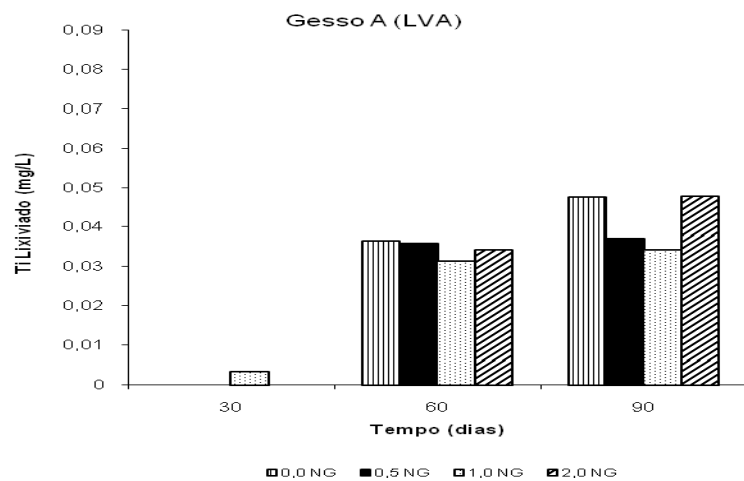


Figura 3.18. Teores de Ti nos lixiviados coletados na base dos vasos em que se cultivou soja ao longo de 90 dias no Latossolo Vermelho-Amarelo e no Latossolo Amarelo de Sete Lagoas-MG e Três Marias-MG, respectivamente, tratado com os fosfogessos A e B

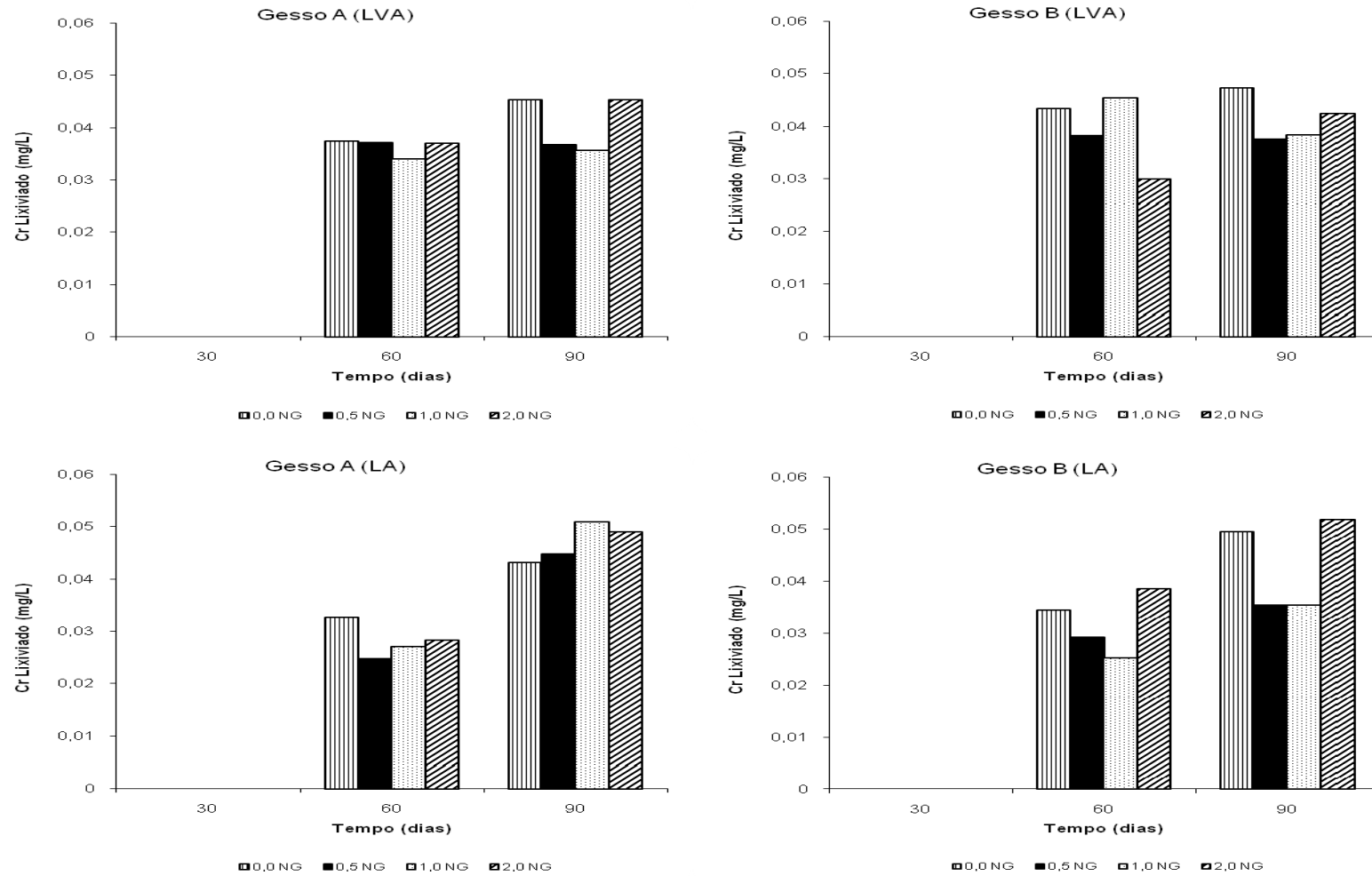


Figura 3.19. Teores de Cr nos lixiviados coletados na base dos vasos em que se cultivou soja ao longo de 90 dias no Latossolo Vermelho-Amarelo e no Latossolo Amarelo de Sete Lagoas-MG e Três Marias-MG, respectivamente, tratado com os fosfogessos A e B

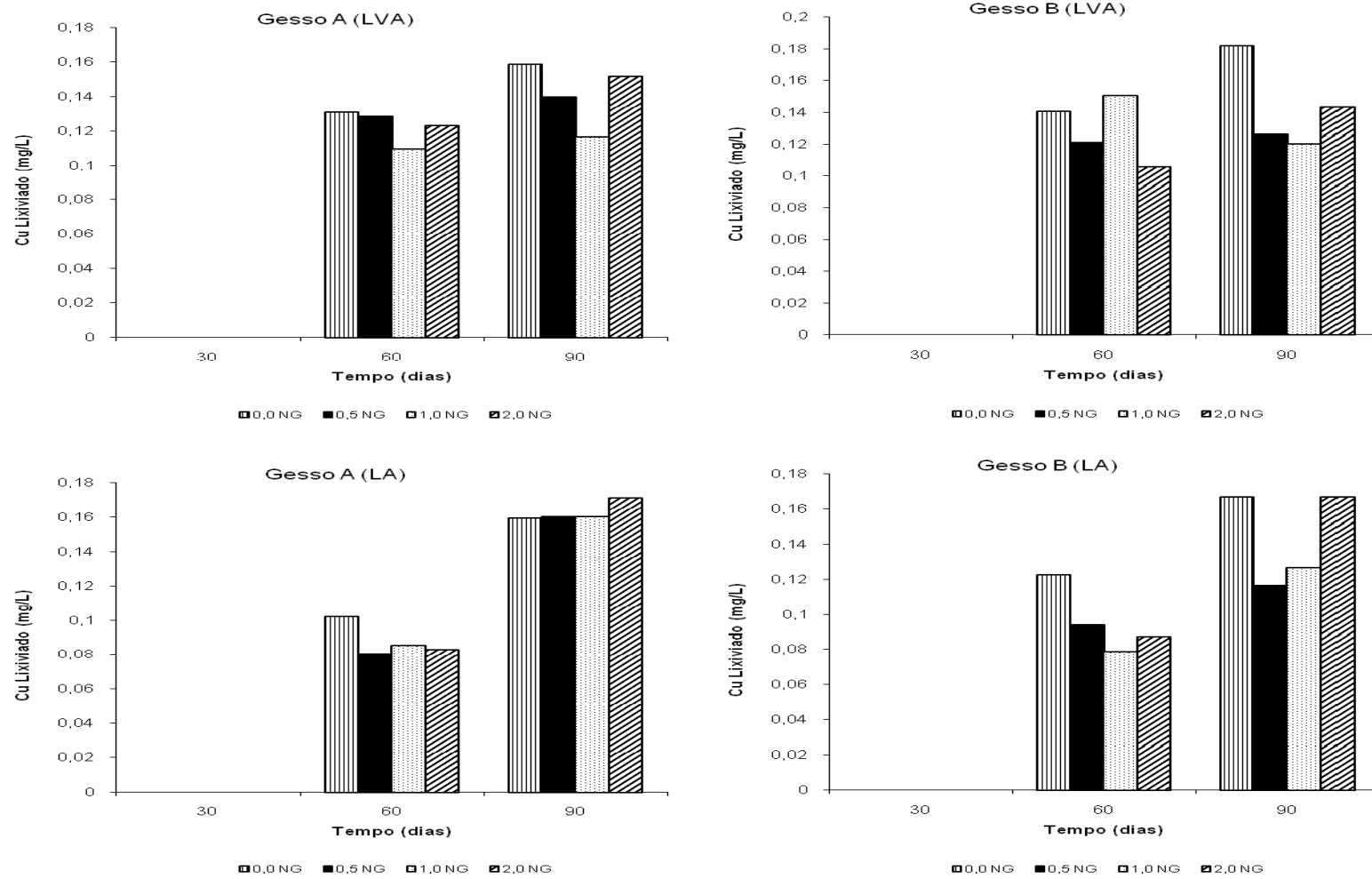


Figura 3.20. Teores de Cu nos lixiviados coletados na base dos vasos em que se cultivou soja ao longo de 90 dias no Latossolo Vermelho-Amarelo e no Latossolo Amarelo de Sete Lagoas-MG e Três Marias-MG, respectivamente, tratado com os fosfogessos A e B

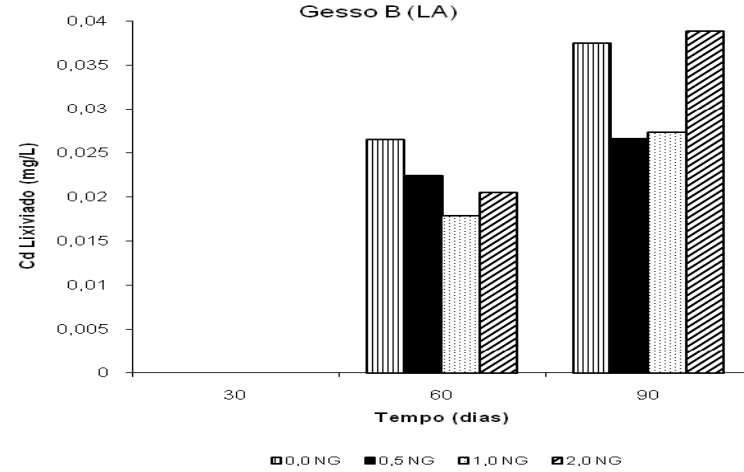
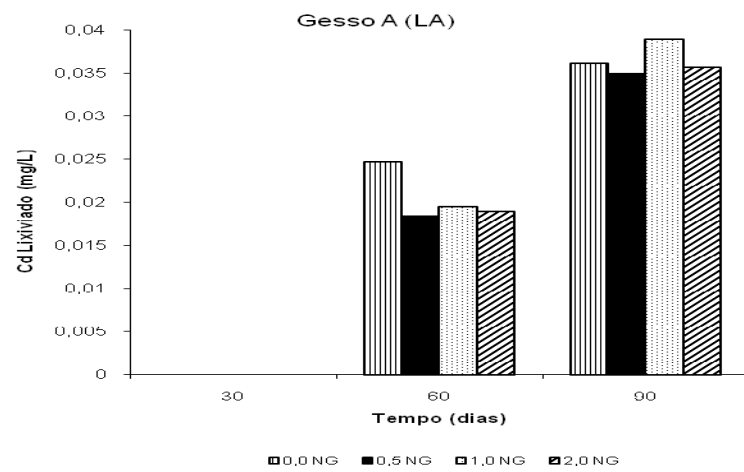
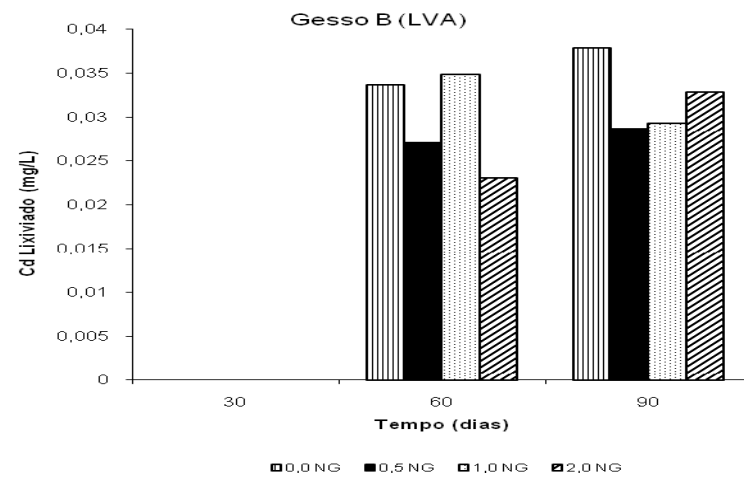
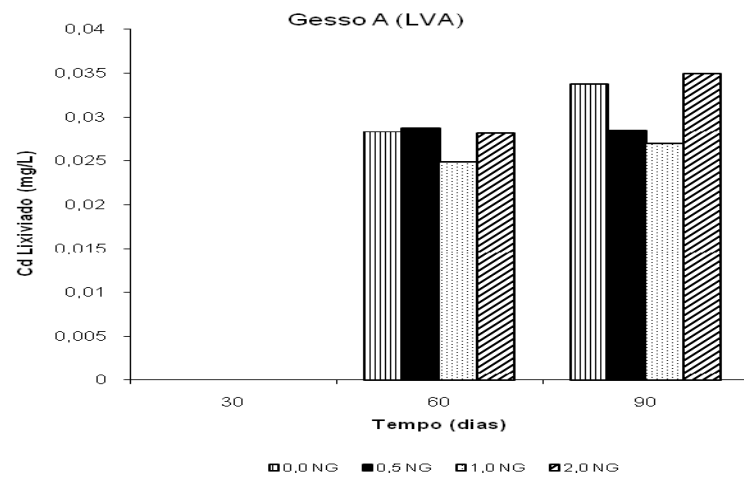


Figura 3.21. Teores de Cd nos lixiviados coletados na base dos vasos em que se cultivou soja ao longo de 90 dias no Latossolo Vermelho-Amarelo e no Latossolo Amarelo de Sete Lagoas-MG e Três Marias-MG, respectivamente, tratado com os fosfogessos A e B

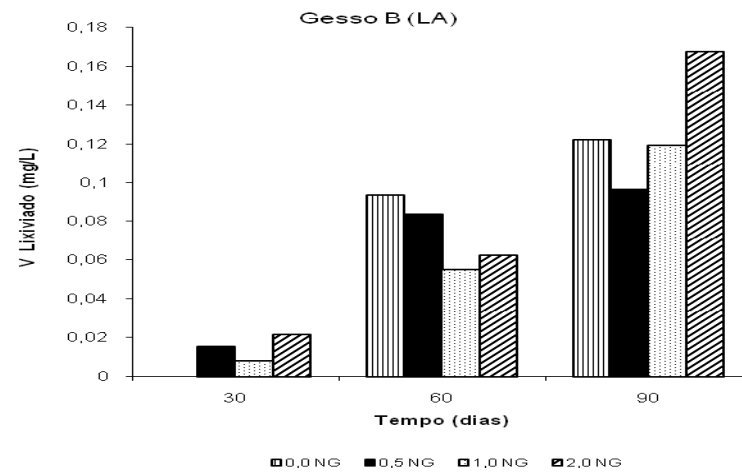
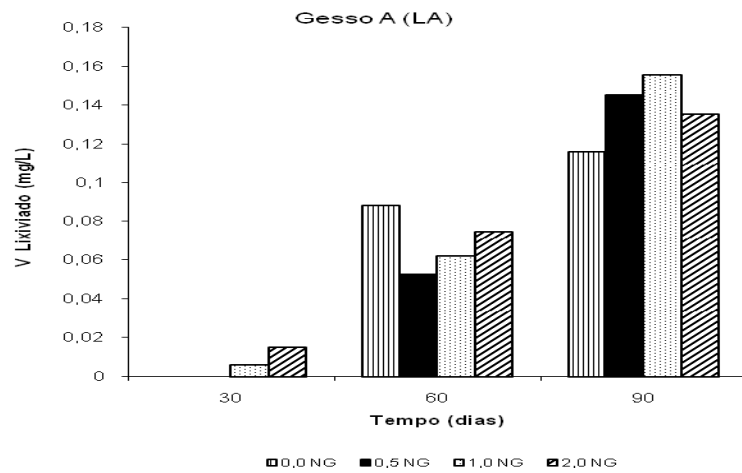
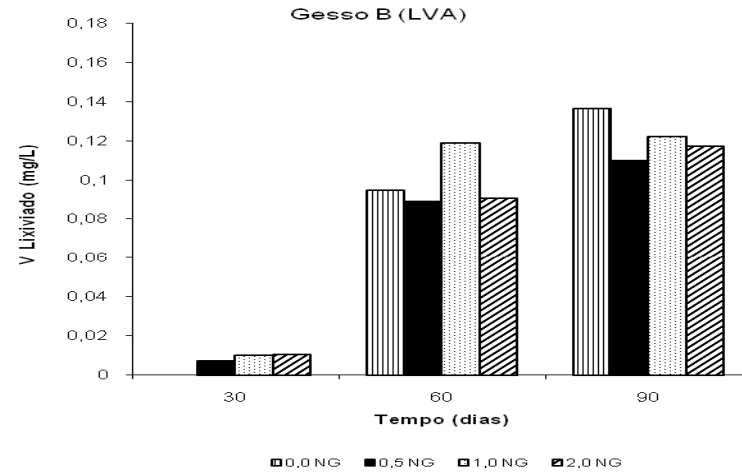
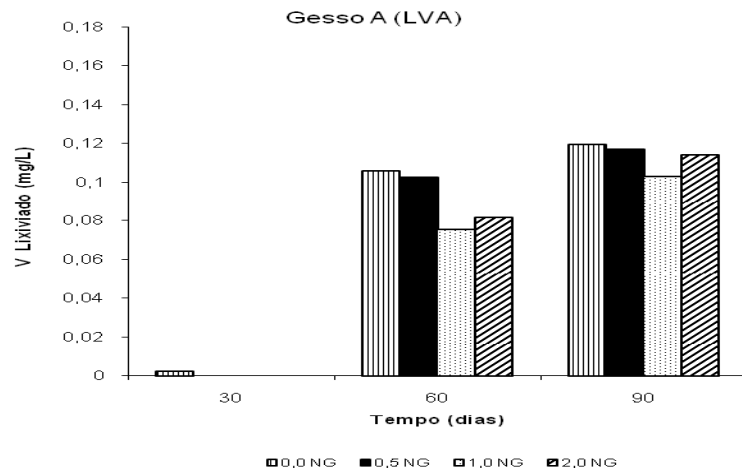


Figura 3.22. Teores de V nos lixiviados coletados na base dos vasos em que se cultivou soja ao longo de 90 dias no Latossolo Vermelho-Amarelo e no Latossolo Amarelo de Sete Lagoas-MG e Três Marias-MG, respectivamente, tratado com os fosfogessos A e B

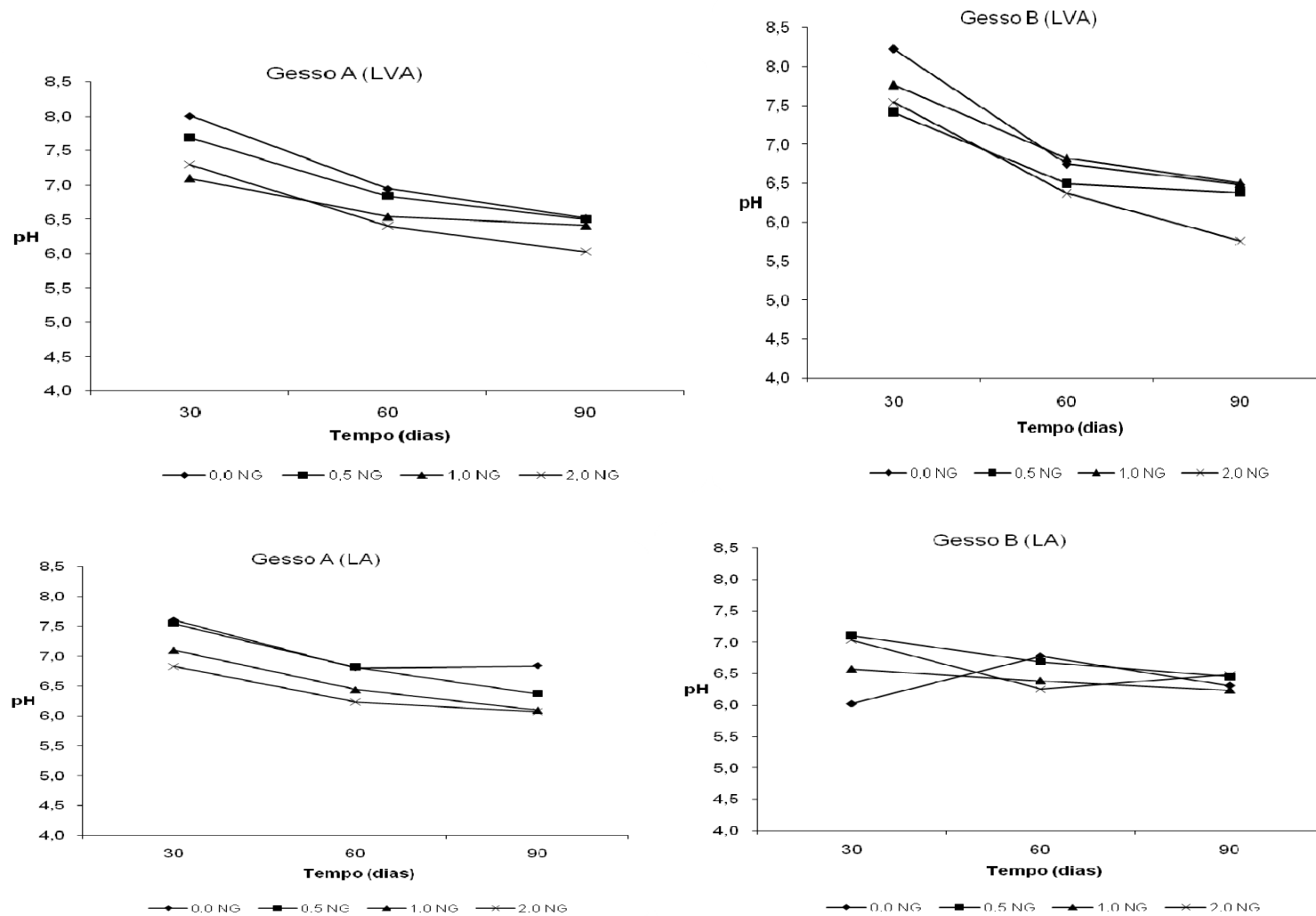


Figura 3.23. Valores de pH nos lixiviados coletados na base dos vasos em que se cultivou milho ao longo de 90 dias no Latossolo Vermelho-Amarelo e Latossolo Amarelo de Sete Lagoas-MG e Três Marias-MG, respectivamente, tratado com os fosfogessos A e B

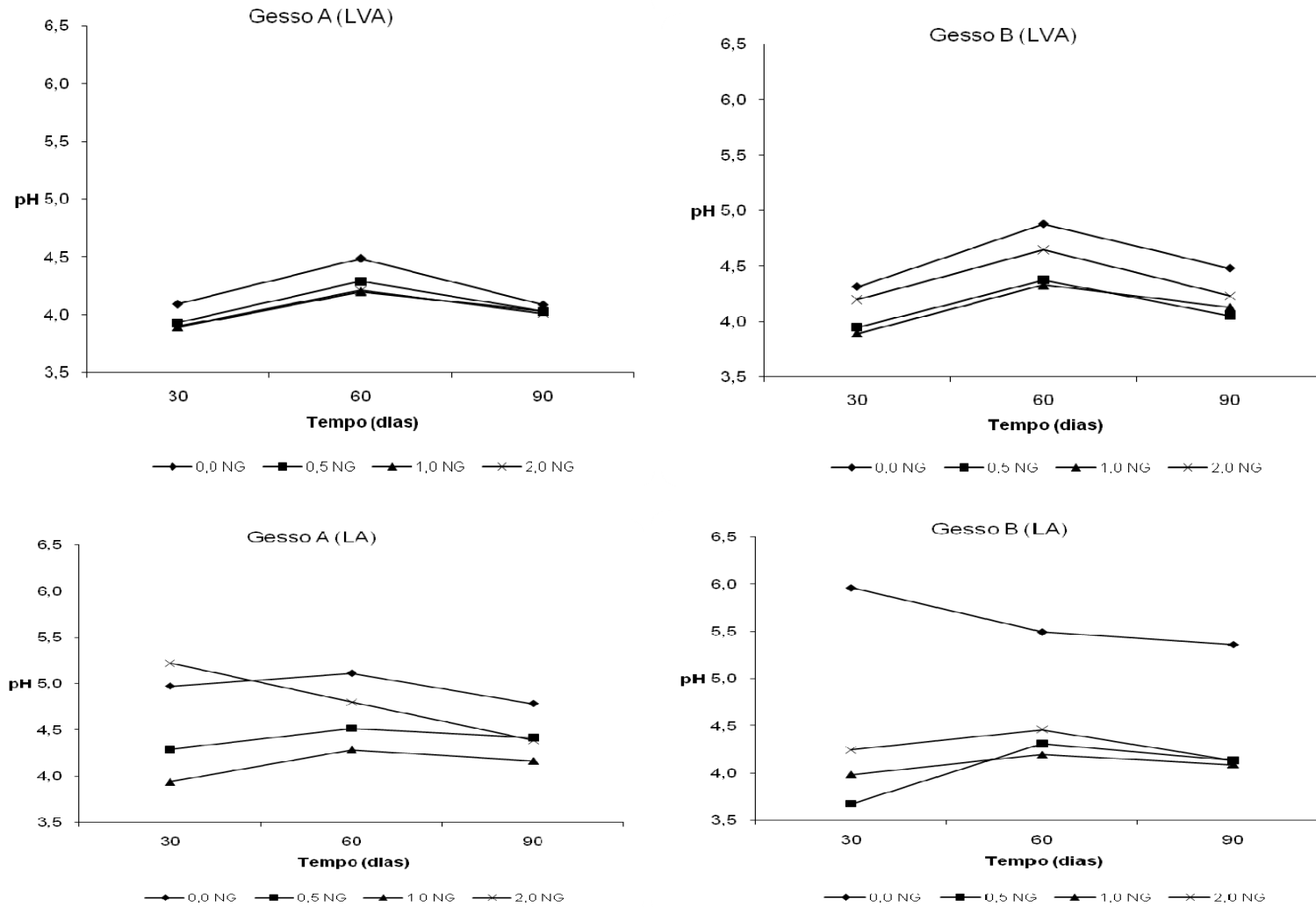


Figura 3.24. Valores de pH nos lixiviados coletados na base dos vasos em que se cultivou soja ao longo de 90 dias no Latossolo Vermelho-Amarelo e Latossolo Amarelo de Sete Lagoas-MG e Três Marias-MG, respectivamente, tratado com os fosfogessos A e B

Os experimentos, a partir dos quais foram gerados os dados apresentados nesta dissertação, fazem parte de um projeto maior, intitulado, “Avaliação do uso do rejeito gerado pelo beneficiamento da rocha fosfatada na agricultura da região do Cerrado”. Na execução deste projeto estiveram envolvidos pesquisadores das seguintes instituições: Universidade Federal de Viçosa (UFV), Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear (CDTN), Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN), Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA) e Fundação Estadual do Meio Ambiente (FEAM).

Alguns dados apresentados e discutidos anteriormente, referentes aos teores de metais na água de lixiviação, foram superiores a alguns resultados encontrados em análises do mesmo material por outros pesquisadores ligados ao projeto, os quais são apresentados nas tabelas 3.15 e 3.16 para fins de comparação. Neste caso, embora os teores de Cd, Pb, Cr e Ni sejam inferiores aos apresentados anteriormente, algumas similaridades podem ser observadas quando se compara as duas culturas. Em ambos os casos a água lixiviada dos vasos onde se cultivou a soja apresentou valores superiores em relação àqueles obtidos na cultura do milho, onde todos os elementos analisados estiveram abaixo do limite de detecção do método analítico utilizado. Entretanto, Os teores médios apresentados nas tabelas 3.15 e 3.16 foram todos inferiores aos limites estabelecidos pela CETESB (2005), a saber: Cd, $0,005 \text{ mg L}^{-1}$, Pb, $0,01 \text{ mg L}^{-1}$, Cr, $0,05 \text{ mg L}^{-1}$ e Ni, $0,02 \text{ mg L}^{-1}$.

Vale ressaltar que os resultados apresentados anteriormente se referem a 3 lixiviações realizadas em 3 épocas distintas e os dados apresentados nas tabelas 3.15 e 3.16 são relativos à média de 5 lixiviações acumuladas. Além disso, na filtração das soluções lixiviadas foi utilizado filtro de membrana milipore de $0,45 \mu\text{m}$, ao passo que as soluções referentes aos resultados discutidos anteriormente foram filtradas em papel filtro com diâmetro de poros de $3 \mu\text{m}$. Portanto, tais diferenças podem ser atribuídas, pelo menos em parte, à presença de material coloidal em suspensão nos lixiviados. Embora as normas para a determinação dos teores de elementos tóxicos em águas subterrâneas considerem a filtração da amostra em membrana milipore de $0,45 \mu\text{m}$, é relevante ressaltar que o solo em condições naturais não possui um sistema tão eficiente para filtrar a solução percolada pelo perfil.

Quadro 3.15. Média dos teores de Cd, Pb, Cr e Ni na cultura do milho em 5 lixiviações filtrada em filtro de membrana milipore de 0,45 µm

Solo	Fosfogesso	Dose (NG)	Cd	Pb	Cr	Ni
			mg L ⁻¹			
LVA	A	0,0	< 0,0002	< 0,001	< 0,05	< 0,0001
		0,5	< 0,0002	< 0,001	< 0,05	< 0,0001
		1,0	< 0,0002	< 0,001	< 0,05	< 0,0001
		2,0	< 0,0002	< 0,001	< 0,05	< 0,0001
	B	0,0	< 0,0002	< 0,001	< 0,05	< 0,0001
		0,5	< 0,0002	< 0,001	< 0,05	< 0,0001
		1,0	< 0,0002	< 0,001	< 0,05	< 0,0001
		2,0	< 0,0002	< 0,001	< 0,05	< 0,0001
LA	A	0,0	< 0,0002	< 0,001	< 0,05	< 0,0001
		0,5	< 0,0002	< 0,001	< 0,05	< 0,0001
		1,0	< 0,0002	< 0,001	< 0,05	< 0,0001
		2,0	< 0,0002	< 0,001	< 0,05	< 0,0001
	B	0,0	< 0,0002	< 0,001	< 0,05	< 0,0001
		0,5	< 0,0002	< 0,001	< 0,05	< 0,0001
		1,0	< 0,0002	< 0,001	< 0,05	< 0,0001
		2,0	< 0,0002	< 0,001	< 0,05	< 0,0001

Quadro 3.16. Média dos teores de Cd, Pb, Cr e Ni na cultura da soja em 5 lixiviações filtrada em filtro de membrana milipore de 0,45 µm

Solo	Fosfogesso	Dose (NG)	Cd		Pb		Cr	Ni
			mg L ⁻¹					
LVA	A	0,0	0,0007	± 0,0002	0,0025	± 0,0006	< 0,05	< 0,0001
		0,5	0,0013	± 0,0001	0,0029	± 0,0004	< 0,05	< 0,0001
		1,0	0,0012	± 0,0002	0,0030	± 0,0005	< 0,05	< 0,0001
		2,0	0,0013	± 0,0003	0,0030	± 0,0005	< 0,05	< 0,0001
	B	0,0	0,0009	± 0,0001	0,0024	± 0,0003	< 0,05	< 0,0001
		0,5	0,0012	± 0,0002	0,0028	± 0,0005	< 0,05	< 0,0001
		1,0	0,0013	± 0,0003	0,0031	± 0,0006	< 0,05	< 0,0001
		2,0	0,0011	± 0,0002	0,0027	± 0,0009	< 0,05	< 0,0001
LA	A	0,0	0,0014	± 0,0002	0,0030	± 0,0019	< 0,05	< 0,0001
		0,5	0,0013	± 0,0002	0,0023	± 0,0011	< 0,05	< 0,0001
		1,0	0,0015	± 0,0002	0,0022	± 0,0002	< 0,05	< 0,0001
		2,0	0,0010	± 0,0005	0,0072	± 0,0058	< 0,05	< 0,0001
	B	0,0	0,0007	± 0,0002	0,0073	± 0,0021	< 0,05	< 0,0001
		0,5	0,0015	± 0,0003	0,0030	± 0,0004	< 0,05	< 0,0001
		1,0	0,0009	± 0,0007	0,0019	± 0,0004	< 0,05	< 0,0001
		2,0	0,0011	± 0,0003	0,0147	± 0,0067	< 0,05	< 0,0001

Em condições de campo a contaminação das águas pode atingir valores superiores àqueles encontrados em ensaios de lixiviação com filtração em membrana milipore, já que uma quantidade significativa da fração total dos metais pesados encontram-se normalmente na fração não-dissolvida, adsorvida à superfície de partículas sólidas em suspensão. Windom et al. (1991) relataram que a proporção de metais ligados a partículas sólidas em suspensão encontrados em rios da costa leste dos Estados Unidos era de 62 % para Cd, 40 % para Cu, 90 % para Pb e 80% para Zn.

Os metais em águas podem interagir com outros solutos, formando complexos e permanecendo na forma dissolvida, como também se unir a partículas inorgânicas ou orgânicas através de adsorção e assimilação, ficando, neste caso, na forma particulada. Uma vez particulado, o elemento pode precipitar-se ou sedimentar-se no fundo do corpo d'água. Ele retornará à forma dissolvida através da mineralização, dessorção ou ressolubilização. Próximo à interface água-sedimento, pode ocorrer uma zona anóxica, de depleção de O_2 , onde reações de redução e dissolução de óxidos de Fe^{+3} e Mn^{+5} podem liberar metais catiônicos, por exemplo, Cd^{2+} , Cu^{2+} , Pb^{2+} e Zn^{2+} ou aniônicos como o AsO_3^{3-} que se encontravam adsorvidos a estes óxidos. A dissolução destes óxidos leva também à liberação de Fe^{2+} e Mn^{+2} que, uma vez atingindo a região óxica próxima à superfície, na presença de O_2 , sofrem oxidação e reprecipitação, levando novamente à formação de óxidos de Fe^{3+} e Mn^{5+} , que podem adsorver a elementos dissolvidos e, novamente, sedimentar no fundo do lago, ficando sujeitos a novos ciclos de redução e dissolução, e assim por diante (Stumm & Morgan, 1996).

4. CONCLUSÕES

Não se verificou contaminação significativa dos solos para nenhuma das culturas estudadas, tanto na camada superficial (0-18 cm de profundidade) quanto subsuperficial (18-25 cm de profundidade), pelo uso do fosfogesso em curto prazo. Projeções para longo prazo sugerem que o uso do fosfogesso é relativamente seguro, do ponto de vista ambiental, por décadas a centenas de anos, sendo que o número máximo de reaplicações em uma mesma área depende das características do solo. Esta hipótese, contudo, necessita de comprovação através de trabalhos realizados no campo e em estudos de longo prazo;

Os fosfogessos não contribuíram para o aumento dos teores de metais pesados extraídos pelo Mehlich 3 na camada superficial;

A absorção de metais pelas plantas para os grãos é maior quando cultivado no solo arenoso (LA), devido a sua menor capacidade tampão. Logo, a utilização do fosfogesso pode ser feita com maior segurança em solos profundos, de textura mais argilosa, com baixos teores originais de elementos tóxicos e com lençol freático relativamente profundo;

Não foi observada a transferência de Pb, tanto para os grãos de milho quanto de soja;

De maneira geral, a soja apresentou maior absorção de metais o que, em parte, pode ser explicado pela maior acidificação da rizosfera, tendo em vista, o menor valor do pH encontrado nos extratos lixiviados. Como o mesmo comportamento é esperado para as leguminosas, a utilização do fosfogesso em áreas onde é realizado o cultivo destas plantas oferece maior risco de transferência de metais para as plantas e maior mobilidade no perfil do solo;

O Mn, o Ni e o Zn apresentaram maior mobilidade no solo em relação ao Pb, Cd e Cu, portanto, logo as águas subterrâneas estão mais susceptíveis a possíveis contaminações por estes elementos.

A solução lixiviada no experimento onde se cultivou a soja apresentou maiores teores de metais pesados em relação ao experimento com a cultura do milho.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABIA (São Paulo, SP). **Compêndio da legislação dos alimentos**. São Paulo, 1985. Não paginado.
- ALLOWAY, B.J. The origins of heavy metals in soils. In: ALLOWAY, B.J. ED. **Heavy metals in soils**. New York, NY: John Wiley, 1990. p. 29-39.
- ALLOWAY, B.J. **Heavy metals in soils**. 2nd ed. New York: Blackie Academic & Professional, 1995. 368p.
- ALVAREZ V., V.H.; NOVAIS, R.F.; DIAS, L.E. & OLIVEIRA, J.A. **Determinação e uso do fósforo remanescente**. **B. Inf. SBCS**, 25:27-32, 2000.
- ALVAREZ, V. V. H. **Equilíbrio de formas disponíveis de fósforo e enxofre em dois latossolos de Minas Gerais**. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 1974. 134 f. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 1974.
- AMARAL SOBRINHO, N.M.B., do. **Interação dos metais pesados de resíduos siderúrgicos com um solo podzólico vermelho-amarelo**. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 1993. 163 p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 1993.
- AMARAL SOBRINHO, N.M.B.; BARROS, N.F.; COSTA, L.M.; FONTES, M.P.F. Efeito de um rejeito da indústria de Zn sobre a química de amostras de solo e plantas de milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v.20, p.271-276, 1996.
- AMARAL SOBRINHO, N.M.B.; VELLOSO, A.C.X. & OLIVEIRA, C. Solubilidade de metais pesados em solo tratado com resíduo siderúrgico. **R. Bras. Ci. Solo**, v.21, p.9-16, 1997.
- AMARAL SOBRINHO, N.M.B.; VELLOSO, A.C.X.; COSTA, L.M.; OLIVEIRA, C. Mobilidade de metais pesados em solo tratado com resíduo siderúrgico ácido. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 22, n. 2, p. 345-353, 1998.
- ANTOSIEWICZ, D.M. Adaptation of plants to an environment polluted with heavy metals. **Acta Societatis Botanicorum Poloniae**, v.61, p.281-299, 1992.
- ANVISA. **Decreto no 55.871, de 26 de março de 1965**. Disponível em: <http://www.anvisa.gov.br/legis/decretos/55871_65.htm>. Acesso em: 30 jun. 2009.
- ARDUINI, I.; GODBOLD, D.L.; ONNIS, A. Cadmium and copper uptake and distribution in Mediterranean tree seedlings. **Physiologia Plantarum**, v.97, p.111-117, 1996.

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. RESÍDUOS SÓLIDOS. Coletânea de Normas. **ABNT NBR 10004:2004, ABNT NBR 10005:2004, ABNT NBR 10006:2004, ABNT NBR 10007:2004**. Rio de Janeiro, RJ. 71 p., 2004.
- BARCELÓ, J.; POSCHENRIEDER, C. Respuestas de las plantas a la contaminación por metales pesados. **Suelos y Planta**, v.2, p.345-361, 1992.
- BARROW, N.J. Reactions of anions and cations with variable-charge soils. **Adv. Agr.** 38:183–230, 1985.
- BARROW, N.J. The reaction of plant nutrients and pollutants with soil. **Aust. J. Soil Res.**v. 27, p.475–492, 1989.
- BASTA, N.T. & Tabatabai, M.A. Effect of cropping systems on adsorption of metals by soils: II. Effect of pH. **Soil Sci.** v.153, p.195–204, 1992.
- BERTON, R.S. Riscos de contaminação do agrossistema com metais pesados. In: BETTIOL, W.; CAMARGO, O.A. (Ed.). **Impacto ambiental do uso agrícola do lodo de esgoto**. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2000. p.259-268.
- BIDAPPA, C.C.; CHINO, M.; KUMAZAWA, K. Migration of heavy metals in two japonese soils. **Plant and soil**, v.66, p. 299-316,1982.
- BRUGGENWERT, M.G.M.; KAMPHORST, A. Survey of experimental information on cation exchange in soil systems. In: BOLTH, G.H., Ed. **Soil Chemistry, B: physic-chemical models**. Amsterdam: Elsevier Science, 1979. P. 141-203.
- CAMPOS, M.L.; Pierangeli, M.A.P.; Guilherme,L.R.G.; Marques, J.J. & Curi, N. Baseline, Concentration of heavy metals in Brazilian latosols. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**. V.34, p. 547-557, 2003.
- CANUT, M. **Estudo da Viabilidade da Substituição do Gesso pelo Rejeito Fosfogeno em Material de Construção**. Belo Horizonte, Universidade Federal de Minas Gerais, 2006. 110 f. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Belo Horizonte, MG, 2006.
- CONAMA – Conselho nacional do Meio Ambiente. Ministério do Meio Ambiente. **Resolução CONAMA nº 357, de 17 de março de 2005**. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res05/res35705.pdf>>. Acesso em: 28 nov. 2008.

- CORRÊA, M.L.T. **Utilização de escória de aciaria como corretivo da acidez de solos para cultivos de soja e cana-de-açúcar e avaliação da contaminação ambiental.** Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 2006. 165 f. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) – Universidade Federal de Viçosa, MG, 2006.
- CETESB – COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL. **Aplicação de lodos de sistemas de tratamento biológico em áreas agrícolas - Critérios para projeto e aplicação.** São Paulo, SP: CETESB, 1999. 32 p.
- CETESB – COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL. **Decisão de Diretoria Nº 195-2005- E, de 23 de novembro de 2005 Dispõe sobre a aprovação dos Valores Orientadores para Solos e Águas Subterrâneas no Estado de São Paulo – 2005, em substituição aos Valores Orientadores de 2001, e dá outras providências.** São Paulo, SP: CETESB, 2005. 4 p.
- DAKORA, F.D.; PHILLIPS, D.A. Root exudates as mediators of mineral acquisition in low nutrient environments. **Plant Soil**, v.245, p.35-47, 2002.
- ELLIS, B.G.; KNEZEK, B.D. Adsorptions, reactions of micronutrients in soils. In: DINAUER, R.C., Ed. **Micronutrients in agriculture**, Madson, ASA/SSSA, 1977. 566 p.
- ELLIS, B.G.; KNEZEK, B.D.; JACOBS, L.W. The movement of micronutrients in soil. In: NELSON, D.W.; ELRICK, D.E.; TANGI, K.K.; EDS. Chemical mobility and reactivity in soil system. Madson, **Soil Science Society of America, 1983.**
- EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. EMBRAPA-CNPS **Manual de métodos de análise do solo.** 2ª ed., Rio de Janeiro, RJ, 1997. 212 p.
- EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Embrapa Milho e Sorgo **Fertilidade de Solos**, 2000. Disponível em: <<http://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/FontesHTML/Milho/CultivoDoMilho/fertilsolo.htm>>. Acesso em: 25 jun. 2006.
- EPA (1988). ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY U.S. **Background Information Document: Statistical Procedures for Certifying Phosphogypsum for Entry Into Commerce, As Required by Section 61.207 of 40 CFR Part 61, Subpart R.** EPA 402-R-98-008, Washington, DC.
- FAURE, G. **Principles and applications of geochemistry: a comprehensive textbook for geology students.** 2nd ed. New Jersey, 1991. 600p.

- FERNANDES, H.M.; RIO, A.P.M.; FRANKLIN, M.R. **Impactos Radiológicos da Indústria do Fosfato. Série Estudos & Documentos CETEM/MCT 56**, 2004. Disponível em: <http://www.cetem.gov.br/publicacao/CETEM_SED_56.pdf>. Acesso em: 04 jul. 2006.
- GUSSARSSON, M.; ADALSTEINSSON, P.J.; JENSÉN, P.; ASP, H. Cadmium and copper interactions on the accumulation and distribution of Cd and Cu in birch (*Betula pendula Roth*) seedlings. **Plant and Soil**, v.171, p.185-187, 1995.
- HARTER, R.D. Effect of soil pH on adsorption of lead, copper, zinc, and nickel. **Soil Sci. Soc. Am. J.** v.47, p.47–51, 1983.
- HAYES, K.F. & Traina, S.J. Metal speciation and its significance in ecosystem health. In: Huang, P.M. (ed.) **Soil chemistry and ecosystem health**. Soil Science Society of America, Madison, 1998. p. 45–84. (SSSA Special Publication N° 52).
- HESTERBERG, D. Biogeochemical cycles and processes leading to changes in mobility of chemicals in soils. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v.67(2–3), p.121–133, 1998.
- HINSINGER, P.; PLASSARD, C.; TANG, C.; JAILLARD, B. Origins of root-mediated pH changes in the rhizosphere and their responses to environmental constraints: a review. **Plant and Soil**, v.248, p.43-59, 2003.
- KABATA-PENDIAS, A.; PENDIAS, H. **Trace elements in soil and plants**. 3rd ed. Boca Raton: CRC Press, 2001. 413p.
- KHAN, D. H.; FRANKLAND, B. Effects of cadmium and lead on radish plants with particular reference to movement of metals through soil profile and plant. **Plant and Soil**, v. 70, p. 335-345, 1983.
- MALAVOLTA, B. O gesso agrícola no ambiente e na nutrição da planta - perguntas & respostas. XVI curso de resíduos agroindustriais e impacto ambiental – SECITAP, 1991 Jaboticabal. **Anais...**Jaboticabal, 1991.
- MARSCHNER, H. **Mineral Nutrition of Higher Plants**. 2 ed. London: Academic Press, 1995. 889 p.
- MAZZILLI, B. P. ; PALMIRO, V. ; SAUEIA, C. H. R. ; NISTI, M. B. Radiochemical characterization of Brazilian phosphogypsum. **Journal of Environmental Radioactivity**, England, v. 49, n. 1, p. 113-122, 2000.
- McBRIDE, M.B. Reactions controlling heavy metals solubility in soils. **Adv. Soil Sci.**, v.10, p.1-56, 1989.
- MELLO, F.A.F. **Fertilidade do solo**. Nobel, São Paulo, 1989.

- MORTVEDT, J. J., COX, F. R., SHUMAN, L. M., WELCH, R. M. **Micronutrients in agriculture**. 2.ed. Madson: Soil Sci. Soc. America, 1991. 760 p.
- OLIVEIRA, K. A. P. **Aplicação do fosfogesso na agricultura do cerrado e suas implicações radiológicas**. Belo Horizonte, CNEN/CDTN, 2008. (Dissertação Mestrado) – CNEN/CDTN. Belo Horizonte, MG, 2008.
- PIERANGELI, M.A.P., Guilherme, L.R.G., Oliveira, L.R., Curi, N. & Silva, M.L.N. Efeito da força iônica da solução de equilíbrio sobre a adsorção-dessorção de chumbo em Latossolos brasileiros. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, 36:1077–1084, 2001a.
- PIERANGELI, M.A.P.; Guilherme, L.R.G.; Curi, N.; Silva, M.L.N.; Oliveira, L.R. & Lima, J.M. Efeito do pH na adsorção-dessorção de chumbo em Latossolos brasileiros. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 25(2):269–277, 2001b.
- RIBEIRO, A.C.; GUIMARÃES, P. T. G.; ALVAREZ V., V. H. – Comissão de fertilidade do solo do estado de minas gerais. **Recomendações para uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais - 5ª Aproximação**. Viçosa, MG. 359 p.1999.
- SANTOS, A.J.G., MAZZILLI, B. P. ; FÁVARO, D.I.T. ; SILVA, P.S.C. Partitioning of radionuclides and trace elements in phosphogypsum and its source materials based on sequential extraction methods. **Journal of Environmental Radioactivity**, Great Britain, v. 87, p. 52-61, 2006.
- SHARPLEY, A.N.; MENZEL, R.G. The impact of soil and fertilizer phosphorus on the environment. **Advances in Agronomy**,. v.41, p. 297-324,1987.
- SHEPPARD, M.J.; THIBAUT, D.H. Desorption and extraction of selected Heavy Metal from soil. **Soil Science Society American Journal**, New York, NY, n. 56: p. 415-423. 1992.
- SILVA, Maria Ligia de Souza; VITTI, Godofredo Cesar; TREVIZAM, Anderson Ricardo. Concentração de metais pesados em grãos de plantas cultivadas em solo com diferentes níveis de contaminação. **Pesq. agropec. bras.**, Brasília, v. 42, n. 4, Apr. 2007.
- SOARES, C.R.F.S.; GRAZZIOTTI, P.H.; SIQUEIRA, J.O.; CARVALHO, J.G. de; MOREIRA, F.M.S. Toxidez de zinco no crescimento e nutrição de *Eucalyptus maculata* e *Eucalyptus urophylla* em solução nutritiva. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.36, p.339-348, 2001.
- SOUSA, D. M. G.; REIN, T. A.; LOBATO, E.; RITCHEY, K. D. **Sugestões para Diagnose e recomendação de gesso em solos de cerrado**. Em: II Seminário sobre o uso do gesso na agricultura. P.139-158. IBRAFOS – Instituto Brasileiro do Fosfato. Uberaba, MG. 1992, 413 p.

- SOUSA, D. M. G.; VILELA, L.;LOBATO, E.;SOARES, W. V. Uso de fosfogesso, calcário e adubos para pastagens no Cerrado. Planaltina, Embrapa Cerrados, 2001. 22p. (Embrapa Cerrados, Circular Técnica, 12).
- SOUSA, D. M. G.; MIRANDA, L. N.; OLIVEIRA, S. A. Acidez do solo e sua correção. In: **Fertilidade do Solo**. 1. ed. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. p. 205-274.
- SOUZA, A.E. **Fosfato**. In: Balanço Mineral Brasileiro 2001. Disponível em: WWW.dnpm.gov.br. Acesso em: 17 jan. 2009.
- STUMM, W. & Morgan, J.J. **Aquatic chemistry: chemical equilibria and rates in natural waters**. 3rd ed. New York, John Wiley & Sons Inc., 1996. 1022p.
- TÜZEN, M. Determination of heavy metals in fish samples of the middle Black Sea (Turkey) by graphite furnace atomic absorption spectrometry. **Food chemistry**, v.80, p. 119-123, 2003.
- U.S.EPA (Environmental Protection Agency). **Soil screening guidance: thecnical background document**. Washington, EPA, Office of Solid Waste and Emergency Response, 1996. 168 p.
- U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (U.S.EPA) **Risk Assessment Guidance for Superfund (RAGS): Human Health Evaluation Manual: Part A**, 1989.
- WELCH, J.E.; LUND, L.J. Zinc movement in sewage-sludge treated soils as influenced by soils properties, irrigation water quality and soil moisture levels. **Soil Science**, v. 147, p. 208-214, 1989.
- WILLIAMS, D.E.; VLAMIS, J.; PUKITE,A.H.; COREY,J.E. Metal movement in sludge treated soils after six years of sludge adition: 2. Nickel, Cobalt, Iron, Manganese, Cromium, and Mercury. **Soil Science**, v. 140, p. 120-125, 1985.
- WINDOM, H.L.; Byrd, T.; Smith, R.G. & Huang, F. Inadequacy of NAS-QUAN data for assessing metal trends in the nation's rivers. **Environ. Sci. Technol.** V.25, p.1137–1142, 1991.
- VITTI, G.C.; FERREIRA, M.E.; MALAVOLTA, E. Respostas de culturas anuais e perenes. In: SEMINÁRIO SOBRE O USO DO FOSFOGESSO NA AGRICULTURA, 1., Brasília. **Anais...** Brasília: IBRAFOS, 1985. p. 17-44.

APÊNDICE

Quadro 1A. Quadrado médio da análise de variância para os teores semi-totais de Pb,Cd, Cu,Cr, Fe, Mn, Ni, Ti, V e Zn nos solos tratados com fosfogesso, na profundidade de 0-18 cm, após o cultivo com milho.

FV	GL	Pb	Cd	Cu	Cr	Fe
Bloco (B)	2	8,0128 ^{n.s.}	0,2360 ^{n.s.}	132,4460 ^{n.s.}	29,7992 ^{n.s.}	6151217,1516 ^{n.s.}
Solo (S)	1	8996,3172**	5,1237**	6884,0193**	33210,1791**	23228845083,8393**
Fosfogesso (F)	1	12,4472 ^{n.s.}	0,3970 ^{n.s.}	4,8355 ^{n.s.}	11,3335 ^{n.s.}	98152,3086 ^{n.s.}
Dose (D)	3	2,8671 ^{n.s.}	0,2431 ^{n.s.}	17,5362 ^{n.s.}	59,7405 ^{n.s.}	751204,7097 ^{n.s.}
S x F	1	17,1688 ^{n.s.}	0,1769 ^{n.s.}	4,8355 ^{n.s.}	0,3341 ^{n.s.}	7242,7178 ^{n.s.}
S x D	3	11,3437 ^{n.s.}	0,0767 ^{n.s.}	17,5362 ^{n.s.}	47,8185 ^{n.s.}	35620,8124 ^{n.s.}
F x D	3	3,8805 ^{n.s.}	0,2503 ^{n.s.}	5,0798 ^{n.s.}	20,1779 ^{n.s.}	1129712,7172 ^{n.s.}
S x F x D	3	10,2201 ^{n.s.}	0,3839 ^{n.s.}	5,0798 ^{n.s.}	23,5651 ^{n.s.}	823634,8302 ^{n.s.}
Resíduo	30	8,0177	0,1638	18,3459	35,9343	1665841
FV	GL	Mn	Ni	Ti	V	Zn
Bloco (B)	2	130,6543 ^{n.s.}	5713,1900 ^{n.s.}	1882,0162 ^{n.s.}	8,7429 ^{n.s.}	112529,3936 ^{n.s.}
Solo (S)	1	579049,3411**	62524,8714**	23192,6788 ^{n.s.}	184222,6435**	596920,8852*
Fosfogesso (F)	1	9,7829 ^{n.s.}	14240,2264 ^{n.s.}	11135,3696 ^{n.s.}	11,7989 ^{n.s.}	2315,5431 ^{n.s.}
Dose (D)	3	45,2644 ^{n.s.}	14425,7767 ^{n.s.}	2005,5795 ^{n.s.}	8,5695 ^{n.s.}	112366,3409 ^{n.s.}
S x F	1	11,0108 ^{n.s.}	14240,2264 ^{n.s.}	6481,3995 ^{n.s.}	2,0413 ^{n.s.}	4134,3346 ^{n.s.}
S x D	3	16,8047 ^{n.s.}	14925,7767*	3956,2062 ^{n.s.}	2,7978 ^{n.s.}	113484,5837 ^{n.s.}
F x D	3	21,1484 ^{n.s.}	15564,0700*	1110,3692 ^{n.s.}	12,1665 ^{n.s.}	122892,9594 ^{n.s.}
S x F x D	3	44,1731 ^{n.s.}	15564,0700*	729,9955 ^{n.s.}	4,7160 ^{n.s.}	119259,0678 ^{n.s.}
D/S=1/F=1	3		12094,3550 ^{n.s.}	-	-	-
D/S=1/F=2	3		31,3383 ^{n.s.}	-	-	-
D/S=2/F=1	3		-	-	-	-
D/S=2/F=2	3		-	-	-	-
Resíduo	30	100,0089	4958,489	5623,203	14,7444	87308,74

Quadro 2A. Quadrado médio da análise de variância para teores os semi-totais de Pb, Cd, Cu, Cr, Fe, Mn, Ni, Ti, V e Zn nos solos, na profundidade de 18-25 cm, após o cultivo com milho.

FV	GL	Pb	Cd	Cu	Cr	Fe
Bloco (B)	2	3,5099 ^{n.s.}	0,2835 ^{n.s.}	4,1119 ^{n.s.}	36,7693 ^{n.s.}	950042,9173 ^{n.s.}
Solo (S)	1	8027,6009**	5,7622**	4734,8318**	34302,3022**	23075759175,6048**
Fosfogesso (F)	1	0,0416 ^{n.s.}	0,0503 ^{n.s.}	35,3147 ^{n.s.}	43,8494 ^{n.s.}	41210,8319 ^{n.s.}
Dose (D)	3	4,1480 ^{n.s.}	0,2455 ^{n.s.}	8,6483 ^{n.s.}	14,5795 ^{n.s.}	138571,5081 ^{n.s.}
S x F	1	23,8076 ^{n.s.}	0,2574 ^{n.s.}	35,3147 ^{n.s.}	61,1758 ^{n.s.}	988613,4048 ^{n.s.}
S x D	3	10,9555 ^{n.s.}	0,0900 ^{n.s.}	8,6483 ^{n.s.}	17,7632 ^{n.s.}	1340928,9374 ^{n.s.}
F x D	3	7,6675 ^{n.s.}	0,1008 ^{n.s.}	5,9128 ^{n.s.}	102,8093*	1376025,2469 ^{n.s.}
D/F=1	3	-	-	-	69,6274 ^{n.s.}	-
D/F=2	3	-	-	-	47,7614 ^{n.s.}	-
S x F x D	3	15,2358 ^{n.s.}	0,4984 ^{n.s.}	5,9128 ^{n.s.}	75,2574 ^{n.s.}	1898678,1963 ^{n.s.}
Resíduo	30	11,4834	0,1942	11,0047	26,2599	1284611
FV	GL	Mn	Ni	Ti	V	Zn
Bloco (B)	2	29,8674 ^{n.s.}	31,1299 ^{n.s.}	14840,802 ^{n.s.}	10,0237 ^{n.s.}	34,6091 ^{n.s.}
Solo (S)	1	580364,2134**	14518,2767**	82798,6771**	188330,1058**	34599,0671**
Fosfogesso (F)	1	38,9078 ^{n.s.}	6,3459 ^{n.s.}	982,368 ^{n.s.}	2,3997 ^{n.s.}	94,3585 ^{n.s.}
Dose (D)	3	15,1323 ^{n.s.}	5,6476 ^{n.s.}	5427,605 ^{n.s.}	17,1793 ^{n.s.}	78,9015 ^{n.s.}
S x F	1	16,4683 ^{n.s.}	6,3459 ^{n.s.}	5419,858 ^{n.s.}	14,4403 ^{n.s.}	388,9594 ^{n.s.}
S x D	3	45,1727 ^{n.s.}	5,6476 ^{n.s.}	3489,306 ^{n.s.}	1,8634 ^{n.s.}	77,4390 ^{n.s.}
F x D	3	98,3608 ^{n.s.}	14,2437 ^{n.s.}	10572,231 ^{n.s.}	15,4363 ^{n.s.}	100,4250 ^{n.s.}
S x F x D	3	257,4856 ^{n.s.}	14,2437 ^{n.s.}	6764,963 ^{n.s.}	26,2316 ^{n.s.}	192,7234 ^{n.s.}
Resíduo	30	97,1218	10,6364	5675,323	18,3161	160,7204

Quadro 3A. Quadrado médio da análise de variância para os teores semi-totais de Pb, Cd, Cu, Cr, Fe, Mn, Ni, Ti, V e Zn nos solos tratados com fosfogesso, na profundidade de 0-18 cm, após o cultivo com soja.

FV	GL	Pb	Cd	Cu	Cr	Fe
Bloco (B)	2	86,7782**	86,5807**	131,4653 ^{n.s.}	148,0739 ^{n.s.}	18262652,3417 ^{n.s.}
Solo (S)	1	7309,6797**	15,9953**	11614,2103**	110801,9546**	28097888451,2109**
Fosfogesso (F)	1	31,3170*	12,1205*	11,2798 ^{n.s.}	367,1064 ^{n.s.}	11644712,8435 ^{n.s.}
Dose (D)	3	0,4734 ^{n.s.}	0,5240 ^{n.s.}	54,0238 ^{n.s.}	113,6519 ^{n.s.}	486465,2769 ^{n.s.}
S x F	1	17,0345 ^{n.s.}	7,5900 ^{n.s.}	11,2798 ^{n.s.}	376,7889 ^{n.s.}	4701877,8182 ^{n.s.}
S x D	3	2,2100 ^{n.s.}	0,4494 ^{n.s.}	54,0238 ^{n.s.}	98,3651 ^{n.s.}	2317706,1554 ^{n.s.}
F x D	3	1,3454 ^{n.s.}	0,6862 ^{n.s.}	113,2219 ^{n.s.}	18,8898 ^{n.s.}	6221112,8426 ^{n.s.}
S x F x D	3	1,3574 ^{n.s.}	0,7288 ^{n.s.}	113,2219 ^{n.s.}	109,7020 ^{n.s.}	11737885,8582 ^{n.s.}
Resíduo	30	5,1142	1,9573	85,2884	176,3509	10896453,5938

FV	GL	Mn	Ni	Ti	V	Zn
Bloco (B)	2	3191,2924**	19,2542 ^{n.s.}	19921,8905 ^{n.s.}	114,0284 ^{n.s.}	81,3360 ^{n.s.}
Solo (S)	1	729381,3106**	18361,9812**	364010,5648**	208617,1719**	29628,7782**
Fosfogesso (F)	1	1355,3155 ^{n.s.}	2,2383 ^{n.s.}	990,4903 ^{n.s.}	11,4977 ^{n.s.}	3,4040 ^{n.s.}
Dose (D)	3	199,3993 ^{n.s.}	5,5047 ^{n.s.}	1663,5575 ^{n.s.}	14,1867 ^{n.s.}	23,1710 ^{n.s.}
S x F	1	0,0000 ^{n.s.}	2,2383 ^{n.s.}	2100,1356 ^{n.s.}	0,0730 ^{n.s.}	0,6758 ^{n.s.}
S x D	3	53,9772 ^{n.s.}	5,5047 ^{n.s.}	3121,4548 ^{n.s.}	28,9703 ^{n.s.}	28,8365 ^{n.s.}
F x D	3	481,6361 ^{n.s.}	2,0337 ^{n.s.}	1138,0259 ^{n.s.}	36,4649 ^{n.s.}	54,3510 ^{n.s.}
S x F x D	3	750,0787 ^{n.s.}	2,0337 ^{n.s.}	11416,4569 ^{n.s.}	78,2800 ^{n.s.}	42,4100 ^{n.s.}
Resíduo	30	491,2052	8,57	6859,3096 ^{s.}	71,8281	54,3303

Quadro 4A. Quadrado médio da análise de variância para os teores semi-totais de Pb, Cd, Cu, Cr, Fe, Mn, Ni, Ti, V e Zn nos solos, na profundidade de 18-25 cm, após o cultivo com soja.

FV	GL	Pb	Cd	Cu	Cr	Fe
Bloco (B)	2	24,0174*	0,0629 ^{n.s.}	110,1885 ^{n.s.}	80,4338 ^{n.s.}	13907195,1440 ^{n.s.}
Solo (S)	1	7792,3684**	2,1407**	6659,1995**	75830,5242**	26478018800,8160**
Fosfogesso (F)	1	0,9501 ^{n.s.}	0,0128 ^{n.s.}	29,0012 ^{n.s.}	124,4285 ^{n.s.}	8214571,6042 ^{n.s.}
Dose (D)	3	3,4736 ^{n.s.}	0,4067 ^{n.s.}	8,8474 ^{n.s.}	32,7794 ^{n.s.}	1808668,0583 ^{n.s.}
S x F	1	29,2565*	0,0079 ^{n.s.}	29,0012 ^{n.s.}	0,2224 ^{n.s.}	3790724,2639 ^{n.s.}
S x D	3	14,9047 ^{n.s.}	0,5052 ^{n.s.}	8,8474 ^{n.s.}	27,9048 ^{n.s.}	11129428,2431 ^{n.s.}
F x D	3	9,7382 ^{n.s.}	0,0372 ^{n.s.}	1,6719 ^{n.s.}	98,8726 ^{n.s.}	1466257,5260 ^{n.s.}
S x F x D	3	42,2949**	0,0289 ^{n.s.}	1,6719 ^{n.s.}	222,2046 ^{n.s.}	11342250,9840 ^{n.s.}
D/S=1/F=1	3	42,8992**	-	-	-	-
D/S=1/F=2	3	11,7377 ^{n.s.}	-	-	-	-
D/S=2/F=1	3	14,3250 ^{n.s.}	-	-	-	-
D/S=2/F=2	3	1,4868 ^{n.s.}	-	-	-	-
Resíduo	30	5,1327	0,2065	36,5061	273,5928	11408066
FV	GL	Mn	Ni	Ti	V	Zn
Bloco (B)	2	2574,4358 ^{n.s.}	1,5715 ^{n.s.}	15683,9821 ^{n.s.}	40,5267 ^{n.s.}	789,9233*
Solo (S)	1	591218,9335**	15432,9208**	146704,6081**	209646,4583**	24291,7269**
Fosfogesso (F)	1	412,6098 ^{n.s.}	4,3708 ^{n.s.}	29859,3004 ^{n.s.}	18,7276 ^{n.s.}	303,3293 ^{n.s.}
Dose (D)	3	1935,9232 ^{n.s.}	4,5493 ^{n.s.}	8723,0614 ^{n.s.}	5,7139 ^{n.s.}	50,8264 ^{n.s.}
S x F	1	2066,6306 ^{n.s.}	4,3708 ^{n.s.}	2442,5371 ^{n.s.}	61,8489 ^{n.s.}	95,5964 ^{n.s.}
S x D	3	3927,9286 ^{n.s.}	4,5493 ^{n.s.}	4989,9188 ^{n.s.}	98,0997 ^{n.s.}	248,8184 ^{n.s.}
F x D	3	2346,0689 ^{n.s.}	3,4066 ^{n.s.}	3826,8829 ^{n.s.}	14,8036 ^{n.s.}	31,6686 ^{n.s.}
S x F x D	3	2738,3680 ^{n.s.}	3,4066 ^{n.s.}	4234,4000 ^{n.s.}	224,9984 ^{n.s.}	128,5615 ^{n.s.}
Resíduo	30	2562,429	14,8804	13000,6	96,9040	165,6109

Quadro 5A. Quadrado médio da análise de variância para os teores de Cu, Fe, Mn, Ti, V e Zn extraídos pelo extrator Mehlich 3 nos solos antes do cultivo com milho.

FV	GL	Cu	Fe	Mn	Ti	V	Zn
Bloco (B)	2	0,0001 ^{n.s.}	3,4248*	1,1307**	0,0031 ^{n.s.}	0,0002 ^{n.s.}	3,87E-05 ^{n.s.}
Solo (S)	1	0,0004 ^{n.s.}	221,9210**	128,1768**	0,0826**	0,0477**	0,0404**
Fosfogesso (F)	1	0,0003 ^{n.s.}	0,9421 ^{n.s.}	0,1199 ^{n.s.}	0,0025 ^{n.s.}	0,0001 ^{n.s.}	0,0001 ^{n.s.}
Dose (D)	3	0,0006 ^{n.s.}	1,6585 ^{n.s.}	0,0543 ^{n.s.}	0,0019 ^{n.s.}	7,12E-05 ^{n.s.}	9,82E-05 ^{n.s.}
S X F	1	0,0010 ^{n.s.}	0,0003 ^{n.s.}	0,1345 ^{n.s.}	0,0082 ^{n.s.}	0,0004*	4,49E-07 ^{n.s.}
F/S=1	1	-	-	-	-	0,0005*	-
F/S=2	1	-	-	-	-	4,13E-05 ^{n.s.}	-
S X D	3	0,0005 ^{n.s.}	0,6986 ^{n.s.}	0,0747 ^{n.s.}	0,0047 ^{n.s.}	2,96E-05 ^{n.s.}	0,0002 ^{n.s.}
D/S=1	3	-	-	-	-	-	-
D/S=2	3	-	-	-	-	-	-
F X D	3	0,0007 ^{n.s.}	3,1506*	0,0798 ^{n.s.}	0,0039 ^{n.s.}	0,0002 ^{n.s.}	0,0012*
D/F=1	3	-	1,7517 ^{n.s.}	-	-	-	0,0008 ^{n.s.}
D/F=2	3	-	3,0574*	-	-	-	0,0004 ^{n.s.}
S X F X D	3	0,0002 ^{n.s.}	1,4831 ^{n.s.}	0,0135 ^{n.s.}	0,0023 ^{n.s.}	0,0001 ^{n.s.}	0,0004 ^{n.s.}
Resíduo	30	0,0003	0,9354	0,0881	0,0031	9,80E-05	0,0003

Quadro 6A. Quadrado médio da análise de variância para os teores de Cu, Fe, Mn, Ti, V e Zn extraídos pelo extrator Mehlich 3 nos solos antes do cultivo com soja.

FV	GL	Cu	Fe	Mn	Ti	V	Zn
Bloco (B)	2	0,0017**	3,1978*	4,6822**	0,0153	3,93E-05 ^{n.s.}	0,0027**
Solo (S)	1	0,0059**	181,3288**	120,6913**	0,0861**	0,0475**	0,0544**
Fosfogesso (F)	1	0,0001 ^{n.s.}	1,1590 ^{n.s.}	0,0082 ^{n.s.}	0,0006 ^{n.s.}	2,46E-06 ^{n.s.}	8,80E-06 ^{n.s.}
Dose (D)	3	0,0001 ^{n.s.}	1,6845 ^{n.s.}	0,0995 ^{n.s.}	0,0019 ^{n.s.}	2,06E-05 ^{n.s.}	0,0002 ^{n.s.}
S X F	1	0,0004 ^{n.s.}	0,1114 ^{n.s.}	0,0627 ^{n.s.}	0,0109 ^{n.s.}	1,75E-05 ^{n.s.}	2,13E-06 ^{n.s.}
S X D	3	0,0002 ^{n.s.}	1,7826 ^{n.s.}	0,1204 ^{n.s.}	0,0047 ^{n.s.}	1,80E-05 ^{n.s.}	0,0002 ^{n.s.}
F X D	3	7,73E-07 ^{n.s.}	1,2766 ^{n.s.}	0,0118 ^{n.s.}	0,0030 ^{n.s.}	5,97E-06 ^{n.s.}	0,0004 ^{n.s.}
S X F X D	3	2,23E-05 ^{n.s.}	1,4836 ^{n.s.}	0,1303 ^{n.s.}	0,0025 ^{n.s.}	0,0001 ^{n.s.}	0,0003 ^{n.s.}
Resíduo	30	0,0002	0,6612	0,065	0,0029	3,39E-05	0,0005

Quadro 7A. Quadrado médio da análise de Variância para os fatores de transferência de Cr, Fe, Mn e Ti na cultura do milho cultivada em dois solos (LVA e LA) tratados com os fosfogessos A e B.

FV	GL	Cr	Fe	Mn	Ti
Bloco (B)	2	0,0003 ^{n.s.}	2,16E-07 ^{n.s.}	0,0002 ^{n.s.}	2,82E-08 ^{n.s.}
Solo (S)	1	0,0866**	1,95E-05**	0,1563**	5,12E-06**
Fosfogesso (F)	1	0,0001 ^{n.s.}	3,01E-07 ^{n.s.}	0,0006 ^{n.s.}	3,36E-08 ^{n.s.}
Dose (D)	3	0,0002 ^{n.s.}	2,04E-08 ^{n.s.}	0,0005 ^{n.s.}	3,38E-08 ^{n.s.}
S x F	1	0,0000 ^{n.s.}	6,52E-07 ^{n.s.}	0,0007 ^{n.s.}	1,59E-08 ^{n.s.}
S x D	3	0,0002 ^{n.s.}	1,50E-07 ^{n.s.}	0,0004 ^{n.s.}	1,72E-07 ^{n.s.}
G x D	3	0,0008 ^{n.s.}	1,93E-07 ^{n.s.}	0,0012*	1,13E-07 ^{n.s.}
S x F x D	3	0,0003 ^{n.s.}	1,53E-07 ^{n.s.}	0,0010*	1,07E-07 ^{n.s.}
D/S=1/F=1	3	-	-	0,0000 ^{n.s.}	-
D/S=1/F=2	3	-	-	0,0000 ^{n.s.}	-
D/S=2/F=1	3	-	-	0,0004 ^{n.s.}	-
D/S=2/F=2	3	-	-	0,0027**	-
Resíduo	30	0,0003	1,58E-07	0,0003	1,19E-07

Quadro 8A. Quadrado médio da análise de Variância para os fatores de transferência de Cu, Fe, Mn, Ni e V na cultura da soja cultivada em dois solos (LVA e LA) tratados com os fosfogessos A e B.

FV	GL	Cu	Fe	Mn	Ni	V
Bloco (B)	2	0,0464 ^{n.s.}	4,11E-06 ^{n.s.}	0,0299 ^{n.s.}	0,0017 ^{n.s.}	6,86E-05 ^{n.s.}
Solo (S)	1	2,4631**	1,21E-04**	2,8590**	0,3654**	0,0068**
Fosfogesso (F)	1	0,0025 ^{n.s.}	1,57E-05*	0,0362 ^{n.s.}	0,0000 ^{n.s.}	0,0003**
Dose (D)	3	0,0020 ^{n.s.}	3,45E-06 ^{n.s.}	0,0026 ^{n.s.}	0,0028 ^{n.s.}	0,000 ^{n.s.}
S x F	1	0,0025 ^{n.s.}	2,45E-05**	0,0267 ^{n.s.}	0,0000 ^{n.s.}	0,0006**
F/S=1	1	-	4,87E-07 ^{n.s.}	-	-	2,41E-05 ^{n.s.}
F/S=2	1	-	3,97E-05**	-	-	0,0008**
S x D	3	0,0020 ^{n.s.}	3,35E-06 ^{n.s.}	0,0091 ^{n.s.}	0,0028 ^{n.s.}	4,74E-05 ^{n.s.}
F x D	3	0,0159 ^{n.s.}	3,48E-06 ^{n.s.}	0,0164 ^{n.s.}	0,0030 ^{n.s.}	3,61E-05 ^{n.s.}
S x F x D	3	0,0159 ^{n.s.}	3,90E-06 ^{n.s.}	0,0123 ^{n.s.}	0,0030 ^{n.s.}	0,0001 ^{n.s.}
Resíduo	30	0,0265	2,52E-06	0,0152	0,0026	3,30E-05

Quadro 9A. Quadrado médio da análise de variância para o conteúdo de Cd, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb, Ti, V e Zn nos extratos lixiviados dos solos cultivados com milho e tratados com os fosfogessos A e B após 90 dias de experimentação.

FV	GL	Cd	Cu	Cr	Fe	Mn	Ti	V	Zn
Bloco (B)	2	9,43E-06 ^{n.s.}	0,0002 ^{n.s.}	3,37E-05 ^{n.s.}	0,0504 ^{n.s.}	29,8513**	0,0007 ^{n.s.}	0,0005 ^{n.s.}	0,0027 ^{n.s.}
Solo (S)	1	0,0061**	0,1077**	0,0107**	1,4088**	430,0999**	0,0077*	0,1103**	0,0128 ^{n.s.}
Fosfogesso (F)	1	0,0007**	0,0180**	0,0015**	1,0535**	4,7097 ^{n.s.}	0,0084**	0,0039**	0,0537**
Dose (D)	3	1,72E-05 ^{n.s.}	0,0004 ^{n.s.}	3,41E-05 ^{n.s.}	0,0962 ^{n.s.}	56,2558**	0,0011 ^{n.s.}	0,0019**	0,0032 ^{n.s.}
S x F	1	0,0005**	0,0118**	0,0011**	0,0033 ^{n.s.}	22,2503*	0,0029 ^{n.s.}	0,0060**	0,0624**
F/S=1	1	1,21E-05 ^{n.s.}	0,0003 ^{n.s.}	2,18E-05 ^{n.s.}	-	3,2432 ^{n.s.}	-	-	0,0002 ^{n.s.}
F/S=2	1	0,0012**	0,0295**	0,0026**	-	23,7169**	-	-	0,1160**
S x D	3	2,71E-05 ^{n.s.}	0,0006 ^{n.s.}	0,0001 ^{n.s.}	0,1035 ^{n.s.}	29,5774**	0,0002 ^{n.s.}	0,0002 ^{n.s.}	0,0050 ^{n.s.}
D/S=1	3	-	-	-	-	7,4633 ^{n.s.}	-	-	-
D/S=2	3	-	-	-	-	78,3700**	-	-	-
F x D	3	2,32E-05 ^{n.s.}	0,0007 ^{n.s.}	0,0001 ^{n.s.}	0,2467 ^{n.s.}	5,1294 ^{n.s.}	0,0005 ^{n.s.}	0,0005 ^{n.s.}	0,0047 ^{n.s.}
S x F x D	3	3,27E-05 ^{n.s.}	0,0006 ^{n.s.}	0,0001 ^{n.s.}	0,0787 ^{n.s.}	0,9758 ^{n.s.}	0,0005 ^{n.s.}	0,0011*	0,0045 ^{n.s.}
D/S=1/F=1	3	-	-	-	-	-	-	0,0006 ^{n.s.}	-
D/S=1/F=2	3	-	-	-	-	-	-	0,0010 ^{n.s.}	-
D/S=2/F=1	3	-	-	-	-	-	-	0,0002 ^{n.s.}	-
D/S=2/F=2	3	-	-	-	-	-	-	0,0020 ^{n.s.}	-
Resíduo	30	0	0,0005	4,33E-05	0,0924	2,9975	0,0011	0,0003	0,0042

Quadro 10A. Quadrado médio da análise de variância para o conteúdo de Pb, Cd, Cu, Cr, Fe, Mn, Ni, Ti, V e Zn nos extratos lixiviados dos solos cultivados com soja e tratados com os fosfogessos A e B após 90 dias de experimentação.

FV	GL	Pb	Cd	Cu	Cr	Fe	Mn	Ni	Ti	V	Zn
Bloco (B)	2	0,0017 ^{n.s.}	0,0001 ^{n.s.}	0,0006 ^{n.s.}	0,0001 ^{n.s.}	18,5355 ^{n.s.}	45,3094 ^{n.s.}	0,0096 ^{n.s.}	1,92E-05 ^{n.s.}	0,0010 ^{n.s.}	0,2611 ^{n.s.}
Solo (S)	1	0,0361*	0,0003n.s.	0,0065n.s.	0,0002n.s.	804,0745**	562,2506**	0,0575n.s.	0,0002n.s.	0,0002n.s.	14,2255**
Fosfogesso (F)	1	0,0006n.s.	2,02E-06n.s.	1,76E-05n.s.	3,25E-05n.s.	25,6087n.s.	68,8712n.s.	0,0020n.s.	0,0019n.s.	0,0012n.s.	0,8360n.s.
Dose (D)	3	0,0151*	0,0003 ^{n.s.}	0,0071 ^{n.s.}	0,0004 ^{n.s.}	158,0606**	583,1414**	0,1965**	0,0010 ^{n.s.}	0,0008 ^{n.s.}	3,8546**
S x F	1	0,0086 ^{n.s.}	0,0001 ^{n.s.}	0,0010 ^{n.s.}	4,10E-05 ^{n.s.}	142,8667**	208,0561 ^{n.s.}	0,1042*	0,0007 ^{n.s.}	0,0015 ^{n.s.}	1,8257 ^{n.s.}
F/S=1	1	-	-	-	-	23,7511 ^{n.s.}	-	0,0386 ^{n.s.}	-	-	-
F/S=2	1	-	-	-	-	144,7243**	-	0,0676 ^{n.s.}	-	-	-
S x D	3	0,0083 ^{n.s.}	7,37E-06 ^{n.s.}	0,0004 ^{n.s.}	0,0001 ^{n.s.}	2,9161 ^{n.s.}	25,1361 ^{n.s.}	0,0130 ^{n.s.}	0,0002 ^{n.s.}	0,0017 ^{n.s.}	1,2120 ^{n.s.}
F x D	3	0,0013 ^{n.s.}	4,97E-05 ^{n.s.}	0,0018 ^{n.s.}	0,0001 ^{n.s.}	105,5123**	296,9631**	0,0918**	0,0004 ^{n.s.}	0,0006 ^{n.s.}	0,9257 ^{n.s.}
D/F=1	3	-	-	-	-	68,6570*	230,5501*	0,0539*	-	-	-
D/F=2	3	-	-	-	-	194,9160**	649,5544**	0,2343**	-	-	-
S x G x D	3	0,0171*	0,0002 ^{n.s.}	0,0016 ^{n.s.}	0,0004 ^{n.s.}	28,2353 ^{n.s.}	83,4671 ^{n.s.}	0,0075 ^{n.s.}	0,0005 ^{n.s.}	0,0028 ^{n.s.}	0,7861 ^{n.s.}
D/S=1/F=1	3	0,0081 ^{n.s.}	-	-	-	-	-	-	-	-	-
D/S=1/F=2	3	0,0060 ^{n.s.}	-	-	-	-	-	-	-	-	-
D/S=2/F=1	3	0,0072 ^{n.s.}	-	-	-	-	-	-	-	-	-
D/S=2/F=2	3	0,0205*	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Resíduo	30	0,005	0,0001	0,0027	0,0002	16,5278	57,1652	0,0179	0,0005	0,0017	0,7089