

JUSCIMAR DA SILVA

**AVALIAÇÃO DO POTENCIAL AGRONÔMICO E DE CONTAMINAÇÃO
AMBIENTAL DECORRENTE DO USO DE UMA ESCÓRIA DE ACIARIA
COMO CORRETIVO E FERTILIZANTE DE SOLOS**

Tese apresentada a 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
2003

**Ficha catalográfica preparada pela Seção de Catalogação e
Classificação da Biblioteca Central da UFV**

T

S586a
2003

Silva, Juscimar da, 1977-

Avaliação do potencial agrônomo e de contaminação ambiental decorrente do uso de uma escória de aciaria como corretivo e fertilizante de solos / Juscimar da Silva. – Viçosa : UFV, 2003.
xix, 134f. : il. ; 29cm.

Orientador: Jaime Wilson Vargas de Mello.
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa

Inclui bibliografia e apêndice.

1. Solos - Correção. 2. Adubos e fertilizantes. 3. Resíduos industriais - Lixiviação. 4. Solos - Poluição. 5. Solos - Teor de metal pesado. 6. Química do solo. I. Universidade Federal de Viçosa. II. Título.


CDD 20.ed. 631.821

JUSCIMAR DA SILVA


**AVALIAÇÃO DO POTENCIAL AGRONÔMICO E DE CONTAMINAÇÃO
AMBIENTAL DECORRENTE DO USO DE UMA ESCÓRIA DE ACIARIA
COMO CORRETIVO E FERTILIZANTE DE SOLOS**

Tese apresentada a 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*.

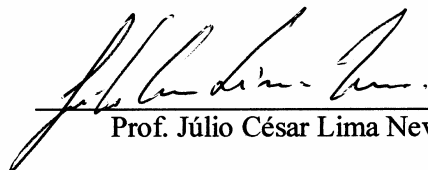
APROVADA: 20 de novembro de 2003.



Prof. Luiz Eduardo Dias
(Conselheiro)



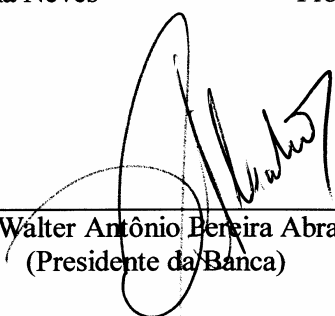
Prof. Maurício Paulo Ferreira Fontes



Prof. Júlio César Lima Neves



Prof. Cláudio Pereira Jordão



Prof. Walter Antônio Pereira Abrahão
(Presidente da Banca)

Aos meus pais, Amado e Maria, pela vida,
pela educação e pelo amor.

À Ângela, pelos momentos de companheirismo
e pela convivência.

Aos meus irmãos, Rita, I tamar e Gislene,
pelo carinho e pela compreensão.

À toda minha família e aos meus amigos.

“... Herdarás o Solo Sagrado e a fertilidade será transmitida de geração em geração. Protegerás teus campos contra a erosão e tuas florestas contra a desolação. Impedirás que tuas fontes sequem e que teus campos sejam devastados pelo gado. Para que teus descendentes tenham abundância para sempre...”

Oração do Agrônomo

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela vida e pela paz, nos momentos de dificuldade, pela calma na hora de decidir o que é certo ou errado e pela sabedoria, nas tomadas de decisões.

À Universidade Federal de Viçosa, especialmente ao Departamento de Solos, pela oportunidade de realização do curso.

À Companhia Siderúrgica de Tubarão (CST), pelo financiamento do projeto e das viagens aos eventos para divulgação dos resultados obtidos.

À FAPEMIG, pela concessão da bolsa de estudo.

Ao professor Jaime Wilson Vargas de Mello e Walter Antônio Pereira Abrahão, pela amizade, pelos conhecimentos e ensinamentos transmitidos, pela colaboração e pelos incentivos incondicionais em diversas etapas, desde a iniciação científica até o curso de pós-graduação.

Aos membros da banca examinadora, professores Luiz Eduardo Dias, Maurício Paulo Ferreira Fontes, Júlio César Lima Neves e Cláudio Pereira Jordão, que contribuíram para o melhoramento deste trabalho.

Ao professor Victor Hugo Alvarez Venegas, pelo apoio, pelos ensinamentos e pelo exemplo de pessoa e profissionalismo.

Aos demais professores, colegas de curso e a todos os funcionários do Departamento de Solos, pela convivência, pelas críticas, pela colaboração e amizade.

Ao Mauro, pela amizade, pela oportunidade de trabalho e pelos ensinamentos transmitidos.

Aos amigos desde a época de estúdio, Augusto, D'artagnan e Geraldo Robésio.

A todos os amigos e colegas da graduação, em especial ao Bruno (Berí), Marcelo (Lobão), Denílson, Fabiana (Fabis), João Pedro (Johnson), Uelington, Léo (Chock) e Douglas, pelo convívio e pela amizade.

A todos que, de alguma forma, contribuíram para realização deste trabalho.

BIOGRAFIA

JUSCIMAR DA SILVA, filho de Amado Francisco da Silva e Maria da Conceição Silva, nasceu em 4 de agosto de 1977, em Viçosa-MG.

Em maio de 2002, graduou-se em Engenharia Agrônômica, pela Universidade Federal de Viçosa e, em abril do mesmo ano, iniciou, nesta mesma instituição, o Programa de Pós-Graduação, em nível de Mestrado, em Solos e Nutrição de Plantas.

Em março de 2004, iniciou o Programa de Pós-Graduação, em nível de Doutorado, em Solos e Nutrição de Plantas.

CONTEÚDO

	Página
LISTA DE QUADROS.....	ix
LISTA DE FIGURAS	xiv
RESUMO	xvi
ABSTRACT.....	xviii
CAPÍTULO 1.....	1
COMPOSIÇÃO QUÍMICA, CLASSIFICAÇÃO QUANTO À PERICU- LOSIDADE E AVALIAÇÃO DO POTENCIAL CORRETIVO DA ESCÓRIA DE ACIARIA.....	1
1. INTRODUÇÃO	1
2. MATERIAL E MÉTODOS	5
2.1. Corretivos.....	5
2.2. Solos.....	6
2.3. Avaliação do potencial corretivo da escória	7
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	9
3.1. Caracterização química da escória	9
3.2. Classificação da escória quanto à periculosidade	11
3.2.1. Teste de solubilização	11
3.2.2. Teste de lixiviação.....	11
3.2.3. Avaliação do potencial corretivo da escória	13
4. CONCLUSÕES	19
5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	20

	Página
CAPÍTULO 2.....	24
RESPOSTA DA PLANTA DE SORGO AO USO DA ESCÓRIA COMO CORRETIVO DA ACIDEZ DO SOLO	24
1. INTRODUÇÃO	24
2. MATERIAL E MÉTODOS	26
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	29
4. CONCLUSÕES	42
5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	43
CAPÍTULO 3.....	45
RESPOSTA DAS PLANTAS AO USO DA ESCÓRIA COMO FERTILIZANTE FOSFATADO E FONTE DE ZINCO.....	45
1. INTRODUÇÃO	45
2. MATERIAL E MÉTODOS	48
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	50
4. CONCLUSÕES	61
5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	62
CAPÍTULO 4.....	64
DISPONIBILIDADE E MOBILIDADE DE METAIS NOS SOLOS TRATADOS COM ESCÓRIA DE ACIARIA.....	64
1. INTRODUÇÃO	64
2. MATERIAL E MÉTODOS	68
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	74
3.1. Biodisponibilidade de metais	74
3.2. Fracionamento do Cr.....	80
3.3. Lixiviação do solo com água.....	84
3.4. Lixiviação ácida	96
4. CONCLUSÕES	114
5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	115
CONCLUSÕES GERAIS	119
APÊNDICE.....	121

LISTA DE QUADROS

Página

CAPÍTULO 1

1	Especificações da programação utilizada na digestão da amostra de escória utilizando forno de microondas	6
2	Composição química e física das amostras de solo utilizadas no experimento. Valores médios (três repetições)	7
3	Análise química da escória de aciaria com granulometria inferior a 1 mm e de 2 a 10 mm da Cia. Siderúrgica de Tubarão. Valores médios (três repetições) \pm erro padrão da média	10
4	Valores de metais da escória de aciaria, nas diferentes granulometrias, obtidos após serem submetidas a testes de solubilização de resíduos sólidos. Valores médios (três repetições) \pm erro padrão da média	12
5	Análise de variância para pH, Ca^{2+} e Al^{3+} nos solos, aos 42 dias, após o início do período de incubação	17

CAPÍTULO 2

1	Valores de pH e teores de Al^{3+} , Ca^{2+} , Mg^{2+} , P, K, Zn, Fe, Mn, Cu, Ni e Cd presentes nas amostras de solos antes e após o cultivo com sorgo, para os diferentes tratamentos do experimento sobre o uso da escória como corretivo. Valores médios (três repetições) \pm erro padrão da média	30
---	--	----

2	Análise de variância para pH, Ca, Mg, P, K, Zn, Fe, Mn, Cu, Ni e Cd nos solos, antes do plantio do sorgo, do experimento sobre “Uso de Escória como Corretivo de Solos”	34
3	Análise de variância para matéria seca (MS) e teores de Ca, Mg, P, K, Zn, Fe, Mn, Cu, Ni e Cd nas plantas de sorgo do experimento sobre “Uso de Escória como Corretivo de Solos”	36
4	Produção de matéria seca (MS) e teores de Ca, Mg, P, K, Zn, Fe, Mn, Cu, Ni e Cd em plantas de sorgo após 45 dias de cultivo, para os diferentes tratamentos utilizados no experimento sobre o uso da escória como corretivo. Valores médios (três repetições) ± erro padrão da média	37

CAPÍTULO 3

1	Valores de pH e teores de Al^{3+} , Ca^{2+} , Mg^{2+} , P, K, Zn, Fe, Mn, Cu, Ni e Zn presentes nas amostras de solos, antes e após o cultivo com sorgo, para os diferentes tratamentos do experimento sobre o uso da escória como fertilizante fosfatado e fonte de zinco. Valores médios (três repetições) ± erro padrão da média	51
2	Análise de variância para pH, Ca, Mg, P, K, Zn, Fe, Mn e Cu nos solos, antes do plantio do sorgo, do experimento sobre “Uso de Escória como Fertilizante”	54
3	Análise de variância para pH, Ca, Mg, P, K, Zn, Fe, Mn e Cu nos solos, após o plantio do sorgo, do experimento sobre “Uso de Escória como Fertilizante”	54
4	Produção de matéria seca (MS) e teores de Ca, Mg, P, K, Zn, Fe, Mn e Cu em plantas de sorgo após 45 dias de cultivo, para os diferentes tratamentos utilizados no experimento sobre o uso da escória como fertilizante fosfatado e fonte de zinco. Valores médios (três repetições) ± erro padrão da média	56

CAPÍTULO 4

1	Esquema utilizado para o fracionamento de Cr	71
2	Teores totais de metais presentes nos solos, obtidos por ataque triácido, após o cultivo com alfaca. Valores médios (três repetições) ± erro padrão da média	75
3	Análise de variância e contrastes entre as médias dos teores totais de metais nos solos obtidos por ataque triácido, após o cultivo com plantas de alfaca	76

	Página
4	Produção de matéria seca (MS) e teores de Ca, Mg, P, K, Zn, Fe, Mn, Cu, Ni, Cd, Pb e Cr em plantas de alface. Valores médios (três repetições) ± erro padrão da média 78
5	Análise de variância para produção de matéria seca (MS) e teores de Ca, Mg, P, K, Zn, Fe, Mn, Cu, Ni, Cd, Pb e Cr em plantas de alface 79
6	Valores de pH e distribuição de Cr em cada fração da extração seqüencial, realizada no LVA e no LA. Valores médios (três repetições) ± erro padrão da média 81
7	Análise de variância e contrastes estabelecidos para o teor de cromo total nas amostras submetidas a diferentes níveis de escória de aciaria... 82
8	Valores de pH dos solos, antes e depois da etapa de lixiviação com água, utilizados no experimento de disponibilidade e mobilidade de metais. Valores médios (três repetições) ± erro padrão da média..... 84
9	Teores de Ca determinados por espectrofotometria de emissão por plasma induzido (ICP – OES), em amostras de lixiviados, ao longo de 105 dias de teste de lixiviação com água. Valores médios (três repetições) ± erro padrão da média 88
10	Teores de Mg determinados por espectrofotometria de emissão por plasma induzido (ICP – OES), em amostras de lixiviados, ao longo de 105 dias de teste de lixiviação com água. Valores médios (três repetições) ± erro padrão da média 91
11	Análise de variância para Ca e Mg nos lixiviados coletados no decorrer de 105 dias de ensaio de lixiviação com água 94
12	Valores de pH dos solos, antes e depois da etapa de lixiviação com solução de ácido acético 0,001 mol L ⁻¹ , utilizados no experimento de disponibilidade e mobilidade de metais. Valores médios (três repetições) ± erro padrão da média 97
13	Teores de Zn determinados por espectrofotometria de emissão por plasma induzido (ICP – OES), em amostras de lixiviados, ao longo de 35 dias de teste de lixiviação, com solução de ácido acético 0,001 mol L ⁻¹ . Valores médios (três repetições) ± erro padrão da média 98
14	Teores de Cu determinados por espectrofotometria de emissão por plasma induzido (ICP – OES), em amostras de lixiviados, ao longo de 35 dias de teste de lixiviação. Valores médios (três repetições) ± erro padrão da média 99

15	Teores de Fe determinados por espectrofotometria de emissão por plasma induzido (ICP – OES), em amostras de lixiviados, ao longo de 119 dias de teste de lixiviação. Valores médios (três repetições) ± erro padrão da média	100
16	Teores de Cu determinados por espectrofotometria de emissão por plasma induzido (ICP – OES), em amostras de lixiviados, ao longo de 105 dias de teste de lixiviação. Valores médios (três repetições) ± erro padrão da média	103
17	Teores de Ca determinados por espectrofotometria de emissão por plasma induzido (ICP – OES), em amostras de lixiviados, ao longo de 119 dias de teste de lixiviação com solução de ácido acético 0,001 mol L ⁻¹ . Valores médios (três repetições) ± erro padrão da média	106
18	Teores de Mg determinados por espectrofotometria de emissão por plasma induzido (ICP – OES), em amostras de lixiviados, ao longo de 119 dias de teste de lixiviação, com solução de ácido acético 0,001 mol L ⁻¹ . Valores médios (três repetições) ± erro padrão da média. Valores médios (três repetições) ± erro padrão da média	109
19	Análise de variância para Ca e Mg nos lixiviados, coletados no decorrer de 119 dias de ensaio de lixiviação com solução de ácido acético 0,001 mol L ⁻¹	112

APÊNDICE A

1A	Teores de Zn determinados por espectrofotometria de emissão por plasma induzido (ICP – OES), em amostras de lixiviados, ao longo de 105 dias de teste de lixiviação com água. Valores médios (três repetições) ± erro padrão da média	122
2A	Teores de Cu determinados por espectrofotometria de emissão por plasma induzido (ICP – OES), em amostras de lixiviados, ao longo de 105 dias de teste de lixiviação com água. Valores médios (três repetições) ± erro padrão da média	125
3A	Teores de Fe determinados por espectrofotometria de emissão por plasma induzido (ICP – OES), em amostras de lixiviados, ao longo de 105 dias de teste de lixiviação com água. Valores médios (três repetições) ± erro padrão da média	128
4A	Teores de Mn determinados por espectrofotometria de emissão por plasma induzido (ICP – OES), em amostras de lixiviados, ao longo de 105 dias de teste de lixiviação com água. Valores médios (três repetições) ± erro padrão da média	131

5A	Quantidade de corretivo utilizada para neutralizar a acidez dos solos, calculada com base no P.N. dos corretivos e da acidez potencial dos solos. Valores médios (três repetições).....	134
----	---	-----

LISTA DE FIGURAS

Página

CAPÍTULO 1

- 1 Valores de pH das amostras de Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA) e Latossolo Amarelo (LA), incubadas com quatro doses de CaCO_3 , escória < 1 mm e escória de 2 a 10 mm, em função do tempo 14
- 2 Valores de teor de Ca^{2+} das amostras de Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA) e Latossolo Amarelo (LA), incubadas com quatro doses de CaCO_3 , escória < 1 mm e escória de 2 a 10 mm, em função do tempo ... 15
- 3 Valores de teor de Al^{3+} das amostras de Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA) e Latossolo Amarelo (LA), incubadas com quatro doses de CaCO_3 , escória < 1 mm e escória de 2 a 10 mm, em função do tempo ... 16
- 4 Valores de pH e teores de Ca^{2+} e Al^{3+} após 42 dias de incubação das amostras do LVA e do LA com CaCO_3 , escória < 1,0 mm e escória 2,0 a 10,0 mm..... 19

CAPÍTULO 2

- 1 Valores de pH e teores de Ca^{2+} e Mg^{2+} presentes nas amostras de solos antes do cultivo com sorgo, para os diferentes tratamentos do experimento sobre uso da escória como corretivo 33

CAPÍTULO 3

- 1 Produção de matéria seca e teores de Ca, Mg, P, K, Zn, Fe, Mn e Cu na parte aérea das plantas de sorgo, em função das doses de fertilizantes aplicadas nos solos 58

CAPÍTULO 4

1	Distribuição do Cr em cada fração da extração seqüencial, realizada nas amostras do Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA) e Latossolo Amarelo (LA), tratados com diferentes níveis de escória de aciaria	83
2	Distribuição do Cr em cada fração da extração seqüencial realizada da amostra da escória de aciaria.....	83
3	Modelo aproximativo para expressar a mobilização do Ca e Mg acumulados ao longo de 105 dias de ensaio de lixiviação com água, em função dos níveis de corretivo aplicadas no solo	95
4	Varição média de pH dos lixiviados, em ambos os solos tratados com níveis crescentes de CaCO ₃ e escória, coletados no decorrer dos 119 dias de ensaio de mobilização de metais	104
5	Modelo aproximativo para expressar a mobilização do Ca e Mg acumulado, ao longo de 105 dias de ensaio de lixiviação com solução de ácido acético 0,001 mol L ⁻¹ , em função dos níveis de corretivo aplicadas no solo	113

RESUMO

SILVA, Juscimar, M.S., Universidade Federal de Viçosa, novembro de 2003.
Avaliação do Potencial Agronômico e de Contaminação Ambiental Decorrente do Uso de uma Escória de Aciaria como Corretivo e Fertilizante de Solos.
Orientador: Jaime Wilson Vargas de Mello. Conselheiros: Walter Antônio Pereira Abrahão e Luiz Eduardo Dias.

A reciclagem de materiais industriais ou de mineração, disponíveis para uso na agricultura, é assunto já bem estudado em diversos países, mas no Brasil tem tido pouca ênfase. Os diferentes tipos de escória de siderurgia, com produção anual estimada de 3 milhões de toneladas, apresentam grande potencial de utilização na agricultura, porém estudos com esse propósito são pouco difundidos pela pesquisa nacional. Um dos grandes entraves ao uso generalizado deste resíduo em atividades agrossilviculturais é a presença de metais pesados, que presentes no solo em forma solúvel, são absorvidos por plantas envolvidas na cadeia trófica, podendo causar sérios problemas à saúde de animais e do homem. Desta forma, antes de qualquer recomendação são indispensáveis estudos detalhados sobre os possíveis impactos causados pelo uso desses resíduos na agricultura. Neste contexto, o presente trabalho teve como objetivo avaliar a utilização agrícola de uma escória de aciaria, proveniente da Companhia Siderúrgica de Tubarão (CST), como corretivo da acidez de solos e como fonte de fósforo e zinco para as plantas de sorgo (*Sorghum bicolor* L. Moench – variedade BR 300), bem como a contaminação de solos e plantas de alface (*Lactuca sativa* – variedade Regina-de-Verão) por metais pesados, decorrente do uso desse resíduo. Para atingir o objetivo supracitado, foi caracterizada quimicamente a escória em duas granulometrias (0 a

1 mm e 2 a 10 mm) e, com ela, foram realizados dois experimentos utilizando amostra de um Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA), textura argilo-arenosa e de um Latossolo Amarelo (LA), textura franco-arenosa, ambas coletadas no estado do Espírito Santo. O primeiro experimento de avaliação agrônômica do resíduo envolveu três etapas: 1ª etapa: avaliação do potencial corretivo da escória por meio de curvas de incubação; 2ª etapa: respostas das plantas ao uso da escória como corretivo de solos e a possível presença de metais em plantas; e 3ª etapa: respostas das plantas ao uso da escória como fertilizante fosfatado e fonte de zinco. O segundo experimento, no qual foi estudado o comportamento dos metais nos solos, avaliou a disponibilidade do Cr por meio de extrações seqüenciais e a mobilidade de metais quando os solos foram submetidos a lixiviações periódicas durante quatro meses com água deionizada e, posteriormente, com solução de ácido acético $0,001 \text{ mol L}^{-1}$, também durante quatro meses. A escória com granulometria inferior a 1 mm se mostrou eficiente para corrigir a acidez, neutralizar o alumínio tóxico dos solos e suprir as plantas com Ca e Mg, semelhante ao tratamento onde se utilizou, para efeito de comparação, uma mistura corretiva composta por $\text{CaCO}_3 + \text{MgCO}_3$ p.a. Já a escória com granulometria entre 2 e 10 mm proporcionou resultados semelhantes aos tratamentos sem corretivo. Desta forma, a mesma foi considerada inadequada para uso agrícola, pelo menos para utilização em cultivo de plantas de ciclo curto. Os baixos teores de Zn e P total, bem como a ausência de P solúvel em ácido cítrico não recomendam o uso da escória como fonte destes nutrientes. Para todos os ensaios montados, nos tratamentos que foram aplicados escória, houve incremento significativo dos teores de Fe e, principalmente, de Mn nos solos. Este aumento – a presença destes dois elementos em quantidades relativamente elevadas no resíduo –, no entanto, não foi verificado sintoma de toxidez nas plantas de sorgo cultivadas. Contudo, para culturas mais sensíveis ao Mn, cuidados devem ser tomados quanto ao incremento deste elemento no solo. Houve também incremento nos teores de Cr do solo com a utilização da escória, no entanto, os valores constatados foram inferiores ao máximo estabelecido para solos, conforme sugerido pela CETESB (2001). Do total de Cr presente no solo, a grande maioria encontrou-se associada a formas mais estáveis de óxidos de Fe e em formas residuais, possivelmente com os silicatos. Não foi detectada pelo método analítico utilizado (ICP – OES), a presença de Cr nos lixiviados coletados e os teores observados de Zn, Cu, Fe e Mn em solução foram muito baixos, sendo inferiores aos valores máximos estabelecidos para águas Classe III, conforme Resolução nº 20/1986, do CONAMA.

ABSTRACT

SILVA, Juscimar, M.S., Universidade Federal de Viçosa, November 2003. **Evaluation of the Agronomical Potential and Environmental Contamination due to the use of an Slag as Soil Corrective and Fertilizer.** Adviser: Jaime Wilson Vargas de Mello. Committee Members: Walter Antônio Pereira Abrahão and Luiz Eduardo Dias.

Recycling of industrial or mining material available for use in agriculture is an issue extensively studied in various countries, but it has received little attention in Brazil. The different types of steel industry residue (slag), with an estimated annual production of 3 million tones, has a great potential for utilization in agriculture; however, studies with this objective, are not common in Brazil. One of the major shortcomings for the use of this residue in agro silvicultural activities is the presence of heavy metals, which, when present in the soil in the soluble form are absorbed by plants of the trophic-chain, and may cause serious damage to health of animals and human beings. Thus, before any recommendations are made, detailed studies are indispensable on the likely impacts caused by the use of these residues on agriculture. Within this context, this work aimed to evaluate the agricultural utilization of an slag originated from Companhia Siderúrgica de Tubarão (CST) as a soil liming and as a source of phosphorous and zinc for sorghum plants (*Sorghum bicolor* L. Moench – variety BR 300) and to evaluated the contamination of soil and lettuce plants (*Lactuca sativa* – variety Regina-de-Verão) by heavy metals due to the use of this residue. In order to accomplish such objectives, the slag was chemically characterized and separated in two

granulometries (0 to 1 mm and 2 to 10 mm). Two experiments with the slag were carried out, using a sample of a Red Yellow Latosol (RYL), of sandy clay texture and of a Yellow Latosol (YL), sandy loam texture, both collected in the state of Espírito Santo. The first experiment, for agronomic evaluation of the residue, involved three stages: stage 01: evaluation of the corrective potential of the slag by means of incubation curves; stage 02: response of plants to the use of slag as a soil liming agent and the likely presence of heavy metals in plants; and stage 03: response of the plants to the use of slag as phosphate and zinc fertilizer. The second experiment, in which metal behavior in soil was studied, evaluated Cr availability by means of sequential extractions and metal mobility when the soils were submitted to periodical leaching with deionized water and, later, with acetic acid solution (0.001 mol L^{-1}), during four months. The slag with granulometry below 1 mm was found efficient in correcting soil acidity, in neutralizing toxic soil aluminum and providing Ca and Mg to plants, similarly to the treatment using a corrective mixture composed of $\text{CaCO}_3 + \text{MgCO}_3$ p.a. On the other hand, the slag with granulometry between 2 and 10 mm provided results similar to the treatments without corrective agent. Thus, its use was considered inadequate for agricultural purposes, at least for cultivation of short-cycle plants. The low contents of total Zn and P, as well as the absence of soluble P in nitric acid do not recommend the use of slag as source of these nutrients. For all the assays set up, in the treatments using slag there was a significant increase of Fe and, mainly, of Mn content in the soils. This increase however, did not cause toxicity symptoms in the sorghum plants cultivated. However, for cultures more sensitive to Mn, care must be taken concerning the increment of this element in the soil. There was an increase in the Cr content in the soil by using the slag, but the values found were below the maximum established for soils. From the total Cr present in the soil, the large majority was associated to more stable Fe oxides and in residual forms, possibly within the structure of silicates. The presence of Cr in the leachate collected was not detected by the analytical method applied (ICP – OES) and Zn, Cu, Fe and Mn in solution were detected in very small amounts, below the maximum values established for Class III water according to Brazilian Environmental Agency Protection.

CAPÍTULO 1

COMPOSIÇÃO QUÍMICA, CLASSIFICAÇÃO QUANTO À PERICULOSIDADE E AVALIAÇÃO DO POTENCIAL CORRETIVO DA ESCÓRIA DE ACIARIA

1. INTRODUÇÃO

A obtenção do aço na aciaria pelo processo do conversor de oxigênio LD (Linz-Donawitz) consiste no refino da sucata e do gusa líquido, obtido após fundição a 1.600 °C do minério de ferro, do coque ou carvão (mineral ou vegetal) e do calcário, pelo uso do oxigênio, escorificantes e refrigerantes. Conforme ARAÚJO (1997), o oxigênio ejetado sob alta pressão atua como agente oxidante e o CaO como agente escorificante no fluxo de refino. Neste processo, é adicionada, também, uma fonte de magnésio, em geral, a dolomita ($\text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3$), para proteção do refratário do forno. Por diferença de densidade, dentro do conversor, ocorre a separação do aço que é mais denso que a escória, sendo esta retirada e conduzida aos pátios de deposição da siderúrgica onde é resfriada.

O resfriamento da escória pode ser feito pela exposição ao ar ou pela aspensão de água (“quenching”). O “quenching” evita a recristalização dos constituintes, facilitando a solubilidade dos compostos quando incorporados ao solo (LOUZADA, 1987). Quando resfriada ao ar, têm-se inconvenientes; ela solidifica-se e causa problemas significativos no armazenamento e na posterior moagem do material (PRADO et al., 2001).

Para cada tonelada de aço líquido produzida, obtém-se 0,64 t de escória de aciaria (CANTINE & SOUZA, 1989), o que corresponde a uma produção anual estimada de 3 milhões de toneladas (PRADO et al., 2001). Desta forma, as indústrias siderúrgicas se deparam com o problema do acúmulo deste resíduo nos pátios de deposição, podendo causar passivo ambiental, necessitando, neste caso, de alternativas para destinação final (ou reciclagem) que dependerá do grau de periculosidade do resíduo.

Nesse sentido, a ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT (1987), norma NBR 10.004, atribuiu três classes aos resíduos industriais:

1. Resíduos Classe I ou Perigosos;
2. Resíduos Classe II ou Não-Inertes; e
3. Resíduos Classe III ou Inertes.

Os resíduos que apresentam periculosidade, inflamabilidade ou corrosividade são pertencentes à Classe I; aqueles que submetidos ao teste de lixiviação, conforme proposta pela NBR 10.005, apresentarem, no lixiviado, teores inferiores aos padrões de potabilidade da água, pertencem à Classe III; aqueles que não se enquadram nas Classes I e III, isto é, apresentam características intermediárias, pertencem à Classe II (ABNT, 1987).

A composição química da escória é formada basicamente por óxidos e silicatos de Ca e de Mg, óxidos de Fe e de Mn, ferro metálico e outros elementos em menores proporções. Todavia, a quantidade de óxidos presentes e sua concentração serão influenciadas pela constituição química da matéria-prima utilizada no processo de fabricação do produto siderúrgico, além do tipo de refratário usado nas paredes do forno (PRADO et al., 2001).

Assim, a utilização da escória na agricultura como corretivo e fertilizante de solo reveste-se numa alternativa viável de reciclagem deste resíduo (GOMES et al., 1962; WUTKE et al., 1962; PEREIRA, 1978; RIBEIRO et al., 1986; LOUZADA, 1987; NOGUEIRA, 1990; AMARAL, 1994; PRADO & FERNANDES, 2001), tendo em vista sua composição química e, também, por apresentar reação alcalina. Em diversos países, como o Japão, China, EUA, a escória é amplamente utilizada (Prado et al., 2001). Barnette (1926), citado por PIAU (1991), mostrou que escória apresenta poder de correção da acidez do solo idêntico ao do carbonato de cálcio (CaCO_3) e do hidróxido de cálcio [$\text{Ca}(\text{OH})_2$].

Contudo, a preocupação com o uso agrícola desse material é, entre outras, a disseminação de elementos indesejáveis, ou mesmo micronutrientes em doses excessivas que podem limitar sua utilização na agricultura. Estes elementos indesejáveis, uma vez presentes no solo em forma solúvel, são absorvidos por plantas envolvidas na cadeia trófica, podendo causar sérios problemas à saúde de animais e do homem (AMARAL, 1994).

A correção da acidez do solo pelo corretivo está relacionada com o poder neutralizante (PN), expresso pela sua composição química, com a reatividade do material, expressa em eficiência relativa (ER) e com o tempo de contato com o solo. A ER de um corretivo depende fundamentalmente da granulometria do material, que indica a capacidade de um corretivo reagir com o solo e envolve a velocidade de reação e seu efeito residual. Neste sentido, sabe-se que o aumento da superfície específica do material, pelo fracionamento dos grânulos, favorece a ação corretiva no solo (LOUZADA, 1987).

Avaliando a viabilidade do uso de escórias como corretivo e fertilizante do solo, PIAU (1991) observou que a aplicação das escórias na granulometria entre 0,25 e 0,30 mm, 90 dias antes do plantio, permitiu a elevação do pH e dos teores de cálcio e magnésio para níveis satisfatórios às culturas.

LOUZADA (1987), utilizando uma escória de aciaria, em três frações granulométricas e em três tipos de solo, verificou que houve aumento da solubilidade dos compostos de magnésio na medida em que a granulometria era mais fina. Verificou, também, que a solubilidade do cálcio não foi afetada por ela.

Trabalhando com duas escórias de siderurgia em diferentes granulometria, variando de 0,84 mm até menor que 0,05 mm, FORTES (1993) observou que os melhores resultados ocorreram com a granulometria inferior a 0,15 mm, aos 90 dias de incubação.

FORTES (1993) e PRADO & FERNANDES (2000) mencionaram em seus trabalhos que a escória de siderurgia apresenta efeito residual superior ao do calcário, por ter reação mais lenta, com mecanismos de solubilidade controlada pelo valor de pH e pelo teor de cálcio na solução do solo, e concluíram que a eficiência da escória de siderurgia, com base no poder neutralizante adotado para o calcário, não foi adequada para estimar a necessidade deste produto para a correção da acidez do solo. Conforme PRADO et al. (2001), do ponto de vista químico a determinação do PN, utilizando soluções de HCl $0,5 \text{ mol L}^{-1}$, é considerada branda, surgindo questionamentos com relação ao potencial de

solubilização integral dos componentes neutralizantes da amostra, principalmente aqueles aprisionados em estruturas cristalinas, contendo sílica, que só seriam atingidos pelo ataque mais energético da amostra. Contudo, um aspecto positivo, levantado pelo o mesmo autor, é que nestas circunstâncias, eventuais erros de cálculo da quantidade de escória, ou da incorporação inadequada, que resultem em superdoses, não causam tantos malefícios ao sistema solo-planta quando comparados ao uso do calcário.

Diante do exposto, o objetivo deste trabalho foi realizar a caracterização química de uma escória de aciaria, proveniente da Companhia Siderúrgica de Tubarão (CST), bem como classificá-la quanto ao grau de periculosidade, conforme proposto pela ABNT (1987) e avaliar seu potencial corretivo, comparando-a com o CaCO_3 p.a.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Corretivos

Utilizou-se uma amostra representativa de uma escória de aciaria proveniente da Companhia Siderúrgica de Tubarão. Desta escória, foram utilizadas duas frações granulométricas: a fração retida entre as peneiras de 2,0 e 10,0 mm e a que passou pela peneira de 1,0 mm. Para efeito de comparação, foi utilizada, em cada solo, uma mistura corretiva composta por carbonatos de cálcio e magnésio p.a., na proporção estequiométrica de 4:1, bem como uma testemunha sem a adição de corretivo.

Para determinação dos teores totais de P, Si, Fe, Mn, Zn, Cu, Ni, Pb, Cd e Cr, foram adicionadas em recipientes de Teflon[®] (específico do forno de microondas utilizado, marca MILESTONE – modelo ETHOS PLUS), 0,2 g da escória previamente triturada e passada em peneira de 0,297 mm (ABNT 50), uma mistura quaternária de ácidos composta por 5 mL de HF + 5 mL de HCl + 3 mL HNO₃ + 2 mL de HClO₄ (todos na forma concentrada) e 5 mL de H₃BO₃ 10%. Depois de fechados, os recipientes foram submetidos, em diferentes estádios, a altas temperaturas e pressão (Quadro 1). Após a retirada dos recipientes e o seu resfriamento, o extrato totalmente dissolvido foi filtrado, utilizando papel de filtração lenta, para balões de 50 mL completando o restante do volume com água deionizada. Em seguida, o extrato foi transferido para um frasco plástico previamente limpo e armazenado para posterior análise.

A análise foi realizada em triplicatas e, paralelamente, foram realizadas provas em branco (testemunha).

Quadro 1 – Especificações da programação utilizada na digestão da amostra de escória utilizando forno de microondas

Estádio	Tempo (min)	T (°C)	Potência (W)
1 ^o	8	140	1.000
2 ^o	4	200	1.000
3 ^o	20	230	1.000
4 ^o	5	-	-

Obs.: O 4^o estágio foi realizado para promover a ventilação do forno.

As amostras de escória, nas duas granulometrias, foram submetidas também às seguintes análises químicas, em três repetições:

- teor de P solúvel em ácido cítrico (EMBRAPA, 1999) e extraído com Mehlich-1, determinado conforme DEFELIPO e RIBEIRO (1996);
- teores de CaO e MgO extraídos conforme metodologia descrita por EMBRAPA (1999);
- poder neutralizante (PN) e eficiência relativa (ER), conforme EMBRAPA (1999);
- a partir do PN e da ER foi calculado o poder relativo de neutralização total (PRNT), que avalia a qualidade do corretivo;
- testes de lixiviação e solubilização de resíduos, conforme as normas técnicas NBR 10.005 e NBR 10.006, respectivamente. Depois de realizados os testes, a escória foi classificada quanto a sua periculosidade, conforme norma técnica NBR 10.004 (ABNT, 1987); e
- os teores dos elementos nos extratos foram determinados por espectrometria de emissão óptica em plasma induzido (ICP-OES), marca PERKIN ELMER – Modelo Optima 3300 DV ou por espectrofotometria de absorção atômica (E.A.A.), conforme o caso.

2.2. Solos

Foram utilizadas amostras de um Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA), textura argilo-arenosa e de um Latossolo Amarelo (LA), textura franco-arenosa, ambos coletados, respectivamente, nos municípios de Viana e Nova Almeida, situados no estado do Espírito Santo. As amostras foram coletadas na camada de 0 a 20 cm de

profundidade, homogeneizadas, secas ao ar, passadas em peneira com malhas de 2 mm de abertura e caracterizadas por meio de análises química e física, conforme EMBRAPA (1997) (Quadro 2).

Quadro 2 – Composição química e física das amostras de solo utilizadas no experimento. Valores médios (três repetições)

Resultados analíticos	LVA ^{1/}	LA ^{2/}
pH (H ₂ O)	5,0	5,6
P (mg dm ⁻³)	2,62	1,58
K (mg dm ⁻³)	93,84	58,65
Ca ²⁺ (cmol _c dm ⁻³)	1,02	1,07
Mg ²⁺ (cmol _c dm ⁻³)	0,81	0,71
Al ³⁺ (cmol _c dm ⁻³)	0,60	0,20
H + Al (cmol _c dm ⁻³)	6,05	3,22
SB (cmol _c dm ⁻³)	2,07	1,93
MO (dag kg ⁻¹)	1,35	0,89
Areia grossa (dag kg ⁻¹)	37	60
Areia fina (dag kg ⁻¹)	10	19
Silte (dag kg ⁻¹)	12	5
Argila (dag kg ⁻¹)	41	16
Classe textural	Argilo-arenosa	Franco-arenosa
Capacidade de campo (%)	27,72	13,72

^{1/} Latossolo Vermelho-A marelo, coletado no município de Viana-ES.

^{2/} Latossolo Amarelo, coletado no município de Nova Almeida-ES.

2.3. Avaliação do potencial corretivo da escória

Para avaliar o potencial corretivo da escória de aciaria, nas diferentes granulometrias, em comparação com o CaCO₃ p.a., foi montado um experimento de curvas de incubação, utilizando os solos anteriormente mencionados.

O experimento fatorial (2 x 3 x 4) foi montado no delineamento inteiramente casualizado, com três repetições, perfazendo um total de 72 parcelas, sendo:

- dois solos;
- três corretivos da acidez [a escória em duas granulometrias (2,0 a 10,0 mm e < 1,0 mm) e CaCO₃ p.a]; e
- quatro níveis crescentes dos corretivos, correspondentes a 0,0, 0,5, 1,0 e 1,5 vez a necessidade de calagem, estimada a partir da acidez potencial dos solos (H + Al), extraída por acetato de cálcio [Ca(OAc)₂] 0,5 mol L⁻¹ a pH 7,0.

As quantidades de corretivos, estimadas a partir da acidez potencial e calculadas com base no poder neutralizante dos corretivos, foram misturadas às amostras de 500 g de cada solo e acondicionadas em sacos plásticos. Posteriormente, as amostras foram incubadas com umidade próxima à capacidade de campo dos solos e, periodicamente (a cada 7 dias), foram retiradas subamostras para determinação dos valores de pH em água (relação 1:2,5) e Al e Ca trocáveis.

Os resultados obtidos foram analisados estatisticamente (Análise de variância e Regressão) por meio do software Sistema de Análise Estatística e Genética (SAEG).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Caracterização química da escória

No Quadro 3 encontram-se as análises químicas da amostra de escória utilizada. As concentrações mais altas foram de CaO, seguida de Fe₂O₃, SiO₂ (na escória de granulometria inferior a 1 mm) e MgO. O teor total de SiO₂ para a escória de granulometria inferior a 1 mm encontra-se de acordo com os observados na literatura. PIAU (1995) menciona que o teor de Si (total) das escórias varia conforme o tipo, sendo que as escórias de aciaria apresentam teores entre 12 e 22 dag kg⁻¹. De modo geral, observa-se, em ambas as amostras, semelhanças nos valores obtidos, sendo que as mais marcantes podem ser verificadas para os teores de Cu, Ni, Cd e Cr, que se apresentam superiores na escória com granulometria mais grosseira.

Comparando os valores aqui obtidos com os da legislação brasileira de corretivos (BRASIL, 1986), nota-se que a escória de menor granulometria apresenta as características mínimas para ser comercializada como corretivo agrícola, ou seja, poder de neutralização (PN) maior que 60 %, soma de óxidos de cálcio e magnésio superior a 30 dag kg⁻¹, eficiência relativa (ER) superior a 50 % (na forma de pó, 95 % das partículas devem passar por peneira ABNT nº 10 e 50 % por peneira ABNT nº 50) e poder relativo de neutralização total (PRNT) superior a 45 %. Ainda em relação ao PRNT da escória de granulometria inferior a 1 mm (50 %), nota-se que este está muito abaixo dos encontrados em corretivos comerciais que giram em torno de 80 %. Assim, como alternativa para elevar este valor torna-se necessária uma moagem mais eficiente do

Quadro 3 – Análise química da escória de aciaria com granulometria inferior a 1 mm e de 2 a 10 mm da Cia. Siderúrgica de Tubarão. Valores médios (três repetições) ± erro padrão da média

Análise Química	Escória de aciaria	
	< 1 mm	2 a 10 mm
P ₂ O ₅ total (dag kg ⁻¹) ^{1/}	1,36 ± 1,25	1,54 ± 2,04
P ₂ O ₅ Solúvel em ácido cítrico (dag kg ⁻¹)	0,00	0,00
P ₂ O ₅ solúvel (mg kg ⁻¹) ^{2/}	30,08 ± 1,29	0,00
CaO (dag kg ⁻¹) ^{1/}	43,89 ± 2,34	47,00 ± 3,45
MgO (dag kg ⁻¹) ^{1/}	7,46 ± 1,58	6,73 ± 1,98
Fe ₂ O ₃ (dag kg ⁻¹) ^{1/}	20,49 ± 6,02	28,08 ± 3,25
MnO ₂ (dag kg ⁻¹) ^{1/}	3,81 ± 3,01	4,18 ± 2,66
SiO ₂ (dag kg ⁻¹) ^{1/}	19,58 ± 5,32	---
Zn (mg kg ⁻¹) ^{1/}	29,20 ± 1,02	34,30 ± 2,56
Cu (mg kg ⁻¹) ^{1/}	38,00 ± 2,08	108,33 ± 4,65
Ni (mg kg ⁻¹) ^{1/}	33,40 ± 7,52	67,27 ± 8,20
Pb (mg kg ⁻¹) ^{1/}	< 0,03 ^{4/}	< 0,03
Cd (mg kg ⁻¹) ^{1/}	10,87 ± 10,23	24,13 ± 15,24
Cr (mg kg ⁻¹) ^{1/}	496,08 ± 6,35	523,51 ± 9,07
PN (%) ^{3/}	75,63 ± 0,09	57,48 ± 1,07
ER (%) ^{3/}	66,11 ± 0,07	0,00
PRNT (%) ^{3/}	50,00	0,00

^{1/} Ataque ácido total em forno de microondas: HCl (5 mL) + HNO₃ (1,5 mL) + HF (1 mL) - estágio 1 (3,5 min; 140 °C; 1.000 W); estágio 2 (3,5 min; 200 °C; 1.000 W); estágio 3 (3,5 min; 230 °C; 1.000 W); estágio 4 (20 min; 230 °C; 1.000 W); e estágio 5 (5 min ventilação).

^{2/} Extrator Mehlich-1 (DEFELIPO e RIBEIRO, 1996).

^{3/} Determinados conforme EMBRAPA (1999).

^{4/} O número seguido do sinal < indica o limite de determinação do método analítico utilizado.

material, fazendo com que uma proporção bem maior passe pela peneira ABNT nº 50, o que aumentaria a eficiência relativa do resíduo e, conseqüentemente, seu PRNT. Outro fator relevante que pode estar influenciando nestes baixos valores é a forma em que é determinado, em escórias, o valor do poder de neutralização (PN). Como a metodologia é a mesma utilizada para calcário, os resultados podem ser sujeitos a erros, principalmente quando levamos em consideração o tamanho das partículas.

Ao titular o excesso de ácido na determinação do PN das escórias utilizadas neste trabalho, observou-se que, com o aumento do pH da solução, ocorreu a precipitação de óxidos de Fe e Mn. Em soluções aquosas, o Fe (III) encontra-se coordenado por seis moléculas de água, formando o íon Fe(H₂O)₆³⁺ (LINDSAY, 1979). Com o aumento do pH, o Fe em solução hidrolisa e há liberação de prótons H⁺ das moléculas de H₂O para o meio, dessa forma são necessárias maiores quantidades de hidróxido para atingir o ponto de equivalência da reação. Assim, o volume gasto de

hidróxido de sódio, no momento da titulação, pode ter sido superestimado, o que justifica os baixos valores obtidos de PN para as escórias. Este fenômeno está de acordo com as observações levantadas por PIAU (1995). Este autor cita que, além da provável maior energia de ligação dos silicatos contidos na escória, outra questão que pode provocar variações na determinação do PN da escória é a interferência de impurezas, como micronutrientes (Fe e Mn), quando se titula com hidróxido de sódio a escória dissolvida em HCl. Alcarde (1983), citado por DUARTE et al. (1993), citam que outras variáveis podem interferir nos resultados, como por exemplo, a composição química e a cristalografia dos corretivos.

A amostra de escória de granulometria entre 2 a 10 mm não apresenta todos os requisitos para ser comercializada (BRASIL, 1986), tendo sua granulometria como principal fator limitante.

Os teores de Cr encontrados nas amostras analisadas foram considerados altos, contudo, o efeito deste elemento no solo e na planta será discutido detalhadamente a partir dos resultados analíticos das fases posteriores deste trabalho.

3.2. Classificação da escória quanto à periculosidade

3.2.1. Teste de solubilização

Comparando os resultados obtidos aos valores-padrão para teste de lixiviação, conforme NBR 10.004 (ABNT, 1987) para classificação de resíduos sólidos, verificou-se que a escória enquadra-se na classe III, ou seja, a mesma é considerada material inerte (Quadro 4). Conforme ABNT (1987), qualquer resíduo quando amostrado de forma representativa, submetido a contato estático ou dinâmico com água destilada ou deionizada, à temperatura ambiente, conforme teste de solubilização (NBR 10.006, 1987), que não apresentar nenhum de seus constituintes solubilizados a concentrações superiores aos padrões de potabilidade de água, conforme listagem nº 8, excetuando-os aspectos de cor e sabor, são considerados inertes.

3.2.2. Teste de lixiviação

Em virtude da reação alcalina da escória, houve problemas na realização do teste de lixiviação de resíduos. Neste teste, realizado conforme a NBR 10.005 (ABNT, 1987),

Quadro 4 – Valores de metais da escória de aciaria, nas diferentes granulometrias, obtidos após serem submetidas a testes de solubilização de resíduos sólidos. Valores médios (três repetições) ± erro padrão da média

Granulometria	Zn	Cu	Mn	Fe	Cd	Cr	Ni
	----- mg L ⁻¹ -----						
< 1,0 mm	0,008 ± 3,64	0,069 ± 0,08	0,040 ± 1,05	0,055 ± 6,32	< 0,003	0,006 ± 8,15	< 0,02
2,0 a 10,0 mm	0,004 ± 8,25	0,028 ± 0,15	0,010 ± 2,35	0,020 ± 0,07	< 0,003	< 0,004	< 0,02
Limite máximo ^{1/}	5,0	1,0	0,1	0,3	0,005	0,05	0,03

^{1/} Fonte: Anexo H, listagem nº 8, da NBR 10004 (1987) – Padrões para o teste de solubilização. O número seguido do sinal < indica o limite de determinação do método analítico utilizado.

um recipiente contendo o resíduo em contato com água deionizada (proporção 1:16) é agitado e, periodicamente, faz-se o ajuste do pH da solução para valores inferiores a $5,00 \pm 0,2$, utilizando o ácido acético $0,5 \text{ mol L}^{-1}$, tomando-se o cuidado para que o volume total do ácido acético gasto não exceda a 4 mL por grama de material, mesmo que a condição de pH não seja atingida. Como foi utilizado neste trabalho 3,125 g da escória, o volume máximo do ácido que deveria ter sido utilizado seria de 12,5 mL, o que não ocorreu.

A presença de compostos neutralizantes da acidez na escória (ex.: carbonatos e silicatos) ocasionaram tamponamento do pH da solução resultando num consumo excessivo do ácido, em torno de 50 mL, para que se atingisse o valor estabelecido ($5,00 \pm 0,2$). Com isso, o procedimento de lixiviação realizado conforme a NBR 10.005 não é recomendado para este resíduo, uma vez que a quantidade de ácido acético $0,5 \text{ mol L}^{-1}$ utilizada foi superior à relação máxima permitida de 4,0 mL por grama de massa sólida.

Embora o teste de lixiviação não seja recomendado para a escória, nos extratos obtidos não foi detectada a presença de Cr e Cd, elementos potencialmente tóxicos presentes na escória, ou seja, sua concentração foi inferior ao limite de determinação do método analítico utilizado ($< 0,005 \text{ mg L}^{-1}$ para Cr e $< 0,003 \text{ mg L}^{-1}$ para Cd).

Diante disso, a escória foi classificada como não tóxica, uma vez que os teores dos metais encontravam-se abaixo dos limites considerados máximos ($5,0 \text{ mg L}^{-1}$ e $0,5 \text{ mg L}^{-1}$ para Cr e Cd, respectivamente). Conforme ABNT (1987), é considerado tóxico o resíduo que, quando amostrado de maneira representativa, conter no extrato, obtido

conforme a NBR 10.005, qualquer dos constituintes em concentrações superiores aos valores constantes na listagem nº 7 (anexo G, NBR 10.004).

3.2.3. Avaliação do potencial corretivo da escória

A variação do pH e dos teores de Ca^{2+} e Al^{3+} nas amostras de solo, ao longo do período de incubação dos corretivos, são apresentados nas Figuras 1, 2 e 3.

A análise de variância das variáveis mencionadas anteriormente encontra-se no Quadro 5. Verificou-se que os tratamentos com CaCO_3 e escória de granulometria inferior a 1,0 mm foram eficientes para elevar o pH e os teores de Ca^{2+} , bem como para reduzir o nível de Al^{3+} a valores nulos (Figuras 1, 2 e 3). Contudo, os aumentos nos valores de pH e teores de Ca^{2+} em relação à testemunha variaram entre solos e tratamentos (Quadro 5), o que pode ser explicado, em grande parte, pelas diferenças de poder tampão dos solos e da granulometria dos materiais corretivos aqui utilizados. Assim, a menor capacidade tamponante do Latossolo Amarelo (LA), em relação ao Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA), justifica os maiores acréscimos dos valores de pH no LA.

Ainda em relação às variações de pH e Ca^{2+} , em ambos os solos foram observados maiores incrementos, quando foi utilizado o CaCO_3 em relação à escória de granulometria inferior a 1 mm (Figuras 4a e 4b). Isto se deve à diferença de granulometria entre os corretivos, já que as doses foram calculadas apenas com base no PN. No caso da escória, a solubilidade é influenciada por sua menor superfície de contato com as partículas do solo. Diversos autores observaram que o aumento da superfície do material corretivo, pelo fracionamento dos grânulos, favorece a ação corretiva no solo (GALO & CATANI, 1954; CAMARGO, 1972; PEREIRA, 1978; BELLINGIERI, 1983; LOUZADA, 1987; PIAU, 1991; FORTES, 1993). LOUZADA (1987), avaliando a eficiência corretiva de uma escória de aciaria em diferentes classes de solos, observou que no LVm, houve acréscimos de pH com a diminuição da granulometria e atribuiu isto ao aumento da superfície específica das partículas.

Em se tratando da escória de granulometria entre 2 a 10 mm os mesmos resultados não foram verificados, sendo seu comportamento semelhante aos tratamentos sem corretivos. Nesta granulometria, a reatividade do corretivo é considerada nula e, conforme BRASIL (1986), para ser comercializado é necessário que 95 % passe pela peneira ABNT nº 10 (2,0 mm). Desta forma, a mesma foi considerada inadequada para uso

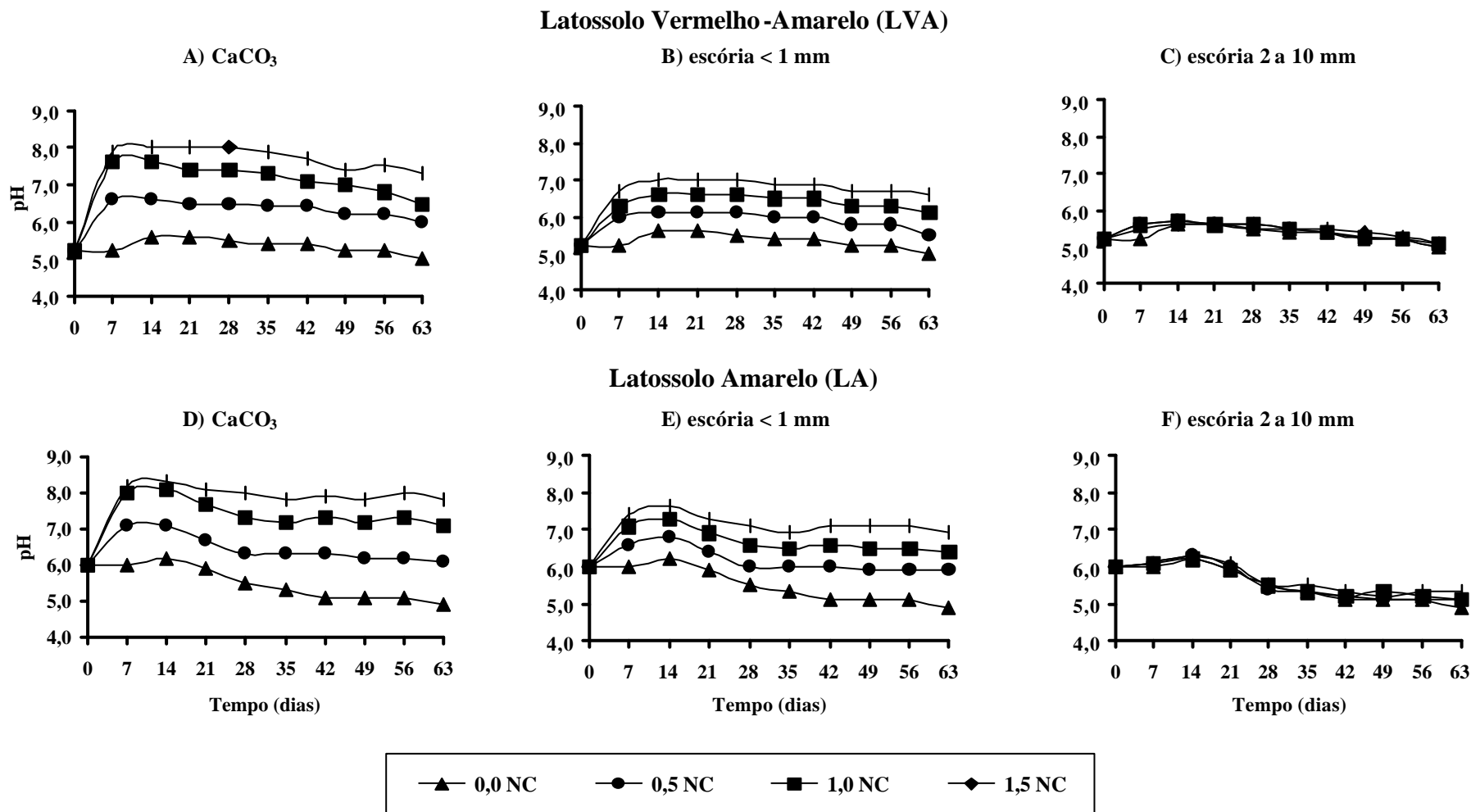


Figura 1 – Valores de pH das amostras de Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA) e Latossolo Amarelo (LA), incubadas com quatro doses de CaCO₃, escória < 1 mm e escória de 2 a 10 mm, em função do tempo.

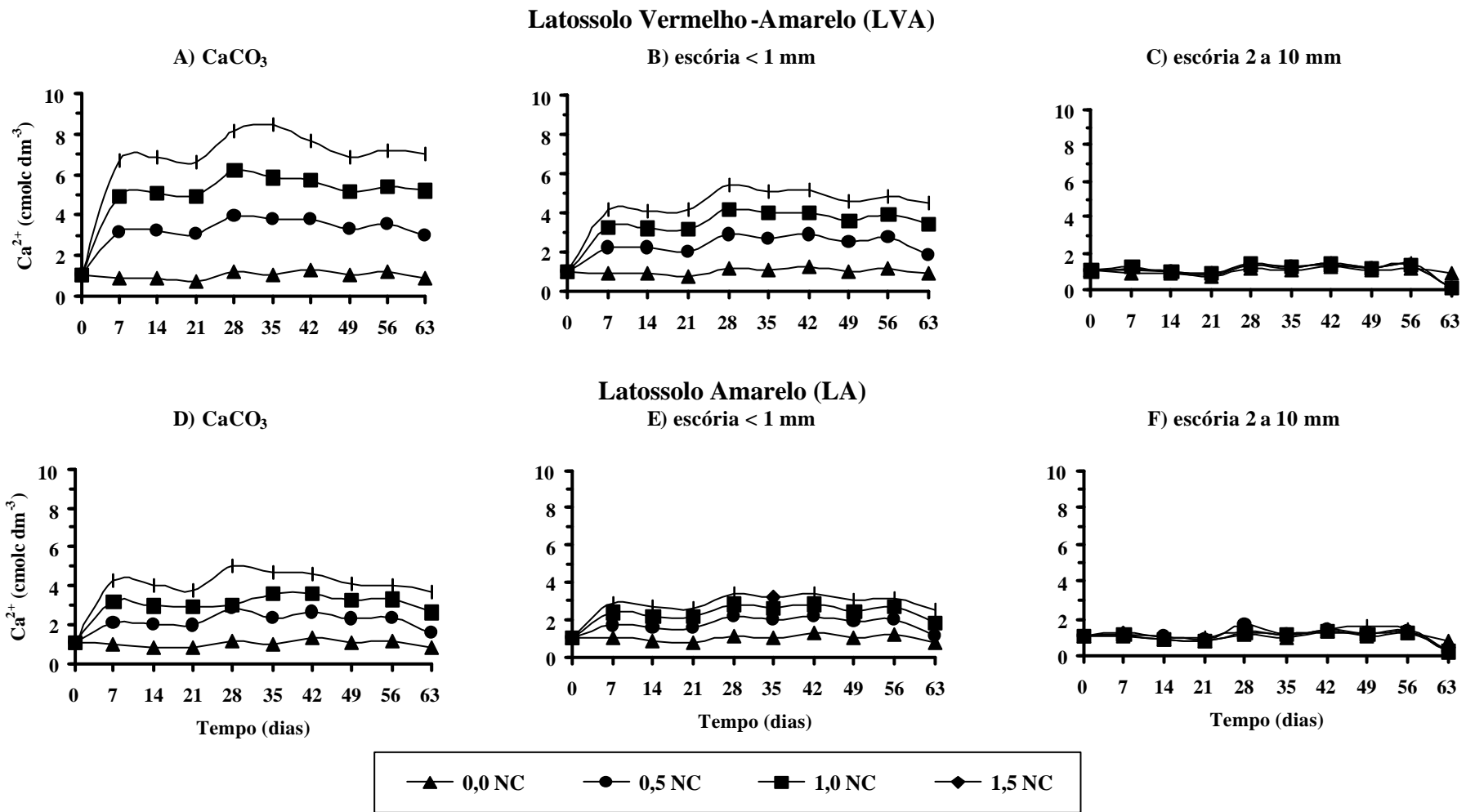
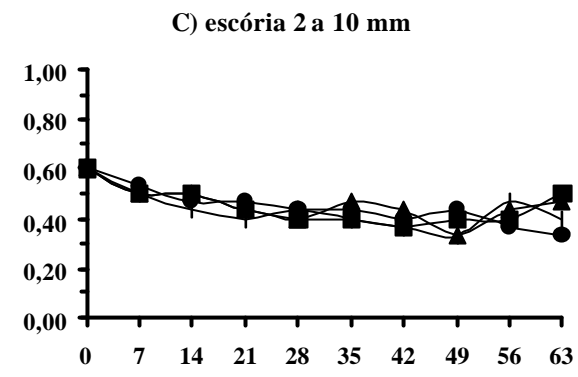
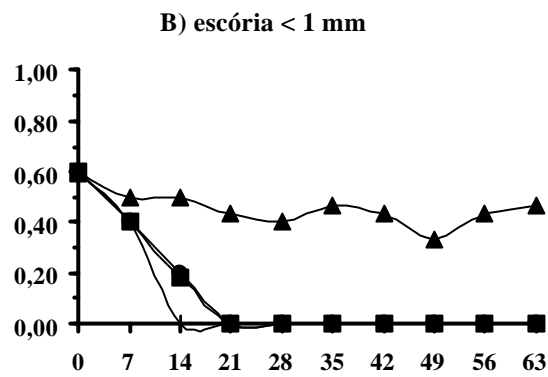
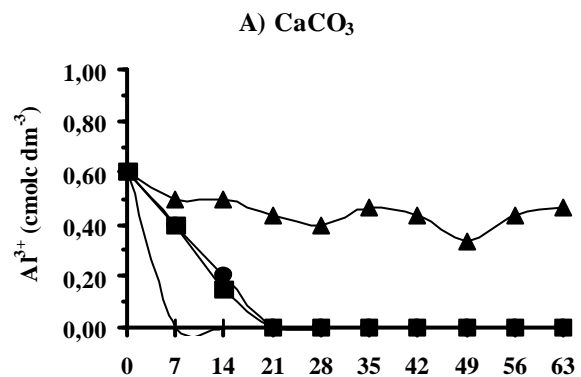


Figura 2 – Valores de teor de Ca²⁺ das amostras de Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA) e Latossolo Amarelo (LA), incubadas com quatro doses de CaCO₃, escória < 1 mm e escória de 2 a 10 mm, em função do tempo.

Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA)



Latossolo Amarelo (LA)

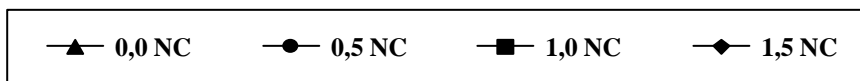
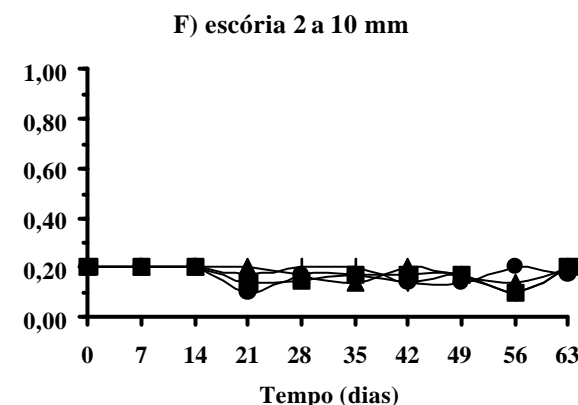
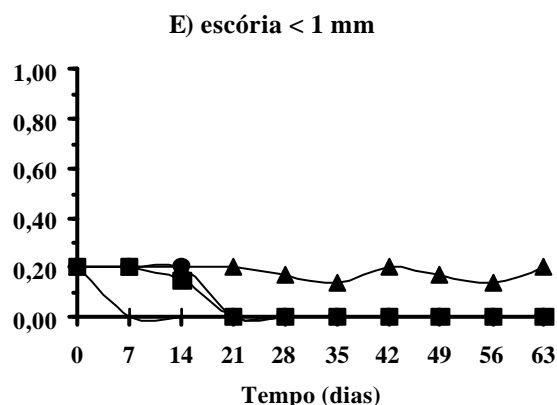
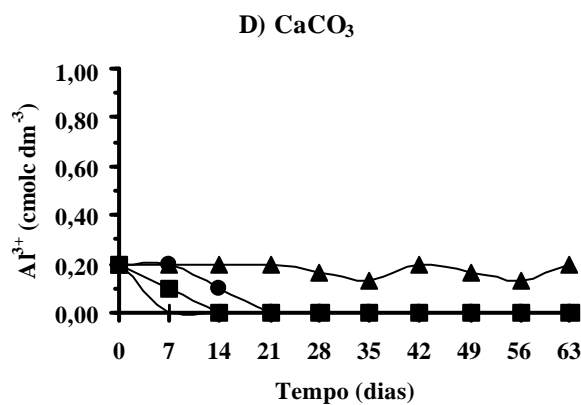


Figura 3 – Valores de teor de Al^{3+} das amostras de Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA) e Latossolo Amarelo (LA), incubadas com quatro doses de $CaCO_3$, escória < 1 mm e escória de 2 a 10 mm, em função do tempo.

Quadro 5 – Análise de variância para pH, Ca²⁺ e Al³⁺ nos solos, aos 42 dias, após o início do período de incubação

F.V.	G.L.	Q.M		
		pH	Ca ²⁺	Al ³⁺
Solo	1	0,14401**	11,98919**	0,24500**
Corretivo	2	10,95188**	36,50085**	0,30681**
Nível	3	7,23150**	23,33643**	0,23741**
Corretivo d/ Solo	2	0,08426**	3,77518**	0,06125**
Nível d/ Solo	3	0,11664**	2,416764**	0,02759**
Nível d/ Corretivo	6	1,67243**	6,10413**	0,03421**
Resíduo	40	0,01604	0,00414	0,00200
C.V. (%)		2,04	2,18	40,66

** Significativo, a 1% de probabilidade, pelo teste F.

agrícola, pelo menos para cultivo de plantas de ciclo curto (Figuras 1c, 1f, 2c, 2f, 3c e 3f). DUARTE et al. (1993), trabalhando com 11 amostras de calcários, observaram diferença entre as diversas granulometrias. A amostra que passou pela peneira ABNT nº 10 apresentou o maior PN, indicando que as partículas maiores que 2 mm não foram completamente solubilizadas. Estas, por se apresentarem, provavelmente, como estruturas cristalinas mais estáveis, devem ser mais trituradas para maior solubilização.

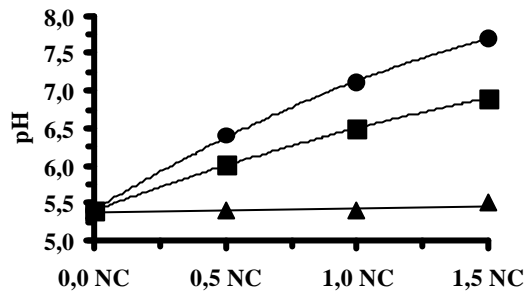
A quantidade de escória necessária para se atingir o pH ideal para a cultura do sorgo 6,5 foi 1,5 a 1,7 vez superior, aproximadamente, à quantidade de calcário (Figuras 4a e 4b). Como a granulometria da escória é superior à do CaCO₃ p.a., a maior dose necessária da escória, nesse particular, pode ser creditada quase que exclusivamente à sua granulometria. Conforme discutido anteriormente, a ER da escória de granulometria inferior a 1 mm foi de 66,11 %, inferior ao CaCO₃ p.a., cuja ER é de 100%.

Observou-se neutralização completa do Al³⁺ em ambos os solos, a partir dos 21 dias após o início do período de incubação quando se utilizou o nível 0,5 vez a NC (3,0 e 4,0 t ha⁻¹, para o LVA, e 1,61 e 2,13 t ha⁻¹, para o LA, considerando, respectivamente, os corretivos CaCO₃ e escória de granulometria inferior a 1 mm), estimada a partir da acidez potencial dos solos (Figura 3a, 3b, 3c e 3d). Com a maior dose aplicada de CaCO₃, a neutralização ocorreu aos 7 dias após o início do período de incubação em ambos os solos. Por outro lado, para a mesma dose de escória com granulometria inferior a 1 mm (16,02 t ha⁻¹), o mesmo comportamento só foi observado no LA. No

LVA, devido ao seu maior poder tampão, a total neutralização do Al pela escória ocorreu apenas aos 14 dias após o início da incubação.

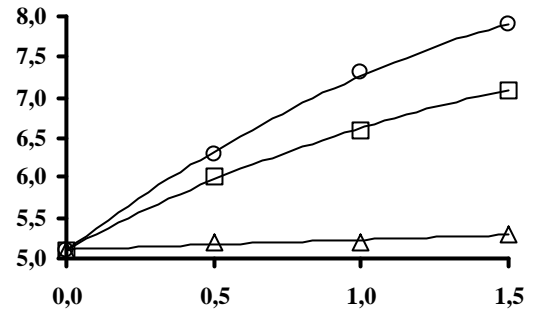
Comparando os efeitos dos corretivos após incubação, verifica-se comportamento estatisticamente idêntico no que tange à correção do Al^{3+} do solo, o que sugere, novamente, possibilidade de utilização agronômica da escória de aciaria de granulometria inferior a 1 mm (Figura 4a e 4b). Resultados semelhantes foram obtidos por CAMARGO (1972), RIBEIRO et al. (1986) e LOUZADA (1987). RIBEIRO et al. (1986), trabalhando com um LVA, argiloso, que apresentava $1,3 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ de Al^{3+} e pH 4,1, necessitaram de $7,44 \text{ t ha}^{-1}$ de escória para neutralizar o Al^{3+} , contudo, com a metade da dose o teor de Al^{3+} já estava em $0,1 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$. LOUZADA (1987) avaliando a eficiência corretiva de uma escória de siderurgia observou neutralização do Al^{3+} a partir da primeira dose do corretivo ($2,5 \text{ t ha}^{-1}$) em LEr e da segunda dose ($5,0 \text{ t ha}^{-1}$), em LVm.

A) Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA)

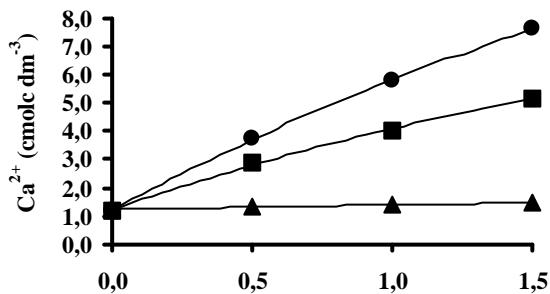


$\hat{Y} = 5,3686 + 0,8763*** X + 0,8129** \sqrt{X} \quad R^2 = 0,9998**$
 $\hat{Y} = 5,4500 + 1,0000*** X \quad R^2 = 0,9921**$
 $\hat{Y} = 5,4$

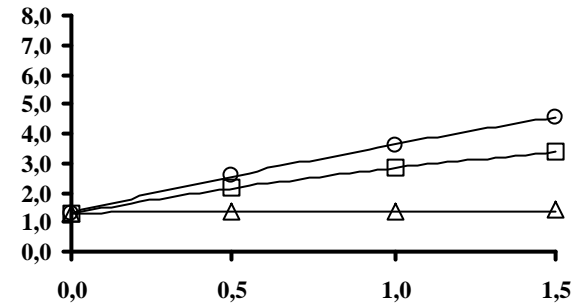
B) Latossolo Amarelo (LA)



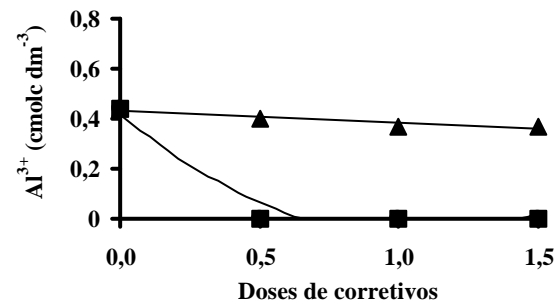
$\hat{Y} = 5,0735 + 2,8837*** X + 0,7033*** \sqrt{X} \quad R^2 = 0,9992**$
 $\hat{Y} = 5,0957 + 1,9780*** X + 0,4467** \sqrt{X} \quad R^2 = 0,9993**$
 $\hat{Y} = 5,1$



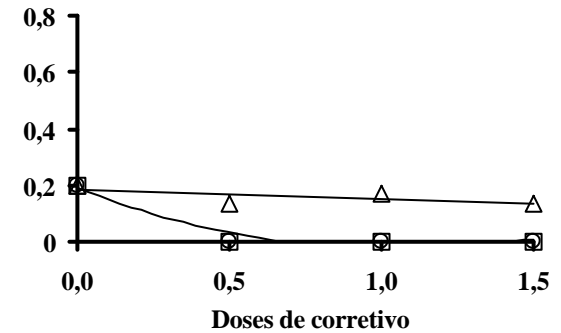
$\hat{Y} = 1,2216 + 3,2402*** X + 1,2746*** \sqrt{X} \quad R^2 = 0,9999**$
 $\hat{Y} = 1,3777 + 2,5602*** X \quad R^2 = 0,9902**$
 $\hat{Y} = 1,22$



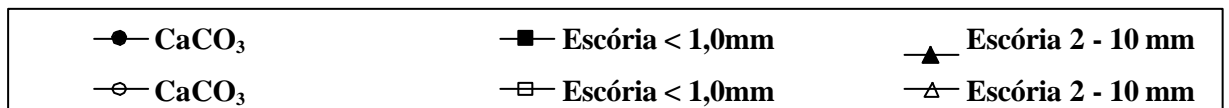
$\hat{Y} = 1,3026 + 1,6006*** X + 0,6981*** \sqrt{X} \quad R^2 = 0,9999**$
 $\hat{Y} = 1,2994 + 0,8818*** X + 0,6135*** \sqrt{X} \quad R^2 = 0,9993**$
 $\hat{Y} = 1,30$



$\hat{Y} = 0,4318 + 0,4790*** X - 0,9314*** \sqrt{X} \quad R^2 = 0,9952**$
 $\hat{Y} = 0,4318 + 0,4790*** X - 0,9314*** \sqrt{X} \quad R^2 = 0,9952**$
 $\hat{Y} = 0,43$



$\hat{Y} = 0,1993 + 0,2211* X + 0,4299*** \sqrt{X} \quad R^2 = 0,9952**$
 $\hat{Y} = 0,1993 + 0,2211* X + 0,4299*** \sqrt{X} \quad R^2 = 0,9952**$
 $\hat{Y} = 0,20$



***, ** e * Coeficientes significativos, a 0,1, 1 e 5 %, respectivamente.

Figura 4 – Valores de pH e teores de Ca²⁺ e Al³⁺ após 42 dias de incubação das amostras do LVA e do LA com CaCO₃, escória < 1,0 mm e escória 2,0 a 10,0 mm

4. CONCLUSÕES

1. A escória após ser submetida a teste de solubilização de resíduos foi classificada como pertencente à Classe III – Inerte.

2. O teste de lixiviação de resíduos não foi recomendado para a escória, uma vez que sua reação alcalina ocasionou o tamponamento da solução, resultando gasto excessivo do ácido acético utilizado para atingir o valor de pH preestabelecido;

3. Considerando os resultados obtidos no teste de lixiviação, mesmo que a quantidade de ácido gasto tenha ultrapassado a relação estabelecida pela NBR 10.005 (4,0 mL por grama de material), a escória foi considerada não-tóxica.

4. A escória com granulometria inferior a 1 mm mostrou-se eficiente para corrigir a acidez, neutralizar o alumínio tóxico e elevar os teores de Ca^{2+} dos solos.

5. A escória com granulometria entre 2 e 10 mm não apresentou resultados satisfatórios como corretivo da acidez dos solos.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMARAL, R. D. **Avaliação de um resíduo da indústria de zinco como corretivo da acidez e fertilizante de solo e fonte de metais pesados para plantas**. Viçosa: UFV, 1994. 70 f. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) – Universidade Federal de Viçosa, 1994.

ARAÚJO, A.L. **Manual de siderurgia** – produção. São Paulo: Editora Arte & Ciência. 1997. v.1. 420 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 10.004 Classificação de Resíduos Sólidos**. Rio de Janeiro, 1987. 63 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 10.005, Lixiviação de resíduos sólidos**. Rio de Janeiro, 1987. 10 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 10.006 Solubilização de resíduos sólidos**. Rio de Janeiro, 1987. 2 p.

BELLINGIERI, P. A. **Análise em laboratório da eficiência de diferentes frações granulométricas de calcários agrícolas**. Piracicaba: USP, 1983. 99 f. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) – Escola Superior “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, 1983.

BRASIL. Ministério da Agricultura. **Secretaria Nacional de Defesa Agropecuária**. Portaria nº 3, de 12 de junho de 1986. Diário Oficial, Brasília, 16 junho de 1986. Seção I, p. 8.673.

CAMARGO, A. P. **Influência da granulometria de três materiais corretivos na neutralização da acidez do solo**. Piracicaba: USP 1972, 59 f. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, 1972.

CANTINI, V. L. & SOUZA, L. F. Aplicações e mercado de rejeitos siderúrgicos da Companhia Siderúrgica Nacional. In: SEMINÁRIO DE RECUPERAÇÃO DE REJEITO DA INDÚSTRIA METALÚRGICA, 1., 1989, Volta Redonda. **Anais...** Volta Redonda: CORENE; ABM, 1989. p. 131-144.

DEFELIPO, B. V. & RIBEIRO, A. C. **Análise química do solo (metodologia)**. Viçosa: UFV, 1996. 17 p. (Boletim, 29).

DUARTE, A. P.; BOGNOLA, L. A.; ALVAREZ V., V. H.; DIAS, L. E. Avaliação de métodos de determinação do poder neutralizante e teores de cálcio e magnésio de calcários. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 17, p. 305-310, 1993.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). Centro de Nacional Pesquisa de Solos. EMBRAPA-CNPS. **Manual de métodos de análise de solo**. 2. ed., Rio de Janeiro: EMBRAPA-CNPS, 1997. 212 p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). **Manual de análise química de solos, plantas e fertilizantes**. Organizador: Fabio César da Silva.- Brasília: Embrapa Comunicação para Transferência de Tecnologia, 1999. 370 p.

FORTES, J. L. O. **Eficiência de duas escórias de siderurgia do estado do Maranhão na correção da acidez do solo**. Viçosa: UFV, 1993. 66 f. Dissertação Mestrado (Solos e Nutrição de Plantas) – Universidade Federal de Viçosa, 1993.

GALO, J. R. & CATANI, R. A. Solubilidade de alguns tipos de calcário. **Bragantia**, v. 13, p. 63-74, 1954.

GOMES, A. G.; GARGANTINI, H.; BLANCO, H. G. Comportamento de tipos de escória de siderurgia como corretivo da acidez do solo. **Bragantia**, v. 24, p. 173-179, 1962.

LINDSAY, W. L. **Chemical equilibria in soil**. New York: John Wiley and Sons, 1979. 439 p.

LOUZADA, P. T. C. **Eficiência de uma escória de siderurgia como corretivo e fertilizante de solo**. Viçosa: UFV, 1987. 52 f. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) – Universidade Federal de Viçosa, 1987.

NOGUEIRA, A. V. **Eficiência agrônômica, como fertilizante, de um lodo de esgoto e de dois resíduos proveniente de indústria siderúrgica**. Viçosa: UFV, 1990. 85 f. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Planas) – Universidade Federal de Viçosa, 1990.

PEREIRA, J. E. **Solubilidade de alguns calcários e escórias de alto-forno**. Viçosa: UFV, 1978. 84 f. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) – Universidade Federal de Viçosa, 1978.

PIAU, W. C. **Efeito de escórias de siderurgia em atributos químicos de solos e na cultura do milho (*Zea mays L.*)**. Piracicaba: USP, 1995. 124 f. Tese (Doutorado em Energia Nuclear na Agricultura) – Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, 1995.

PIAU, W. C. **Variabilidade do uso das escórias como corretivo e fertilizante**. Piracicaba, 1991. 99 f. Dissertação (Mestrado em Energia Nuclear na Agricultura) – Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, 1991.

PRADO, R. M. & FERNANDES, F. M. Escória de siderurgia e calcário na correção da acidez do solo cultivado com cana-de-açúcar em vaso. **Scientia Agrícola**, v. 57, p. 739-744, 2000.

PRADO, R. M. & FERNANDES, F. M. Resposta de cana-de-açúcar à aplicação da escória de siderurgia como corretivo de acidez do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 25, p. 199-207, 2001.

PRADO, R. M.; FERNANDES, F. M.; NATALE, W. **Uso agrícola da escória de siderurgia no Brasil – Estudos na cultura da cana-de-açúcar**. Jaboticabal: Funep, 2001. 67 p.

RIBEIRO, A. C.; FIRME, D. J.; MATOS, A. C. M. Avaliação da eficiência de uma escória de aciaria como corretivo da acidez. **Revista Ceres**, v. 33, n. 187, p. 242-248, 1986.

WUTKE, A. C. P. & GARGANTINI, H. Avaliação das possibilidades de escórias de siderurgia como corretivo da acidez do solo. **Bragantia**, v. 21, p. 797-805, 1962.

CAPÍTULO 2

RESPOSTA DA PLANTA DE SORGO AO USO DA ESCÓRIA COMO CORRETIVO DA ACIDEZ DO SOLO

1. INTRODUÇÃO

Em respostas aos problemas ecológicos, um dos desafios da atualidade é a preocupação do homem com a reciclagem de recursos utilizados nas mais variadas atividades. Há, em determinadas áreas, acúmulo de elementos químicos, que ocasionam poluição local e, em outras, o esgotamento de elementos químicos essenciais às plantas, como é o caso da maioria dos solos brasileiros (NOGUEIRA, 1990). Para que a produtividade das culturas, nesses solos, seja aumentada, é imprescindível que os nutrientes perdidos ao longo do tempo retornem aos solos, o que muitas vezes é extremamente oneroso, pelo alto custo dos corretivos e fertilizantes empregados.

No Brasil, é importante que seja intensificada a pesquisa integrada de aproveitamento dos resíduos industriais e urbanos, como alternativa de produção de corretivos e fertilizantes mais baratos e, paralelamente, que haja a tentativa de diminuição dos problemas ambientais ocasionados pelo acúmulo e não-utilização desses resíduos. Neste particular, o uso da escória de aciaria como corretivo da acidez do solo e como fonte de Ca e de Mg para as plantas reveste-se de grande importância, pois pode conciliar a produção do aço com a atividade agrícola, eliminando, pelo menos em parte, o passivo ambiental gerado pelo acúmulo de escórias nos pátios das siderúrgicas.

Diante da possibilidade atual da reciclagem deste resíduo na agricultura, existem três fatores importantes a considerar. O primeiro seria a própria utilização de um resíduo industrial abundante, disponível e promissor, a escória de siderurgia, tendo em vista sua composição química; o segundo, o ambiente agrícola propício, solo ácido e de baixa fertilidade; e o terceiro, diz respeito às culturas responsivas e de importância socioeconômica, como a cana-de-açúcar, tendo em vista a vasta área cultivada que atinge cerca de 5 milhões de hectares, com uma produção de colmos de 345 milhões de toneladas (PRADO et al., 2001).

Diversos trabalhos relatam resultados promissores com relação às respostas de plantas ao uso de escórias como corretivo da acidez de solos (GOMES et al, 1962; WUTKE et al., 1962; RIBEIRO et al., 1986; LOUZADA, 1987; PRADO & FERNANDES, 2001). GOMES et al. (1962), em ensaios conduzidos com a cultura da batata e do tomate obtiveram maiores produções com a utilização de duas amostras de escória em relação ao calcário.

WUTKE et al. (1962), trabalhando com plantas de soja, observaram similaridade de respostas da produção de sementes nos tratamentos com escórias em comparação a outros três materiais corretivos: o calcário calcítico, o calcário dolomítico e o sambaqui do litoral paulista. No mesmo trabalho, os autores obtiveram produções cerca de dez vezes, em média, superior ao alcançado pela testemunha, não havendo diferenças significativas entre os corretivos.

RIBEIRO et al. (1986), utilizando uma escória de aciaria proveniente da Siderúrgica Pains, Contagem-MG, obtiveram produções de matéria seca, em média, 2,5 vezes superiores às da testemunha. Estes autores atribuíram este efeito benéfico da escória à redução do efeito tóxico do Al^{3+} e ao suprimento de cálcio e magnésio.

PRADO & FERNANDES (2001), avaliando a resposta da cana-de-açúcar, durante os dois primeiros cortes, utilizando como corretivo à escória de siderurgia, comparando-a com calcário calcítico, concluíram que ambos os corretivos promoveram o efeito benéfico semelhante, tanto na correção da acidez do solo quanto na elevação da concentração de Ca e Mg; a maior dose de calcário causou efeito depressivo na produção de cana-de-açúcar e no perfilhamento, fenômeno não observado com a escória; a cana-de-açúcar respondeu positivamente à aplicação da escória de siderurgia.

Diante do exposto, o presente trabalho teve como objetivo avaliar a resposta de uma variedade de sorgo ao uso da escória de aciaria como corretivo da acidez do solo.

2. MATERIAL E MÉTODOS

Um experimento foi instalado, em casa de vegetação, para avaliar a resposta de plantas de sorgo (*Sorghum bicolor* (L.) Moench), variedade BR-304, ao uso da escória de aciaria como corretivo de solo. Por se tratar de uma cultura de rápido crescimento e sensível à acidez do solo, o sorgo é muito utilizado em ensaios desta natureza.

Os solos utilizados foram os mesmos do experimento anterior, ou seja, Latossolo Vermelho-Amarelo e Latossolo Amarelo, ambos provenientes dos municípios de Viana e Nova Almeida-ES, respectivamente.

As doses de corretivo foram determinadas considerando-se a necessidade de calagem (NC), estimada a partir da acidez potencial dos solos e as quantidades foram corrigidas levando-se em consideração o poder neutralizante dos corretivos.

O experimento em arranjo fatorial [2 x (2 x 3 + 1)] foi montado no delineamento inteiramente casualizado, em três repetições, perfazendo 42 parcelas, sendo:

- dois solos;
- dois corretivos ($\text{CaCO}_3 + \text{MgCO}_3$ na proporção estequiométrica de 4:1 e a escória de granulometria inferior a 1,0 mm);
- três níveis de corretivo equivalentes a 0,6, 1,2 e 2,4 vezes a necessidade de calagem (NC); e
- uma testemunha para cada solo.

Amostras de 3,0 dm³ de solo, após receberem os respectivos tratamentos, foram acondicionadas em sacos plásticos. As parcelas foram incubadas, mantendo-se a

umidade em torno de 80% da capacidade de campo, por 21 dias. Após este período, as amostras foram secas ao ar e retiradas subamostras para determinação de pH em H₂O e teores de P, K, micronutrientes e metais extraíveis pelo extrator Mehlich-1. Determinaram-se, também, os teores de Ca, Mg e Al trocáveis, conforme DEFELIPO & RIBEIRO (1996).

A unidade experimental foi constituída por um vaso plástico, com 2,0 dm³ de solo, no qual foi realizada uma adubação complementar com NPKS, conforme recomendação proposta por CFSEMG (1999). Os vasos foram irrigados, plantando-se em seguida 12 sementes de sorgo por vaso. Decorridos 12 dias do plantio, foi efetuado o desbaste, deixando-se cinco plantas em cada unidade experimental.

As adubações com micronutrientes foram realizadas em duas etapas: a primeira, após o desbaste, e a segunda, dez dias após a primeira. Foram realizadas, também, adubações de cobertura, com 40 mg dm⁻³ de N na forma de uréia, a cada semana, durante o cultivo.

Decorridos 45 dias após a semeadura, a parte aérea das plantas foi colhida, acondicionada em sacos de papel e seca em estufa com circulação forçada de ar, a 70 °C, por 72 horas. O material vegetal foi, então, pesado, triturado e submetido à digestão nítrico-perclórica, para determinação das concentrações de Ca, Mg, Fe, Mn, Zn, Cu, Ni, Cd e Cr por espectrofotometria de absorção atômica, P por espectrofotometria de absorção molecular e K por fotometria de chama.

Após o cultivo, o solo de cada unidade experimental foi homogeneizado, coletando-se uma amostra para determinação de pH em H₂O, e os teores de P, K, micronutrientes e metais extraíveis, pelo extrator Mehlich-1. Determinaram-se, também, os teores de Ca, Mg e Al trocáveis, conforme DEFELIPO & RIBEIRO (1996).

A partir dos valores de produção de matéria seca da parte área do sorgo, dos teores de nutrientes nas plantas e dos teores recuperados dos solos pelos extratores, efetuou-se análises de variância e, levando-se em consideração a produção de matéria seca e o PRNT de 50 % da escória, foram estabelecidos os seguintes contrastes (C) para comparar o efeito dos níveis de corretivo aplicado:

- C₁ = T₁ vs T₅;
- C₂ = T₂ vs T₆;
- C₃ = T₇ vs T₁₁; e
- C₄ = T₈ vs T₁₂.

em que

T_1 = média do tratamento ao qual foi adicionado, no LVA, o nível 0,6 NC de CaCO_3 ;

T_2 = média do tratamento ao qual foi adicionado, no LVA, o nível 1,2 NC de CaCO_3 ;

T_5 = média do tratamento ao qual foi adicionado, no LVA, o nível 1,2 NC de escória;

T_6 = média do tratamento ao qual foi adicionado, no LVA, o nível 2,4 NC de escória;

T_7 = média do tratamento ao qual foi adicionado, no LA, o nível 0,6 NC de CaCO_3 ;

T_8 = média do tratamento ao qual foi adicionado, no LA, o nível 1,2 NC de CaCO_3 ;

T_{11} = média do tratamento ao qual foi adicionado, no LA, o nível 1,2 NC de escória; e,

T_{12} = média do tratamento ao qual foi adicionado, no LA, o nível 2,4 NC de escória.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Após a incubação dos solos por 21 dias, verificou-se que houve elevação do pH com o acréscimo dos corretivos, em níveis superiores ao mínimo necessário para cultivo adequado de plantas (Quadro 1). O nível 0,6 NC foi suficiente para diminuir o alumínio trocável a valores praticamente nulos. Os teores de Ca^{2+} e Mg^{2+} , no solo, se mostraram crescentes com o aumento dos níveis de ambos os corretivos (Figura 1). Neste particular, não houve diferença significativa entre a escória e o CaCO_3 em liberar Ca para o solo (Quadro 2).

Para os demais nutrientes, exceto o Fe e o Mn, não se verificou variação crescente nos teores disponíveis, em função dos níveis ou do tipo de corretivo aplicado (Quadro 1). Isto se justifica pela utilização de adubação complementar de todos os nutrientes, exceto Ca e Mg, que foram aplicados em níveis adequados para o cultivo.

Em virtude das elevadas concentrações de Fe e de Mn na escória, observou-se nos tratamentos onde as mesmas foram aplicadas, aumento significativo nos teores disponíveis de Fe e, principalmente, de Mn dos solos. Contudo, em virtude da elevação do pH dos solos ocasionado pela adição da escória, não foram verificados nas plantas de sorgo sintomas de toxidez (Quadro 2). Assim, para culturas mais sensíveis, cuidados devem ser tomados quanto à aplicação de deste resíduo.

Comportamento semelhante aos obtidos neste trabalho foi constatado por LOUZADA (1987), ao cultivar sorgo e soja em solos tratados com doses crescentes de escória de siderurgia. O autor constatou que houve incremento nos teores de Fe e Mn disponíveis dos solos, e o Mn limitou as produções de soja, sendo este efeito menos

Quadro 1 – Valores de pH e teores de Al^{3+} , Ca^{2+} , Mg^{2+} , P, K, Zn, Fe, Mn, Cu, Ni e Cd presentes nas amostras de solos antes e após o cultivo com sorgo, para os diferentes tratamentos do experimento sobre o uso da escória como corretivo. Valores médios (três repetições) \pm erro padrão da média

Solo	Corretivo	Nível	pH		Al^{3+}		Ca^{2+}		Mg^{2+}		
			Antes	Depois	Antes	Depois	Antes	Depois	Antes	Depois	
----- cmol _c dm ⁻³ -----											
LVA	Testemunha	0,0	5,9 \pm 0,01	6,2 \pm 0,01	0,6 \pm 0,1	0,2 \pm 0,0	1,14 \pm 0,07	0,59 \pm 0,02	0,92 \pm 0,01	0,19 \pm 0,05	
		0,6	6,8 \pm 0,01	5,8 \pm 0,07	0,0	0,0	4,48 \pm 0,09	2,58 \pm 0,05	1,13 \pm 0,01	0,82 \pm 0,01	
	Carbonato	1,2	7,6 \pm 0,01	6,3 \pm 0,01	0,0	0,0	7,86 \pm 0,10	3,92 \pm 0,08	1,34 \pm 0,06	0,95 \pm 0,04	
		2,4	8,1 \pm 0,01	7,3 \pm 0,01	0,0	0,0	11,50 \pm 0,09	5,73 \pm 0,14	1,42 \pm 0,02	1,14 \pm 0,03	
	Escória	0,6	6,7 \pm 0,01	5,8 \pm 0,02	0,0	0,0	4,33 \pm 0,05	2,06 \pm 0,10	1,20 \pm 0,04	0,94 \pm 0,07	
		1,2	7,3 \pm 0,01	6,3 \pm 0,02	0,0	0,0	6,80 \pm 0,18	3,09 \pm 0,05	1,65 \pm 0,57	1,34 \pm 0,06	
			2,4	7,9 \pm 0,09	7,0 \pm 0,01	0,0	0,0	9,07 \pm 0,02	4,42 \pm 0,04	1,92 \pm 0,02	0,56 \pm 0,07
	LA	Testemunha	0,0	6,3 \pm 0,01	6,5 \pm 0,02	0,2 \pm 0,1	0,0	1,06 \pm 0,02	0,67 \pm 0,03	0,43 \pm 0,04	0,23 \pm 0,01
0,6			7,2 \pm 0,05	5,7 \pm 0,01	0,0	0,0	3,22 \pm 0,05	1,50 \pm 0,05	0,57 \pm 0,02	0,39 \pm 0,05	
Carbonato		1,2	7,8 \pm 0,02	6,1 \pm 0,01	0,0	0,0	4,43 \pm 0,20	2,27 \pm 0,03	0,65 \pm 0,04	0,50 \pm 0,02	
		2,4	8,1 \pm 0,03	7,2 \pm 0,01	0,0	0,0	6,66 \pm 0,13	3,39 \pm 0,10	1,13 \pm 0,01	0,64 \pm 0,03	
Escória		0,6	7,0 \pm 0,02	5,5 \pm 0,01	0,0	0,0	2,92 \pm 0,06	1,35 \pm 0,09	0,59 \pm 0,02	0,37 \pm 0,05	
		1,2	7,4 \pm 0,02	6,1 \pm 0,01	0,0	0,0	3,95 \pm 0,07	1,71 \pm 0,01	0,79 \pm 0,03	0,58 \pm 0,03	
			2,4	7,7 \pm 0,05	7,0 \pm 0,01	0,0	0,0	3,93 \pm 0,99	2,64 \pm 0,14	1,43 \pm 0,07	0,70 \pm 0,16

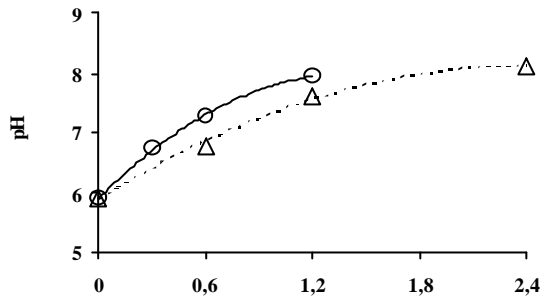
Quadro 1, Cont.

Solo	Corretivo	Nível	P		K				Zn		Fe	
			Antes	Depois	Antes	Depois	Antes	Depois	Antes	Depois		
----- mg dm ⁻³ -----												
LVA	Testemunha	0,0	2,03 ± 0,25	2,19 ± 0,04	151,01 ± 4,82	129,57 ± 9,71	2,12 ± 0,03	5,96 ± 0,38	3.458,17 ± 87,26	1.098,94 ± 84,37		
		0,6	17,84 ± 0,51	13,28 ± 0,24	281,75 ± 5,56	68,19 ± 3,06	2,00 ± 0,05	7,23 ± 1,03	3.555,17 ± 29,76	602,47 ± 39,06		
	Carbonato	1,2	17,47 ± 1,79	14,77 ± 1,06	284,53 ± 4,82	55,84 ± 0,67	2,32 ± 0,17	6,01 ± 0,36	3.427,33 ± 386,57	411,84 ± 48,94		
		2,4	15,33 ± 2,59	19,07 ± 2,49	287,32 ± 7,36	60,85 ± 7,76	1,91 ± 0,06	5,93 ± 0,27	2.102,00 ± 221,58	252,49 ± 58,71		
		0,6	17,61 ± 1,84	15,01 ± 0,44	270,62 ± 7,36	158,94 ± 38,34	1,90 ± 0,17	8,64 ± 0,93	3.577,17 ± 58,67	878,28 ± 20,56		
	Escória	1,2	17,71 ± 0,48	16,98 ± 0,18	267,84 ± 4,82	53,17 ± 2,00	2,03 ± 0,12	7,99 ± 1,15	4.579,00 ± 169,89	606,65 ± 18,34		
		2,4	18,00 ± 0,89	18,88 ± 0,76	281,75 ± 5,56	54,84 ± 1,46	2,70 ± 0,21	7,86 ± 1,43	5.135,50 ± 89,94	438,42 ± 3,09		
		0,0	3,63 ± 0,99	2,91 ± 0,19	103,72 ± 19,47	44,49 ± 1,20	0,79 ± 0,05	5,37 ± 0,13	2.075,17 ± 125,67	658,39 ± 31,41		
LA		0,6	17,52 ± 0,17	12,01 ± 0,25	214,99 ± 10,03	34,81 ± 1,67	0,85 ± 0,09	5,86 ± 0,36	1.543,67 ± 40,44	302,13 ± 17,23		
	Carbonato	1,2	17,71 ± 0,30	13,13 ± 0,24	206,64 ± 2,78	40,49 ± 4,18	1,09 ± 0,28	5,47 ± 0,44	1.466,83 ± 84,16	286,40 ± 18,61		
		2,4	17,44 ± 0,56	13,61 ± 0,99	234,46 ± 4,82	31,47 ± 1,34	0,92 ± 0,06	6,99 ± 1,71	1.442,50 ± 54,18	282,59 ± 6,08		
		0,6	18,07 ± 0,16	12,12 ± 0,45	217,77 ± 8,35	30,47 ± 1,86	0,93 ± 0,10	6,04 ± 1,40	1.813,33 ± 75,28	396,77 ± 7,89		
	Escória	1,2	16,79 ± 0,09	12,52 ± 0,25	212,21 ± 7,36	28,47 ± 0,33	0,78 ± 0,11	5,39 ± 0,31	2.025,00 ± 68,88	427,68 ± 15,01		
		2,4	17,00 ± 0,31	13,29 ± 0,75	217,77 ± 8,35	31,14 ± 1,53	0,85 ± 0,07	4,90 ± 0,77	2.738,33 ± 140,75	525,03 ± 77,93		

Quadro 1, Cont.

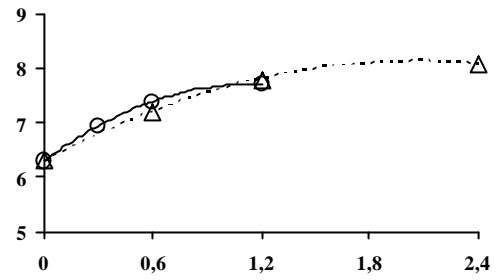
Solo	Corretivo	Nível	Mn		Cu		Ni		Cd		
			Antes	Depois	Antes	Depois	Antes	Depois	Antes	Depois	
----- mg dm ⁻³ -----											
LVA	Testemunha	0,0	15,63 ± 0,64	24,05 ± 2,05	1,70 ± 0,16	1,88 ± 0,27	1,29 ± 0,06	0,46 ± 0,08	0,16 ± 0,02	0,02 ± 0,01	
		0,6	17,84 ± 0,47	20,08 ± 0,71	1,53 ± 0,05	1,42 ± 0,04	0,77 ± 0,12	0,39 ± 0,03	0,14 ± 0,01	0,02 ± 0,01	
	Carbonato	1,2	23,73 ± 4,08	21,40 ± 0,42	1,47 ± 0,05	1,16 ± 0,04	1,23 ± 0,11	0,37 ± 0,06	0,15 ± 0,01	0,03 ± 0,01	
		2,4	17,56 ± 0,38	16,57 ± 2,03	1,16 ± 0,08	0,48 ± 0,16	1,24 ± 0,11	0,45 ± 0,07	0,20 ± 0,01	0,07 ± 0,01	
	Escória	0,6	51,08 ± 3,29	64,86 ± 1,21	1,37 ± 0,01	1,24 ± 0,09	0,71 ± 0,07	0,22 ± 0,04	0,12 ± 0,02	0,02 ± 0,01	
		1,2	103,47 ± 3,01	111,65 ± 9,17	1,30 ± 0,01	1,01 ± 0,04	1,16 ± 0,12	0,52 ± 0,02	0,14 ± 0,02	0,02 ± 0,00	
		2,4	196,00 ± 8,38	155,28 ± 7,36	1,16 ± 0,05	0,57 ± 0,07	0,93 ± 0,09	0,55 ± 0,03	0,14 ± 0,00	0,07 ± 0,00	
		0,0	8,58 ± 0,30	12,72 ± 0,81	0,29 ± 0,06	0,76 ± 0,05	0,60 ± 0,11	0,20 ± 0,11	0,07 ± 0,01	0,01 ± 0,00	
LA	Testemunha	0,6	9,15 ± 0,72	10,29 ± 0,47	0,29 ± 0,06	0,91 ± 0,11	0,82 ± 0,12	0,15 ± 0,07	0,08 ± 0,02	0,01 ± 0,00	
		1,2	8,24 ± 0,45	10,54 ± 0,49	0,46 ± 0,04	0,73 ± 0,13	0,34 ± 0,10	0,21 ± 0,05	0,08 ± 0,01	0,01 ± 0,01	
	Carbonato	2,4	9,05 ± 0,06	15,99 ± 2,14	0,34 ± 0,02	0,80 ± 0,32	0,81 ± 0,06	0,25 ± 0,03	0,10 ± 0,02	0,01 ± 0,00	
		0,6	31,89 ± 0,59	33,70 ± 0,69	0,40 ± 0,08	1,17 ± 0,38	0,45 ± 0,20	0,19 ± 0,01	0,06 ± 0,01	0,01 ± 0,00	
	Escória	1,2	53,01 ± 2,80	47,79 ± 0,45	0,28 ± 0,05	0,94 ± 0,11	0,52 ± 0,06	0,20 ± 0,09	0,04 ± 0,01	0,01 ± 0,00	
		2,4	115,90 ± 9,63	105,60 ± 12,95	0,23 ± 0,04	0,66 ± 0,17	0,60 ± 0,05	0,18 ± 0,04	0,08 ± 0,01	0,01 ± 0,01	

Latossolo Vermelho-Amarelo (Viana-ES)

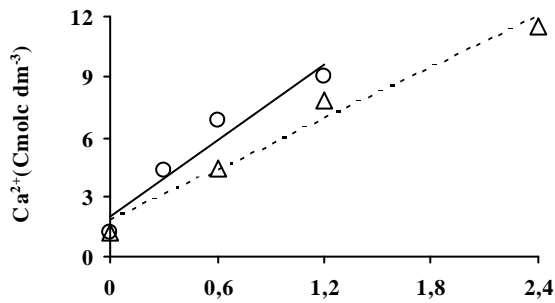


$\Delta \hat{Y} = 5,87 + 1,85^{***} X - 0,38^{***} X^2 R^2 = 0,9972^{**}$
 $\circ \hat{Y} = 5,01 + 1,47^{***} X - 0,30^{***} X^2 R^2 = 0,9988^{**}$

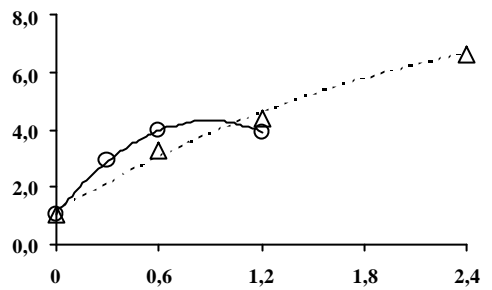
Latossolo Amarelo (Nova Almeida-ES)



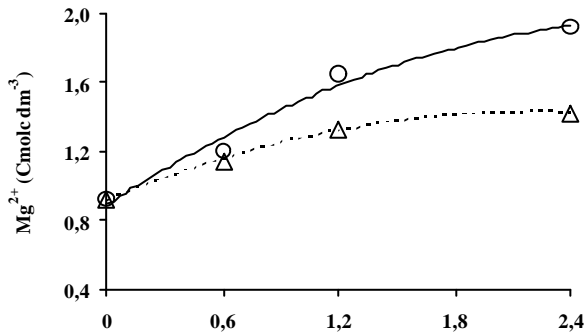
$\Delta \hat{Y} = 6,29 + 1,78^{***} X - 0,43^{***} X^2 R^2 = 1,0000^{**}$
 $\circ \hat{Y} = 6,29 + 1,24^{***} X - 0,27^{***} X^2 R^2 = 0,9999^{**}$



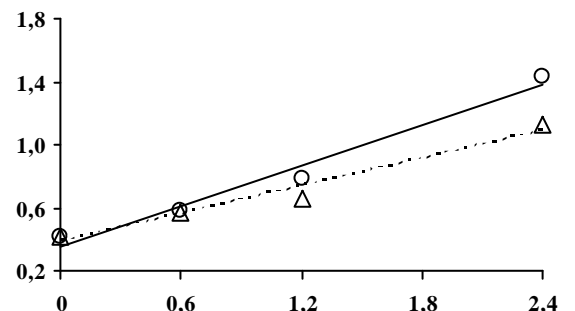
$\Delta \hat{Y} = 436,98 + 809,93^* X R^2 = 0,9940^{**}$
 $\circ \hat{Y} = 479,65 + 595,42^* X R^2 = 0,9552^*$



$\Delta \hat{Y} = 474,6 + 4.504,00^* X - 3.962,90^{\circ} \sqrt{X} R^2 = 0,9546^{**}$
 $\circ \hat{Y} = 383,20 + 467,11^* X - 123,54^* X^2 R^2 = 0,9821^*$



$\Delta \hat{Y} = 110,90 + 56,87^{***} X - 12,86^* X^2 R^2 = 0,9944^*$
 $\circ \hat{Y} = 108,20 + 88,59^{***} X - 15,00^* X^2 R^2 = 0,9809^{**}$



$\Delta \hat{Y} = 47,48 + 35,40^{**} X R^2 = 0,9625^{**}$
 $\circ \hat{Y} = 44,04 + 51,17^{**} X R^2 = 0,9747^{**}$

Δ CaCO3 \circ Escória

***, **, * e ° Coeficientes significativos, a 0,1, 1, 5 e 10% de probabilidade, respectivamente.

Figura 1 – Valores de pH e teores de Ca^{2+} e Mg^{2+} presentes nas amostras de solos antes do cultivo com sorgo, para os diferentes tratamentos do experimento sobre uso da escória como corretivo.

Quadro 2 – Análise de variância para pH, Ca, Mg, P, K, Zn, Fe, Mn, Cu, Ni e Cd nos solos, antes do plantio do sorgo, do experimento sobre “Uso de Escória como Corretivo de Solos”

F.V.	G.L.	Q.M.										
		pH	Ca	Mg	P	K	Zn	Fe	Mn	Cu	Ni	Cd
Solo	1	0,44**	1,3 E+04 ^{n.s.}	55.655,89**	1,22 E+05**	40.464,29**	19,11**	3,7.3 E+08**	7.242,50**	14,54**	2,80**	0,73E-01 ^{n.s.}
Corretivo	1	0,46**	5,54 E+07 ^{n.s.}	4.853,48**	3,06 ^{n.s.}	326,45 ^{n.s.}	0,001 ^{n.s.}	7,51 E+07**	40.676,57**	0,50E-01 ^{n.s.}	0,14 ^{n.s.}	0,42E-02 ^{n.s.}
Nível	3	7,85**	10,89 E+08*	21.050,78**	14.44,96**	44.093,48**	0,080 ^{n.s.}	1,16 E+07 ^{n.s.}	11.779,16**	0,15**	0,15*	0,21E-02*
Corretivo d/ Solo	1	0,05**	2,96 E+07 ^{n.s.}	497,51 ^{n.s.}	16,57 ^{n.s.}	117,52 ^{n.s.}	0,09 ^{n.s.}	8,14 E+05**	2.569,46**	0,40E-02 ^{n.s.}	0,3E-03 ^{n.s.}	0,52E-04 ^{n.s.}
Nível d/ Solo	3	0,16**	1,47 E+07 ^{n.s.}	1170,11**	8,775,08**	194,91 ^{n.s.}	0,071 ^{n.s.}	4,59.E+05**	879,97**	0,16**	0,28**	0,49E-03 ^{n.s.}
Nível d/ Corretivo	3	0,08**	4,51 E+07 ^{n.s.}	1.483,94**	17,50 ^{n.s.}	63,36 ^{n.s.}	0,22*	2,93 E+07**	11.446,82**	0,02 ^{n.s.}	0,75 ^{n.s.}	0,69E-03 ^{n.s.}
Trat.	(15)											
C1	1	0,37**	3,23 E+05**	5.887,53 ^{n.s.}	0,03 ^{n.s.}	290,18 ^{n.s.}	0,002 ^{n.s.}	1,57 E+08**	10.997,89**	0,08**	0,23 ^{n.s.}	9,25E-18 ^{n.s.}
C2	1	0,19**	8,76E+05**	7.455,38**	0,43 ^{n.s.}	11,61 ^{n.s.}	0,21 ^{n.s.}	4,38 E+06*	44.515,42**	0,15*	0,14 ^{n.s.}	1,50 E-4 ^{n.s.}
C3	1	0,05*	3,16 E+04**	1034,25**	55,01*	11,61 ^{n.s.}	0,001 ^{n.s.}	3,48 E+08**	2.885,55**	2,66 E-04 ^{n.s.}	0,14 ^{n.s.}	1,67 E-03 ^{n.s.}
C4	1	0,01 ^{n.s.}	1,49 E+04 ^{n.s.}	13.421,38**	52,02 ^{n.s.}	185,72 ^{n.s.}	0,84 ^{n.s.}	2,43 E+06**	17.384,93**	0,77*	0,10 ^{n.s.}	0,01 ^{n.s.}
Resíduo	28	0,002	3,48 E+07	193,80	11,53	202,3	5,27 E-02	6,54 E+04	44,46	1,25E-02	3,40E-02	6,20E-04
C.V. (%)		0,57	140,139	10,57	4,759	6,16	15,15	9,19	14,18	13,06	22,38	22,46

^{1/} C₁ = T₁ vs T₅; C₂ = T₂ vs T₆; C₃ = T₇ vs T₁₁; e C₄ = T₈ vs T₁₂, em que T₁ (nível 0,6 de CaCO₃), T₂ (nível 1,2 CaCO₃), T₅ (nível 1,2 de escória) e T₆ (nível 2,4 de escória) são médias dos tratamentos aplicados no LVA. T₇ (nível 0,6 de CaCO₃), T₈ (nível 1,2 de CaCO₃), T₁₁ (nível 1,2 de escória) e T₁₂ (nível 2,4 de escória) são médias dos tratamentos aplicados no LA;

** e * Coeficiente significativo, a 1 e 5% de probabilidade, respectivamente pelo teste F.

^{n.s.} Coeficientes não-significativos.

pronunciado com o aumento da dose utilizada. Tal comportamento não foi verificado em plantas de sorgo.

Outro aspecto positivo verificado neste ensaio foi com relação ao teor de Cd nos solos tratados com escória, que foi estatisticamente semelhante ou inferior aos níveis encontrados nos solos corrigidos com carbonatos, indicando que a escória não promoveu aumento do teor deste elemento tóxico no solo, mesmo nos mais altos níveis aplicados (Quadro 1). Com relação à produção de matéria seca, apesar dos teores de Ca e os valores de pH, nos tratamentos em que se aplicou escória, terem sido inferiores aos verificados para os tratamentos com CaCO_3 (Quadro 1), observou-se comportamento estatisticamente idêntico entre o carbonato e a escória em cada solo cultivado (Quadro 3). Diferença significativa foi constatada entre os solos, onde se observou maior produção de matéria seca no Latossolo Amarelo em relação ao Latossolo Vermelho-amarelo.

Os contrastes estabelecidos entre os níveis de CaCO_3 e os níveis equivalentes de escórias, considerando PRNT 50%, mostraram, de uma maneira geral, não haver diferença significativa na produção matéria seca entre corretivos (Quadro 3). Diferença significativa foi observada no C_3 , onde se constatou produção de matéria seca, neste caso em particular, maior nos tratamentos com escória.

Os teores de Ca e Mg na matéria seca foram crescentes com o aumento dos níveis de corretivo, tanto para escória quanto para o carbonato (Quadro 4), com diferenças significativas em função do tipo de corretivo apenas para Ca, mas não para Mg (Quadro 3). Observou-se maior acúmulo destes nutrientes nas plantas cultivadas no LA. Verificou-se, ainda, que apenas para os tratamentos em que não se aplicou corretivo e para o tratamento em que se aplicou escória no nível 0,6 NC, o teor de Ca na matéria seca foi inferior aos teores normalmente encontrados deste nutriente na matéria seca das plantas em geral, que varia entre 5.000 e 30.000 mg kg^{-1} (MALAVOLTA, 1981). Conforme THOMAS & HARGROVE (1984), níveis adequados de Ca ajudam a planta a evitar estresse decorrente da presença de metais pesados e, ou, salinidade.

Para todas as situações avaliadas os teores de Mg na planta encontravam-se dentro dos teores considerados normais. Contudo, teores mais adequados foram verificados tanto para os tratamentos com escória quanto para carbonato com o incremento dos níveis (Quadro 4). A concentração de Mg nos tecidos vegetais pode variar de 1.500 a 10.000 mg kg^{-1} (MALAVOLTA, 1981).

Quadro 3 – Análise de variância para matéria seca (MS) e teores de Ca, Mg, P, K, Zn, Fe, Mn, Cu, Ni e Cd nas plantas de sorgo do experimento sobre “Uso de Escória como Corretivo de Solos”

F.V.	G.L.	Q.M.											
		MS	Ca	Mg	P	K	Zn	Fe	Mn	Cu	Ni	Cd	
Solo	1	184,73 **	9,50E+07 **	9,19E+06 **	2,37E+07 **	6,09E+08 **	682,52 **	5,95E+04 **	7,95E+04 n.s.	496,92 n.s.	316,54 *	1,56E-02 n.s.	
Corretivo	1	0,46 n.s.	4,96E+06 **	1,79E+05 n.s.	1,26E+04 n.s.	3,09E+05 n.s.	276,39 *	4,54E+03 n.s.	6,68E+04 n.s.	2,79E+03 n.s.	6,46 n.s.	0,39 n.s.	
Nível	2	28,16 **	6,42E+07 **	2,59E+06 **	3,53E+05 n.s.	4,18E+06 n.s.	932,81 **	5,82E+04 **	7,46E+04 n.s.	558,16 n.s.	277,93 **	6,42E-02 n.s.	
Corretivo d/ Solo	1	3,71 n.s.	1,81E+05 n.s.	5,30E+05 n.s.	4,73E+04 n.s.	3,06E+05 n.s.	1,74E-03 n.s.	8,07E+03 *	1,38E+05 n.s.	111,13 n.s.	7,79 n.s.	0,63 n.s.	
Nível d/ solo	2	1,25 n.s.	3,59E+06 **	1,69E+06 **	1,69E+06 **	3,41E+06 n.s.	131,58 *	4,50E+04 **	1,26E+05 n.s.	1791,21 n.s.	191,62 *	0,26 n.s.	
Nível d/ Corretivo	2	0,44 n.s.	6,52E+05 n.s.	2,10E+05 n.s.	1,26E+05 n.s.	1,48E+07 *	100,19 n.s.	1,17E+03 n.s.	1,48E+05 n.s.	712,76 n.s.	163,05 n.s.	0,66 n.s.	
Trat.	(11)												
C ₁ ¹	1	4,42 n.s.	4,34E+06 *	2,57E+06 **	1,22E+05 n.s.	1,15E+05 n.s.	231,26 *	1,02E+03 n.s.	294,00 n.s.	4704,00 n.s.	60,17 n.s.	0,84 n.s.	
C ₂	1	0,19 n.s.	1,71E+06 n.s.	2,28E+06 **	2,13E+04 n.s.	4,62E+05 n.s.	352,67 **	135,38 n.s.	23,01 n.s.	46,76 *	11,34 n.s.	0,94 n.s.	
C ₃	1	8,31 *	1,35E+02 n.s.	2,24E+05 n.s.	2,69E+04 n.s.	1,28E+04 n.s.	555,84 n.s.	2,45E+04 **	5,51 n.s.	2,04 n.s.	145,04 *	0,17 n.s.	
C ₄	1	1,15 n.s.	1,28E+07 **	1,35E+05 n.s.	5,66E+05 n.s.	8,67 n.s.	25,01 n.s.	8,88E+04 **	19,26 n.s.	1,04 n.s.	100,04 n.s.	0,51 *	
Resíduo	26	1,83	3,42E+05	1,69E+05	1,59E+05	2,70E+06	37,05	1717,01	1,23E+05	1072,55	48,54	0,29	
C.V. (%)		9,44	6,75	8,38	19,06	17,55	40,08	30,29	238,30	224,89	51,27	13,00	

^{1/} C₁ = T₁ vs T₅; C₂ = T₂ vs T₆; C₃ = T₇ vs T₁₁; e C₄ = T₈ vs T₁₂, o nível 1,2 CaCO₃ vs nível 2,4 Escória, em que: T₁ (nível 0,6 de CaCO₃); T₂ (nível 1,2 CaCO₃); T₅ (nível 0,6 de escória); vs nível 2,4 Escória; nível 0,6 CaCO₃ vs nível 1,2 Escória.

** e * Coeficientes significativos, a 1 e 5 % de probabilidade, pelo teste F.

n.s. Coeficientes não-significativos.

Quadro 4 – Produção de matéria seca (MS) e teores de Ca, Mg, P, K, Zn, Fe, Mn, Cu, Ni e Cd em plantas de sorgo após 45 dias de cultivo, para os diferentes tratamentos utilizados no experimento sobre o uso da escória como corretivo. Valores médios (três repetições) ± erro-padrão da média

Solo	Corretivo	Nível	MS	Ca	Mg	P	K	Zn	
			----- g vaso ⁻¹ -----	----- g kg ⁻¹ -----					----- mg kg ⁻¹ -----
LVA	Testemunha	0,0	1,46 ± 0,01	1,38 ± 79,92	1,88 ± 19,50	0,20 ± 1,17	9,22 ± 281,15	39,58 ± 82	
		0,6	10,79 ± 1,09	5,01 ± 274,94	3,47 ± 122,23	1,06 ± 5,00	13,10 ± 974,12	34,92 ± 28	
		1,2	13,64 ± 1,21	7,90 ± 100,00	4,19 ± 52,74	1,27 ± 138,97	11,72 ± 687,22	21,08 ± 47	
		2,4	13,11 ± 0,89	9,50 ± 260,15	4,98 ± 107,61	1,58 ± 99,74	16,15 ± 121,01	10,92 ± 68	
	Escória	0,6	9,15 ± 0,83	4,05 ± 471,19	3,59 ± 257,86	1,07 ± 68,88	15,88 ± 154,81	22,08 ± 73	
		1,2	12,51 ± 0,79	6,70 ± 427,15	4,78 ± 135,31	1,34 ± 102,92	12,83 ± 554,75	22,50 ± 28	
		2,4	13,29 ± 0,83	8,99 ± 501,56	5,43 ± 133,53	1,38 ± 55,68	11,16 ± 891,64	5,75 ± 66	
	LA	Testemunha	0,0	1,35 ± 0,12	2,14 ± 359,33	2,63 ± 342,87	0,20 ± 2,75	7,83 ± 209,06	33,25 ± 27
			0,6	14,92 ± 0,39	5,01 ± 335,57	5,15 ± 91,09	3,30 ± 404,80	5,06 ± 423,70	25,17 ± 61
1,2			16,82 ± 0,66	7,90 ± 313,72	5,40 ± 58,17	2,84 ± 296,20	5,15 ± 333,37	6,25 ± 41	
Carbonato		2,4	17,47 ± 0,82	9,50 ± 511,92	5,86 ± 318,36	2,41 ± 216,97	5,52 ± 244,62	9,42 ± 30	
		0,6	15,49 ± 0,30	4,05 ± 272,90	5,46 ± 146,32	3,49 ± 422,06	5,42 ± 403,02	16,08 ± 55	
Escória		1,2	17,28 ± 0,36	6,70 ± 279,25	5,53 ± 250,81	3,16 ± 177,83	5,15 ± 403,02	5,92 ± 94	
		2,4	17,69 ± 0,84	8,99 ± 45,37	5,10 ± 530,47	2,23 ± 361,86	5,15 ± 183,73	2,17 ± 36	

Quadro 4, Cont.

Solo	Corretivo	Nível	Fe	Mn	Cu	Ni	Cd	
			----- mg kg ⁻¹ -----					
LVA	Testemunha	0,0	1223,33 ± 229,07	104,08 ± 6,58	11,08 ± 1,86	131,75 ± 29,13	3,17 ± 0,08	
	Carbonato	0,6	86,00 ± 15,86	106,75 ± 4,30	14,42 ± 2,10	7,25 ± 1,42	3,75 ± 0,29	
		1,2	97,92 ± 11,22	77,00 ± 3,85	11,25 ± 0,63	11,17 ± 4,69	3,92 ± 0,30	
		2,4	115,67 ± 32,65	59,42 ± 0,74	10,50 ± 1,66	13,33 ± 1,84	4,17 ± 0,30	
	Escória	0,6	76,67 ± 8,58	154,58 ± 18,96	8,75 ± 0,14	10,00 ± 2,60	3,83 ± 0,22	
		1,2	112,08 ± 34,15	120,75 ± 7,73	8,75 ± 1,64	13,58 ± 2,43	4,50 ± 0,14	
		2,4	88,42 ± 12,75	80,92 ± 15,56	5,67 ± 1,45	8,42 ± 2,17	3,67 ± 0,30	
	LA	Testemunha	0,0	627,83 ± 256,38	66,58 ± 11,51	5,67 ± 0,73	63,75 ± 25,87	3,67 ± 0,08
		Carbonato	0,6	54,83 ± 7,79	91,33 ± 4,59	4,33 ± 0,96	8,58 ± 1,40	3,92 ± 0,17
1,2			107,50 ± 12,71	50,75 ± 2,52	2,83 ± 1,53	11,08 ± 2,24	4,08 ± 0,08	
2,4			291,46 ± 53,51	54,58 ± 12,03	9,83 ± 1,86	32,67 ± 4,88	4,50 ± 0,66	
Escória		0,6	77,58 ± 4,84	130,08 ± 9,62	3,92 ± 0,58	9,33 ± 2,98	4,00 ± 0,38	
		1,2	182,67 ± 26,42	89,42 ± 5,27	5,50 ± 2,27	18,42 ± 2,33	3,58 ± 0,36	
		2,4	350,75 ± 24,52	47,17 ± 11,71	2,00 ± 0,25	19,25 ± 10,45	3,50 ± 0,14	

Com relação ao fósforo não se observaram diferenças estatisticamente significativas entre os dois tipos de corretivos (Quadro 3). Verificou-se, de forma similar ao observado para o cálcio e magnésio, teor de P mais elevados na parte aérea das plantas cultivadas no LA. Neste solo, observou-se aumento do P até o nível equivalente a 0,6 vez a NC. A partir daí, verificou-se declínio na concentração de P, fato que é explicado pela diluição deste elemento dentro da planta em função do aumento de produção de material vegetal. Segundo MALAVOLTA (1981), a faixa de suficiência em P, para a maioria das culturas, pode variar entre 1.200 e 3.000 mg kg⁻¹. Assim, para este ensaio, verifica-se que o P não foi limitante para a produção vegetal, mesmo porque este elemento foi aplicado em níveis que propiciassem adequado desenvolvimento das plantas.

Com relação ao K não foi observado efeito significativo do tipo de corretivo utilizado, mas o tipo de solo apresentou efeito significativo (Quadro 3). Não se verificou, também, efeito do nível de corretivo utilizado sobre o teor de K na parte aérea das plantas. Valores mais comumente encontrados de K nos tecidos vegetais situam-se na faixa de 10.000 a 35.000 mg kg⁻¹ (MALAVOLTA, 1981).

Tratando-se agora dos micronutrientes, elementos exigidos em quantidades relativamente pequenas pelas plantas, verificou-se decréscimo na concentração de Zn nas plantas, em função do aumento dos níveis do corretivo (Quadro 4). Isto se deve à menor disponibilidade do Zn no solo, à medida que o pH se leva (LINDSAY, 1979). Não foi verificado, para este micronutriente, efeito significativo em função do tipo de corretivo, mas, sim, em função do tipo de solo (Quadro 3). Estes resultados indicam que a escória não é uma boa fonte de Zn para as plantas, pois ao elevar o pH do solo há diminuição na solubilidade do Zn, tornando-o menos disponível para as plantas.

Além disso, a escória possui teor de Zn relativamente baixo, conforme pode ser verificado no Quadro 3 do capítulo anterior. A faixa de concentração do Zn nos tecidos foliares varia entre 27 e 150 mg kg⁻¹, dependendo da espécie. A concentração de Zn ficou dentro desta faixa apenas para os tratamentos sem corretivo e para o tratamento em que foram aplicados carbonatos no nível referente a 0,6 NC no solo LVA de Viana (Quadro 2). O Zn atua como constituinte de algumas enzimas ou como co-fator destas. Sua deficiência afeta o crescimento das plantas, resultando pequena expansão foliar e encurtamento de internódios (MENGEL & KIRBY, 1987).

A dinâmica do ferro no solo assemelha-se à do zinco, ou seja, com a elevação do pH, o Fe precipita, limitando a sua absorção pelas plantas. Este fato explica a diminuição da concentração deste elemento na parte aérea das plantas com a aplicação dos corretivos, a partir do nível 0,6 NC. A partir daí, houve pequeno incremento no acúmulo deste elemento nas plantas, tanto para o tratamento com carbonato quanto para com a escória. Este comportamento do Fe e do Zn, de certa forma, é benéfico às plantas, pois limitam, em algumas situações, problemas de fitotoxidez destes elementos. A concentração normal do Fe na matéria seca de plantas cultivadas varia entre 50 e 150 mg kg⁻¹ (MALAVOLTA, 1981). Os teores médios de Fe na matéria seca foram superiores aos valores normalmente observados para os cultivos realizados nos tratamentos sem corretivos em ambos os solos e também para os níveis mais altos dos corretivos no solo LA, principalmente no caso da escória (Quadro 4). No entanto, não se verificou efeito de fitotoxidez causada por este elemento em nenhum destes casos.

Os níveis de Mn nas plantas, de modo geral, apresentaram-se dentro da faixa considerada normal na literatura pertinente, que varia entre 20 e 100 mg kg⁻¹ na matéria seca de folhas. No entanto, não houve diferença significativa em função do tipo de corretivo utilizado (Quadro 3). Observou-se que com o aumento dos níveis dos corretivos houve uma diminuição no conteúdo deste nutriente na planta, o que está estritamente relacionado com o aumento do pH do solo, semelhante ao observado para Zn e Fe, como também pelos incrementos de Ca nos solos. Conforme PAVAN & BINGHAM (1981), o aumento da concentração de Ca na zona da raiz pode diminuir a absorção e o efeito tóxico de Mn, pois eles competem pelo mesmo sítio de absorção.

Os teores de cobre na parte aérea das plantas apresentaram-se dentro da faixa normalmente encontrada nas plantas (Quadro 3), entre 5 e 30 mg kg⁻¹. Não se verificaram diferenças significativas em função do tipo ou nível de corretivo utilizado e do tipo de solo (Quadro 4). O Cu atua como co-fator de enzimas, participa do metabolismo de proteínas e de carboidratos e na fixação simbiótica de N₂ (MENGEL & KIRBY, 1987).

Não foram verificadas diferenças significativas do Ni absorvido pelas plantas de sorgo em função do tipo de corretivo. Os teores de Cd nas plantas também não apresentaram diferenças significativas, em função do tipo de corretivo utilizado ou

tipo de solo (Quadro 3). Não foi detectada, pelo método analítico utilizado, a presença do Cr ($< 0,60 \text{ mg kg}^{-1}$) nas plantas em nenhum dos tratamentos.

4. CONCLUSÕES

1. A escória mostrou-se eficiente para corrigir a acidez, neutralizar o alumínio tóxico dos solos e suprir as plantas com Ca e Mg.

2. Com a utilização da escória de aciaria houve aumento significativo nos teores disponíveis de Fe e, principalmente, de Mn em ambos solos. Contudo, mesmo no maior nível aplicado não foram constatados sintomas de toxidez nas plantas.

3. Os teores de Cd nas plantas não apresentaram diferenças significativas, em função do tipo de corretivo utilizado ou do tipo de solo, e não foi detectada a presença de Cr no tecido das plantas em nenhum dos tratamentos.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

COMISSÃO DE FERTILIDADE DO SOLO DO ESTADO DE MINAS GERAIS. **Recomendação para uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais – 5ª Aproximação**. Viçosa, MG. 1999. 359 p.: il.

DEFELIPO, B. V. & RIBEIRO, A. C. **Análise química do solo (metodologia)**. Viçosa: UFV, 1996. 17 p. (Boletim, 29).

GOMES, A. G.; GARGANTINI, H.; BLANCO, H. G. Comportamento de tipos de escória de siderurgia como corretivo da acidez do solo. **Bragantia**, v. 24, p. 173-179, 1962.

LINDSAY, W. L. **Chemical equilibria in soil**. New York: John Wiley and Sons, 1979. 439 p.

LOUZADA, P. T. C. **Eficiência de uma escória de siderurgia como corretivo e fertilizante de solo**. Viçosa: UFV, 1987. 52 f. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) - Universidade Federal de Viçosa, 1987.

MALAVOLTA, E. **Manual de química agrícola - adubos e adubação**. 3. ed. São Paulo: Editora Ceres, 1981. 596 p.

MENGEL, K.; KIRKBY, E.A. **Principles of plant nutrition**. International Potash Institute, 1987. 687 p.

NOGUEIRA, A. V. **Eficiência agrônômica, como fertilizante, de um lodo de esgoto e de dois resíduos proveniente de indústria siderúrgica**. Viçosa: UFV, 1990. 85 f. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) - Universidade Federal de Viçosa, 1990.

PAVAN, M. A.; BINGHAM, F. T. Toxidez de metais em plantas: II. Caracterização da toxidez do níquel em cafeeiros. **Pesq. Agropec. Bras.**, v. 17, p. 323-328, 1982.

PRADO, R. M. & FERNANDES, F. M. Resposta de cana-de-açúcar à aplicação da escória de siderurgia como corretivo de acidez do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 25, p. 199-207, 2001.

PRADO, R. M.; FERNANDES, F. M.; NATALE, W. **Uso agrícola da escória de siderurgia no Brasil** – Estudos na cultura da cana-de-açúcar. Jaboticabal: Funep, 2001. 67 p.

RIBEIRO, A. C.; FIRME, D. J.; MATOS, A. C. M. Avaliação da eficiência de uma escória de aciaria como corretivo da acidez. **Revista Ceres**, v. 33, n. 187, p. 242-248, 1986.

THOMAS, G. W., HARGROVE, W. L. The Chemistry of soil acidity. In: F. ADAMS (Ed.). **Soil acidity and liming**. 2. ed. Madison: ASA, CSSA, SSSA, 1984. p. 3-56.

WUTKE, A. C. P. & GARGANTINI, H. Avaliação das possibilidades de escórias de siderurgia como corretivo da acidez do solo. **Bragantia**, v. 21, p. 797-805, 1962.

CAPÍTULO 3

RESPOSTAS DAS PLANTAS AO USO DA ESCÓRIA COMO FERTILIZANTE FOSFATADO E FONTE DE ZINCO

1. INTRODUÇÃO

O uso de fontes alternativas de nutrientes para as plantas, como lodo de tratamento biológico, composto de lixo urbano, resíduos siderúrgicos e diferentes tipos de resíduos industriais, tem sido apresentado como uma opção para o seu descarte. Desta forma, a utilização de escórias na agricultura traz como benefícios não apenas a correção da acidez do solo e suprimento de cálcio e magnésio, mas, também, como fonte de P, Si e, principalmente, micronutrientes para as culturas, podendo, em alguns casos, justificar seu uso como corretivo e fertilizante. Outrossim, os teores destes elementos na escória dependem fundamentalmente da constituição química da matéria-prima utilizada na obtenção do produto siderúrgico, bem como, do tipo de material refratário utilizado.

Comparando a composição química de duas escórias de alto forno com amostras de 31 calcários de diferentes origens, Valadares et al. (1974), citados por LOUZADA (1987), verificaram maiores teores de micronutrientes nas escórias. Num trabalho semelhante, PEREIRA (1978) verificou teores mais elevados de Zn, Cu, Fe, Mn e B em escórias comparativamente a sete calcários metamórficos. PRADO & FERNANDES (2001), utilizaram em seus trabalhos uma amostra de escória contendo 300, 400, 900 mg kg⁻¹ de B, Cu e Zn, respectivamente, 2,47 dag kg⁻¹ de Mn e 26,18 dag kg⁻¹ de Fe.

Assim, quando comparadas ao calcário, as escórias contribuem com o incremento de micronutrientes ao solo, podendo prever melhores respostas quando aplicadas em solos com maiores limitações de micronutrientes às plantas (UFV, 1983).

Apesar dos efeitos positivos, a aplicação deste material pode elevar os teores de Fe e Mn, presentes em quantidades relativamente elevadas nestes resíduos nos solos, podendo causar problemas de fitotoxidez, principalmente em plantas mais sensíveis. Entretanto, conforme relatado no capítulo anterior, a reação alcalina da escória promove a elevação do pH do solo, reduzindo a disponibilidade destes elementos e limitando sua absorção pela planta.

LOUZADA (1987), concluiu, no seu ensaio com plantas de soja, que a maior disponibilidade de Mn nos solos tratados com escória limitou a obtenção de produções mais elevadas, sendo este efeito menos pronunciado com o aumento da dose utilizada.

Em virtude do teor elevado de silício nos diferentes tipos de escória, que variam entre 12 a 22 dag kg⁻¹ e entre 36 a 42 dag kg⁻¹ em escórias de aciaria e de autoforno, respectivamente (PIAU, 1999), a mesma vem sendo utilizada como fonte deste elemento para as culturas, em especial as gramíneas. Apesar de não ter sua essencialidade comprovada, parece que o Si favorece o aumento da tolerância de algumas culturas em níveis elevados de Mn e Al, aumenta a redistribuição do Mn na planta e aumenta a tolerância a algumas pragas e doenças (Russel, 1976 e Foy et al., 1978, citados por LOUZADA, 1987).

PRADO & FERNANDES (2001), verificaram que a aplicação de calcário na dose equivalente a 3,8 t ha⁻¹ resultou decréscimo na produção de colmos, enquanto para a escória na mesma dose equivalente, foi constatada resposta linear na produção de colmos e no perfilhamento da cana-de-açúcar. Estes autores inferiram a isto, pelo menos em parte, a presença do silício na composição química da escória e a eficiência da cana-de-açúcar em extrair silício do solo.

Outro ponto relevante no que tange a aplicação de escória no solo, é quanto ao aumento na disponibilidade de P, provocado pela adição de silicato ao meio (LOUZADA, 1987; PRADO & FERNANDES, 1999; PRADO et al., 2001). Conforme PRADO et al. (2001), existem duas teorias que explicam o efeito benéfico da escória no aumento da disponibilidade de P no solo. A primeira considera que o incremento de ânions silicatos no solo, a princípio, provoca competição entre Si e P pelos mesmos sítios de adsorção, de forma que o silício provocaria a saturação do solo, reduzindo seu poder de adsorção de P. A segunda, embora menos provável, o Si também poderia

deslocar o P, previamente adsorvido para a solução do solo.

Desta maneira, o efeito benéfico do silício, no que se refere ao emprego das escórias de siderurgia, é aparentemente sustentável, minimizando as pesadas adubações fosfatadas que são recomendadas para solos tropicais (CARVALHO, 1999). Soma-se a isto, a presença do P na composição química das escórias que podem contribuir para o incremento deste nutriente no solo. Neste particular, a escória de Thomas tem seu principal uso como fertilizante fosfatado, por conter teores de 12,5 a 22,8 dag kg⁻¹ de P₂O₅ solúvel em ácido cítrico (LOUZADA, 1987).

RIBEIRO et al. (1986), avaliando os conteúdos dos principais nutrientes de uma escória de aciaria, encontraram teores baixos de fósforo (1,26 dag kg⁻¹ de P₂O₅), o que limitou sua aplicação como fonte de fertilizante fosfatado. Contudo, os mesmos autores relataram que este baixo teor não deve ser desprezado, pois uma aplicação de 5 t ha⁻¹ corresponderia à adição de 63 kg ha⁻¹ de P₂O₅ ou 315 kg ha⁻¹ de superfosfato simples.

Assim, visando observar os efeitos benéficos da utilização de uma escória de aciaria na disponibilidade de nutrientes, este trabalho teve como objetivo, avaliar a utilização desta escória como fertilizante fosfatado e fonte de zinco para plantas.

2. MATERIAL E MÉTODOS

Foi instalado um ensaio, em casa de vegetação, onde se avaliou a eficiência da escória como fonte de fósforo e zinco para plantas de sorgo (*Sorghum bicolor* (L.) Moench), variedade BR-304. Neste ensaio, foi utilizada a escória de granulometria inferior a 1,0 mm e dois solos representantes da classe dos Latossolos, cujas composições químicas encontram-se, respectivamente, nos Quadros 2 e 3, do Capítulo 1.

O experimento, em arranjo fatorial [2 x (3 x 3 +1)], foi montado no delineamento inteiramente casualizado em três repetições, perfazendo 60 parcelas, sendo:

- dois solos;
- três fertilizantes (escória como fonte de P e Zn, fosfato monocálcico p.a como fonte de P e cloreto de zinco P. A. como fonte de Zn);
- três níveis de P e Zn equivalentes à 0,5, 1,0 e 2,0 vezes as doses de 80 kg ha⁻¹ de P e 2 kg ha⁻¹ de Zn, conforme recomendada pela CFSEMG (1999), considerando o teor de zinco, na escória, como acompanhante; e
- uma testemunha para cada solo.

Foram utilizadas parcelas com 3 dm³ de solo, que receberam seus respectivos tratamentos, sendo incubadas, por 21 dias, com umidade correspondente a 80% da capacidade de campo. Após este período, as amostras foram secas ao ar, destorroadas, retirando-se, em seguida, subamostras para determinação do pH em água, P-disponível,

Zn e outros elementos extraíveis pelo extrator Mehlich-1. Foram analisadas ainda as concentrações de Ca, Mg e Al trocáveis (DEFELIPO & RIBEIRO, 1996).

A unidade experimental foi constituída por um vaso plástico, com 2,0 dm³ de solo, no qual foi realizada uma adubação complementar com NKS, conforme recomendação proposta por CFSEMG (1999).

Os vasos foram irrigados, plantando-se em seguida 12 sementes de sorgo por vaso. Decorridos 12 dias do plantio, foi efetuado o desbaste, deixando-se cinco plantas em cada unidade experimental.

As adubações com micronutrientes, suprimindo-se a fonte de zinco, foram realizadas em duas etapas: a primeira, após o desbaste, e a segunda, dez dias após a primeira. Foram realizadas, também, adubações de cobertura, com 40 mg dm⁻³ de N na forma de uréia, a cada semana, durante o cultivo.

Decorridos 45 dias após a semeadura, a parte aérea das plantas foi colhida, acondicionada em sacos de papel e seca em estufa com circulação forçada de ar, à 70 °C, por 72 horas. O material vegetal foi, então, pesado, triturado e submetido à digestão nítrico-perclórica, para determinação das concentrações de Ca, Mg, Fe, Mn, Zn, Cu, Ni, Cd e Cr por espectrofotometria de absorção atômica; P, por espectrofotometria de absorção molecular, e K, por fotometria de chama.

Após o cultivo, o solo de cada unidade experimental foi homogeneizado, coletando-se uma amostra para determinação de pH em H₂O e os teores de P, K, micronutrientes e metais extraíveis pelo extrator Mehlich-1. Determinaram-se, também, os teores de Ca, Mg e Al trocáveis, conforme DEFELIPO & RIBEIRO (1996).

Os resultados obtidos foram submetidos à análise de variância e regressão, por intermédio do software Sistemas de Análises Estatísticas e Genéticas (SAEG), versão 5.0.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Verificou-se, no presente ensaio, que a correção da acidez do solo foi eficaz para elevar o pH em níveis adequados de cultivo, reduzir o teor de alumínio trocável a zero, bem como elevar os teores de cálcio, magnésio a níveis adequados de cultivo (Quadro 1). O potássio e os micronutrientes Fe, Mn, Cu também apresentaram teores suficientes para o bom desenvolvimento das plantas. Os teores mais elevados desses elementos, observados depois do cultivo, se devem à aplicação dos mesmos na forma de solução nutritiva para adubação complementar.

Semelhante ao observado no ensaio da escória como fonte de corretivo, nos tratamentos que receberam escória como fonte de fertilizante, foram verificados teores efetivamente mais elevados de Fe e Mn disponíveis nos solos (Quadro 1), sendo observadas diferenças significativas entre as diferentes fontes de fertilizantes utilizadas, em ambos os solos, antes e após o cultivo de sorgo (Quadros 2 e 3). Tal comportamento, confirmado também neste ensaio, leva a inferir que a escória efetivamente eleva os teores de Fe e Mn do solo, conforme constatado também por LOUZADA (1987). Neste caso, para culturas mais sensíveis, principalmente, ao Mn, cuidados com a dosagem excessiva deste resíduo devem ser tomados.

Com relação à dose de B_2O_5 recomendada por CFSEMG (1999), 80 kg ha^{-1} , verificou-se que esta foi limitante para o desenvolvimento das plantas cultivadas em vasos. Deve-se salientar que esta recomendação foi calculada tomando-se como base a produção em condições de campo, ou seja, aplicação do P no sulco de plantio. Para a situação de cultivo em casa-de-vegetação, em que o fertilizante é misturado ao solo e

Quadro 1 – Valores de pH e teores de Al^{3+} , Ca^{2+} , Mg^{2+} , P, K, Zn, Fe, Mn, Cu, Ni e Zn presentes nas amostras de solos, antes e após o cultivo com sorgo, para os diferentes tratamentos do experimento sobre o uso da escória como fertilizante fosfatado e fonte de zinco. Valores médios (três repetições) \pm erro padrão da média

Solo	Fertilizante	Nível	pH		Al^{3+}		Ca^{2+}		Mg^{2+}		
			Antes	Depois	Antes	Depois	Antes	Depois	Antes	Depois	
----- cmol _c dm ⁻³ -----											
LVA	Testemunha	0,0	7,1 \pm 0,0	6,1 \pm 0,1	0,0	0,0	4,06 \pm 0,04	0,94 \pm 0,01	1,07 \pm 0,01	0,26 \pm 0,00	
		0,5	7,1 \pm 0,1	6,1 \pm 0,0	0,0	0,0	3,72 \pm 0,07	0,86 \pm 0,01	0,92 \pm 0,06	0,25 \pm 0,02	
	Escória	1,0	6,9 \pm 0,0	6,2 \pm 0,1	0,0	0,0	3,51 \pm 0,03	0,82 \pm 0,01	0,97 \pm 0,02	0,24 \pm 0,01	
		2,0	7,2 \pm 0,1	6,9 \pm 0,0	0,0	0,0	3,93 \pm 0,05	1,02 \pm 0,03	0,85 \pm 0,01	0,26 \pm 0,01	
	Fosfato Ca	0,5	7,2 \pm 0,0	6,2 \pm 0,1	0,0	0,0	3,78 \pm 0,10	0,81 \pm 0,01	0,98 \pm 0,03	0,22 \pm 0,00	
		1,0	7,3 \pm 0,0	6,3 \pm 0,0	0,0	0,0	3,87 \pm 0,02	0,83 \pm 0,01	1,01 \pm 0,00	0,21 \pm 0,01	
		2,0	7,3 \pm 0,0	6,3 \pm 0,2	0,0	0,0	2,56 \pm 0,05	0,83 \pm 0,02	0,76 \pm 0,01	0,22 \pm 0,01	
	Cloreto Zn	0,5	7,3 \pm 0,0	6,2 \pm 0,1	0,0	0,0	2,43 \pm 0,03	0,81 \pm 0,01	0,73 \pm 0,02	0,21 \pm 0,01	
		1,0	7,3 \pm 0,1	6,3 \pm 0,1	0,0	0,0	2,39 \pm 0,05	0,82 \pm 0,03	0,68 \pm 0,02	0,21 \pm 0,01	
		2,0	7,2 \pm 0,0	6,3 \pm 0,1	0,0	0,0	2,51 \pm 0,04	0,79 \pm 0,02	0,73 \pm 0,04	0,20 \pm 0,00	
	LA	Testemunha	0,0	7,9 \pm 0,0	6,1 \pm 0,1	0,0	0,0	4,03 \pm 0,08	0,50 \pm 0,02	0,97 \pm 0,04	0,16 \pm 0,00
			0,5	7,6 \pm 0,0	5,9 \pm 0,0	0,0	0,0	3,98 \pm 0,11	0,49 \pm 0,01	0,94 \pm 0,03	0,15 \pm 0,00
Escória		1,0	7,6 \pm 0,0	6,6 \pm 0,0	0,0	0,0	3,94 \pm 0,08	0,58 \pm 0,02	0,96 \pm 0,03	0,19 \pm 0,04	
		2,0	8,0 \pm 0,0	7,4 \pm 0,1	0,0	0,0	3,80 \pm 0,07	0,83 \pm 0,02	0,96 \pm 0,02	0,18 \pm 0,01	
Fosfato Ca		0,5	8,0 \pm 0,0	6,5 \pm 0,1	0,0	0,0	2,07 \pm 0,04	0,49 \pm 0,00	0,67 \pm 0,02	0,19 \pm 0,00	
		1,0	8,0 \pm 0,0	6,4 \pm 0,1	0,0	0,0	2,16 \pm 0,01	0,46 \pm 0,01	0,64 \pm 0,02	0,17 \pm 0,01	
		2,0	8,0 \pm 0,0	6,5 \pm 0,0	0,0	0,0	2,73 \pm 0,17	0,48 \pm 0,03	0,59 \pm 0,01	0,17 \pm 0,01	
Cloreto Zn		0,5	7,9 \pm 0,0	6,1 \pm 0,0	0,0	0,0	2,39 \pm 0,06	0,48 \pm 0,04	0,68 \pm 0,01	0,18 \pm 0,01	
		1,0	8,0 \pm 0,0	6,2 \pm 0,0	0,0	0,0	2,41 \pm 0,05	0,48 \pm 0,01	0,68 \pm 0,03	0,17 \pm 0,00	
		2,0	7,9 \pm 0,0	6,2 \pm 0,0	0,0	0,0	2,55 \pm 0,09	0,51 \pm 0,01	0,76 \pm 0,03	0,18 \pm 0,01	

Quadro 1, Cont.

Solo	Corretivo	Nível	P		K		Zn		Fe	
			Antes	Depois	Antes	Depois	Antes	Depois	Antes	Depois
----- mg dm ³ -----										
LVA	Testemunha	0,0	2,84 ± 0,76	4,20 ± 0,15	66,84 ± 0,00	294,61 ± 20,62	1,41 ± 0,05	1,90 ± 0,40	185,39 ± 10,28	409,67 ± 31,89
		0,5	2,49 ± 0,13	5,45 ± 0,37	135,62 ± 1,81	370,37 ± 20,62	1,34 ± 0,05	3,72 ± 0,50	234,52 ± 3,17	580,50 ± 16,64
	Escória	1,0	2,98 ± 0,29	7,01 ± 0,08	133,81 ± 6,34	357,74 ± 5,15	1,32 ± 0,08	2,05 ± 0,18	255,22 ± 3,04	514,71 ± 1,33
		2,0	3,48 ± 0,29	10,33 ± 0,31	135,62 ± 3,62	345,12 ± 15,46	1,32 ± 0,02	2,20 ± 0,73	272,31 ± 11,89	583,00 ± 58,07
	Fosfato Ca	0,5	2,53 ± 0,07	5,37 ± 0,47	139,24 ± 10,08	332,49 ± 10,31	1,35 ± 0,07	2,91 ± 0,11	183,26 ± 11,28	338,50 ± 6,74
		1,0	2,99 ± 0,07	5,12 ± 0,21	124,76 ± 3,62	336,70 ± 15,46	1,29 ± 0,10	1,98 ± 0,14	161,10 ± 7,78	406,79 ± 8,27
		2,0	4,15 ± 0,22	6,71 ± 0,26	132,00 ± 8,29	395,62 ± 5,15	1,26 ± 0,05	2,54 ± 0,44	169,42 ± 7,88	445,25 ± 29,80
		0,5	2,34 ± 0,02	5,77 ± 0,16	128,38 ± 3,62	361,95 ± 10,31	1,28 ± 0,03	2,50 ± 0,01	164,45 ± 2,92	453,79 ± 3,16
	Cloreto Zn	1,0	2,08 ± 0,03	5,91 ± 0,16	131,10 ± 2,39	399,83 ± 0,00	1,31 ± 0,10	2,94 ± 0,01	161,88 ± 7,25	582,96 ± 52,05
		2,0	2,30 ± 0,27	5,79 ± 0,10	135,62 ± 6,53	357,74 ± 15,46	1,15 ± 0,23	2,53 ± 0,46	183,43 ± 3,62	442,17 ± 36,03
LA	Testemunha	0,0	2,75 ± 0,13	3,85 ± 0,11	28,83 ± 0,00	235,69 ± 0,00	0,67 ± 0,02	0,76 ± 0,05	145,07 ± 2,52	247,50 ± 15,00
		0,5	5,06 ± 0,42	6,02 ± 0,18	108,47 ± 4,79	290,40 ± 5,15	0,76 ± 0,04	0,44 ± 0,07	219,27 ± 8,18	466,88 ± 1,99
	Escória	1,0	7,20 ± 0,31	9,49 ± 0,50	110,28 ± 3,14	269,36 ± 0,00	0,73 ± 0,02	0,39 ± 0,07	257,31 ± 4,74	515,96 ± 38,02
		2,0	10,16 ± 1,10	15,64 ± 0,13	98,52 ± 3,26	281,99 ± 5,15	0,71 ± 0,04	0,55 ± 0,21	319,37 ± 12,62	724,08 ± 2,40
	Fosfato Ca	0,5	5,51 ± 0,19	5,25 ± 0,42	103,04 ± 1,81	273,57 ± 25,77	0,65 ± 0,04	0,47 ± 0,12	152,99 ± 5,11	248,92 ± 8,42
		1,0	7,92 ± 0,12	6,95 ± 0,06	101,23 ± 2,39	265,15 ± 5,15	0,68 ± 0,04	0,49 ± 0,03	153,08 ± 5,26	274,96 ± 4,34
		2,0	15,66 ± 0,24	10,26 ± 0,64	105,76 ± 3,94	164,14 ± 5,15	0,60 ± 0,02	0,43 ± 0,06	147,47 ± 4,51	275,63 ± 13,68
		0,5	2,96 ± 0,07	9,71 ± 0,93	99,42 ± 8,29	273,57 ± 30,93	0,72 ± 0,07	0,50 ± 0,03	151,87 ± 0,95	268,33 ± 9,75
	Cloreto Zn	1,0	2,76 ± 0,04	10,10 ± 0,40	97,61 ± 4,79	311,45 ± 15,46	0,73 ± 0,02	0,49 ± 0,03	150,79 ± 1,48	260,54 ± 5,77
		2,0	2,94 ± 0,05	8,92 ± 0,16	95,80 ± 1,81	294,61 ± 0,00	0,75 ± 0,01	0,52 ± 0,02	156,84 ± 3,88	255,50 ± 12,50

Quadro 1, Cont.

Solo	Corretivo	Nível	Mn		Cu		Ni		Cd		
			Antes	Depois	Antes	Depois	Antes	Depois	Antes	Depois	
----- mg dm ⁻³ -----											
LVA	Testemunha	0,0	11,99 ± 1,12	21,96 ± 0,67	0,72 ± 0,03	1,26 ± 0,02	0,21 ± 0,06	0,00	0,06 ± 0,00	0,00	
		0,5	25,38 ± 1,47	50,74 ± 4,23	0,72 ± 0,04	1,34 ± 0,19	0,09 ± 0,07	0,00	0,04 ± 0,02	0,00	
		1,0	39,34 ± 2,65	71,86 ± 2,60	0,71 ± 0,01	4,54 ± 4,11	0,11 ± 0,08	0,00	0,04 ± 0,01	0,00	
	Escória	2,0	53,96 ± 0,34	29,72 ± 6,15	0,73 ± 0,01	1,26 ± 0,00	0,28 ± 0,06	0,00	0,05 ± 0,00	0,00	
		0,5	12,22 ± 0,92	22,60 ± 0,42	0,65 ± 0,04	1,02 ± 0,09	0,11 ± 0,02	0,00	0,04 ± 0,00	0,00	
		1,0	10,19 ± 0,53	23,79 ± 0,58	0,57 ± 0,00	1,20 ± 0,12	0,08 ± 0,04	0,00	0,02 ± 0,00	0,00	
	Fosfato Ca	2,0	10,66 ± 0,43	23,32 ± 0,34	0,58 ± 0,02	1,26 ± 0,04	0,00 ± 0,00	0,00	0,03 ± 0,01	0,00	
		0,5	10,40 ± 0,22	20,57 ± 0,00	0,57 ± 0,01	1,17 ± 0,07	0,07 ± 0,01	0,00	0,03 ± 0,01	0,00	
		1,0	10,53 ± 0,47	22,95 ± 0,67	0,53 ± 0,02	1,19 ± 0,03	0,00	0,00	0,03 ± 0,01	0,00	
	Cloreto Zn	2,0	11,12 ± 0,09	20,30 ± 1,29	0,65 ± 0,10	1,16 ± 0,10	0,00	0,00	0,01 ± 0,01	0,00	
		Testemunha	0,0	6,38 ± 0,15	13,64 ± 0,88	0,23 ± 0,03	0,52 ± 0,03	0,00	0,00	0,01 ± 0,00	0,00
			0,5	26,47 ± 1,17	51,34 ± 3,82	0,16 ± 0,01	0,30 ± 0,05	0,00	0,00	0,01 ± 0,01	0,00
1,0	42,43 ± 0,64		88,13 ± 0,22	0,16 ± 0,02	0,27 ± 0,04	0,00	0,00	0,02 ± 0,01	0,00		
LA	Escória	2,0	53,02 ± 1,63	36,67 ± 0,88	0,22 ± 0,02	0,42 ± 0,01	0,18 ± 0,09	0,00	0,02 ± 0,00	0,00	
		0,5	6,65 ± 0,24	13,71 ± 1,12	0,21 ± 0,00	0,18 ± 0,04	0,00	0,00	0,01 ± 0,00	0,00	
		1,0	6,46 ± 0,12	14,12 ± 0,46	0,24 ± 0,03	0,15 ± 0,05	0,08 ± 0,08	0,00	0,00	0,00	
	Fosfato Ca	2,0	6,34 ± 0,35	14,08 ± 0,55	0,24 ± 0,03	0,11 ± 0,07	0,00	0,00	0,02 ± 0,00	0,00	
		0,5	6,54 ± 0,26	14,41 ± 0,51	0,22 ± 0,03	0,18 ± 0,07	0,00	0,00	0,00	0,00	
		1,0	5,93 ± 0,44	14,59 ± 0,12	0,22 ± 0,02	0,29 ± 0,03	0,00	0,00	0,01 ± 0,01	0,00	
Cloreto Zn	2,0	6,41 ± 0,28	13,60 ± 0,48	0,18 ± 0,02	0,10 ± 0,07	0,00	0,00	0,02 ± 0,01	0,00		

Quadro 2 – Análise de variância para pH, Ca, Mg, P, K, Zn, Fe, Mn e Cu nos solos, antes do plantio do sorgo, do experimento sobre “Uso de Escória como Fertilizante”

F.V.	G.L.	Q.M.								
		pH	Ca	Mg	P	K	Zn	Fe	Mn	Cu
Solo	1	9,01**	0,95**	0,15**	149,16**	19.019,03**	7,09**	4.876,94**	203,72**	3,54**
Fertilizante	2	0,21**	6,62**	0,18**	53,54**	110,98 ^{n.s}	0,12E-01 ^{n.s}	43.467,39**	4.459,57**	0,11E-01 ^{n.s}
Nível	3	0,56E+01**	4,58**	0,21**	45,29**	21.605,74**	0,19E-01 ^{n.s}	5.615,72**	685,68**	0,18E-01**
Fert d/ solo	2	0,52E-03 ^{n.s}	1,59**	0,10**	29,61**	29,90 ^{n.s}	0,18E-01 ^{n.s}	1.002,49**	34,68**	0,32E-01**
Nível d/ solo	3	0,14E-01 ^{n.s}	0,32E-01 ^{n.s}	0,14E-01*	31,87**	103,31 ^{n.s}	0,30E-01 ^{n.s}	1.423,47**	12,02**	0,73E-02 ^{n.s}
Nível d/ Fert	6	0,83**	0,36E-01 ^{n.s}	0,36E-01**	15,45**	55,56 ^{n.s}	0,25E-01 ^{n.s}	6.481,51**	756,28**	0,22E-02 ^{n.s}
Resíduo	40	0,38E-02	0,15E-01	0,21E-02	0,38	69,66	0,16E-01	140,63	2,57	0,31E-02
C.V. (%)		0,82	3,96	5,59	13,46	7,55	12,65	6,2	8,64	13,05

Quadro 3 – Análise de variância para pH, Ca, Mg, P, K, Zn, Fe, Mn e Cu nos solos, após o plantio do sorgo, do experimento sobre “Uso de Escória como Fertilizante”

F.V.	G.L.	Q.M.								
		pH	Ca	Mg	P	K	Zn	Fe	Mn	Cu
Solo	1	0,12*	2,11**	0,70E-01**	71,23**	127.538,10**	63,45**	297.750,80**	314,42**	25,71**
Fertilizante	2	0,25**	0,61E-01**	0,16E-02**	19,19**	5.148,02**	0,48E-01 ^{n.s}	204.964,60**	6.022,05**	2,12 ^{n.s}
Nível	3	0,82**	0,32E-01**	0,39E-03 ^{n.s}	97,63**	12..346,39**	0,64*	52.630,88**	1.525,44**	1,29 ^{n.s}
Fert d/ solo	2	0,12*	0,54E-02*	0,16E-02*	3,38**	1.999,43 ^{n.s}	0,32E-01 ^{n.s}	49.462,05**	295,94**	1,25 ^{n.s}
Nível d/ solo	3	0,45 ^{n.s}	0,23E-01**	0,26E-02**	15,70**	2.910,64*	1,55**	7.294,34 ^{n.s}	47,82*	1,61 ^{n.s}
Nível d/ Fert	6	0,45**	0,32E-01**	0,48E-03 ^{n.s}	17,69**	1.445,87 ^{n.s}	0,34 ^{n.s}	34.511,84**	1.379,01**	1,25 ^{n.s}
Resíduo	40	0,018	0,992-03	0,319E-03	0,362	449,04	0,176	2.295,56	9,23	1,74
C.V. (%)		2,13	4,56	8,84	8,14	6,82	27,66	11,55	10,44	147,22

^{n.s.} Coeficientes não-significativos.

** e * Coeficientes significativos, a 1 e 5% de probabilidade pelo teste F, respectivamente.

incubado por determinado período de tempo, para que se processem as reações de equilíbrio, pode ocorrer, dependendo das características físico-químicas do solo, maior ou menor grau de adsorção de P, que, em última instância, pode se tornar menos disponível para as plantas. Assim sendo, acredita-se que esta foi a causa para limitação na produção de matéria seca verificada neste ensaio (Quadro 4).

Contudo, no LA, verificaram-se aumentos nos teores de P disponível, à medida que aumentaram os níveis de P aplicados (Quadro 1). No LVA, este comportamento foi observado apenas no nível 2,4 NP.

Com o maior tempo de contato da escória com o solo verificou-se uma liberação gradativa de P, corroborando o resultado obtido de P_2O_5 solúvel em Mehlich-1 ($30,08 \text{ mg kg}^{-1}$). Avaliando o efeito da aplicação de doses de escória de siderurgia sobre algumas características químicas de solos sob cerrado, UFV (1985) constatou aumento significativo dos teores de P disponível e atribuiu isto ao efeito de granulometria e ao maior tempo de incubação com os solos. O mesmo autor concluiu que a contribuição da escória para o aumento de P no solo pode ser atribuída ao seu teor de P. Comportamento semelhante a este foi constatado por RIBEIRO et al. (1986).

Não foi detectada, pelo método analítico utilizado, a presença do Cr ($< 0,10 \text{ mg kg}^{-1}$) e Cd ($< 0,05 \text{ mg kg}^{-1}$) nas plantas em nenhum dos tratamentos.

Mesmo tendo sido ajustadas as equações de regressão para produção de matéria seca (Figura 1), em razão da limitação em sua produção, possivelmente consequência das baixas doses de P utilizadas, nada se pode concluir a respeito deste experimento para o solo LVA. No entanto, para o solo mais arenoso (LA), houve incremento linear de produção com o uso do fosfato de cálcio que não se verificou para escória. Neste sentido, os baixos teores de P total, bem como teores nulos de P solúvel em ácido cítrico (Quadro 3 do capítulo 1) não recomendam o uso da escória como fertilizante fosfatado. Resultados semelhantes foram observados por UFV (1983), FIRME (1986) e RIBEIRO et al. (1986). UFV (1983) e FIRME (1986), mencionaram que, com o emprego de minérios de ferro pobres em P, a escória produzida no Brasil, a partir de 1975, tem apresentado valores médios de $2,2 \text{ dag kg}^{-1}$ de P_2O_5 , limitando seu uso como fertilizante fosfatado; no entanto, a constatação da liberação gradativa de P por parte da escória torna-se vantagem perante aos outros materiais corretivos da acidez do solo e não deve ser desprezada.

Da mesma forma, os teores de Zn encontrados na escória (Quadro 1) estão muito aquém do teor mínimo, de 500 mg kg^{-1} , admitido na legislação brasileira para uso agrícola como fonte de Zn (RODELLA & ALCARDE, 2001).

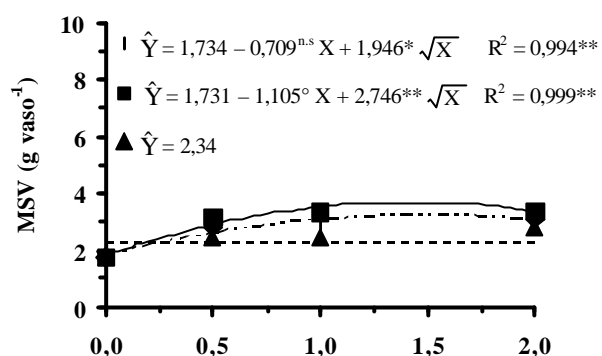
Quadro 4 – Produção de matéria seca (MS) e teores de Ca, Mg, P, K, Zn, Fe, Mn e Cu em plantas de sorgo após 45 dias de cultivo, para os diferentes tratamentos utilizados no experimento sobre o uso da escória como fertilizante fosfatado e fonte de zinco. Valores médios (três repetições) ± erro padrão da média

Solo	Corretivo	Nível	MS	Ca	Mg	P	K	Zn	
			----- g vaso ⁻¹ -----	----- g kg ⁻¹ -----					
LVA	Testemunha	0,0	1,73 ± 0,14	4,26 ± 84,29	2,85 ± 87,81	0,53 ± 22,64	14,73 ± 552,87	88,67 ± 30,56	
	Escória	0,5	2,81 ± 0,20	3,17 ± 574,70	2,09 ± 271,02	0,55 ± 35,84	18,54 ± 831,72	103,33 ± 11,70	
		1,0	2,91 ± 0,26	3,03 ± 104,44	2,02 ± 92,10	0,59 ± 14,49	17,90 ± 380,51	75,50 ± 3,18	
		2,0	3,09 ± 0,07	3,69 ± 154,59	2,18 ± 38,16	0,61 ± 52,32	19,42 ± 219,69	73,50 ± 4,39	
	Fosfato Ca	0,5	3,15 ± 0,14	3,34 ± 263,37	2,44 ± 191,50	0,52 ± 39,46	18,66 ± 380,51	75,92 ± 13,99	
		1,0	3,33 ± 0,42	3,56 ± 26,51	2,08 ± 239,17	0,74 ± 60,57	20,82 ± 1.395,21	65,00 ± 8,14	
		2,0	3,42 ± 0,45	3,44 ± 215,75	2,32 ± 33,15	0,59 ± 55,38	18,79 ± 887,86	53,25 ± 17,22	
	Cloreto Zn	0,5	2,45 ± 0,19	3,72 ± 234,75	2,61 ± 58,34	0,62 ± 39,17	18,79 ± 126,84	84,42 ± 19,13	
		1,0	2,44 ± 0,25	3,51 ± 182,53	2,08 ± 118,35	0,69 ± 77,72	19,17 ± 126,84	77,92 ± 15,39	
		2,0	2,76 ± 0,13	3,10 ± 623,87	2,03 ± 449,95	0,83 ± 63,67	20,57 ± 1.098,44	70,83 ± 24,66	
	LA	Testemunha	0,0	2,37 ± 0,31	5,60 ± 493,25	3,37 ± 86,98	0,63 ± 23,14	20,69 ± 671,16	46,92 ± 2,87
		Escória	0,5	2,72 ± 0,18	4,14 ± 255,95	2,71 ± 63,52	0,72 ± 52,25	25,77 ± 706,20	51,17 ± 9,37
1,0			3,22 ± 0,21	4,63 ± 53,90	2,69 ± 55,13	0,71 ± 14,88	27,41 ± 380,51	43,25 ± 5,67	
2,0			3,43 ± 0,18	6,77 ± 483,25	2,80 ± 135,02	0,54 ± 29,85	24,75 ± 11.715,82	19,08 ± 0,98	
Fosfato Ca		0,5	3,20 ± 0,31	4,47 ± 148,04	2,76 ± 73,33	0,86 ± 55,07	30,08 ± 0,00	27,58 ± 10,65	
		1,0	4,52 ± 0,64	4,69 ± 77,52	2,63 ± 8,95	0,93 ± 93,73	32,11 ± 2.286,58	40,92 ± 8,19	
		2,0	8,15 ± 0,50	4,14 ± 542,16	2,44 ± 249,95	0,98 ± 88,32	30,33 ± 1.706,41	30,50 ± 4,64	
Cloreto Zn		0,5	2,97 ± 0,02	5,26 ± 181,36	2,60 ± 61,83	1,17 ± 111,72	27,54 ± 1.038,20	39,58 ± 3,31	
		1,0	2,60 ± 0,23	4,94 ± 478,86	2,47 ± 93,74	1,07 ± 60,85	27,67 ± 552,87	32,75 ± 2,78	
		2,0	2,90 ± 0,31	4,35 ± 305,47	2,65 ± 78,24	1,47 ± 58,57	27,03 ± 878,75	41,17 ± 3,86	

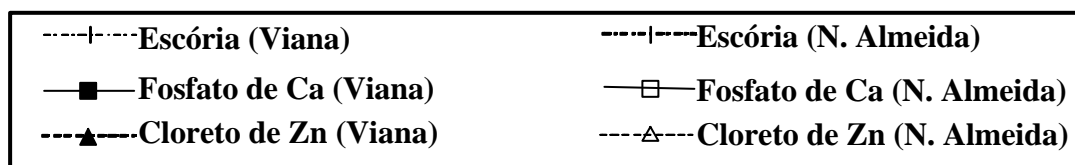
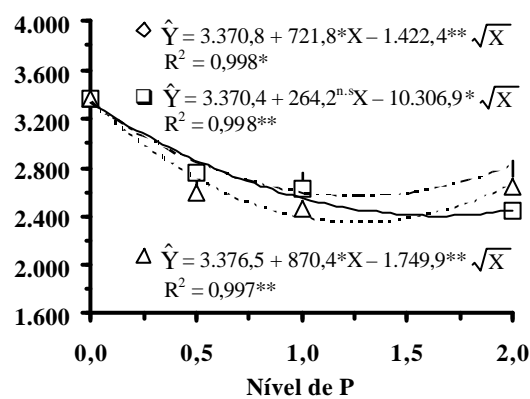
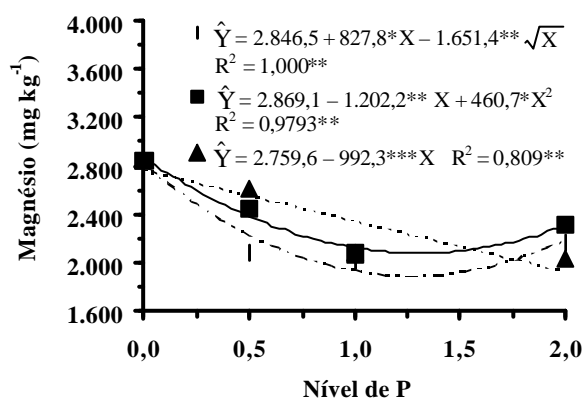
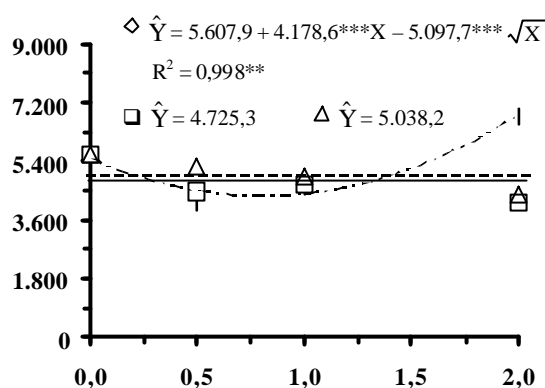
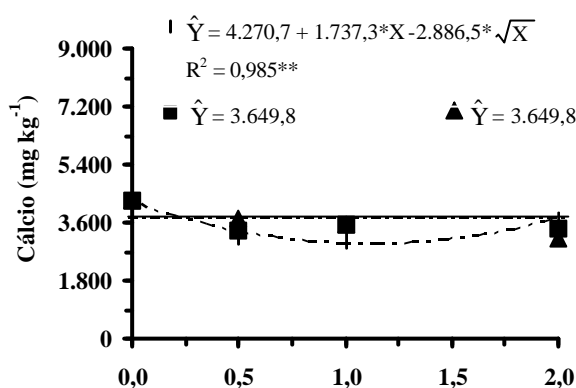
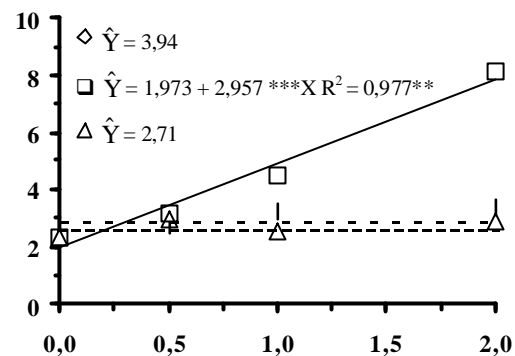
Quadro 4, Cont.

Solo	Corretivo	Nível	Fe		Mn		Cu		
			mg kg ⁻¹						
LVA	Testemunha	0,0	214,58 ±	67,28	100,25 ±	11,11	21,25 ±	0,80	
		0,5	190,00 ±	54,22	115,17 ±	3,69	20,83 ±	2,34	
		1,0	148,92 ±	42,75	107,58 ±	14,07	14,08 ±	1,48	
	Escória	2,0	139,67 ±	49,76	102,75 ±	12,13	18,08 ±	2,96	
		0,5	177,00 ±	44,46	78,08 ±	4,68	19,25 ±	2,13	
		1,0	200,92 ±	58,77	86,50 ±	6,14	73,25 ±	54,63	
	Fosfato Ca	2,0	173,00 ±	56,94	78,75 ±	3,96	19,92 ±	1,24	
		0,5	263,58 ±	107,67	82,08 ±	4,06	15,17 ±	2,46	
		1,0	80,83 ±	6,99	66,08 ±	5,92	13,83 ±	1,67	
	Cloreto Zn	2,0	300,25 ±	130,26	72,00 ±	5,75	16,17 ±	0,22	
		Testemunha	0,0	83,50 ±	25,78	51,42 ±	2,37	13,58 ±	1,39
			0,5	108,17 ±	7,30	87,33 ±	2,05	1,58 ±	1,58
1,0	106,67 ±		5,81	98,58 ±	3,05	0,00 ±	0,00		
LA	Escória	2,0	117,58 ±	21,07	90,83 ±	13,10	2,42 ±	1,34	
		0,5	165,67 ±	75,35	66,75 ±	6,39	5,50 ±	2,98	
		1,0	164,58 ±	59,11	54,67 ±	7,07	6,92 ±	1,71	
	Fosfato Ca	2,0	103,33 ±	18,84	36,42 ±	1,40	6,17 ±	1,02	
		0,5	112,00 ±	12,62	55,75 ±	2,36	36,75 ±	27,91	
		1,0	122,92 ±	14,56	52,75 ±	3,50	7,50 ±	2,93	
	Cloreto Zn	2,0	121,08 ±	13,58	64,42 ±	1,04	7,75 ±	1,73	

Latossolo Vermelho-Amarelo (Viana-ES)



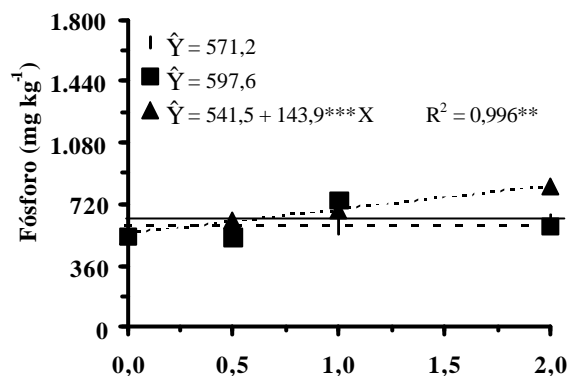
Latossolo Amarelo (Nova Almeida-ES)



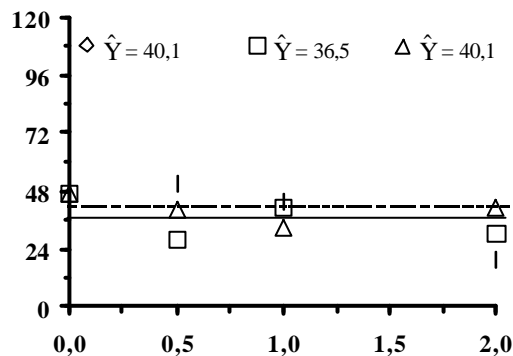
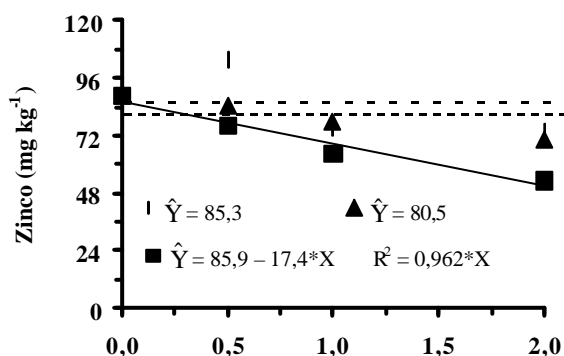
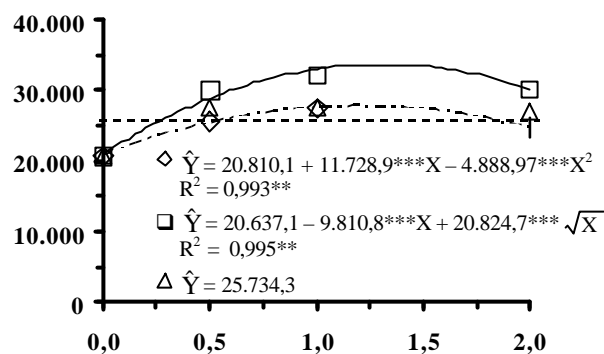
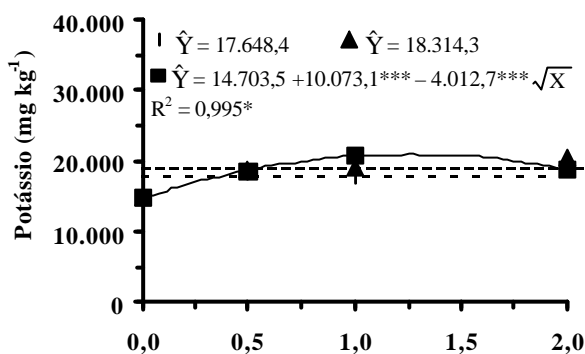
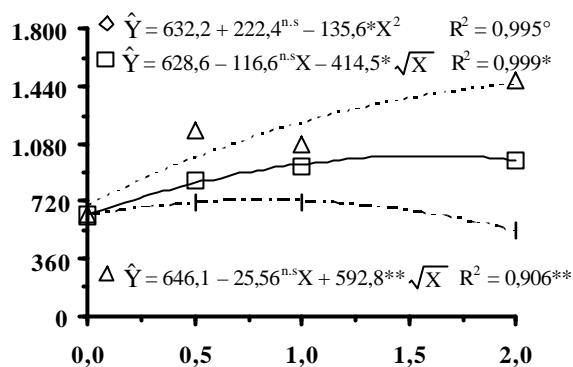
***, **, * e ° Coeficientes significativos, a 0,1, 1, 5 e 10 % de probabilidade, respectivamente.
n.s. Coeficientes não-significativos.

Figura 1 – Produção de matéria seca e teores de Ca, Mg, P, K, Zn, Fe, Mn e Cu na parte aérea das plantas de sorgo, em função das doses de fertilizantes aplicadas nos solos.

Latossolo Vermelho-Amarelo (Viana-ES)

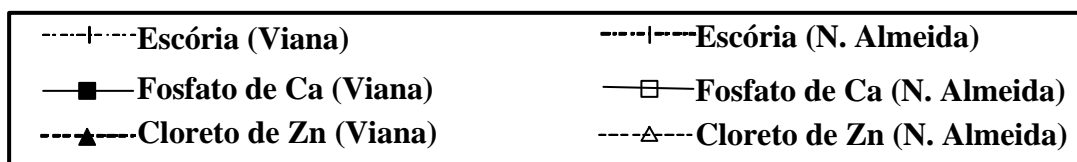


Latossolo Amarelo (Nova Almeida-ES)



Nível de P

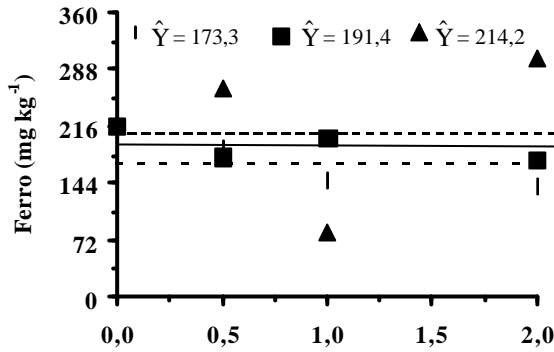
Nível de P



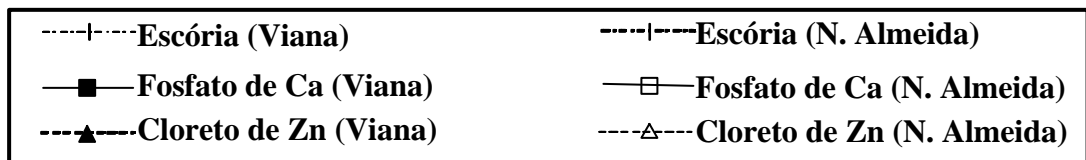
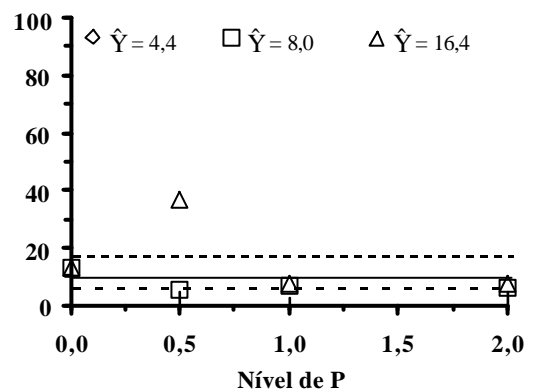
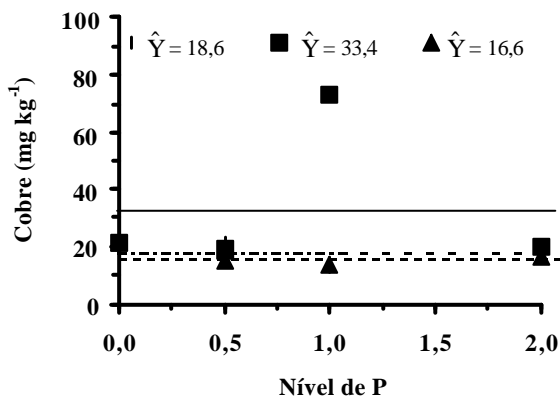
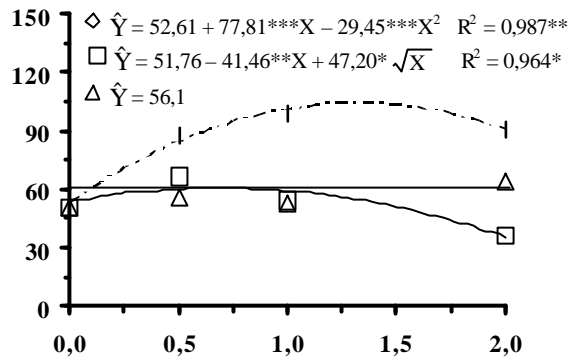
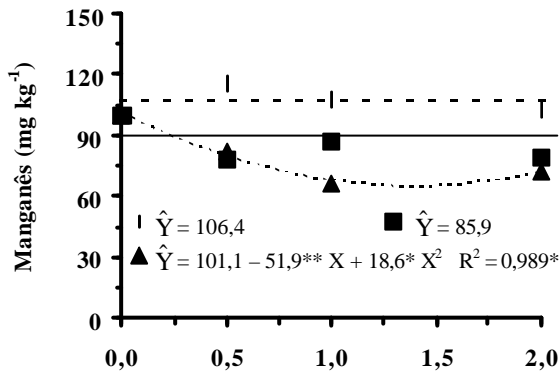
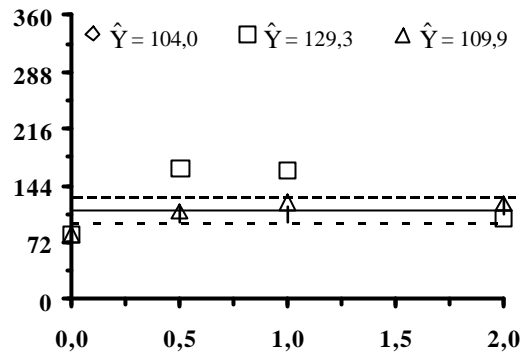
***, **, * e ° Coeficientes significativos, a 0,1, 1, 5 e 10 % de probabilidade, respectivamente.
 n.s. Coeficientes não-significativos.

Figura 1, Cont.

Latossolo Vermelho-Amarelo (Viana-ES)



Latossolo Amarelo (Nova Almeida-ES)



***, ** e * Coeficientes significativos, a 0,1, 1 e 5 % de probabilidade, respectivamente.

Figura 1, Cont.

4. CONCLUSÕES

1. Os baixos teores de Zn e P total, bem como os teores nulos de P solúvel em ácido cítrico não recomendam o uso da escória como fonte destes fertilizantes.

2. Houve liberação gradativa de P ao longo do tempo de contato com o solo, o que é uma vantagem da escória frente a outros materiais corretivos.

3. Com o uso da escória, houve aumento efetivo dos teores disponíveis de Fe e Mn nos solos. No entanto, não foram verificados sintomas de fitotoxidez das plantas cultivadas.

4. Não foi detectada a presença de Cr e Cd no tecido das plantas.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CARVALHO, R. **Interações silício-fósforo em Latossolo Vermelho-Escuro e Cambissolo cultivados com mudas de eucalipto**. Lavras: UFLA, 1999. 89 f. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) – Universidade Federal de Lavras, 1999.

COMISSÃO DE FERTILIDADE DO SOLO DO ESTADO DE MINAS GERAIS. **Recomendação para uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais – 5ª Aproximação**. Viçosa, MG. 1999. 359 p.: il.

DEFELIPO, B. V. & RIBEIRO, A. C. **Análise química do solo (metodologia)**. Viçosa: UFV, 1996. 17 p. (Boletim, 29).

LOUZADA, P. T. C. **Eficiência de uma escória de siderurgia como corretivo e fertilizante de solo**. Viçosa: UFV, 1987. 52 f. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) – Universidade Federal de Lavras, 1987.

PEREIRA, J. E. **Solubilidade de alguns calcários e escórias de alto-forno**. Viçosa: UFV, 1978. 84 f. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) - Universidade Federal de Viçosa, 1978.

PIAU, W. C. **Efeito de escórias de siderurgia em atributos químicos de solos e na cultura do milho (*Zea mays L.*)**. Piracicaba: USP, 1995. 124 f. Tese (Doutorado em Energia Nuclear na Agricultura) – Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, 1994.

PIAU, W. C. **Variabilidade do uso das escórias como corretivo e fertilizante**. Piracicaba: USP, 1991. 99 f. Dissertação (Mestrado em Energia Nuclear na Agricultura) – Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, 1991.

PRADO, R. M. & FERNANDES, F. M. Resposta de cana-de-açúcar à aplicação da escória de siderurgia como corretivo de acidez do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 25, p. 199-207, 2001.

PRADO, R. M.; FERNANDES, F. M.; NATALE, W. **Uso agrícola da escória de siderurgia no Brasil – Estudos na cultura da cana-de-açúcar**. Jaboticabal: Funep, 2001. 67 p.

RIBEIRO, A. C.; FIRME, D. J. & MATOS, A. C. M. Avaliação da eficiência de uma escória de aciaria como corretivo da acidez. **Revista Ceres**, v. 33, n. 187, p. 242-248, 1986.

RODELLA, A. A. & ALCARDE, J. C. Legislação sobre micronutrientes e metais pesados. In: FERREIRA, M. E.; CRUZ, M. C. P.; RAIJ, B.; ABREU, C. A. (Ed.) **Micronutrientes e elementos tóxicos na agricultura**. Jaboticabal. CNPq/FAPESP/POTAFOS, 2001. p. 555-576.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA – UFV. **Nutrição, fertilização e manejo de solos sob reflorestamento e utilização de escória de siderurgia como corretivo e fertilizante do solo**. Projeto apresentado pelo Departamento de Solos à FINEP. Viçosa-UFV, 1983, 138 p.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA – UFV. **Nutrição, fertilização e manejo de solos sob reflorestamento e utilização de escória de siderurgia como corretivo e fertilizante do solo**. Relatório técnico semestral de atividades (3^o Relatório), convênio UFV/ FINEP: 54/84/0298/00. Viçosa – MG, 1985. 141 p. (mimeogr).

CAPÍTULO 4

DISPONIBILIDADE E MOBILIDADE DE METAIS NOS SOLOS TRATADOS COM ESCÓRIA DE ACIARIA

1. INTRODUÇÃO

No Brasil é importante que seja intensificada a pesquisa integrada de aproveitamento dos resíduos industriais e urbanos, como alternativa de produção de corretivos e fertilizantes mais baratos e, paralelamente, que haja a tentativa de diminuição dos problemas ambientais ocasionados pelo acúmulo e pela não-utilização desses resíduos. Assim, a reciclagem de resíduos industriais na atividade agrícola como alternativa de descarte reveste-se de grande importância, tendo em vista a diminuição, pelo menos em parte, do passivo ambiental, ocasionado pelo acúmulo destes materiais nos pátios das indústrias.

Um dos grandes entraves ao uso generalizado dos resíduos industriais em atividades agrossilviculturais é a presença de metais pesados, que podem ser tóxicos. Os metais pesados, uma vez presentes no solo em forma solúvel, são absorvidos por plantas envolvidas na cadeia trófica, podendo causar sérios problemas à saúde de animais e do homem. Esse problema, entretanto, não ocorre apenas com os resíduos, pois os fertilizantes, corretivos, defensivos e outros produtos usados na agricultura também podem conter esses elementos (ABREU et al., 2002). Segundo os autores, os principais metais pesados presentes no solo e nos produtos utilizados na agricultura são o Co, Cd, Cr, Cu, Fe, Hg, Mn, Mo, Ni, Pb, Sn, e Zn. Dentre estes, deve-se

ressaltar que alguns são essências para as plantas (Cu, Fe, Mn, Mo, Ni e Zn), às bactérias fixadoras de nitrogênio (Co e Mo) e aos animais (Co, Cr, Cu, Fe, Mn, Mo e Zn).

AMARAL SOBRINHO et al. (1992), trabalhando com o resíduo calcário-de-Paracatu (MG), encontraram teores preocupantes de cádmio, chumbo (esse bem acima do encontrado comumente em calcários) e zinco, em quantidade extremamente elevada (aproximadamente 1 dag/kg). Segundo os autores, esses teores elevados decorrem do fato de tal produto resultar como resíduo do processo de mineração desses metais em Paracatu (MG) e, que, 23, 13 e 0,87 aplicações do resíduo seriam necessárias para atingir os níveis críticos no solo de Cd, Pb e Zn, respectivamente.

O solo tem papel importante na disposição de resíduos, sendo evidente que a frequência e a extensão de contaminação deverão aumentar significativamente. Desta forma, o interesse de cientistas, técnicos e agricultores pela análise de metais em solos tem aumentado a cada dia, devido ao aumento da aplicação de resíduos ao solo e ao tempo indefinido que esses elementos podem permanecer no solo (ABREU et al., 2002).

A disponibilidade dos elementos às plantas e aos microorganismos depende essencialmente de sua presença na solução do solo. Esta presença é governada pela composição e reação do solo, pelas condições de oxirredução e pela cinética das reações, que dependem de atributos do solo e da tendência destes elementos em formar precipitados insolúveis e co-precipitados com outros íons, formar complexos com a matéria orgânica e serem adsorvidos pelos colóides do solo.

O uso de plantas como indicadoras da biodisponibilidade de metais no solo tem sido muito empregado. Nesse sentido, na literatura são encontrados diversos trabalhos desta natureza (AMARAL SOBRINHO, 1993; AMARAL, 1994; NETO & CAMARGO, 2000; Lima, 2001, citado por OLIVEIRA, 2002). AMARAL et al. (1994), avaliando a liberação e absorção de metais de quatro materiais corretivos por plantas de alface, constataram que houve liberação de Zn, Mn e Cd para as plantas, não sendo observados sintomas de toxidez na parte aérea, nem limitação da produção. Entretanto, os teores de Cd e Zn obtidos foram muito acima do permitido pela legislação brasileira de alimentos em vigor.

NETO & CAMARGO (2000), avaliando o crescimento e acúmulo de Cr em alface cultivada em dois Latossolos tratados com CrCl₃ e resíduo de curtume, verificaram que houve grande variação na produção de matéria seca, evidenciando

que as plantas foram afetadas pelos tratamentos com lodos e constataram, também, que houve tendência de elevação na concentração de Cr nas folhas de alface com o aumento dos níveis aplicados.

Avaliando a biodisponibilidade de Cd, Pb e Zn, incorporados ao solo pelo uso de um resíduo calcário, Lima (2001), citado por OLIVEIRA (2002), constatou que não houve absorção de Cd e Zn pela planta de feijão utilizada. Entretanto, o mesmo não foi verificado para o Pb, onde foi constatada sua presença nos grãos de feijão em teores muito acima ($\cong 18 \text{ mg kg}^{-1}$) daqueles permitidos pela legislação brasileira de 2 mg kg^{-1} .

A dinâmica de metais no solo por meio das técnicas de extração seqüencial ou fracionamento tem sido muito utilizada para identificar as diferentes formas geoquímicas desse metal e sua interação com os solos. Estas técnicas mostram, de acordo com o ambiente, as variações temporais e espaciais das frações, possibilitando a avaliação do potencial tóxico de cada elemento (SPOSITO et al., 1982). A seqüência de extração geralmente começa do menos para o mais agressivo reagente e da menor para maior temperatura e agitação (ABREU et al., 2002).

Outra forma relevante de estudar o comportamento dos metais pesados é por meio de ensaios de lixiviação em colunas de solo. Os estudos de mobilidade de metais pesados no solo têm demonstrado que as espécies Pb, Cr e Cu apresentam baixa mobilidade, acumulando-se superficialmente nos solos contaminados, enquanto o Zn, Mn, Ni e, principalmente, o Cd são relativamente mais móveis, apresentando maior risco de contaminação da água subterrânea (WILLIAMS et al., 1985; WELCH & LUND, 1989; SHEPPARD & THIBAUT, 1992). OLIVEIRA (2002), trabalhando com um resíduo-calcário, avaliou a mobilidade de Cd, Pb e Zn em colunas de solo submetidas a lixiviações periódicas com extratos hidrossolúveis, não detectou, no período estudado, a presença dos metais pesados nos lixiviados.

O comportamento dos metais pesados depende, fundamentalmente, da sua interação com a fase sólida que envolve processos de adsorção e dessorção, precipitação, solubilização, complexação e oxirredução, tanto com a fase orgânica quanto com a fase inorgânica.

Atributos do solo, como pH, teor de matéria orgânica, capacidade de troca catiônica (CTC), presença de óxidos de Fe, Al e Mn, conteúdo de argila e potencial redox são responsáveis pelo comportamento e pela disponibilidade de metais pesados no solo (KABATA-PENDIAS & PENDIAS, 2001). O pH e o potencial redox são os

mais relevantes (KABATA-PENDIAS & PENDIAS, 2001), pois, além de afetarem diretamente as reações supracitadas (McBRIDE, 1989), são também os principais fatores que controlam as especiações dos metais em solução.

Assim, tendo em vista o estabelecimento de critérios para a aplicação de subprodutos em áreas agrícolas, alguns estudos vêm sendo realizados. No Estado de São Paulo, a Companhia de Tecnologia e Saneamento Ambiental (CETESB) estuda critérios para a aplicação de lodos de tratamento biológico visando, a melhoria da fertilidade dos solos. Os procedimentos são basicamente adaptados das normas da Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos da América (US-EPA), incluindo recomendações de outros órgãos americanos e também da Alemanha. Para a carga máxima de cromo no solo, por exemplo, é definido um limite de 500 mg kg^{-1} , considerando-se a camada de 0-20 cm de profundidade (RODELLA & ALCARDE, 2001).

Em países com maior tradição no uso agrícola de resíduos, os critérios são variáveis, refletindo a dificuldade em se estabelecer normas a respeito do assunto, mesmo contando com maior volume de resultados de pesquisa.

No Brasil são utilizados critérios de países de clima temperado. Os riscos desse procedimento são evidentes, mas podem ser justificados pela falta de melhor alternativa, uma vez que resultados de pesquisas nas condições brasileiras ainda são incipientes, apesar do grande avanço verificado em anos recentes (RODELLA & ALCARDE, 2001). Nesse sentido, os critérios para determinação de quantidades máximas permissíveis de metais em solos de regiões tropicais devem refletir seus atributos, como: teor de argila, pH e teor de óxidos de ferro e de alumínio, conforme proposição de MATTIAZZO-PREZZOTTO (1994) para adição ao solo de resíduos contendo cádmio, cobre, níquel e zinco.

Diante do exposto, o presente trabalho teve como objetivo avaliar a biodisponibilidade de metais para plantas de alface, e o fracionamento do Cr, presente em quantidades relativamente elevadas na escória. Avaliou-se também, em colunas de lixiviação, a mobilização de metais, Ca e Mg dos solos corrigidos com escória e CaCO_3 .

2. MATERIAL E MÉTODOS

Para atingir os objetivos supracitados, o presente trabalho foi desenvolvido em quatro etapas.

1ª Etapa: biodisponibilidade de metais

Foi instalado, em casa de vegetação, um experimento para avaliar a biodisponibilidade de metais para plantas de alface (*Lactuca sativa*), variedade Regina-de-Verão, uma espécie indicadora da presença de metais pesados muito utilizada em ensaios desta natureza.

As doses de corretivo foram determinadas considerando-se a necessidade de calagem (NC), estimada a partir da acidez potencial dos solos e as quantidades foram corrigidas levando-se em consideração o poder neutralizante dos corretivos.

O experimento, em arranjo fatorial (2 x 2 x 2), foi montado no delineamento inteiramente casualizado, em três repetições, perfazendo 24 parcelas, sendo:

- dois solos;
- dois corretivos, CaCO₃ p.a. e escória, no nível equivalente a 1,0 NC; e
- dois solos sem corretivo.

Amostras de 3,0 dm³ de solo, após receberem os respectivos tratamentos, foram acondicionadas em sacos plásticos. As parcelas foram incubadas, mantendo-se

a umidade em torno de 80% da capacidade de campo, por 21 dias. Após este período, as amostras foram secas ao ar e retiradas subamostras para determinação dos teores totais de metais, conforme EMBRAPA (1999).

A unidade experimental foi constituída por um vaso plástico, com 2,0 dm³ de solo, no qual foi realizada uma adubação complementar com NPKS, conforme recomendação proposta por CFSEMG (1999). Os vasos foram irrigados, plantando-se em seguida seis mudas da alface por vaso. Decorridos 12 dias do plantio, foi efetuado o desbaste, deixando-se duas plantas em cada unidade experimental.

As adubações com micronutrientes foram realizadas em duas etapas; a primeira, após o desbaste, e a segunda, dez dias após a primeira. Foram realizadas, também, adubações de cobertura, com 40 mg dm⁻³ de N na forma de uréia, a cada semana, durante o cultivo.

Decorridos 45 dias após a sementeira, a parte aérea das plantas foi colhida, acondicionada em sacos de papel e seca em estufa com circulação forçada de ar, à 70 °C, por 72 horas. O material vegetal foi, então, pesado, triturado e submetido à digestão nítrico-perclórica, para determinação das concentrações de Ca, Mg, Fe, Mn, Zn, Cu, Ni, Cd e Cr, por espectrofotometria de absorção atômica; P, por espectrofotometria de absorção molecular; e K, por fotometria de chama.

Por intermédio do software SAEG, a partir dos valores de produção de matéria seca da parte área da alface, dos teores de nutrientes nas plantas foram feitas análises de variância e, a partir dos teores de metais obtidos após ataque ácido total dos solos, procederam-se as análises de variância e foram estabelecidos os seguintes contrastes (C) entre os níveis de corretivo aplicado:

$$C_1 = T_1 \text{ vs } T_2 + T_3; C_2 = T_2 \text{ vs } T_3; C_3 = T_4 \text{ vs } T_5 + T_6; C_4 = T_5 \text{ vs } T_6; C_5 = T_1 + T_2 + T_3 \text{ vs } T_4 + T_5 + T_6$$

em que

T₁ (sem corretivo), T₂ (com CaCO₃) e T₃ (com escória) são tratamentos aplicados no LVA; e,

T₄ (sem corretivo), T₅ (com CaCO₃) e T₆ (com escória) são tratamentos aplicados no LA.

2ª Etapa: fracionamento de Cr no solo

O fracionamento do cromo justifica-se pela sua presença em concentrações ligeiramente mais elevadas na escória, em relação aos demais elementos potencialmente tóxicos.

Nas amostras que receberam os níveis 0,0, 1,2 e 2,4 NC do experimento que avaliou a resposta das plantas ao uso da escória como corretivo (Capítulo 2), mais um nível adicional equivalente a 10 N.C da escória de aciaria, foram analisadas as concentrações de Cr total (EMBRAPA, 1999) e em extrações sequenciais, com o intuito de identificar as diferentes formas geoquímicas desse metal e sua interação com os solos. O nível equivalente a 10 NC teve como objetivo simular o incremento de Cr nos solos após dez aplicações sucessivas da escória como corretivo de solos.

Foi utilizada a relação de 1:10 de solo, em relação aos diferentes extratores (Quadro 1). Os extratos obtidos foram filtrados, acidificados e acondicionados em frascos plásticos para análise. Após cada determinação, as amostras contidas nos tubos de centrifuga foram lavadas com água deionizada por duas vezes. A quantificação do Cr, obtida em cada etapa de extração, foi realizada por espectrometria de emissão óptica em plasma induzido (ICP-OES).

Os resultados totais de Cr, obtidos nos diferentes níveis, foram analisados estatisticamente para comparar os efeitos dos tratamentos (Análise de variância). Em seguida, os efeitos destes tratamentos foram desdobrados e testados, para teores de Cr, por meio de contrastes.

3ª Etapa: lixiviação dos solos com água

Nesta etapa foi avaliada a mobilização tanto de metais quanto de Ca e Mg nos solos utilizados no experimento que avaliou as respostas das plantas de sorgo ao uso da escória como corretivo (Capítulo 2), acrescentando-se um nível de escória equivalente a dez vezes a NC.

O experimento ficou assim constituído: arranjo fatorial [(2 x 2 x 4) + 2], em delineamento inteiramente casualizado, com três repetições, perfazendo 54 parcelas, sendo:

- dois solos;
- dois corretivos da acidez, CaCO₃ p.a. e escória;
- quatro níveis de corretivos, correspondentes a 0,6; 1,2; 2,4 e 10 vezes a NC; e
- duas testemunhas (dois solos sem aplicação de corretivo).

Quadro 1 – Esquema utilizado para o fracionamento de Cr

Fração	Extrator
Solúvel (SOL)	Água deionizada: 2,0 g de solo e 20 mL de água; 20 min de agitação e centrifugação por 20 min, a 3.500 rpm.
Trocável (TROC)	Nitrato de magnésio $[Mg(NO_3)_2]$ 1 mol L ⁻¹ pH 7,2; 2,0 g de solo e 20 mL da solução; 1 h de agitação e centrifugação por 20 min, a 3.500 rpm.
Ligado aos carbonatos (CARB)	Acetato de amônio (NH ₄ OAc) 0,5 mol L ⁻¹ , pH 5,0; 2,0 g de solo e 20 mL da solução; 1 h de agitação e centrifugação por 20 min a 3500 rpm.
Ligado aos óxidos mal cristalizados de Fe e Mn (OMC)	Oxalato de amônio ((NH ₄) ₂ C ₂ O ₄ .H ₂ O) 0,2 mol L ⁻¹ e ácido oxálico (H ₂ C ₂ O ₄) 0,2 mol L ⁻¹ , pH 3,0; 2,0 g de solo e 20 mL da solução; 1 h de agitação e centrifugação por 20 min, a 3.500 rpm.
Ligado aos óxidos de Fe cristalino (OC)	Oxalato de amônio 0,2 mol L ⁻¹ e 0,2 mol L ⁻¹ , pH 3,0 com ácido ascórbico 0,1 mol L ⁻¹ ; 2,0 g de solo e 20 mL da solução; banho-maria por 30 min, a 100 °C; agitação e centrifugação por 20 min, a 3.500 rpm.
Ligado à matéria orgânica (MO)	Hipoclorito de sódio (NaOCl) 0,7 mol L ⁻¹ , pH 8,5; 2,0 g de solo e 10 mL da solução; banho-maria por 30 min, a 100 °C; agitação e centrifugação por 20 min, a 3500 rpm; repetiu-se o processo por mais uma vez.
Residual (RES)	Residual = total - ∑ frações anteriores

Fonte: metodologia adaptada de Tessier (1979) e Shuman (1985), citados por BORGES JR. (2002).

Os solos foram destorroados e, novamente, passados em peneira de 2,0 mm, posteriormente, foram tomadas 300 g de cada solo, com seu respectivo tratamento, juntamente com 150 g de areia de quartzo (2,0 mm granulometria). Após a homogeneização, 300 g de cada da mistura foram acondicionados em colunas de PVC, contendo um sistema de filtragem em sua base.

Para eliminação de possíveis contaminantes, a areia de quartzo foi lavada em baldes de PVC, com capacidade para dez litros, na razão de 2,5 kg de areia por balde, onde foram adicionados, aproximadamente, cinco litros de HCl 6,0 mol L⁻¹ e agitados, em seguida, manualmente com o auxílio de um bastão de madeira. Em seguida, deixou-se em repouso por um período de 48 horas. Ao final deste período, o ácido contido nos baldes foi descartado e repetiu-se o procedimento anterior por mais duas vezes. A areia foi, então, lavada com água de torneira, até que o pH da água se aproximasse ao seu valor em condições normais (pH ≅ 5,5) e, depois, com água destilada, para remover

todo o resíduo. Posteriormente, foi seca em estufa, com circulação forçada de ar, à 40 °C, até completa secura, para finalmente ser misturada ao solo.

As amostras contidas nas colunas foram submetidas a lixiviações periódicas a cada sete dias, com 170 mL de água deionizada, equivalente à precipitação anual de 1.800 mm por ano, até completar quatro meses, para avaliar a movimentação de metais através do perfil do solo. As colunas (7,5 cm de diâmetro x 15,0 cm de altura) foram acondicionadas de modo que a lixiviação ocorresse de forma mais uniforme possível em todos os tratamentos e durante todo o período do experimento.

As amostras de lixiviado tiveram seus respectivos volumes medidos, sendo determinadas concentrações de Ca, Mg, Fe, Mn, Zn, Cu, Ni, Cd e Cr; este último presente em quantidade significativa na escória, por espectrometria de emissão óptica em plasma induzido (ICP-OES).

As concentrações de metais obtidas foram comparadas aos valores máximos estabelecidos para águas destinadas ao consumo humano, conforme CONAMA (1986). Com relação às concentrações de Ca e Mg, realizaram-se análises de variância e de regressão, levando-se em consideração as quantidades acumuladas ao longo do período de lixiviação, para verificar os efeitos dos diferentes tratamentos.

4ª Etapa: lixiviação ácida dos solos

Após o término das lixiviações com água (etapa anterior), as amostras foram novamente secas, destorroadas e, em seguida, utilizadas para a execução dessa etapa do trabalho.

Os solos foram passados em peneira de 2,0 mm e posteriormente, uma alíquota de 250 g da mistura foi novamente acondicionada nas colunas de lixiviação.

As amostras contidas nas colunas foram submetidas, também, a lixiviações periódicas a cada sete dias, com 170 mL de solução aquosa de ácido acético 0,001 mol L⁻¹ até completar quatro meses. A utilização do ácido acético justifica-se pelo seu uso no teste de lixiviação de resíduos sólidos (NBR 10.005), proposto pela ABNT (1986).

Semelhante ao ensaio anterior, nas amostras de lixiviado, mediram-se seus respectivos volumes e foram determinadas as concentrações de Ca, Mg, Fe, Mn, Zn, Cu, Ni, Cd e Cr; este último presente em quantidade significativa na escória, por espectrometria de emissão óptica em plasma induzido (ICP-OES). Determinaram-se,

ainda, os valores de pH dos lixiviados e o pH dos solos antes e após o início deste ensaio, com o intuito de verificar se houve modificação do mesmo ao longo do período de lixiviação.

As concentrações dos metais obtidos também foram comparadas aos valores máximos estabelecidos em águas para consumo humano, conforme CONAMA (1986). Com relação às concentrações de Ca e Mg, realizaram-se análises de variância e de regressão, levando-se em consideração suas quantidades acumuladas ao longo do período de lixiviação, para verificar os efeitos dos diferentes tratamentos.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Biodisponibilidade de metais

Com relação à utilização da planta de alface como indicadora da disponibilidade de metais pesados nos solos, verificou-se elevação do teor de Mn no solo em decorrência da utilização de escória para os dois solos estudados, diferindo estatisticamente dos tratamentos que receberam CaCO_3 como corretivos (Quadros 2 e 3). Contudo, este teor de manganês ($89,72$ e $95,28 \text{ mg kg}^{-1}$ para o LVA e La, respectivamente) está consideravelmente abaixo daquele que ocorre na litosfera, que é de, aproximadamente, 1.000 mg kg^{-1} , e também inferior aos teores normalmente encontrados nos solos, que variam de 270 a 525 mg kg^{-1} , considerando-se 437 mg kg^{-1} o valor médio (KABATA-PENDIAS & PENDIAS, 2001).

Considerando o elevado teor de óxido de Mn na escória (Quadro 3, Capítulo 1), especial atenção deve ser dada ao acúmulo deste elemento no solo, uma vez que as formas de Mn (III) e Mn (IV), denominadas facilmente reduzíveis, têm importante papel na mudança do estado de oxidação do cromo. JAMES & BARTLETT (1983), relataram uma lenta transformação do Cr (III) à Cr (VI), em solos com elevados teores de Mn facilmente reduzíveis. Essa transformação representaria um aumento no risco de poluição do ambiente, uma vez que a forma hexavalente apresenta toxicidade, solubilidade e mobilidade muito maiores do que a forma trivalente (ALCÂNTARA & CAMARGO, 2001).

Quadro 2 – Teores totais de metais presentes nos solos, obtidos por ataque triácido, após o cultivo com alface. Valores médios (três repetições) ± erro padrão da média

Solo	Corretivo	Nível	Zn	Fe	Mn	Cu	Ni	Cd	Pb	Cr
			----- mg kg ⁻¹ -----							
LVA	Testemunha	0,0	79,17 ± 17,11	3.8795,77 ± 102,26	33,06 ± 2,90	10,63 ± 0,30	14,17 ± 0,20	0,37 ± 0,19	28,40 ± 0,72	49,80 ± 0,35
	Carbonato	1,0	51,03 ± 5,93	4.5966,67 ± 122,47	32,78 ± 3,74	10,90 ± 0,21	15,07 ± 0,28	<0,04	30,43 ± 0,58	46,75 ± 2,31
	Escória	1,0	41,23 ± 2,09	4.6941,21 ± 13,61	89,72 ± 7,46	10,27 ± 0,99	13,67 ± 0,69	<0,04	27,47 ± 1,26	52,48 ± 3,52
LA	Testemunha	0,0	21,07 ± 2,82	9.219,16 ± 51,03	60,56 ± 14,79	3,90 ± 0,31	3,33 ± 0,09	<0,04	1,37 ± 0,32	17,01 ± 0,45
	Carbonato	1,0	42,63 ± 17,54	10.260,83 ± 84,37	48,61 ± 5,58	3,43 ± 0,44	3,00 ± 0,10	0,23 ± 0,23	1,53 ± 0,19	16,27 ± 0,95
	Escória	1,0	22,47 ± 0,94	9.117,50 ± 27,90	95,28 ± 12,36	3,80 ± 0,32	3,03 ± 0,09	0,03 ± 0,03	1,40 ± 0,25	19,89 ± 1,70

Quadro 3 – Análise de variância e contrastes entre as médias dos teores totais de metais nos solos obtidos por ataque triácido, após o cultivo com plantas de alface

F.V.	G.L.	Q.M.							
		Zn	Fe	Mn	Cu	Ni	Cd	Pb	Cr
Solo	1	7.707,75**	0,58E10**	2.188,22*	281,54**	738,15**	0,82E-01 ^{n.s.}	4.458,10**	8.411,27**
Corretivo	1	336,75 ^{n.s.}	573.498,40 ^{n.s.}	4.025,72**	0,27E-01 ^{n.s.}	0,70 ^{n.s.}	0,15E-01 ^{n.s.}	3,60 ^{n.s.}	124,67 ^{n.s.}
Nível	1	696,60 ^{n.s.}	0,50E+08 ^{n.s.}	2.350,26**	0,17 ^{n.s.}	0,20E-01 ^{n.s.}	0,82E-01 ^{n.s.}	0,63 ^{n.s.}	53,70 ^{n.s.}
Corretivo d/ Solo	1	40,30 ^{n.s.}	668,71 ^{n.s.}	39,61 ^{n.s.}	0,37 ^{n.s.}	0,77 ^{n.s.}	0,15E-01 ^{n.s.}	3,01 ^{n.s.}	99,63 ^{n.s.}
Nível d/ Solo	1	2.972,60*	0,36E+08 ^{n.s.}	423,64 ^{n.s.}	0,82E-01 ^{n.s.}	0,40 ^{n.s.}	0,38*	0,30 ^{n.s.}	150,50 ^{n.s.}
Nível d/ Corretivo	1	336,75 ^{n.s.}	573.503,30 ^{n.s.}	4.025,72**	0,27E-01 ^{n.s.}	0,70 ^{n.s.}	0,15E-01 ^{n.s.}	3,60 ^{n.s.}	124,67 ^{n.s.}
Tratamentos	(5)								
Contraste (C ₁)	1	2.182,40*	0,54E+08*	1589,85*	0,01 ^{n.s.}	0,08 ^{n.s.}	0,27*	0,31 ^{n.s.}	128,00 ^{n.s.}
Contraste (C ₂)	1	144,06 ^{n.s.}	0,54E+06 ^{n.s.}	4864,00**	0,60 ^{n.s.}	9,35**	-	9,97**	447,21 ^{n.s.}
Contraste (C ₃)	1	263,73 ^{n.s.}	0,38E+06 ^{n.s.}	259,41 ^{n.s.}	0,16 ^{n.s.}	0,20 ^{n.s.}	0,04 ^{n.s.}	0,02 ^{n.s.}	8,13 ^{n.s.}
Contraste (C ₄)	1	610,04 ^{n.s.}	0,61E+06 ^{n.s.}	3266,66**	0,20 ^{n.s.}	0,20E-02 ^{n.s.}	0,06 ^{n.s.}	0,03 ^{n.s.}	1,40 ^{n.s.}
Contraste (C ₅)	1	3.635,20**	0,46E+10**	1195,06*	213,56**	562,24**	0,01 ^{n.s.}	3362,00**	6883,56**
Resíduo	12	324,38	0,11E+08	240,39	0,75	0,31	0,45E-01	1,32	112,27
C.V. (%)		41,95	13,00	25,84	12,08	6,44	200,98	7,62	23,56

** e * Coeficientes significativos, a 1 e 5 % de probabilidade, pelo teste F.

^{n.s.} Coeficientes não-significativos.

C₁ = T₁ vs T₂ + T₃; C₂ = T₂ vs T₃; C₃ = T₄ vs T₅ + T₆; C₄ = T₅ vs T₆; C₅ = T₁ + T₂ + T₃ vs T₄ + T₅ + T₆, em que, respectivamente, T₁ (solo s/corretivo), T₂ (solo c/ CaCO₃) e T₃ (solos c/ escória) são tratamentos aplicados ao LVA, e T₄ (solo s/corretivo), T₅ (solo c/ CaCO₃) e T₆ (solo c/ escória) tratamentos aplicados ao LA.

Os teores de cromo encontrados no LA após o cultivo de alface não apresentaram diferenças significativas devido ao tipo de corretivo utilizado (Quadro 2). Já, para o LVA, quando se utilizou escória como corretivo, verificou-se elevação no teor de cromo do solo (Quadro 1). No entanto, tal aumento não foi significativo até 5% de probabilidade, e este teor é inferior ao observado na crosta terrestre e, também, encontra-se dentro do sugerido pela CETESB (2001) para solos, em torno de 500 mg kg^{-1} .

Com relação aos teores de Ni e Cd não houve diferença significativa quanto ao tipo de corretivo utilizado, indicando que a escória de aciaria não promoveu o incremento destes metais nos solos (Quadro 2). De forma geral, houve diferença significativa em relação aos teores de metais apenas quando se compararam os solos, não sendo observado o mesmo comportamento apenas para o Cd (Quadro 3).

Resultado semelhante foi obtido por PIAU (1991), que, após um período de 90 dias de incubação utilizando três tipos de escórias (aciaria, alto-forno e pré-cal) em diversas granulometrias, não observou incremento de metais pesados nos solos.

Em relação aos teores de metais na matéria seca da planta de alface (Quadro 4), os resultados não revelaram indícios de contaminação ou absorção de metais tóxicos. Os teores de Cr na parte aérea das plantas não diferiram estatisticamente para os tratamentos com escória em relação aos tratamentos com carbonatos como corretivos (Quadro 5).

Com relação aos teores de Mn, na matéria seca das plantas, verificou-se diferença significativa em função do tipo de corretivo utilizado (Quadro 5). Nos tratamentos que receberam escória como corretivo, os teores de Mn na parte aérea das plantas foram superiores aos observados nos tratamentos que receberam CaCO_3 (Quadro 4); no entanto, semelhante ao experimento de corretivos (Capítulo 2), não foram observados sintomas de fitotoxidez, igualmente ao constatado por RIBEIRO et al. (1986) e AMARAL et al. (1994). Isto se deve à presença deste elemento em teores relativamente elevada no resíduo ($3,81 \text{ dag kg}^{-1}$).

Foi verificado, também, teor elevado de Mn na parte aérea das plantas no tratamento testemunha do LVA (Quadro 4). Neste caso em especial, o elevado teor de Mn se deva ao efeito de concentração deste elemento no tecido da planta, uma vez que a produção de matéria seca neste tratamento foi inferior aos demais. Contudo, não foi observado, em nenhum dos tratamentos, sintomas de fitotoxidez deste elemento, durante o período de condução deste experimento.

Quadro 4 – Produção de matéria seca (MS) e teores de Ca, Mg, P, K, Zn, Fe, Mn, Cu, Ni, Cd, Pb e Cr em plantas de alface. Valores médios (três repetições) ± erro padrão da média

Solo	Corretivo	Nível	MS	Ca		Mg		P		K		Zn		Fe	
			----- g vaso ⁻¹ ----	----- g kg ⁻¹ -----											
LVA	Testemunha	0,0	2,91 ± 0,03	3,68 ±	12,11	1,73 ±	9,11	0,71 ±	85,04	20,68 ±	155,83	95,78 ±	3,92	143,20 ±	12,58
	Carbonato	1,0	10,11 ± 2,26	11,27 ±	225,35	2,28 ±	1.034,32	1,55 ±	44,15	31,57 ±	69,6	42,30 ±	2,21	262,64 ±	33,93
	Escória	1,0	9,36 ± 1,16	12,06 ±	450,16	4,50 ±	783,96	1,59 ±	48,11	27,08 ±	40,82	38,92 ±	6,16	268,15 ±	29,14
LA	Testemunha	0,0	6,50 ± 0,78	7,57 ±	505,07	4,52 ±	799,40	1,88 ±	76,18	28,63 ±	199,83	34,50 ±	2,03	219,82 ±	10,47
	Carbonato	1,0	8,39 ± 0,63	12,74 ±	507,75	4,59 ±	460,83	3,65 ±	28,07	29,67 ±	345,37	29,30 ±	3,33	402,48 ±	157,14
	Escória	1,0	8,92 ± 0,54	7,99 ±	239,67	4,97 ±	192,79	3,80 ±	68,16	32,12 ±	377,46	117,22 ±	40	311,98 ±	35,38
			Mn	Cu	Ni	Cd	Pb	----- mg kg ⁻¹ -----							
LVA	Testemunha	0,0	682,58 ± 1,83	8,04 ± 0,25	1,07 ± 0,20	0,15 ± 0,00	<0,04	<0,03							
	Carbonato	1,0	117,17 ± 2,17	7,93 ± 0,24	0,98 ± 0,43	0,10 ± 0,00	<0,04	0,22 ± 0,22							
	Escória	1,0	176,50 ± 5,28	7,40 ± 0,71	0,48 ± 0,13	0,08 ± 0,02	<0,04	<0,03							
LA	Testemunha	0,0	95,67 ± 2,30	2,18 ± 0,42	0,35 ± 0,03	0,05 ± 0,00	<0,04	0,03 ± 0,03							
	Carbonato	1,0	59,02 ± 9,24	2,53 ± 0,22	0,52 ± 0,11	0,07 ± 0,02	<0,04	0,60 ± 0,48							
	Escória	1,0	239,50 ± 7,42	2,83 ± 0,25	1,82 ± 1,28	0,15 ± 0,06	<0,04	0,13 ± 0,07							

Quadro 5 – Análise de variância para produção de matéria seca (MS) e teores de Ca, Mg, P, K, Zn, Fe, Mn, Cu, Ni, Cd, Pb e Cr em plantas de alface

F.V.	G.L.	Q.M.											
		MS	Ca	Mg	P	K	Zn	Fe	Mn	Cu	Ni	Cd	Cr
Solo	1	27,09*	0,16 E+08**	0,28 E+08**	0,22 E+08**	0,20 E+09*	1.270,22 ^{n.s.}	0,55E+05 ^{n.s.}	0,45 E+06**	152,76**	0,13 ^{n.s.}	0,10E-01*	0,11 ^{n.s.}
Corretivo	1	0,17 E-02 ^{n.s.}	0,25 E+07*	0,32 E+07 ^{n.s.}	0,21 E+04 ^{n.s.}	0,19 E+08 ^{n.s.}	2.620,86 ^{n.s.}	0,24E+06 ^{n.s.}	0,36 E+05**	0,60 ^{n.s.}	0,23 ^{n.s.}	0,17E-02 ^{n.s.}	0,19 ^{n.s.}
Nível	1	78,48**	0,15 E+09**	0,46 E+07 ^{n.s.}	0,97 E+07**	0,27 E+09**	381,60 ^{n.s.}	0,57 E+06 ^{n.s.}	0,40 E+06**	0,59 ^{n.s.}	0,36 ^{n.s.}	0,11E-15 ^{n.s.}	0,32 ^{n.s.}
Corretivo d/ Solo	1	0,76 ^{n.s.}	0,65 E+07**	0,91 E+06 ^{n.s.}	0,10 E+04 ^{n.s.}	0,29 E+07 ^{n.s.}	3.062,30 ^{n.s.}	0,18 E+06 ^{n.s.}	0,14 E+05*	2,04 ^{n.s.}	1,20 ^{n.s.}	0,38E-02 ^{n.s.}	0,030 ^{n.s.}
Nível d/ Solo	1	61,70**	0,52 E+08**	0,34 E+07 ^{n.s.}	0,41 E+06 ^{n.s.}	0,16 E+08 ^{n.s.}	13.367,04*	0,22 E+06 ^{n.s.}	0,46 E+06**	0,023 ^{n.s.}	2,01 ^{n.s.}	0,20E-01**	0,088 ^{n.s.}
Nível d/ Corretivo	1	0,54 E-01 ^{n.s.}	0,11 E+08**	0,20 E+07 ^{n.s.}	0,25 E+07 ^{n.s.}	0,17 E+07 ^{n.s.}	2.739,21 ^{n.s.}	0,29 E+06 ^{n.s.}	0,11 E+05 ^{n.s.}	1,13 ^{n.s.}	0,25 ^{n.s.}	0,17E-02 ^{n.s.}	0,16 ^{n.s.}
Resíduo	12	3,89	0,41 E+06	0,13 E+07	0,20 E+07	0,26 E+08	1.462,68	0,29 E+06	2.490,56	0,45	0,95	0,19E-02	0,142
C.V. (%)		25,61	6,94	30,07	18,62	17,58	64,10	137,49	21,85	13,03	111,92	44,10	230,00

^{n.s.} Coeficientes não-significativos.

** e * Coeficientes significativos, a 1 e 5%, respectivamente.

Resultados semelhantes aos obtidos neste trabalho foram observados por RIBEIRO et al. (1986), LOUZADA (1987) e PIAU (1995). Estes autores não observaram sintomas de fitotoxicidade em plantas de sorgo e de milho, respectivamente, quando aplicaram ao solo escória de siderurgia para correção da acidez.

3.2. Fracionamento do Cr

Constatou-se que o incremento nos teores totais de Cr foi diretamente proporcional ao aumento dos níveis de escória aplicada (Quadro 6). Entretanto, no nível mais elevado (10 NC), que procurou simular o acúmulo deste elemento nos solos depois de 30 anos de utilização da escória como corretivo (considerando a aplicação da dose correspondente a 1,0 NC, a cada três anos), os níveis máximos atingidos não excederam aos sugeridos pela CETESB de 500 mg kg^{-1} e os comumente observados em diferentes tipos de solos (KABATA-PENDIAS & PENDIAS, 2001). No entanto, vale a pena ressaltar que esta dose não é aplicada em condições reais; foi aplicada apenas para simular o comportamento do metal de interesse. Embora tenha sido constatado, no nível correspondente a 10 NC, incremento no teor de Cr, para ambos os solos, não houve diferença significativa deste tratamento em relação ao tratamento testemunha (Quadro 7).

Com relação aos teores de Cr obtidos em extrações sequenciais, os resultados aqui obtidos são muito promissores, quanto à utilização da escória como corretivo de solo sem causar passivo ambiental, pois se verificou que este metal pouco interagiu com os diferentes constituintes do solo aqui avaliados. Constatou-se que na fase considerada mais disponível, ou seja, na fração solúvel, trocável e ligada ao carbonato, não foi detectada a presença de Cr. Isto não indica a ausência do elemento, mas, sim, que sua concentração nos extratos obtidos encontrava-se abaixo do limite de determinação do método analítico utilizado ($<0,03 \text{ mg kg}^{-1}$). O baixo teor de matéria orgânica em ambos os solos (Quadro 2, Capítulo 1), justifica as pequenas quantidades de Cr associado a esta fração. Verificou-se, também, que o Cr, mesmo em concentrações relativamente elevadas na escória, encontrou-se associado às formas mais estáveis no solo, independentemente do nível de escória aplicado ou do tipo de solo avaliado (Quadro 6). De modo geral, cerca de 80% do Cr total presente nos dois solos estão associados à fração residual e o restante associado aos óxidos de Fe e Mn (Figura 1). Estes resultados podem ser creditados à presença de diferentes sítios de adsorção nos solos e à alta afinidade do Cr com silicatos, elemento litófilo

Quadro 6 – Valores de pH e distribuição de Cr em cada fração da extração sequencial realizada no LVA e no LA Valores médios (três repetições) ± erro padrão da média

Tratamentos	Nível	pH	Formas Químicas							
			Solúvel	Trocável	Carbonato	Óxido Fe e Mn mal cristalizados	Óxido de Fe Cristalino	Matéria Orgânica	Residual	Total
----- mg kg ⁻¹ -----										
Testemunha	0,0	5,34 ± 0,98	<0,03	<0,03	<0,03	0,81 ± 0,02	9,61 ± 0,02	0,19 ± 0,06	36,24 ± 1,79	46,85 ± 1,81
LVA	1,2	7,11 ± 0,26	<0,03	<0,03	<0,03	1,70 ± 0,06	7,81 ± 0,21	0,06 ± 0,03	40,71 ± 1,53	50,27 ± 1,48
	2,4	7,91 ± 0,14	<0,03	<0,03	<0,03	2,33 ± 0,04	9,30 ± 0,12	<0,03	42,13 ± 0,99	56,75 ± 1,12
	10,0	8,41 ± 0,12	<0,03	<0,03	<0,03	5,93 ± 0,25	8,57 ± 0,32	0,19 ± 0,12	70,65 ± 1,67	93,33 ± 1,57
Testemunha	0,0	6,28 ± 0,45	<0,03	<0,03	<0,03	0,14 ± 0,01	2,97 ± 0,06	<0,03	14,28 ± 1,43	17,39 ± 1,37
LA	1,2	7,32 ± 0,22	<0,03	<0,03	<0,03	0,38 ± 0,01	3,70 ± 0,29	<0,03	17,44 ± 2,95	21,52 ± 1,29
	2,4	7,55 ± 0,14	<0,03	<0,03	<0,03	0,97 ± 0,05	3,00 ± 0,17	<0,03	20,47 ± 2,17	24,43 ± 2,06
	10,0	8,36 ± 0,05	<0,03	<0,03	<0,03	4,69 ± 0,12	5,17 ± 0,15	0,05 ± 0,05	29,01 ± 0,87	47,91 ± 0,83
Escória	---	11,80 ± 1,04	<0,03	<0,03	<0,03	3,54 ± 0,16	27,47 ± 2,19	0,74 ± 0,34	464,46 ± 2,97	496,21 ± 1,42

O número seguido do sinal < indica o limite de determinação do método analítico utilizado.

Quadro 7 – Análise de variância e contrastes estabelecidos para o teor de cromo total nas amostras submetidas a diferentes níveis de escória de aciaria

F.V.	G.L.	Q.M.
Solo	1	6.729,21**
Nível	3	1.095,62**
Nível d/ solo	3	111,68**
Tratamento	(7)	
Contraste (C ₁) ^{1/}	1	2.762,79**
Contraste (C ₂)	1	53,90*
Contraste (C ₃)	1	17,52 ^{n.s}
Contraste (C ₄)	1	712,52**
Contraste (C ₅)	1	49,52 ^{n.s}
Contraste (C ₆)	1	25,66 ^{n.s}
Resíduo	16	6,63
C.V. (%)		6,09

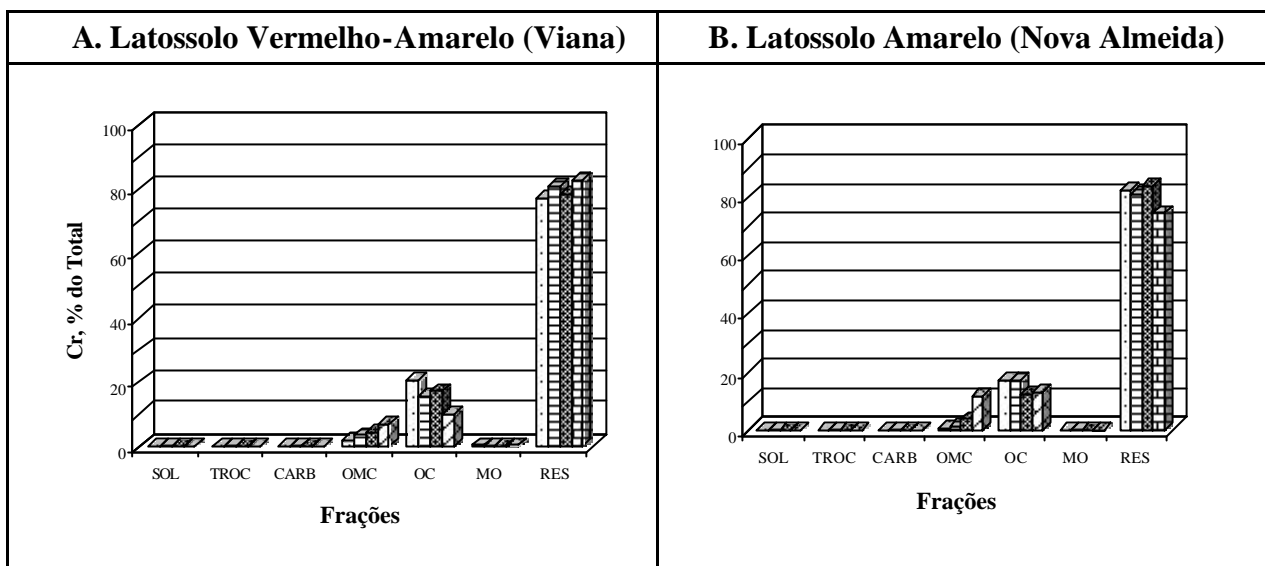
^{1/} C₁= T₁ + T₂ + T₃ vs T₄; C₂ = T₁ + T₂ vs T₃; C₃ = T₁ vs T₂; C₄ = T₅ + T₆ + T₇ vs T₈; C₅ = T₅ + T₆ vs T₇ e C₆ = T₅ vs T₆, em que T₁ (s/ corretivo), T₂ (nível 1,2 N.C.), T₃ (nível 2,4 N.C.) e T₄ (nível 10,0 N.C.) correspondem aos tratamentos aplicados no LVA e T₅ (s/ corretivo), T₆ (nível 1,2 N.C.), T₇ (nível 2,4 N.C.) e T₈ (nível 10,0 N.C.) aos aplicados no LA.

** e * Coeficientes significativos, a 1 e 5 % de probabilidade, respectivamente, pelo teste F.

^{n.s.} Coeficientes não-significativos.

(ALLOWAY, 1990). AMARAL SOBRINHO (1993), estudando a interação dos metais de resíduos siderúrgicos com um solo Podzólico Vermelho-Amarelo, observou que 94,3 % do Cr estavam associados à fração residual. MILACIC & STUPAR (1995), utilizando um solo arenoso e outro argiloso realizaram o fracionamento de Cr e observaram que mais de 80 % estavam associados a esta fração.

ABREU et al. (2002), citando os problemas relacionados ao uso dos esquemas de fracionamento, ressaltam que o processo de readsorção do metal após a liberação da fração de interesse pode subestimar os teores dos metais nas primeiras fases do fracionamento e superestimar nos passos finais. No presente estudo, tal processo pode ter ocorrido, contribuindo para maior porcentagem de Cr associado à fração residual. Outro ponto relevante que também pode ter contribuído para maior porcentagem de Cr observada nesta fração, é o fato da escória, quando aplicada ao solo, não ter sido solubilizada completamente refletindo numa menor quantidade do metal disponibilizada. Tal consideração é fundamentada, levando-se em consideração que no resíduo o Cr encontra-se preferencialmente associado a esta fração (93,6 %) (Figura 2).



SOL = solúvel; TROC = trocável; CARB = ligado a carbonato; OMC = ligados a óxidos mal cristalizados; OC = ligados a óxidos cristalinos; MO = ligados a matéria orgânica; e RES = residual.

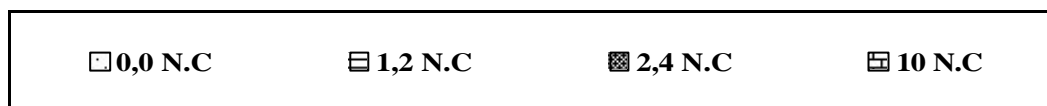
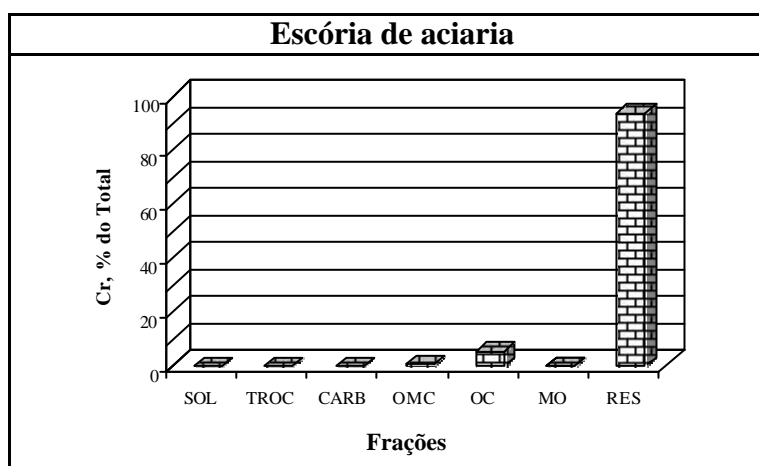


Figura 1 – Distribuição do Cr em cada fração da extração seqüencial, realizada nas amostras do Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA) e Latossolo Amarelo (LA), tratados com diferentes níveis de escória de aciaria.



SOL = solúvel; TROC = trocável; CARB = ligado a carbonato; OMC = ligados a óxidos mal cristalizados; OC = ligados a óxidos cristalinos; MO = ligados a matéria orgânica; e RES = residual.

Figura 2 – Distribuição do Cr em cada fração da extração seqüencial, realizada da amostra da escória de aciaria.

Verificou-se aumento da participação do Cr associado a óxidos mal cristalizados em relação às demais frações com o aumento do nível de escória aplicada. Isto, provavelmente, está relacionado à maior superfície disponível para adsorção destes óxidos em relação aos cristalinos, e também com o desenvolvimento de cargas negativas nestas frações minerais, à medida que o pH se elevou, potencializando a adsorção do Cr, uma vez que este pode ser adsorvido eletrostaticamente na superfície dos óxidos ou especificamente, formando ligações parcialmente covalentes com os oxigênios da estrutura mineral. Deve-se ter em mente que os Latossolos, como os utilizados neste trabalho, possuem fundamentalmente carga variável, a qual se manifesta a partir da interação com íons determinantes de potencial (H^+ e OH^-).

Em relação à extração sequencial da escória, verificou-se que o Cr está presente praticamente na fração residual (Figura 2). A maior porcentagem do Cr nesta fração é justificada pela interação do Cr com os silicatos, que são os principais constituintes na composição da escória. Observou-se também pequena porcentagem de Cr na fração ligada a óxidos de Fe cristalinos (aproximadamente 9%). A presença do Cr nesta fração pressupõe a interação do mesmo com as formas de Fe metálico presentes na constituição da escória que, possivelmente, oxidam-se formando óxidos de Fe muito estáveis, em decorrência das altas temperaturas no processo de produção do aço.

3.3. Lixiviação do solo com água

Concentrações de Zn, Cu, Fe e Mn em solução muito baixas foram observadas, de maneira geral, inferiores a $0,5 \text{ mg L}^{-1}$, ou inferiores ao limite de determinação (L.D) do método analítico utilizado, tanto nos tratamentos em que se utilizou escória quanto naqueles em que se utilizou $CaCO_3$.

Comportamento semelhante também foi verificado entre escória e carbonato para os valores de pH do solo, que variaram de 5,6 a 8,8, antes e depois do ensaio de mobilização (Quadro 8). Como as reações de precipitação, complexação e adsorção são favorecidas pelo aumento do pH (SPOSITO, 1989), possivelmente, nos valores observados, principalmente nos níveis de 2,4 e 10 NC, o pH mais elevado tenha favorecido a cinética de transformação dos metais das formas mais solúveis para as de menor solubilidade. Resultado semelhante foi obtido por WELCH & LUND (1989), que, avaliando a mobilidade de zinco em colunas de solos tratados com lodo de esgoto, sob diferentes condições de saturação, observaram que a disponibilidade do Zn e o pH

Quadro 8 – Valores de pH dos solos, antes e depois da etapa de lixiviação com água, utilizados no experimento de disponibilidade e mobilidade de metais. Valores médios (três repetições) \pm erro padrão da média

Solo	Corretivo	Nível	pH		
			Antes	Depois	
LVA	Testemunha	0,0	6,2 \pm 0,03	5,6 \pm 0,06	
	CaCO ₃	0,6	5,8 \pm 0,02	7,0 \pm 0,09	
		1,2	6,3 \pm 0,03	7,5 \pm 0,39	
		2,4	7,3 \pm 0,04	7,9 \pm 0,08	
		10	8,3 \pm 0,01	8,3 \pm 0,01	
	Escória	0,6	5,8 \pm 0,01	6,8 \pm 0,02	
		1,2	6,3 \pm 0,04	7,1 \pm 0,02	
		2,4	7,0 \pm 0,08	7,9 \pm 0,08	
		10	8,4 \pm 0,01	8,4 \pm 0,07	
	LA	Testemunha	0,0	6,5 \pm 0,02	6,2 \pm 0,03
		CaCO ₃	0,6	5,7 \pm 0,02	6,7 \pm 0,05
			1,2	6,1 \pm 0,01	7,0 \pm 0,03
2,4			7,2 \pm 0,63	7,9 \pm 0,01	
10			8,6 \pm 0,03	8,1 \pm 0,08	
Escória		0,6	5,6 \pm 0,02	6,8 \pm 0,01	
		1,2	6,1 \pm 0,03	7,3 \pm 0,01	
		2,4	7,0 \pm 0,04	6,9 \pm 0,06	
		10	8,8 \pm 0,01	8,4 \pm 0,03	

do solo apresentaram relação inversa. Durante o período de lixiviação houve decréscimo nos valores de pH dos solos não-saturados, sendo, neste caso, verificada a mobilização do Zn. Entretanto, nos solos saturados houve aumento do pH, não sendo observada a mobilização do elemento.

Conforme a CONAMA (1986), o teor máximo estabelecido em águas Classe III, destinada ao abastecimento doméstico (após tratamento convencional), a dessedentação de animais e irrigação de culturas arbóreas e frutíferas para Zn e Fe é 5,0 mg L⁻¹ e para Cu e Mn é 0,5 mg L⁻¹.

Nos lixiviados onde foram detectadas as presenças de Zn, Cu, Fe e Mn foi verificado que os níveis encontrados nas soluções lixiviadas, com exceção dada o teor encontrado de Mn no nível 0,6 NC de escória, aplicada no LVA, aos sete dias após o início do ensaio (1^a lixiviação), estão muito abaixo dos teores máximos estabelecidos pela legislação brasileira para água classe III destinada a consumo humano. Verificou-

se, contudo, que, no nível 1,2 NC, o teor de Mn na solução lixiviada foi nulo, indicando que, na dose normalmente utilizada para a correção da acidez do solo, a escória exerce o efeito benéfico de reduzir, a níveis adequados, o teor deste elemento nas águas.

Não foram detectadas presenças de Cr e Ni nas soluções lixiviadas depois de transcorridos 105 dias de ensaio de lixiviação. Contudo, isto não indica a ausência destes metais na solução percolada do solo, mas que seus níveis foram inferiores ao limite de determinação do método analítico utilizado ($< 0,003 \text{ mg L}^{-1}$ para Ni e $< 0,001 \text{ mg L}^{-1}$ para Cr).

A não-detecção do Ni nos lixiviados pode ser devido aos processos de complexação, adsorção e coprecipitação, resultante do aumento do pH, estando este elemento ligado a frações mais estáveis no solo. Diversos autores relataram que o Ni tem sido encontrado preferencialmente na fração residual e ocluídos junto a óxidos de Fe, Mn e Al, e que, ao longo do tempo de incubação desse elemento no solo, maior é a quantidade ligada à fração residual (AMARAL SOBRINHO, 1993; GOMES et al, 1997; BERTONCINI & MATTIAZZO, 1999; BUNZL et al., 1999; ANJOS & MATTIAZZO, 2000).

A dinâmica do Cr (III) no solo se assemelha a do Ni e de outros metais, ou seja, com a elevação do pH, o Cr se torna menos disponível. O efeito do pH na adsorção de cátions metálicos está relacionado com o balanço de cargas positivas e negativas dos colóides do solo (carga protônica líquida), especialmente da matéria orgânica e dos óxidos de Fe, Mn e Al. Com o aumento do pH, a carga protônica líquida decresce para valores mais negativos, resultando aumentos na atração eletrostática do adsorvente (solo) pelo íon metálico (Cr, com carga positiva) (ALCÂNTARA & CAMARGO, 2001).

Diversos trabalhos de pesquisa envolvendo a avaliação do comportamento geoquímico do Cr no solo relatam que a elevação do pH, a presença da argila e óxidos de Fe, Mn e Al são os principais responsáveis pela diminuição da disponibilidade e aumento na retenção do Cr (BARTLETT & KIMBLE, 1976; AMARAL SOBRINHO, 1993; BERTONCINI & MATTIAZZO, 1999; ANJOS & MATTIAZZO, 2000; ALCÂNTARA & CAMARGO, 2001 e GOMES, et al., 2001).

ALCÂNTARA & CAMARGO (2001), estudando a aplicação de isothermas de adsorção de Freundlich para o Cr (III) em latossolos, concluíram que a adsorção de Cr foi maior no solo que apresentava maiores teores de óxidos e de argila e que o aumento do pH do solo, propiciado pela adição de CaCO_3 , resultou aumento da adsorção de cromo ao solo. BARTLETT & KIMBLE (1976), avaliando o comportamento de Cr (III) no solo

verificaram que, para valores de pH acima de 4, houve decréscimo na disponibilidade do Cr, com a completa precipitação ocorrendo a pH 5,5.

BERTONCINI & MATTIAZZO (1999) e ANJOS & MATTIAZZO (2000), avaliando a lixiviação de metais em solos tratados com lodo de esgoto (Biossólido), não detectaram a presença do Cr ao longo do período de lixiviação ou de aplicação continuada do resíduo, e associaram tal comportamento à elevação do pH e à presença de argila e óxidos de Fe, Mn e Al. O mesmo comportamento foi observado por AMARAL SOBRINHO (1993) em solos tratados com resíduo siderúrgico alcalino submetidos a lixiviações periódicas.

Considerando o elevado teor de óxido de Mn na escória (Quadro 3, Capítulo 1), especial atenção deve ser dada ao acúmulo deste elemento no solo, uma vez que as formas de Mn (III) e Mn (IV), denominada facilmente reduzíveis, têm importante papel na mudança do estado de oxidação do cromo. JAMES & BARTLETT (1983), relataram uma lenta transformação do Cr (III) à Cr (VI), em solos com elevados teores de Mn facilmente reduzíveis. Essa transformação representaria um aumento no risco de poluição do ambiente, uma vez que a forma hexavalente apresenta toxicidade, solubilidade e mobilidade muito maiores do que a forma trivalente (ALCÂNTARA & CAMARGO, 2001).

Tratando-se agora da mobilização do cálcio e do magnésio no solo, observou-se que, em geral as quantidades mobilizadas de cálcio e magnésio aumentaram com o aumento dos níveis dos corretivos nos dois solos (Quadros 9 e 10). Teores mais elevados, em geral, tanto de Ca quanto de Mg, foram observados no primeiro dia da coleta do lixiviado, e, a partir daí, os teores foram decrescendo gradativamente.

O conhecimento das perdas de Ca e Mg do solo, normalmente expressas em carbonato de cálcio, em diferentes condições de clima e culturas, torna-se de grande importância para que a coleta e a época de reaplicação possam ser melhores planejadas. Conforme Gasser (1973), citado por ANJOS & ROWELL (1983), as causas destas perdas são: lixiviação do Ca e Mg formando pares iônicos com nitrato, cloreto, bicarbonato ou sulfato, os quais podem ser provenientes de fertilizantes, chuva ou mineralização de matéria orgânica do solo; utilização para neutralização do nitrato formado pela nitrificação do amônio adicionado através da aplicação dos fertilizantes e remoção pelas culturas. Desta forma, no presente estudo, estas reações poderiam ter ocorrido se realização da adubação de cobertura foram utilizadas fontes de macro e micronutrientes a base de cloretos, sulfatos etc.

Quadro 9 – Teores de Ca determinados por espectrofotometria de emissão por plasma induzido (ICP – OES), em amostras de lixiviados, ao longo de 105 dias de teste de lixiviação com água. Valores médios (três repetições) \pm erro padrão da média

Solo	Corretivo	Nível	Tempo (dias)					
			7	14	21	28	35	
			----- mg L ⁻¹ -----					
LVA	Testemunha	0,0	2,61 \pm 0,23	2,45 \pm 1,23	1,39 \pm 0,39	1,13 \pm 0,14	0,94 \pm 0,24	
	CaCO ₃	0,6	22,53 \pm 3,01	10,09 \pm 0,35	5,43 \pm 0,20	4,49 \pm 0,09	4,02 \pm 0,08	
		1,2	41,67 \pm 0,47	20,13 \pm 1,56	13,27 \pm 0,50	9,95 \pm 0,78	10,53 \pm 1,02	
		2,4	107,52 \pm 5,47	54,14 \pm 1,25	35,94 \pm 0,24	23,24 \pm 11,48	32,78 \pm 1,94	
		10	269,51 \pm 16,88	135,72 \pm 2,50	81,97 \pm 2,23	80,74 \pm 2,60	54,14 \pm 1,79	
	Escória	0,6	33,72 \pm 9,68	11,51 \pm 1,53	7,60 \pm 1,31	5,34 \pm 0,03	4,73 \pm 0,77	
		1,2	44,32 \pm 0,87	20,77 \pm 0,35	13,62 \pm 0,31	10,91 \pm 0,78	9,79 \pm 1,58	
		2,4	84,96 \pm 9,55	50,66 \pm 7,56	31,34 \pm 2,13	27,59 \pm 3,68	30,65 \pm 1,65	
		10	166,18 \pm 18,41	91,52 \pm 6,75	80,07 \pm 7,61	62,92 \pm 4,95	58,31 \pm 2,12	
	LA	Testemunha	0,0	4,67 \pm 1,61	2,32 \pm 0,66	1,79 \pm 0,46	1,81 \pm 0,79	2,59 \pm 1,39
		CaCO ₃	0,6	15,69 \pm 2,14	6,54 \pm 0,11	4,72 \pm 0,00	3,34 \pm 0,07	2,79 \pm 0,14
			1,2	45,56 \pm 3,15	14,74 \pm 2,57	10,77 \pm 1,68	7,78 \pm 1,77	5,90 \pm 1,21
2,4			55,14 \pm 6,44	28,39 \pm 0,87	19,87 \pm 0,53	16,62 \pm 0,77	16,14 \pm 0,33	
10			129,47 \pm 7,34	92,47 \pm 0,98	71,93 \pm 2,55	67,70 \pm 0,24	61,83 \pm 1,53	
Escória		0,6	14,04 \pm 1,19	4,84 \pm 0,22	3,40 \pm 0,31	2,94 \pm 0,33	2,42 \pm 0,31	
		1,2	19,18 \pm 4,40	10,25 \pm 1,64	6,69 \pm 0,06	6,06 \pm 0,14	4,20 \pm 0,70	
		2,4	42,73 \pm 0,60	22,01 \pm 0,12	17,18 \pm 0,48	14,53 \pm 0,82	12,31 \pm 0,58	
		10	102,40 \pm 11,16	74,94 \pm 3,99	62,67 \pm 0,96	52,07 \pm 0,84	56,16 \pm 2,78	

Quadro 9, Cont.

Solo	Corretivo	Nível	Tempo (dias)				
			42	49	56	63	70
			----- mg L ⁻¹ -----				
LVA	Testemunha	0,0	1,36 ± 0,53	2,58 ± 1,01	3,81 ± 1,26	3,58 ± 0,33	3,80 ± 1,20
	CaCO ₃	0,6	3,34 ± 0,26	2,79 ± 0,23	2,66 ± 0,17	3,00 ± 0,34	2,02 ± 0,53
		1,2	8,74 ± 0,54	6,89 ± 0,87	6,24 ± 0,07	4,71 ± 0,49	3,78 ± 0,26
		2,4	24,23 ± 1,80	21,18 ± 0,36	21,68 ± 0,80	19,42 ± 0,84	15,16 ± 2,15
		10	72,44 ± 3,71	72,10 ± 3,00	68,09 ± 3,12	52,22 ± 1,53	53,27 ± 2,28
	Escória	0,6	3,78 ± 0,43	3,28 ± 0,22	2,79 ± 0,40	1,89 ± 0,30	2,07 ± 0,78
		1,2	6,70 ± 0,45	8,73 ± 3,15	6,31 ± 1,13	7,57 ± 1,54	4,13 ± 0,64
		2,4	20,64 ± 1,13	21,69 ± 3,24	35,18 ± 16,38	18,45 ± 3,26	13,04 ± 1,23
		10	54,48 ± 2,10	52,42 ± 0,65	60,08 ± 11,88	51,64 ± 1,70	38,64 ± 3,71
	LA	Testemunha	0,0	3,34 ± 1,87	3,08 ± 0,64	1,75 ± 0,47	1,74 ± 0,57
CaCO ₃		0,6	2,47 ± 0,08	2,30 ± 0,13	2,57 ± 0,20	2,83 ± 0,39	1,81 ± 0,03
		1,2	5,30 ± 1,00	4,35 ± 0,84	4,16 ± 1,02	4,12 ± 0,37	3,29 ± 0,42
		2,4	18,03 ± 4,23	13,01 ± 0,25	12,87 ± 1,58	11,59 ± 1,10	10,21 ± 0,34
		10	61,03 ± 0,60	61,15 ± 1,19	51,16 ± 2,35	53,44 ± 3,23	55,87 ± 2,88
Escória		0,6	2,31 ± 0,36	2,34 ± 0,39	2,17 ± 0,20	2,11 ± 0,30	1,50 ± 0,07
		1,2	3,94 ± 0,62	3,75 ± 0,51	3,21 ± 0,64	3,05 ± 0,48	2,61 ± 0,42
		2,4	10,00 ± 1,13	8,45 ± 0,50	6,30 ± 1,78	6,88 ± 1,63	5,64 ± 1,29
		10	51,84 ± 5,91	53,88 ± 3,06	45,56 ± 4,95	47,29 ± 4,30	39,30 ± 7,06

Quadro 9, Cont.

Solo	Corretivo	Nível	Tempo (dias)				
			77	84	91	98	105
			----- mg L ⁻¹ -----				
LVA	Testemunha	0,0	3,84 ± 1,09	3,37 ± 0,66	5,34 ± 0,70	4,30 ± 1,76	2,89 ± 0,85
	CaCO ₃	0,6	1,49 ± 0,35	2,57 ± 0,19	2,97 ± 0,41	5,70 ± 1,28	6,46 ± 0,81
		1,2	6,12 ± 1,98	6,66 ± 3,57	6,53 ± 1,25	17,73 ± 11,39	8,07 ± 1,15
		2,4	16,58 ± 0,69	16,07 ± 0,85	14,50 ± 1,60	13,00 ± 1,86	15,74 ± 1,19
		10	53,93 ± 3,43	55,61 ± 1,87	52,51 ± 2,43	33,15 ± 0,72	35,47 ± 1,50
	Escória	0,6	1,93 ± 0,26	2,99 ± 0,89	2,15 ± 0,24	2,16 ± 0,36	2,46 ± 0,99
		1,2	4,26 ± 0,57	5,07 ± 1,20	5,59 ± 0,32	16,04 ± 10,72	3,73 ± 0,63
		2,4	12,24 ± 2,95	18,10 ± 1,70	14,28 ± 1,92	15,24 ± 0,91	17,17 ± 0,74
		10	43,09 ± 4,20	47,40 ± 3,58	41,42 ± 2,70	19,96 ± 8,12	35,80 ± 1,01
	LA	Testemunha	0,0	0,64 ± 0,19	0,53 ± 0,07	0,82 ± 0,17	0,62 ± 0,03
CaCO ₃		0,6	1,37 ± 0,11	2,82 ± 0,16	1,90 ± 0,22	1,59 ± 0,22	2,81 ± 0,62
		1,2	2,86 ± 0,27	3,03 ± 0,54	4,16 ± 0,78	9,88 ± 6,84	5,29 ± 0,65
		2,4	8,90 ± 1,59	16,04 ± 1,81	12,73 ± 0,44	10,29 ± 1,59	9,13 ± 0,91
		10	29,77 ± 5,38	53,83 ± 1,93	41,36 ± 5,34	23,43 ± 1,40	24,76 ± 1,19
Escória		0,6	1,10 ± 0,02	1,94 ± 0,26	2,48 ± 0,62	2,42 ± 0,53	3,15 ± 0,95
		1,2	1,44 ± 0,24	3,33 ± 0,39	4,33 ± 0,49	10,33 ± 6,21	4,76 ± 0,83
		2,4	4,65 ± 0,32	11,56 ± 1,94	8,35 ± 0,53	8,32 ± 1,15	6,14 ± 1,23
		10	26,93 ± 5,76	42,98 ± 6,47	36,72 ± 1,92	21,07 ± 1,24	22,04 ± 4,38

Quadro 10 – Teores de Mg determinados por espectrofotometria de emissão por plasma induzido (ICP – OES), em amostras de lixiviados, ao longo de 105 dias de teste de lixiviação com água. Valores médios (três repetições) ± erro padrão da média

Solo	Corretivo	Nível	Tempo (dias)					
			7	14	21	28	35	
			----- mg L ⁻¹ -----					
LVA	Testemunha	0,0	1,20 ± 0,1	0,47 ± 0,1	0,41 ± 0,0	0,44 ± 0,0	0,65 ± 0,2	
	CaCO ₃	0,6	8,26 ± 1,2	3,13 ± 0,1	1,78 ± 0,0	1,49 ± 0,0	1,38 ± 0,1	
		1,2	10,64 ± 0,2	4,95 ± 0,4	3,21 ± 0,2	2,34 ± 0,2	2,49 ± 0,2	
		2,4	21,85 ± 1,6	11,17 ± 0,3	7,06 ± 0,5	4,39 ± 1,4	6,14 ± 0,6	
		10	76,62 ± 7,2	52,43 ± 2,5	35,89 ± 2,5	30,38 ± 3,2	25,44 ± 1,7	
	Escória	0,6	18,45 ± 8,4	5,83 ± 0,7	3,80 ± 0,5	2,69 ± 0,1	2,40 ± 0,2	
		1,2	18,13 ± 0,3	8,45 ± 0,3	5,49 ± 0,1	4,31 ± 0,4	3,07 ± 0,1	
		2,4	32,33 ± 5,4	20,20 ± 3,5	11,83 ± 1,1	10,15 ± 1,3	12,55 ± 1,1	
		10	54,93 ± 1,2	38,44 ± 2,6	37,26 ± 2,9	24,10 ± 2,0	21,83 ± 1,6	
	LA	Testemunha	0,0	1,30 ± 0,2	0,69 ± 0,0	0,68 ± 0,1	0,73 ± 0,3	1,31 ± 0,7
		CaCO ₃	0,6	4,08 ± 0,5	1,45 ± 0,1	1,06 ± 0,1	0,75 ± 0,0	0,65 ± 0,0
			1,2	11,29 ± 1,1	3,35 ± 0,5	2,34 ± 0,5	1,67 ± 0,4	1,39 ± 0,3
2,4			13,14 ± 1,6	6,66 ± 0,9	4,42 ± 0,4	3,49 ± 0,2	3,27 ± 0,1	
10			61,94 ± 1,3	42,51 ± 2,4	27,27 ± 1,3	27,63 ± 1,4	26,61 ± 0,3	
Escória		0,6	4,08 ± 0,4	1,52 ± 0,0	1,06 ± 0,0	0,98 ± 0,0	0,95 ± 0,1	
		1,2	6,03 ± 1,4	3,28 ± 0,6	2,06 ± 0,2	1,89 ± 0,1	1,43 ± 0,3	
		2,4	13,35 ± 0,3	4,83 ± 2,1	3,84 ± 1,7	3,37 ± 1,4	2,87 ± 0,9	
		10	54,15 ± 3,9	40,48 ± 1,2	25,47 ± 0,5	24,55 ± 0,5	25,69 ± 0,5	

Quadro 10, Cont.

Solo	Corretivo	Nível	Tempo (dias)				
			42	49	56	63	70
			----- mg L ⁻¹ -----				
LVA	Testemunha	0,0	1,02 ± 0,4	1,52 ± 0,5	1,81 ± 0,2	1,96 ± 0,1	2,40 ± 0,4
	CaCO ₃	0,6	1,19 ± 0,1	0,94 ± 0,2	0,82 ± 0,1	0,91 ± 0,1	0,92 ± 0,2
		1,2	2,04 ± 0,1	1,76 ± 0,2	1,52 ± 0,0	1,27 ± 0,1	1,16 ± 0,1
		2,4	3,96 ± 0,6	3,65 ± 0,1	3,29 ± 0,0	2,70 ± 0,2	2,56 ± 0,4
		10	24,01 ± 2,3	20,20 ± 2,5	17,43 ± 1,8	16,77 ± 1,0	15,77 ± 1,4
	Escória	0,6	2,04 ± 0,1	1,63 ± 0,1	1,32 ± 0,2	0,94 ± 0,2	0,88 ± 0,2
		1,2	2,44 ± 0,0	2,53 ± 0,4	2,24 ± 0,2	2,28 ± 0,1	1,74 ± 0,2
		2,4	7,50 ± 1,3	8,20 ± 1,1	12,72 ± 7,1	5,78 ± 1,3	4,59 ± 0,6
		10	21,66 ± 1,9	21,69 ± 1,9	14,85 ± 1,3	15,68 ± 1,3	15,85 ± 1,3
	LA	Testemunha	0,0	1,52 ± 0,6	1,66 ± 0,4	0,93 ± 0,3	0,95 ± 0,4
CaCO ₃		0,6	0,57 ± 0,0	0,51 ± 0,0	0,55 ± 0,0	0,63 ± 0,1	0,40 ± 0,0
		1,2	1,19 ± 0,3	0,96 ± 0,2	0,82 ± 0,2	0,86 ± 0,0	0,67 ± 0,1
		2,4	5,17 ± 2,4	2,35 ± 0,1	2,16 ± 0,3	1,98 ± 0,2	1,80 ± 0,1
		10	22,69 ± 0,3	21,14 ± 0,3	18,08 ± 0,5	19,19 ± 1,3	19,34 ± 0,5
Escória		0,6	0,96 ± 0,1	0,95 ± 0,1	0,77 ± 0,0	0,75 ± 0,1	0,55 ± 0,0
		1,2	1,32 ± 0,3	1,27 ± 0,2	1,00 ± 0,2	1,06 ± 0,2	0,86 ± 0,1
		2,4	2,50 ± 0,7	2,42 ± 0,3	2,10 ± 0,4	1,50 ± 0,5	1,25 ± 0,5
		10	16,99 ± 3,1	16,87 ± 3,1	8,40 ± 1,2	19,14 ± 1,3	12,51 ± 2,4

Quadro 10, Cont.

Solo	Corretivo	Nível	Tempo (dias)					
			77	84	91	98	105	
			----- mg L ⁻¹ -----					
LVA	Testemunha	0,0	2,34 ± 0,5	2,04 ± 0,2	2,43 ± 0,2	1,72 ± 0,1	1,60 ± 0,2	
	CaCO ₃	0,6	0,53 ± 0,2	0,77 ± 0,1	0,88 ± 0,1	1,88 ± 0,3	2,12 ± 0,2	
		1,2	1,32 ± 0,2	1,74 ± 0,4	1,57 ± 0,2	1,52 ± 0,2	2,00 ± 0,3	
		2,4	2,67 ± 0,1	2,04 ± 0,1	1,75 ± 0,1	1,84 ± 0,3	2,21 ± 0,2	
		10	16,17 ± 2,0	17,69 ± 0,9	13,81 ± 1,6	10,93 ± 0,9	10,92 ± 0,5	
	Escória	0,6	1,13 ± 0,2	1,43 ± 0,4	0,94 ± 0,1	1,13 ± 0,2	1,29 ± 0,5	
		1,2	1,86 ± 0,2	1,79 ± 0,4	1,81 ± 0,1	1,98 ± 0,2	1,57 ± 0,3	
		2,4	4,38 ± 1,2	5,19 ± 0,8	3,42 ± 0,6	4,52 ± 0,1	4,85 ± 0,4	
		10	16,95 ± 2,5	16,14 ± 1,8	8,84 ± 1,0	8,44 ± 1,0	9,09 ± 0,9	
	LA	Testemunha	0,0	0,39 ± 0,2	0,19 ± 0,0	0,21 ± 0,0	0,32 ± 0,0	0,21 ± 0,2
		CaCO ₃	0,6	0,31 ± 0,1	0,48 ± 0,0	0,29 ± 0,0	0,33 ± 0,0	0,65 ± 0,2
			1,2	0,66 ± 0,1	0,53 ± 0,2	0,81 ± 0,3	0,61 ± 0,1	1,25 ± 0,2
2,4			1,62 ± 0,3	2,15 ± 0,3	1,51 ± 0,1	1,52 ± 0,2	1,48 ± 0,2	
10			13,69 ± 1,4	16,99 ± 1,4	12,94 ± 0,8	9,10 ± 1,3	9,61 ± 0,6	
Escória		0,6	0,41 ± 0,0	0,57 ± 0,1	0,77 ± 0,3	0,87 ± 0,2	1,19 ± 0,4	
		1,2	0,51 ± 0,1	0,93 ± 0,2	1,14 ± 0,2	1,26 ± 0,3	1,63 ± 0,3	
		2,4	1,09 ± 0,4	1,59 ± 1,0	1,20 ± 0,6	1,23 ± 0,6	1,29 ± 0,6	
		10	9,30 ± 2,1	12,60 ± 3,0	12,65 ± 2,7	9,90 ± 1,3	10,10 ± 1,1	

Tratando-se agora dos teores acumulados de Ca, constataram-se diferenças significativas entre os solos, corretivos e níveis. No entanto, quando se comparou corretivo dentro de cada solo não houve diferença significativa, indicando que a diferença nos teores acumulados de Ca em cada solo, deve ser atribuída à diferença entre os solos e não aos corretivos (Quadro 11). Tal fato fundamenta-se no que diz Bolton (1977), citado por ANJOS & ROWELL (1983), que cita como um dos principais fatores que contribuem para a perda de Ca e Mg o tipo de solo em estudo. Em relação ao magnésio, foi observado comportamento estatisticamente idêntico entre o carbonato e a escória, no que tange a sua mobilidade no solo.

Quadro 11 – Análise de variância para Ca e Mg nos lixiviados, coletados no decorrer de 105 dias de ensaio de lixiviação com água

F.V.	G.L	Q.M.	
		Ca	Mg
Solo	1	162.733,20**	13.531,34**
Corretivo	1	50.755,88**	5,34 ^{n.s}
Nível	4	1.611.643,00**	221.885,70**
Corretivo d/ solo	1	321,56 ^{n.s}	1.767,67*
Nível d/ solo	4	27.715,61**	1.262,61**
Nível d/ corretivo	4	22.293,86**	3.099,65**
Resíduo	36	1.122,76	251,46
C.V. (%)		10,32	14,49

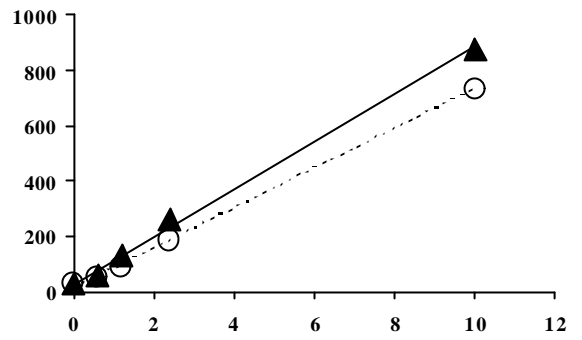
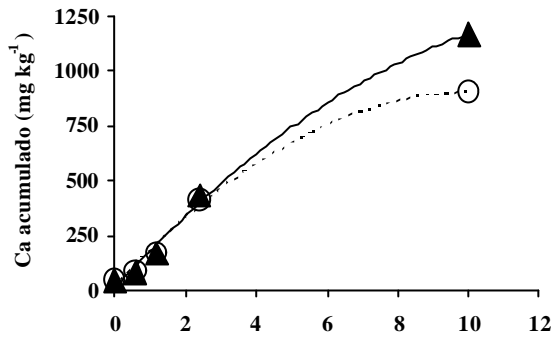
**,* Coeficientes significativos, a 1 e 5% de probabilidade, respectivamente, pelo teste F.

^{n.s.} Coeficientes não-significativos.

Ao se efetuar a análise de regressão com os teores acumulados de Ca e Mg mobilizados dos solos, em função dos níveis dos corretivos, observou-se que todos apresentaram possibilidade de ajuste matemático estatisticamente significativo, tendo os resultados, de uma maneira geral, mais bem ajustados aos modelos quadrático e raiz quadrada (Figura 3). Com exceção do Ca, no LA, que mostrou comportamento linear em função dos níveis de corretivo aplicados, os modelos aproximativos para expressar a mobilização acumulada de Ca e Mg no decorrer do tempo, indicam tendência na redução do processo de mobilização. No LA, a textura mais grosseira e, conseqüentemente, a menor capacidade de retenção de íons justifica o efeito linear observado para os teores acumulados de Ca, em função dos níveis dos corretivos aplicados.

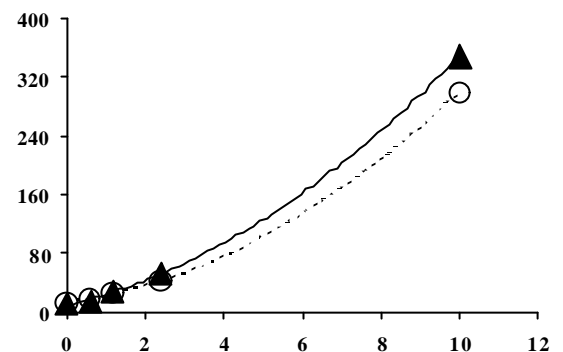
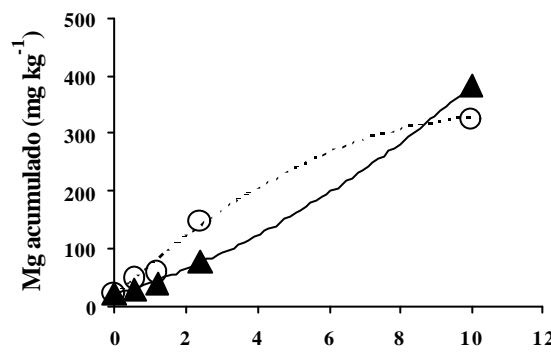
Latossolo Vermelho-Amarelo (Viana-ES)

Latossolo Amarelo (Nova Almeida ES)



$\hat{Y} = 4,549 + 179,305^{**}X - 6,256^{**}X^2 \quad R^2 = 0,9942^{**}$
 $\hat{Y} = 16,435 + 15,807^{**}X - 6,924^{**}X^2 \quad R^2 = 0,9950^{**}$

$\hat{Y} = 26,9225 + 85,7383^{**}X \quad R^2 = 0,9975^{**}$
 $\hat{Y} = 11,7121 + 72,2420^{**}X \quad R^2 = 0,9988^{**}$

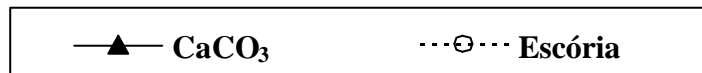


Nível de corretivo

Nível corretivo

$\hat{Y} = 23,503 + 48,02^{**}X - 37,851^{**}\sqrt{X} \quad R^2 = 0,9997^{**}$
 $\hat{Y} = 12,961 + 58,050^{**}X - 2,673^{**}X^2 \quad R^2 = 0,9907^{**}$

$\hat{Y} = 8,968 + 12,787^{**}X + 2,119^{**}X^2 \quad R^2 = 0,9996^{**}$
 $\hat{Y} = 15,061 + 40,278^{**}X - 38,005^{**}\sqrt{X} \quad R^2 = 0,9977^{**}$



** e * Coeficientes significativos, a 1 e 5 % de probabilidade, respectivamente, pelo teste F.

Figura 3 – Modelo aproximativo para expressar a mobilização do Ca e Mg acumulados ao longo de 105 dias de ensaio de lixiviação com água, em função dos níveis de corretivo aplicadas no solo.

Verificou-se, também, que os teores mobilizados de cálcio e magnésio, no nível 10 NC, nos tratamentos que receberam carbonato foram superiores aos que receberam escória. A menor mobilização destes elementos está associada com o maior efeito residual da escória, por ter reação mais lenta, com mecanismos de solubilidade controlado pelo pH e pelo teor de cálcio na solução do solo (FORTES, 1993; PRADO & FERNANDES, 2000).

3.4. Lixiviação ácida

Constatou-se que, depois de transcorridos 119 dias de ensaio de mobilização de metais houve, com exceção para nível 10 NC, a redução dos valores de pH de ambos os solos (Quadro 12), em virtude da utilização da solução de ácido acético $0,001 \text{ mol L}^{-1}$ ($\text{pH} \cong 4,0$). No entanto, com exceção ao tratamento-testemunha, os valores se mantiveram superiores 5,5, considerado crítico em relação à disponibilidade de metais em solos. Dessa forma, semelhante ao ensaio anterior, não foram detectadas as presenças de Cr ($<0,001 \text{ mg kg}^{-1}$) e Ni ($<0,003 \text{ mg kg}^{-1}$) nos lixiviados e os níveis observados de Zn, Cu, Fe e Mn foram muito baixos (Quadros 13, 14, 15 e 16). Em todos os casos avaliados, as concentrações destes metais, nos lixiviados, estiveram muito abaixo do estabelecido pela legislação brasileira para águas classe 3 (CONAMA, 1986).

A mobilização de Zn, Cu e Mn foi observada até o 35º dia após o início do ensaio, não sendo detectada a partir de então. Por outro lado, a mobilização do Fe foi verificada até o final do período, mas conforme já citado, em níveis muito inferiores aos estabelecidos pela legislação. A presença destes elementos, mesmo em pequenas quantidades, pode estar associada a diversos fatores: a) com a redução do pH, pode ter ocorrido a solubilização de compostos menos estáveis no solo (óxidos mal cristalizados), liberando os metais retidos por co-precipitação; b) mobilização dos elementos devido à formação de sais com o acetato; c) o excesso de umidade após a aplicação da solução, poderia ter propiciado condições ideais para redução do Fe (III) e Mn (IV) a Fe (II) e Mn (II), formas mais móveis no solo; e d) mobilização de metais associados a ácidos orgânicos (Cu e Zn).

Com relação à mobilidade de Cu em colunas de solo tratados com bio sólido, BERTONCINI & MATTIAZZO (1999) verificaram que a passagem de água deionizada provocou o arraste de Cu e carbono orgânico do solo e associou este fato à formação de complexos orgânicos solúveis de Cu. AMARAL SOBRINHO (1993), avaliou, mediante a extração seqüencial, as diferentes associações geoquímicas dos metais nos solos e observou a presença de Cu, Zn, Mn na fração mais solúvel do solo após extração com NaOAc (pH 5,0).

Embora tenha sido verificada, de forma geral, a redução nos valores de pH dos solos, o mesmo comportamento não foi observado para os valores de pH dos efluentes coletados a cada lixiviação (Figura 4). Verificou-se que os valores de pH dos efluentes

Quadro 12 – Valores de pH dos solos, antes e depois da etapa de lixiviação com solução de ácido acético $0,001 \text{ mol L}^{-1}$, utilizados no experimento de disponibilidade e mobilidade de metais. Valores médios (três repetições) \pm erro padrão da média

Solo	Corretivo	Nível	pH	
			Antes	Depois
LVA	Testemunha	0,0	5,34 \pm 0,57	4,93 \pm 0,03
		0,6	7,01 \pm 0,08	5,72 \pm 0,09
	CaCO ₃	1,2	7,52 \pm 0,39	6,46 \pm 0,03
		2,4	7,85 \pm 0,08	7,68 \pm 0,02
		10	8,26 \pm 0,01	8,43 \pm 0,03
		Escória	0,6	6,80 \pm 0,18
	1,2		7,11 \pm 0,15	6,60 \pm 0,03
	2,4		7,91 \pm 0,08	7,71 \pm 0,04
	10		8,41 \pm 0,07	8,54 \pm 0,01
	LA	Testemunha	0,0	6,28 \pm 0,26
0,6			6,74 \pm 0,05	5,68 \pm 0,07
CaCO ₃		1,2	7,04 \pm 0,03	6,32 \pm 0,02
		2,4	7,89 \pm 0,11	7,34 \pm 0,05
		10	8,14 \pm 0,08	8,52 \pm 0,02
		Escória	0,6	6,78 \pm 0,14
1,2			7,32 \pm 0,13	6,46 \pm 0,07
2,4			6,94 \pm 0,63	6,84 \pm 0,65
10			8,36 \pm 0,03	8,56 \pm 0,04

de ambos os solos avaliados, de maneira geral, aumentaram em relação ao valor medido na primeira lixiviação, sendo este comportamento mais acentuado à medida que foram aumentados os níveis de corretivos. Este comportamento não era esperado, uma vez que ao passar pelas colunas de lixiviação uma solução ácida ($\text{pH} \cong 4$) era de se esperar, ao longo do tempo, diminuição progressiva nos valores de pH. Não obstante, o íon acetato (OAc^-), na solução lixiviada, tende a combinar-se com o íon H^+ , produto da hidrólise das moléculas de água, regenerando o ácido acético. O Ca e o Mg, presentes em maiores quantidades na solução (Quadros 17 e 18), por serem cátions de caráter básico, reagem com a hidroxila para formar Ca(OH)_2 ou Mg(OH)_2 (bases forte) que se dissociam facilmente, nesse caso, a hidroxila livre promove o aumento nos valores de pH dos lixiviados.

Quadro 13 – Teores de Zn determinados por espectrofotometria de emissão por plasma induzido (ICP-OES), em amostras de lixiviados, ao longo de 35 dias de teste de lixiviação, com solução de ácido acético 0,001 mol L⁻¹. Valores médios (três repetições) ± erro padrão da média

Solo	Corretivo	Nível	Tempo (dias)					
			7	14	21	28	35	
			----- mg L ⁻¹ -----					
LVA	Testemunha	0,0	0,08 ± 0,04	0,05 ± 0,02	0,01 ± 0,01	<0,001 ± 0,00	0,01 ± 0,01	
	CaCO ₃	0,6	0,03 ± 0,03	0,03 ± 0,02	0,02 ± 0,01	0,01 ± 0,00	<0,001	
		1,2	0,04 ± 0,02	0,03 ± 0,02	0,01 ± 0,01	<0,001	<0,001	
		2,4	0,03 ± 0,03	0,02 ± 0,01	0,01 ± 0,01	0,01 ± 0,01	0,01 ± 0,00	
		10	0,00 ± 0,00	0,01 ± 0,01	0,01 ± 0,01	0,01 ± 0,01	0,01 ± 0,01	
	Escória	0,6	0,03 ± 0,02	<0,001	0,01 ± 0,01	<0,001	0,01 ± 0,00	
		1,2	0,06 ± 0,03	0,01 ± 0,00	<0,001	<0,001	0,01 ± 0,01	
		2,4	0,01 ± 0,01	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	
		10	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	
	LA	Testemunha	0,0	0,01 ± 0,01	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
		CaCO ₃	0,6	0,02 ± 0,02	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
			1,2	0,02 ± 0,02	0,01 ± 0,00	<0,001	<0,001	<0,001
			2,4	0,01 ± 0,01	0,01 ± 0,00	<0,001	<0,001	<0,001
			10	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
Escória		0,6	<0,001	0,01 ± 0,01	<0,001	<0,001	0,01 ± 0,00	
		1,2	0,01 ± 0,01	0,01 ± 0,01	<0,001	<0,001	<0,001	
		2,4	0,01 ± 0,01	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	
		10	<0,001	0,01 ± 0,00	0,01 ± 0,00	<0,001	<0,001	

O número seguido do sinal < indica o limite de determinação do método analítico utilizado.

Quadro 14 – Teores de Cu determinados por espectrofotometria de emissão por plasma induzido (ICP-OES), em amostras de lixiviados, ao longo de 35 dias de teste de lixiviação. Valores médios (três repetições) ± erro padrão da média

Solo	Corretivo	Nível	Tempo (dias)					
			7	14	21	28	35	
			----- mg L ⁻¹ -----					
LVA	Testemunha	0,0	0,06 ± 0,03	0,01 ± 0,00	0,01 ± 0,01	<0,0003	0,01 ± 0,01	
	CaCO ₃	0,6	0,08 ± 0,02	0,01 ± 0,01	<0,0003	<0,0003	<0,0003	
		1,2	0,10 ± 0,02	0,04 ± 0,04	<0,0003	<0,0003	<0,0003	
		2,4	0,22 ± 0,04	0,03 ± 0,01	<0,0003	<0,0003	<0,0003	
		10	0,19 ± 0,10	0,06 ± 0,02	0,02 ± 0,01	<0,0003	0,01 ± 0,01	
	Escória	0,6	0,09 ± 0,06	0,02 ± 0,01	0,02 ± 0,01	<0,0003	<0,0003	
		1,2	0,12 ± 0,08	0,01 ± 0,01	<0,0003	0,01 ± 0,01	<0,0003	
		2,4	0,08 ± 0,04	0,01 ± 0,01	<0,0003	<0,0003	<0,0003	
		10	0,12 ± 0,04	0,01 ± 0,01	<0,0003	<0,0003	<0,0003	
	LA	Testemunha	0,0	0,09 ± 0,02	0,02 ± 0,01	0,01 ± 0,01	<0,0003	0,01 ± 0,00
		CaCO ₃	0,6	0,05 ± 0,01	<0,0003	<0,0003	<0,0003	<0,0003
			1,2	0,07 ± 0,01	<0,0003	<0,0003	<0,0003	<0,0003
			2,4	0,07 ± 0,04	0,01 ± 0,01	<0,0003	<0,0003	<0,0003
			10	0,03 ± 0,02	0,01 ± 0,01	<0,0003	<0,0003	<0,0003
Escória		0,6	0,08 ± 0,05	<0,0003	<0,0003	<0,0003	<0,0003	
		1,2	0,09 ± 0,03	0,02 ± 0,02	<0,0003	<0,0003	<0,0003	
		2,4	0,05 ± 0,02	0,01 ± 0,01	0,01 ± 0,01	<0,0003	<0,0003	
		10	0,09 ± 0,03	0,01 ± 0,01	<0,0003	<0,0003	<0,0003	

O número seguido do sinal < indica o limite de determinação do método analítico utilizado.

Quadro 15 – Teores de Fe determinados por espectrofotometria de emissão por plasma induzido (ICP-OES), em amostras de lixiviados, ao longo de 119 dias de teste de lixiviação. Valores médios (três repetições) ± erro padrão da média

Solo	Corretivo	Nível	Tempo (dias)						
			7	14	21	28	35	42	
			----- mg L ⁻¹ -----						
LVA	Testemunha	0,0	0,010 ± 0,01	0,003 ± 0,00	0,012 ± 0,00	0,022 ± 0,01	0,025 ± 0,01	0,059 ± 0,01	
	CaCO ₃	0,6	0,015 ± 0,01	0,007 ± 0,00	0,042 ± 0,02	0,006 ± 0,00	0,013 ± 0,01	0,011 ± 0,00	
		1,2	0,016 ± 0,01	0,005 ± 0,00	0,004 ± 0,00	0,007 ± 0,00	0,006 ± 0,00	0,003 ± 0,00	
		2,4	0,006 ± 0,00	0,005 ± 0,00	0,008 ± 0,00	0,029 ± 0,02	0,114 ± 0,09	0,307 ± 0,14	
		10	0,009 ± 0,00	0,004 ± 0,00	0,010 ± 0,00	0,028 ± 0,02	0,033 ± 0,01	0,187 ± 0,11	
	Escória	0,6	0,011 ± 0,00	0,006 ± 0,00	0,028 ± 0,02	0,004 ± 0,00	0,015 ± 0,01	0,020 ± 0,01	
		1,2	0,007 ± 0,00	0,023 ± 0,02	0,016 ± 0,01	0,004 ± 0,00	0,002 ± 0,00	0,001 ± 0,00	
		2,4	0,004 ± 0,00	0,001 ± 0,00	0,005 ± 0,00	0,007 ± 0,00	0,016 ± 0,01	0,013 ± 0,00	
		10	0,005 ± 0,00	0,003 ± 0,00	0,022 ± 0,01	0,107 ± 0,06	0,060 ± 0,05	0,055 ± 0,04	
	LA	Testemunha	0,0	0,011 ± 0,00	0,007 ± 0,00	0,123 ± 0,10	0,055 ± 0,04	0,024 ± 0,01	0,073 ± 0,03
		CaCO ₃	0,6	0,031 ± 0,01	0,083 ± 0,06	0,060 ± 0,02	0,008 ± 0,00	0,009 ± 0,00	0,002 ± 0,00
			1,2	0,007 ± 0,00	0,025 ± 0,01	0,009 ± 0,01	0,006 ± 0,00	0,005 ± 0,00	0,001 ± 0,00
			2,4	0,008 ± 0,00	0,005 ± 0,00	0,007 ± 0,00	0,027 ± 0,01	0,010 ± 0,00	0,024 ± 0,01
10			0,005 ± 0,00	0,006 ± 0,00	0,064 ± 0,04	0,005 ± 0,00	0,007 ± 0,00	0,006 ± 0,00	
Escória		0,6	0,017 ± 0,00	0,022 ± 0,01	0,008 ± 0,00	0,007 ± 0,00	0,004 ± 0,00	0,008 ± 0,00	
		1,2	0,008 ± 0,00	0,004 ± 0,00	0,009 ± 0,01	0,004 ± 0,00	0,004 ± 0,00	0,005 ± 0,00	
		2,4	0,007 ± 0,00	0,008 ± 0,00	0,029 ± 0,01	0,077 ± 0,07	0,110 ± 0,11	0,283 ± 0,15	
		10	0,005 ± 0,00	0,010 ± 0,01	0,020 ± 0,02	0,022 ± 0,01	0,211 ± 0,11	0,055 ± 0,04	

Quadro 15, Cont.

Solo	Corretivo	Nível	Tempo (dias)					
			49	56	63	70	77	84
			----- mg L ⁻¹ -----					
LVA	Testemunha	0,0	0,168 ± 0,14	0,006 ± 0,01	0,008 ± 0,00	0,002 ± 0,002	<0,001 ± 0,01	0,020 ± 0,01
	CaCO ₃	0,6	0,026 ± 0,02	0,097 ± 0,05	0,257 ± 0,24	0,145 ± 0,145	0,11 ± 0,03	0,038 ± 0,03
		1,2	0,001 ± 0,00	0,038 ± 0,03	0,006 ± 0,00	0,008 ± 0,008	<0,001 ± 0,14	0,202 ± 0,14
		2,4	0,182 ± 0,13	0,007 ± 0,00	0,007 ± 0,00	0,018 ± 0,018	0,01 ± 0,00	0,006 ± 0,00
		10	0,025 ± 0,01	0,003 ± 0,00	0,007 ± 0,00	0,002 ± 0,002	<0,001 ± 0,01	0,018 ± 0,01
	Escória	0,6	0,016 ± 0,01	0,125 ± 0,11	0,033 ± 0,02	0,006 ± 0,006	<0,001 ± 0,00	0,002 ± 0,00
		1,2	0,010 ± 0,01	0,053 ± 0,05	0,066 ± 0,06	0,005 ± 0,005	<0,001 ± 0,00	0,014 ± 0,00
		2,4	0,077 ± 0,07	0,046 ± 0,02	0,041 ± 0,03	0,073 ± 0,073	0,04 ± 0,05	0,059 ± 0,05
		10	0,058 ± 0,03	0,004 ± 0,00	0,004 ± 0,00	0,008 ± 0,008	<0,001 ± 0,02	0,045 ± 0,02
	LA	Testemunha	0,0	0,002 ± 0,00	0,002 ± 0,00	0,001 ± 0,00	0,001 ± 0,001	<0,001 ± 0,00
CaCO ₃		0,6	0,032 ± 0,02	0,019 ± 0,01	0,039 ± 0,02	0,028 ± 0,028	0,01 ± 0,00	0,002 ± 0,00
		1,2	0,011 ± 0,01	0,014 ± 0,01	0,017 ± 0,01	0,017 ± 0,017	0,01 ± 0,01	0,027 ± 0,01
		2,4	0,009 ± 0,00	0,044 ± 0,02	0,009 ± 0,01	0,009 ± 0,009	<0,001 ± 0,00	0,010 ± 0,00
		10	0,001 ± 0,00	0,005 ± 0,00	0,002 ± 0,00	0,003 ± 0,003	<0,001 ± 0,01	0,012 ± 0,01
Escória		0,6	0,220 ± 0,09	0,094 ± 0,04	0,023 ± 0,01	0,005 ± 0,005	<0,001 ± 0,00	0,004 ± 0,00
		1,2	0,074 ± 0,06	0,461 ± 0,44	0,034 ± 0,02	0,009 ± 0,009	<0,001 ± 0,00	0,001 ± 0,00
		2,4	0,029 ± 0,02	0,439 ± 0,39	0,069 ± 0,04	0,223 ± 0,223	0,10 ± 0,16	0,180 ± 0,16
		10	0,010 ± 0,00	0,117 ± 0,07	0,038 ± 0,02	0,134 ± 0,134	0,07 ± 0,15	0,158 ± 0,15

O número seguido do sinal < indica o limite de determinação do método analítico utilizado

Quadro 15, Cont.

Solo	Corretivo	Nível	Tempo (dias)				
			91	98	105	112	119
----- mg L ⁻¹ -----							
LVA	Testemunha	0,0	0,060 ± 0,03	0,017 ± 0,01	0,052 ± 0,04	0,025 ± 0,01	0,011 ± 0,00
	CaCO ₃	0,6	0,063 ± 0,06	0,045 ± 0,03	0,123 ± 0,07	0,108 ± 0,04	0,168 ± 0,13
		1,2	0,002 ± 0,00	0,002 ± 0,00	0,006 ± 0,00	0,014 ± 0,01	0,008 ± 0,00
		2,4	0,128 ± 0,13	0,077 ± 0,07	0,024 ± 0,02	0,016 ± 0,01	0,008 ± 0,01
		10	0,006 ± 0,00	0,016 ± 0,01	0,048 ± 0,02	0,050 ± 0,02	0,067 ± 0,05
		Escória	0,6	<0,001	0,016 ± 0,02	0,018 ± 0,01	0,027 ± 0,01
	1,2		0,003 ± 0,00	0,001 ± 0,00	0,003 ± 0,00	0,003 ± 0,00	0,003 ± 0,00
	2,4		0,025 ± 0,01	0,008 ± 0,00	0,045 ± 0,03	0,027 ± 0,01	0,019 ± 0,00
	10		0,051 ± 0,05	0,038 ± 0,02	0,022 ± 0,01	0,034 ± 0,03	0,020 ± 0,01
	LA	Testemunha	0,0	0,055 ± 0,02	0,031 ± 0,02	0,028 ± 0,00	0,040 ± 0,01
CaCO ₃		0,6	0,001 ± 0,00	0,001 ± 0,00	0,007 ± 0,00	0,003 ± 0,00	0,029 ± 0,03
		1,2	<0,001	0,001 ± 0,00	0,001 ± 0,00	0,001 ± 0,00	0,001 ± 0,00
		2,4	0,025 ± 0,01	0,013 ± 0,01	0,035 ± 0,03	0,116 ± 0,08	0,028 ± 0,01
		10	0,004 ± 0,00	0,013 ± 0,01	0,016 ± 0,01	0,015 ± 0,01	0,034 ± 0,03
		Escória	0,6	0,015 ± 0,01	0,015 ± 0,01	0,116 ± 0,05	0,018 ± 0,01
1,2			0,005 ± 0,00	0,002 ± 0,00	0,004 ± 0,00	0,002 ± 0,00	0,004 ± 0,00
2,4			0,353 ± 0,21	0,189 ± 0,17	0,066 ± 0,05	0,113 ± 0,10	0,053 ± 0,03
10			0,317 ± 0,26	0,328 ± 0,32	0,050 ± 0,05	0,067 ± 0,06	0,083 ± 0,07

O número seguido do sinal < indica o limite de determinação do método analítico utilizado.

Quadro 16 – Teores de Cu determinados por espectrofotometria de emissão por plasma induzido (ICP-OES), em amostras de lixiviados, ao longo de 105 dias de teste de lixiviação. Valores médios (três repetições) ± erro padrão da média

Solo	Corretivo	Nível	Tempo (dias)					
			7	14	21	28	35	
			----- mg L ⁻¹ -----					
LVA	Testemunha	0,0	0,233 ± 0,06	0,155 ± 0,04	0,034 ± 0,02	0,011 ± 0,00	0,007 ± 0,00	
	CaCO ₃	0,6	0,023 ± 0,01	0,036 ± 0,00	0,011 ± 0,01	<0,0003	0,006 ± 0,00	
		1,2	0,001 ± 0,00	0,002 ± 0,00	<0,0003	<0,0003	0,001 ± 0,00	
		2,4	<0,0003	<0,0003	<0,0003	<0,0003	<0,0003	
		10	<0,0003	<0,0003	<0,0003	<0,0003	<0,0003	
	Escória	0,6	0,013 ± 0,01	0,002 ± 0,00	0,002 ± 0,00	<0,0003	0,003 ± 0,00	
		1,2	0,005 ± 0,01	<0,0003	<0,0003	<0,0003	<0,0003	
		2,4	<0,0003	<0,0003	<0,0003	<0,0003	<0,0003	
		10	<0,0003	<0,0003	<0,0003	<0,0003	<0,0003	
	LA	Testemunha	0,0	0,029 ± 0,01	0,005 ± 0,01	0,005 ± 0,00	0,005 ± 0,00	0,004 ± 0,00
		CaCO ₃	0,6	0,025 ± 0,00	0,010 ± 0,01	0,008 ± 0,01	0,005 ± 0,00	0,009 ± 0,01
			1,2	<0,0003	0,001 ± 0,00	<0,0003	<0,0003	0,005 ± 0,00
			2,4	<0,0003	<0,0003	<0,0003	<0,0003	<0,0003
			10	<0,0003	<0,0003	<0,0003	<0,0003	<0,0003
Escória		0,6	0,027 ± 0,01	0,005 ± 0,00	0,015 ± 0,01	0,014 ± 0,01	0,012 ± 0,01	
		1,2	<0,0003	<0,0003	0,005 ± 0,00	0,007 ± 0,01	0,011 ± 0,01	
		2,4	0,024 ± 0,02	0,011 ± 0,01	0,011 ± 0,01	0,006 ± 0,01	0,005 ± 0,01	
		10	<0,0003	<0,0003	0,002 ± 0,00	<0,0003	0,001 ± 0,00	

O número seguido do sinal < indica o limite de determinação do método analítico utilizado.

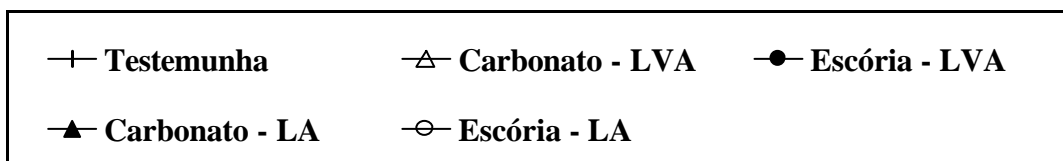
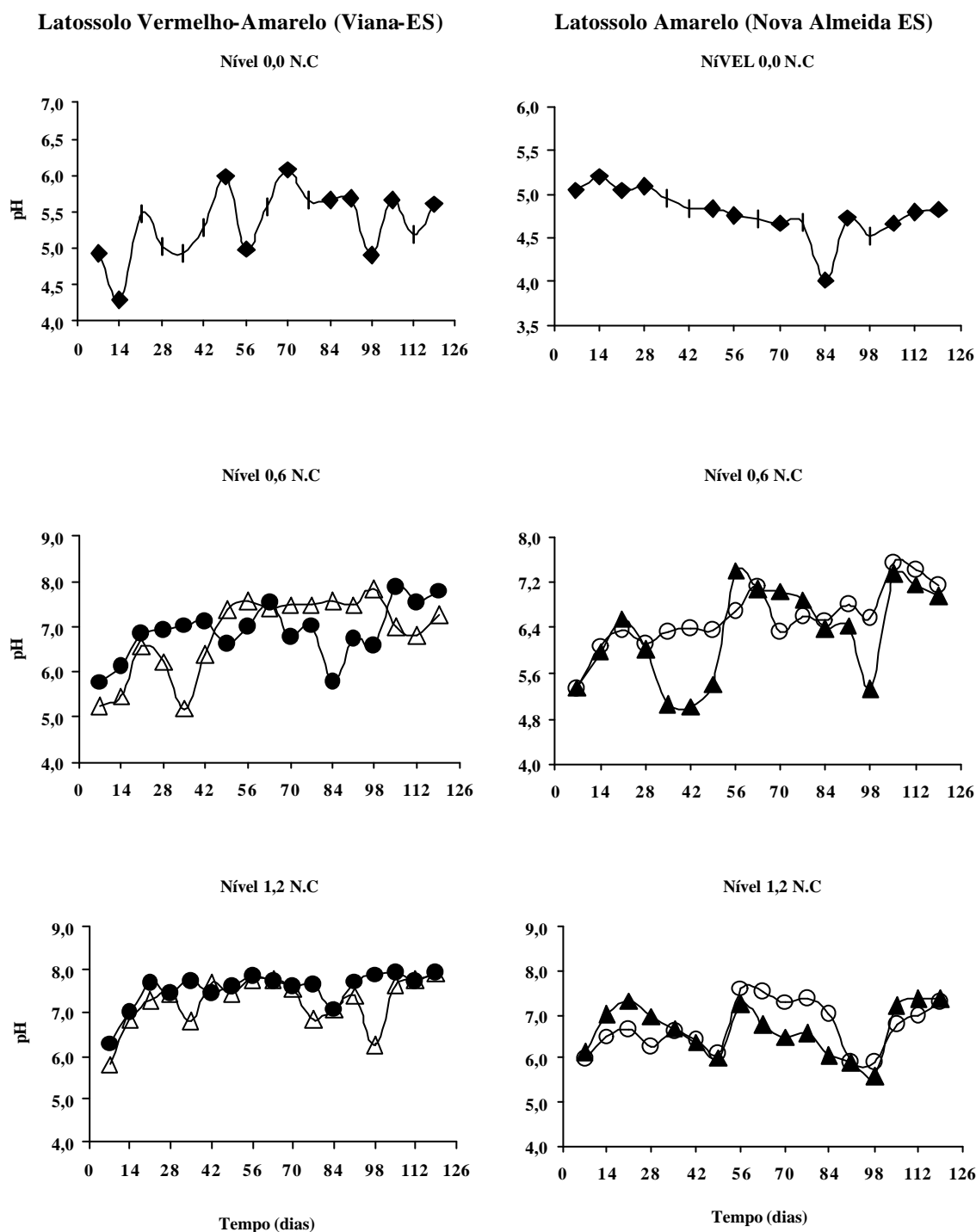


Figura 4 – Variação média de pH dos lixiviados, em ambos os solos tratados com níveis crescentes de CaCO_3 e escória, coletados no decorrer dos 119 dias de ensaio de mobilização de metais.

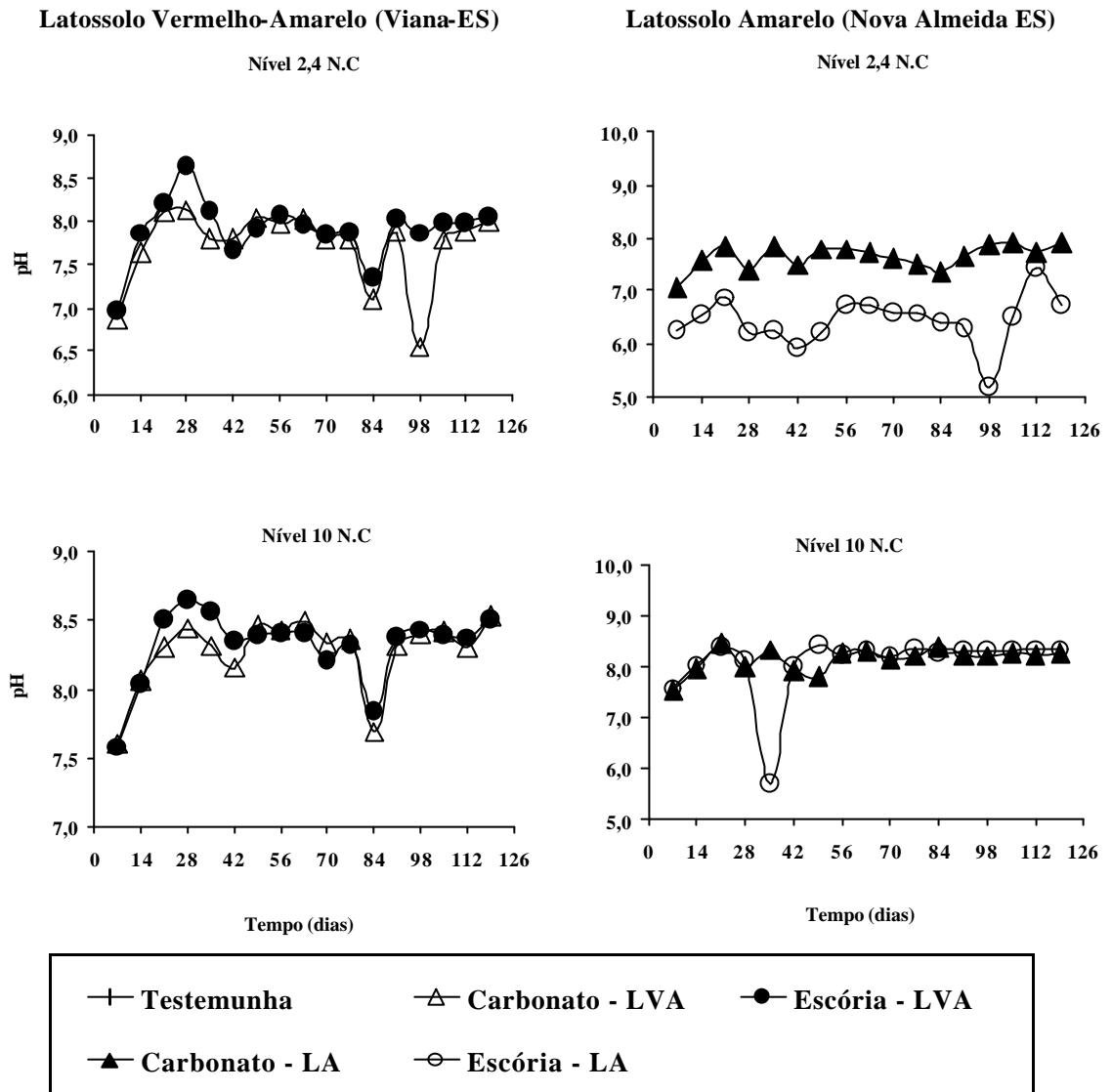


Figura 4, Cont.

Nos Quadros 17 e 18 encontram-se os teores de Ca e Mg, mobilizados ao longo dos 119 dias de ensaio. Foram constatadas, tanto para Ca quanto para Mg, diferenças significativas entre os solos e os corretivos. Entretanto, a interação entre os fatores corretivos e solos, indicou comportamento estatisticamente idêntico entre o carbonato e a escória, evidenciando que a diferença nos teores observados para Ca e Mg se deve à diferença entre os solos. Ainda com relação ao magnésio, não se constatou diferença significativa para a interação entre os fatores níveis e solos (Quadro 19).

Quadro 17 – Teores de Ca determinados por espectrofotometria de emissão por plasma induzido (ICP – OES), em amostras de lixiviados, ao longo de 119 dias de teste de lixiviação com solução de ácido acético 0,001 mol L⁻¹. Valores médios (três repetições) ± erro padrão da média

Solo	Corretivo	Níveis	Tempo (dias)						
			7	14	21	28	35	42	
			----- mg L ⁻¹ -----						
LVA	Testemunha	0,0	3,53 ± 0,24	2,52 ± 0,46	0,97 ± 0,47	1,06 ± 0,32	1,29 ± 0,07	0,89 ± 0,25	
	CaCO ₃	0,6	7,84 ± 0,33	5,69 ± 0,78	4,58 ± 0,90	4,42 ± 0,45	4,23 ± 0,41	3,49 ± 0,25	
		1,2	14,00 ± 1,31	10,14 ± 1,82	8,69 ± 1,73	7,82 ± 0,74	6,62 ± 0,39	5,69 ± 0,51	
		2,4	24,63 ± 1,45	25,52 ± 2,92	19,89 ± 2,08	16,45 ± 1,58	11,88 ± 1,30	10,09 ± 1,35	
		10	19,05 ± 0,61	16,25 ± 1,08	12,90 ± 0,87	12,12 ± 0,65	13,34 ± 0,96	12,23 ± 0,24	
	Escória	0,6	7,11 ± 1,03	4,90 ± 1,22	4,15 ± 1,31	3,99 ± 0,81	3,08 ± 0,12	2,44 ± 0,38	
		1,2	8,81 ± 0,72	8,64 ± 1,05	8,26 ± 1,25	6,40 ± 0,65	6,14 ± 0,40	4,88 ± 0,17	
		2,4	19,66 ± 2,09	21,19 ± 1,49	15,33 ± 1,56	12,49 ± 2,54	11,52 ± 2,76	9,22 ± 1,61	
		10	36,37 ± 2,78	41,33 ± 2,37	35,65 ± 4,53	29,20 ± 2,25	29,44 ± 0,86	21,33 ± 1,20	
	LA	Testemunha	0,0	4,41 ± 0,20	2,27 ± 0,44	1,85 ± 0,31	2,26 ± 0,63	1,83 ± 0,46	1,71 ± 0,41
		CaCO ₃	0,6	6,95 ± 0,59	4,77 ± 0,74	4,23 ± 0,65	3,43 ± 0,85	2,32 ± 0,40	2,08 ± 0,22
			1,2	8,97 ± 0,49	7,67 ± 0,64	6,57 ± 0,49	5,62 ± 0,52	4,06 ± 0,84	2,98 ± 0,45
2,4			15,34 ± 1,36	15,19 ± 1,42	13,74 ± 2,47	10,78 ± 2,12	9,94 ± 1,70	7,46 ± 1,14	
10			14,02 ± 0,74	13,84 ± 0,53	14,62 ± 0,70	11,86 ± 0,80	12,22 ± 0,94	10,75 ± 1,07	
Escória		0,6	6,43 ± 0,60	3,72 ± 0,92	3,29 ± 1,12	3,05 ± 1,05	2,74 ± 0,52	2,08 ± 0,60	
		1,2	7,93 ± 0,21	5,47 ± 0,25	4,61 ± 0,17	4,36 ± 0,58	3,76 ± 0,91	3,02 ± 0,39	
		2,4	10,81 ± 0,98	11,94 ± 2,45	10,35 ± 3,21	8,19 ± 1,79	5,80 ± 1,52	5,73 ± 1,00	
		10	28,93 ± 4,56	23,30 ± 7,49	29,42 ± 6,56	22,95 ± 3,66	21,10 ± 5,00	15,10 ± 2,61	

Quadro 17, Cont.

Solo	Corretivo	Nível	Tempo (dias)					
			49	56	63	70	77	84
			----- mg L ⁻¹ -----					
LVA	Testemunha	0,0	0,71 ± 0,18	1,26 ± 0,08	0,92 ± 0,30	0,93 ± 0,30	0,86 ± 0,31	0,72 ± 0,20
	CaCO ₃	0,6	3,04 ± 0,16	5,22 ± 0,77	4,59 ± 0,30	3,76 ± 0,71	3,16 ± 0,38	2,82 ± 0,61
		1,2	4,34 ± 0,27	6,15 ± 0,57	5,77 ± 0,46	5,60 ± 0,38	5,07 ± 0,61	4,30 ± 0,61
		2,4	7,49 ± 0,52	10,62 ± 1,24	11,08 ± 1,54	10,87 ± 1,09	7,46 ± 1,68	9,37 ± 0,75
		10	10,40 ± 1,57	13,96 ± 1,04	14,67 ± 0,84	14,67 ± 0,98	12,42 ± 1,03	15,27 ± 0,06
	Escória	0,6	2,15 ± 0,28	3,68 ± 0,92	3,04 ± 0,75	2,83 ± 0,84	7,28 ± 4,88	2,43 ± 0,52
		1,2	4,24 ± 0,27	6,34 ± 0,58	5,54 ± 0,32	4,94 ± 0,30	4,39 ± 0,39	6,60 ± 1,77
		2,4	6,60 ± 0,32	10,53 ± 0,34	9,48 ± 1,37	9,76 ± 1,51	7,48 ± 1,10	9,71 ± 0,56
		10	16,03 ± 1,15	23,51 ± 1,92	22,11 ± 0,77	23,27 ± 0,75	22,60 ± 1,44	23,98 ± 1,06
	LA	Testemunha	0,0	1,32 ± 0,21	2,05 ± 0,33	2,12 ± 0,94	1,63 ± 0,52	1,50 ± 0,41
CaCO ₃		0,6	1,87 ± 0,40	2,86 ± 0,53	2,60 ± 0,58	1,97 ± 0,37	2,26 ± 0,49	2,10 ± 0,36
		1,2	2,33 ± 0,53	3,67 ± 0,79	3,09 ± 0,95	3,00 ± 0,79	2,50 ± 0,43	2,31 ± 0,62
		2,4	5,51 ± 0,88	7,83 ± 0,91	7,90 ± 1,16	5,36 ± 0,79	7,91 ± 0,79	6,94 ± 0,93
		10	8,46 ± 0,75	11,67 ± 0,67	11,72 ± 0,91	10,15 ± 0,61	11,63 ± 0,90	11,78 ± 0,43
Escória		0,6	2,02 ± 0,51	2,45 ± 0,74	2,03 ± 0,65	6,03 ± 4,18	2,01 ± 0,70	2,20 ± 0,59
		1,2	2,17 ± 0,30	3,74 ± 0,44	3,78 ± 0,31	3,34 ± 0,86	2,94 ± 0,58	2,78 ± 0,67
		2,4	4,21 ± 0,65	7,03 ± 1,40	6,67 ± 1,15	4,76 ± 0,33	5,24 ± 0,75	4,75 ± 0,93
		10	10,60 ± 0,75	16,55 ± 1,35	18,22 ± 3,15	16,27 ± 6,36	18,39 ± 3,47	21,76 ± 4,55

Quadro 17, Cont.

Solo	Corretivo	Nível	Tempo (dias)				
			91	98	105	112	119
			----- mg L ⁻¹ -----				
LVA	Testemunha	0,0	2,41 ± 1,00	1,36 ± 0,06	1,04 ± 0,12	0,90 ± 0,35	0,23 ± 0,14
	CaCO ₃	0,6	4,78 ± 0,64	5,75 ± 0,75	4,39 ± 0,80	3,53 ± 1,63	4,21 ± 1,30
		1,2	6,68 ± 0,48	6,16 ± 0,47	5,07 ± 0,54	4,34 ± 0,59	3,98 ± 0,15
		2,4	12,60 ± 1,30	11,40 ± 0,92	9,07 ± 0,23	9,55 ± 0,61	8,79 ± 0,73
		10	17,10 ± 0,50	18,99 ± 1,25	15,24 ± 2,01	15,47 ± 2,33	14,33 ± 1,64
	Escória	0,6	3,16 ± 0,55	3,73 ± 0,03	2,71 ± 0,11	2,82 ± 0,20	2,46 ± 0,34
		1,2	6,55 ± 0,66	7,01 ± 1,03	4,81 ± 0,21	4,34 ± 0,40	4,33 ± 0,32
		2,4	11,06 ± 1,68	11,36 ± 1,27	8,89 ± 1,32	9,32 ± 1,33	8,59 ± 0,92
		10	24,91 ± 1,82	27,39 ± 0,57	21,11 ± 1,71	22,17 ± 0,66	20,08 ± 1,36
	LA	Testemunha	0,0	2,38 ± 0,51	2,05 ± 0,26	1,53 ± 0,17	1,49 ± 0,30
CaCO ₃		0,6	2,99 ± 0,53	3,57 ± 0,44	2,68 ± 0,34	2,25 ± 0,60	1,64 ± 0,38
		1,2	3,62 ± 0,66	3,94 ± 0,96	2,88 ± 0,66	2,39 ± 0,30	1,76 ± 0,29
		2,4	10,00 ± 1,38	9,18 ± 0,84	6,88 ± 0,42	7,33 ± 0,56	5,85 ± 0,58
		10	27,03 ± 11,88	16,66 ± 0,88	11,39 ± 0,93	12,05 ± 0,99	11,08 ± 1,31
Escória		0,6	3,47 ± 0,91	4,30 ± 1,15	2,23 ± 0,52	2,43 ± 0,82	1,80 ± 0,80
		1,2	4,21 ± 0,48	3,93 ± 0,50	2,95 ± 0,60	2,86 ± 0,52	2,19 ± 0,21
		2,4	6,89 ± 1,08	7,67 ± 1,32	6,66 ± 1,24	5,66 ± 1,22	4,32 ± 0,93
		10	23,65 ± 3,42	23,32 ± 0,93	15,41 ± 1,45	16,21 ± 1,23	14,11 ± 1,10

Quadro 18 – Teores de Mg determinados por espectrofotometria de emissão por plasma induzido (ICP-OES), em amostras de lixiviados, ao longo de 119 dias de teste de lixiviação, com solução de ácido acético 0,001 mol L⁻¹. Valores médios (três repetições) ± erro padrão da média. Valores médios (três repetições) ± erro padrão da média

Solo	Corretivo	Nível	Tempo (dias)						
			7	14	21	28	35	42	
			----- mg L ⁻¹ -----						
LVA	Testemunha	0,0	2,44 ± 0,14	2,67 ± 0,23	1,47 ± 0,19	1,05 ± 0,11	1,00 ± 0,10	0,72 ± 0,14	
	CaCO ₃	0,6	2,63 ± 0,11	2,42 ± 0,23	1,90 ± 0,22	1,55 ± 0,13	1,46 ± 0,07	1,19 ± 0,06	
		1,2	3,68 ± 0,36	3,11 ± 0,45	2,73 ± 0,44	2,24 ± 0,13	1,84 ± 0,17	1,55 ± 0,08	
		2,4	3,63 ± 0,20	4,07 ± 0,44	3,22 ± 0,32	2,58 ± 0,29	1,87 ± 0,25	1,57 ± 0,20	
		10	15,85 ± 0,35	14,60 ± 2,15	11,80 ± 1,73	10,04 ± 1,36	10,09 ± 1,36	9,17 ± 0,49	
	Escória	0,6	3,73 ± 0,50	3,51 ± 0,42	2,93 ± 0,55	2,32 ± 0,22	1,75 ± 0,12	1,47 ± 0,14	
		1,2	3,73 ± 0,19	4,46 ± 0,46	4,24 ± 0,61	2,93 ± 0,22	2,74 ± 0,23	2,12 ± 0,10	
		2,4	5,46 ± 0,50	6,56 ± 0,42	4,78 ± 0,51	3,78 ± 0,84	3,55 ± 0,84	2,76 ± 0,53	
		10	3,30 ± 0,19	4,06 ± 0,27	3,67 ± 0,46	3,06 ± 0,47	3,35 ± 0,55	2,28 ± 0,36	
	LA	Testemunha	0,0	2,36 ± 0,33	2,20 ± 0,34	1,64 ± 0,27	1,30 ± 0,20	0,95 ± 0,18	0,93 ± 0,19
		CaCO ₃	0,6	1,64 ± 0,15	1,42 ± 0,13	1,18 ± 0,11	0,81 ± 0,15	0,56 ± 0,07	0,51 ± 0,04
			1,2	2,05 ± 0,03	2,03 ± 0,06	1,63 ± 0,08	1,18 ± 0,08	0,84 ± 0,18	0,63 ± 0,15
			2,4	2,61 ± 0,24	2,87 ± 0,27	2,52 ± 0,45	1,83 ± 0,31	1,68 ± 0,29	1,23 ± 0,15
10			11,18 ± 0,36	13,70 ± 0,67	13,15 ± 0,95	8,16 ± 0,57	7,17 ± 0,46	5,65 ± 0,41	
Escória		0,6	2,24 ± 0,27	1,84 ± 0,29	1,59 ± 0,39	1,21 ± 0,29	1,13 ± 0,25	0,81 ± 0,18	
		1,2	2,59 ± 0,17	2,19 ± 0,16	1,75 ± 0,14	1,40 ± 0,19	1,23 ± 0,28	0,97 ± 0,12	
		2,4	2,93 ± 0,56	3,34 ± 1,29	3,12 ± 1,57	2,21 ± 0,90	1,39 ± 0,65	1,35 ± 0,47	
		10	3,76 ± 0,30	4,24 ± 0,73	4,21 ± 0,81	3,17 ± 0,43	2,98 ± 0,64	1,99 ± 0,24	

Quadro 18, Cont.

Solo	Corretivo	Nível	Tempo (dias)						
			49	56	63	70	77	84	
			----- mg L ⁻¹ -----						
LVA	Testemunha	0,0	0,62 ± 0,13	1,03 ± 0,11	0,98 ± 0,08	0,94 ± 0,03	0,75 ± 0,02	0,72 ± 0,06	
	CaCO ₃	0,6	1,02 ± 0,04	1,74 ± 0,24	1,57 ± 0,03	1,30 ± 0,19	0,99 ± 0,09	0,99 ± 0,15	
		1,2	1,10 ± 0,10	1,64 ± 0,21	1,60 ± 0,07	1,40 ± 0,09	1,32 ± 0,16	1,10 ± 0,09	
		2,4	1,16 ± 0,06	1,65 ± 0,19	1,76 ± 0,28	1,74 ± 0,19	1,26 ± 0,16	1,47 ± 0,17	
		10	6,74 ± 0,76	9,32 ± 0,27	9,65 ± 0,23	9,29 ± 0,48	6,42 ± 2,39	8,88 ± 0,26	
	Escória	0,6	1,24 ± 0,07	2,01 ± 0,29	1,77 ± 0,16	1,61 ± 0,20	4,36 ± 2,71	1,33 ± 0,13	
		1,2	1,82 ± 0,11	2,68 ± 0,24	2,50 ± 0,14	2,22 ± 0,13	2,06 ± 0,16	2,31 ± 0,28	
		2,4	1,89 ± 0,11	3,11 ± 0,17	2,81 ± 0,45	2,84 ± 0,36	2,48 ± 0,18	2,93 ± 0,32	
		10	1,66 ± 0,31	2,49 ± 0,47	2,31 ± 0,26	2,46 ± 0,28	2,44 ± 0,52	2,65 ± 0,57	
	LA	Testemunha	0,0	0,70 ± 0,06	1,07 ± 0,07	1,21 ± 0,41	0,97 ± 0,13	0,88 ± 0,07	0,74 ± 0,11
		CaCO ₃	0,6	0,44 ± 0,08	0,65 ± 0,06	0,62 ± 0,07	0,70 ± 0,18	0,57 ± 0,04	0,45 ± 0,05
			1,2	0,48 ± 0,14	0,78 ± 0,22	0,73 ± 0,29	0,68 ± 0,18	0,58 ± 0,13	0,62 ± 0,12
			2,4	0,89 ± 0,11	1,28 ± 0,09	1,32 ± 0,14	0,94 ± 0,12	1,27 ± 0,09	1,07 ± 0,11
			10	4,08 ± 0,16	6,53 ± 0,61	6,33 ± 0,28	5,87 ± 0,59	5,91 ± 0,55	5,67 ± 0,44
Escória		0,6	0,70 ± 0,16	0,86 ± 0,15	0,79 ± 0,11	1,01 ± 0,21	0,77 ± 0,14	0,76 ± 0,08	
		1,2	0,68 ± 0,10	1,18 ± 0,24	1,27 ± 0,16	1,09 ± 0,28	0,98 ± 0,11	0,91 ± 0,13	
		2,4	0,94 ± 0,25	1,67 ± 0,55	1,64 ± 0,42	1,14 ± 0,26	1,17 ± 0,34	1,12 ± 0,37	
		10	1,34 ± 0,06	2,14 ± 0,02	2,43 ± 0,35	2,62 ± 0,62	2,34 ± 0,34	2,79 ± 0,46	

Quadro 18, Cont.

Solo	Corretivo	Nível	Tempo (dias)				
			91	98	105	112	119
----- mg L ⁻¹ -----							
LVA	Testemunha	0,0	1,08 ± 0,18	0,98 ± 0,03	0,72 ± 0,03	0,50 ± 0,24	0,69 ± 0,03
	CaCO ₃	0,6	1,48 ± 0,19	1,75 ± 0,23	1,33 ± 0,21	1,22 ± 0,37	1,44 ± 0,37
		1,2	1,47 ± 0,10	1,47 ± 0,04	1,18 ± 0,08	1,04 ± 0,06	1,05 ± 0,04
		2,4	1,85 ± 0,23	1,68 ± 0,06	1,36 ± 0,10	1,50 ± 0,14	1,39 ± 0,17
		10	8,65 ± 0,58	9,70 ± 1,08	7,72 ± 1,32	7,55 ± 1,24	6,94 ± 0,75
	Escória	0,6	1,48 ± 0,17	1,84 ± 0,08	1,29 ± 0,06	1,38 ± 0,03	1,45 ± 0,08
		1,2	2,54 ± 0,28	2,85 ± 0,26	2,00 ± 0,14	1,80 ± 0,20	1,96 ± 0,19
		2,4	2,85 ± 0,40	2,95 ± 0,34	2,29 ± 0,31	2,46 ± 0,30	2,37 ± 0,25
		10	2,49 ± 0,50	2,61 ± 0,29	1,98 ± 0,32	2,11 ± 0,33	1,99 ± 0,37
	LA	Testemunha	0,0	1,06 ± 0,17	1,04 ± 0,07	0,76 ± 0,05	0,79 ± 0,04
CaCO ₃		0,6	0,59 ± 0,08	0,73 ± 0,09	0,54 ± 0,05	0,51 ± 0,07	0,44 ± 0,09
		1,2	0,69 ± 0,16	0,83 ± 0,25	0,62 ± 0,17	0,48 ± 0,11	0,46 ± 0,10
		2,4	1,48 ± 0,17	1,40 ± 0,10	1,01 ± 0,03	1,09 ± 0,10	0,99 ± 0,12
		10	11,63 ± 5,73	6,64 ± 0,36	4,44 ± 0,41	4,60 ± 0,31	4,28 ± 0,21
Escória		0,6	0,98 ± 0,18	1,29 ± 0,31	0,69 ± 0,13	0,78 ± 0,17	0,68 ± 0,15
		1,2	1,19 ± 0,12	1,15 ± 0,11	0,86 ± 0,16	0,88 ± 0,12	0,84 ± 0,04
		2,4	1,42 ± 0,35	1,85 ± 0,44	1,24 ± 0,33	1,23 ± 0,40	1,13 ± 0,35
		10	2,98 ± 0,36	2,81 ± 0,17	1,83 ± 0,07	1,91 ± 0,04	1,72 ± 0,06

Quadro 19 – Análise de variância para Ca e Mg nos lixiviados, coletados no decorrer de 119 dias de ensaio de lixiviação com solução de ácido acético 0,001 mol L⁻¹

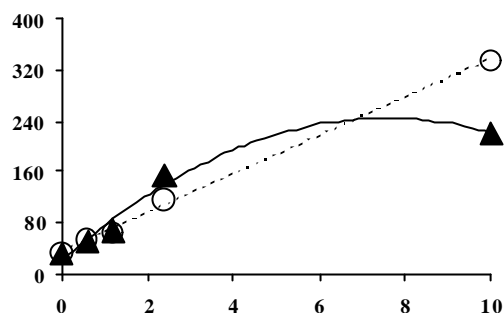
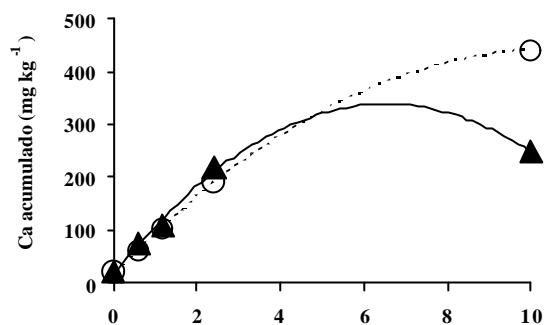
F.V.	G.L.	Q.M.	
		Ca	Mg
Solo	1	20.059,23**	2.917,76**
Corretivo	1	7.396,62**	2.739,61**
Nível	4	155.478,00**	11.588,81**
Corretivo d/ solo	1	723,37 ^{n.s}	4,96 ^{n.s}
Nível d/ solo	4	3.464,96**	213,66 ^{n.s}
Nível d/ corretivo	4	16.500,34**	6.858,67**
Resíduo	36	755,36	60,10
C.V. (%)		19,31	18,31

**,* Coeficientes significativos, a 1 e 5% de probabilidade, respectivamente, pelo teste F.
^{n.s.} Coeficientes não-significativos.

Tratando-se agora do Ca e do Mg mobilizados dos solos, semelhantemente ao ensaio anterior, maiores teores foram observados no início do ensaio, decrescendo com o decorrer do tempo (Figura 5). As equações de regressão ajustadas para os teores acumulados de Ca e Mg evidenciaram, para o LA, tratado com escória de aciaria, um comportamento linear no que tange à mobilização destes elementos. Vale ressaltar que a correção do solo com calcário, para fins de melhoria da fertilidade dos solos, apresenta efeito residual de cerca de três anos. Assim, a solução ácida utilizada neste ensaio pode ter atuado de forma a solubilizar os corretivos que ainda não haviam interagido com o solo, sendo este efeito mais pronunciado nos tratamentos com escória de aciaria, em virtude do seu maior efeito residual em relação ao carbonato. Desta forma, o comportamento linear observado, principalmente, para o Ca, no LA, se deve ao menor poder tampão deste solo e, principalmente, ao efeito residual da escória. Outro exemplo deste maior efeito residual da escória pode ser constatado quando se comparam os teores acumulados de cálcio no nível 10 NC. Observaram-se, neste nível, em ambos os solos avaliados, maiores teores de Ca mobilizados nos tratamentos que receberam escória como corretivo, fato este que corrobora os resultados obtidos no ensaio anterior que mostrou mobilização menos acentuada da escória. PRADO et al. (2001), constataram que a aplicação de escória de siderurgia propiciou efeito residual favorável na disponibilidade de Fe, Cu e Zn do solo em relação ao carbonato e, que este comportamento permitirá maiores intervalos para novas aplicações em relação às fontes comercialmente utilizadas.

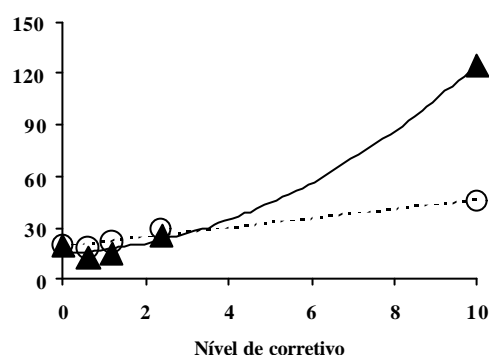
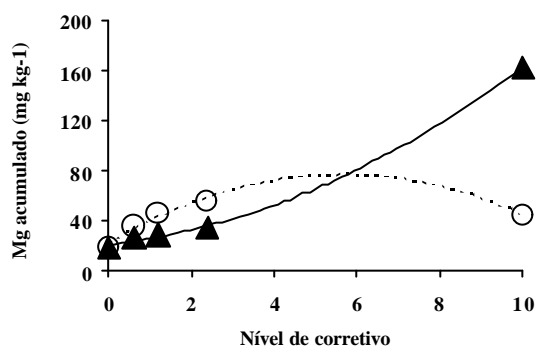
Latossolo Vermelho-Amarelo (Viana-ES)

Latossolo Amarelo (Nova Almeida ES)



$\hat{Y} = 17,187 + 98,110**X - 7,497**X^2 \quad R^2 = 0,9923**$
 $\hat{Y} = 17,489 + 80,137**X - 3,783**X^2 \quad R^2 = 0,9993**$

$\hat{Y} = 21,020 + 59,250**X - 3,921**X^2 \quad R^2 = 0,9733**$
 $\hat{Y} = 34,2558 + 30,2592**X \quad R^2 = 0,9977**$



$\hat{Y} = 21,372 + 19,378**X - 17,013**\sqrt{X} \quad R^2 = 0,9918**$
 $\hat{Y} = 21,549 + 19,397**X - 1,708**X^2 \quad R^2 = 0,9607*$

$\hat{Y} = 19,528 + 18,077**X - 23,839**\sqrt{X} \quad R^2 = 0,9999**$
 $\hat{Y} = 18,8969 + 2,6945**X \quad R^2 = 0,9616*$

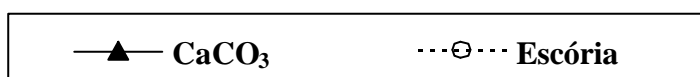


Figura 5 – Modelo aproximativo para expressar a mobilização do Ca e Mg acumulado, ao longo de 105 dias de ensaio de lixiviação com solução de ácido acético 0,001 mol L⁻¹, em função dos níveis de corretivo aplicadas no solo.

A ausência deste mesmo comportamento, em relação ao Mg, está associada à maior solubilidade dos compostos de magnésio (MgSiO₃, MgCO₃ etc.) presentes na composição da escória (LOUZADA, 1987).

4. CONCLUSÕES

1. Houve incremento dos teores de Cr nos solos quando se utilizou a escória de aciaria; no entanto, do total presente nos solos a grande maioria encontrou-se associado a formas mais estáveis de óxidos de Fe e em formas residuais, possivelmente, com os silicatos.

2. Semelhantemente ao constatado nos Capítulos 2 e 3, o teor de Mn nos solos tratados com escória de aciaria foi superior aos tratamentos com carbonato, evidenciando, mais uma vez, que cuidados devem ser tomados quanto ao uso deste resíduo no solo, principalmente se forem cultivadas plantas sensíveis à presença deste elemento.

3. Não foram observados indícios de contaminação dos solos, plantas ou águas percoladas nas colunas de lixiviação por metais pesados, sugerindo que a escória tem grande potencial de uso na agricultura como corretivo da acidez dos solos; no entanto, pesquisas futuras devem ser realizadas com o propósito de se ter segurança em termos de contaminação ambiental.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABREU, C. A.; ABREU, M. F.; BERTON, R. S. Análise química de solo para metais pesados. In: ALVAREZ V., V. H.; SCHAEFER, C. E. G. R.; BARROS, N. F.; MELLO, J. W. V. & COSTA, L. M. eds. **Tópicos em Ciência do Solo**. Viçosa, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, v. 2, jul. 2002. p. 645-692.

ALCÂNTARA, M. A. K. & CAMARGO, O. A. Isotermas de adsorção de Freundlich para o cromo (III) em Latossolos. **Scientia Agrícola**, v. 58, n. 3, p. 567-572, jul./set. 2001.

ALLOWAY, B. J. **Heavy metal in soil**. London: Blackie, 1990. 340 p.

AMARAL SOBRINHO, N. M. B. **Interação dos metais pesados de resíduos siderúrgicos com um Podzólico Vermelho-Amarelo**. Viçosa, 1993. 163 f. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) – Universidade Federal de Viçosa, 1993.

AMARAL SOBRINHO, N. M. B.; COSTA, L. M.; OLIVEIRA, C.; VELLOSO, A. C. X. Metais pesados em alguns fertilizantes e corretivos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 16, p. 271-276, 1992.

AMARAL, A. S.; DEFELIPO, B. V.; COSTA, L. M.; FONTES, M. P. F. Liberação de Zn, Fe, Mn e Cd de quatro materiais corretivos da acidez e absorção por alfaca em dois solos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 29, n. 9, p. 1351-1358, set. 1994.

AMARAL, R. D. **Avaliação de um Resíduo da Indústria de Zinco como Corretivo da Acidez e Fertilizante de Solo e Fonte de Metais Pesados para Plantas**. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 1994. 70 p. (Dissertação de Mestrado).

ANJOS, A. R. M. & MATTIAZZO, M. E. Lixiviação de íons inorgânicos em solos repetidamente tratados com biossólido. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 24, p. 927-938, abr./jun. 2000.

ANJOS, J. T. & ROWELL, D. L. Perdas de calcário em solos: efeito de doses de óxidos de cálcio em colunas de solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 7, p. 75-81, 1983.

AQUINO NETO, V. & CAMARGO, O. A. crescimento e acúmulo de crômio em alface cultivada em dois Latossolos tratados com $CrCl_3$ e resíduo de curtume. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 24, p. 225-235, 2000.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 10.005, Lixiviação de resíduos sólidos**. Rio de Janeiro, 1987. 7 p.

BARTLETT, R. J. & KIMBLE, J. M. Behavior of chromium in soils: I. Trivalent forms. **Journal Environment Quality**, v. 5, p. 379-382, 1976.

BELLINGIERI, P. A. **Análise em laboratório da eficiência de diferentes frações granulométricas de calcários agrícolas**. Piracicaba: USP, 1983. 99 f. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) – Escola Superior “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, 1983.

BERTONCINI, E. I. & MATTIAZZO, M. E. Lixiviação de metais pesados em solos tratados com lodo de esgoto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 2, p. 737-744, 1999.

BORGES JÚNIOR, M. **Avaliação da contaminação, distribuição de metais pesados e obtenção de valores de referência local em perfis de solo no município de Vazante-MG**. Viçosa: UFV, 2002. 152 f. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) – Universidade Federal de Viçosa, 2002.

BUNZL, K.; TRAUTMANNSEIMER, M.; SCHRAMEL, P. Partitioning of heavy metals in soil contaminated by slag: a redistribution study. **Journal Environment Quality**, v. 28, p. 1168-1173, 1999.

COMISSÃO DE FERTILIDADE DO SOLO DO ESTADO DE MINAS GERAIS. **Recomendação para uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais - 5ª Aproximação**. Viçosa-MG. 1999. 359 p.: il.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE – CONAMA Supremo Tribunal Federal. **Portaria n. 20 de 18 de junho de 1986**. Ementa da Portaria do Diário Oficial [da Republica Federativa do Brasil], Brasília, v. 124, n.143. p.11356-11361, 30 Jul. 1986. Seção 1.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). **Manual de análise química de solos, plantas e fertilizantes**. Organizador: Fabio César da Silva.- Brasília: Embrapa Comunicação para transferência de Tecnologia, 1999. 370 p.

FORTES, J. L. O. **Eficiência de duas escórias de siderurgia do estado do Maranhão na correção da acidez do solo**. Viçosa: UFV, 1993. 66 f. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) – Universidade Federal de Viçosa, 1993.

GOMES, P. C.; FONTES, M. P. F.; COSTA, L. M.; MENDONÇA, E. S. Extração fracionada de metais pesados em Latossolo Vermelho-Amarelo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 21, p. 543-551, 1997.

GOMES, P. C.; FONTES, M. P. F.; SILVA, A. G.; MENDONÇA, E. S.; NETTO, A. R. Selectivity sequence and competitive adsorption of heavy metals by Brazilian soils. **Soil Science Society of America Journal**, v. 65, jul-ago, 2001

JAMES, B. R. & BARTLETT, R. J. BEHAVIOR OF CHROMIUM IN SOILS: VII. Adsorption and reduction of hexavalent forms. **Journal of Environmental Quality**, v. 12, p. 177-181, 1983.

KABATA-PENDIAS, A. & PENDIAS, H. **Trace elements in soils and plant**. 3. ed. Boca Raton: CRC Press, 2001. 413 p.

LOUZADA, P. T. C. **Eficiência de uma escória de siderurgia como corretivo e fertilizante de solo**. Viçosa: UFV, 1987. 52 f. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) - Universidade Federal de Viçosa, 1987.

MATTIAZZO-PREZZOTTO, M. E. **Comportamento de cobre, cádmio, cromo, níquel e zinco adicionados a solos de clima tropical em diferentes valores de pH**. Piracicaba: USP, 1994. 197 f. Tese (Livre Docência) – Universidade de São Paulo, 1994.

McBRIDE, M. B. Reactions controlling heavy metal solubility in soils. **Advances in Soil Science**, New York, v. 10, p. 1-56, 1989.

MILACIC, R. & STUPAR, J. Fractionation and oxidation of chromium in tannery waste and sewage sludge-amended soils. **Environmental Science & Technology**, v. 29, n. 2, p. 506-514, 1995.

OLIVEIRA, R. C. **Avaliação do movimento de cádmio, chumbo e zinco em colunas de solos tratados com resíduo-calcário**. Lavras: UFLA, 2002. 71 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Viçosa, 2002.

PIAU, W. C. **Variabilidade do uso das escórias como corretivo e fertilizante**. Piracicaba: USP, 1991. 99 f. Dissertação (Mestrado em Energia Nuclear na Agricultura) – Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, 1991.

PRADO, R. M., FERNANDES, F. M. Escória de siderurgia e calcário na correção da acidez do solo cultivado com cana-de-açúcar em vaso. **Scientia Agrícola**, v. 57, p. 739-744, 2000.

PRADO, R. M.; FERNANDES, F. M.; NATALE, W. **Uso agrícola da escória de siderurgia no Brasil – Estudos na cultura da cana-de-açúcar**. Jaboticabal: Funep, 2001. 67 p.

RIBEIRO, A. C.; FIRME, D. J.; MATOS, A. C. M. Avaliação da eficiência de uma escória de aciaria como corretivo da acidez. **Revista Ceres**, v. 33, n. 187, p. 242-248, 1986.

RODELLA, A.A.; ALCARDE, J.C. Legislação sobre micronutrientes e metais pesados. In: FERREIRA, M.E.; CRUZ, M.C.P.; RAIJ, B.; ABREU, C. A. (Ed.). **Micronutrientes e elementos tóxicos na agricultura**. Jaboticabal: CNPq/FAPESP/POTAFOS, 2001. p. 555-576.

SHEPPARD, M. J. & THIBAUT, D. H. Desorption and extraction of selected heavy metal from soils. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, v. 56, p. 415-423, 1992.

SPOSITO, G. **The chemistry of soils**. New York: Oxford University Press, 1989. 277 p.

SPOSITO, G.; LUND, L. J.; CHANG, A. C. The metal chemistry in arid zone field soils amended with sewage sludge: I. Fractionation of Ni, Cu, Zn, Cd and Pb in solid phases. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, v. 46, p. 260-264, 1982.

WELCH, J. E. & LUND, L. J. Zinc movement in sewage-sludge treated soil as influenced by soil properties, irrigation water quality and soil moisture level. **Soil Sci.**, v. 147, p. 208-214, 1989.

WILLIAMS, D. E.; VLAMIS, J.; PUKITE, A. H.; COREY, J. E. Metal movement in sludge treated of soil after six years of sludge addition: L. Nickel, cobalt, iron, manganese, chromium and mercury. **Soil Sci.**, v. 140, p. 120-125, 1985.

CONCLUSÕES GERAIS

1. Quanto à periculosidade, a escória foi considerada material inerte e não-tóxico.

2. A escória com granulometria inferior a 1 mm mostrou-se eficiente para corrigir a acidez, neutralizar o alumínio tóxico dos solos e suprir as plantas com Ca e Mg.

3. A escória com granulometria entre 2 e 10 mm não apresentou resultados satisfatórios como corretivo da acidez dos solos.

4. Os baixos valores de Zn e P total, bem como teores nulos de P solúvel em ácido cítrico não recomendam o uso da escória como fonte destes fertilizantes.

5. Houve incremento dos teores de Cr nos solos quando se utilizou a escória de aciaria; no entanto, do total presente nos solos a grande maioria encontrou-se associado a formas mais estáveis de óxidos de Fe e em formas residuais, possivelmente, com os silicatos.

6. Com o uso da escória de aciaria, houve aumento significativo dos teores de Fe e, principalmente, de Mn trocável nos solos, entretanto não foram observados sintomas de toxidez nas plantas cultivadas.

7. Cuidados quanto ao uso da escória em solos cultivados com plantas mais sensíveis à presença do Mn, devem ser tomados, tendo em vista que este elemento em níveis muito elevados pode causar toxidez de plantas e, conseqüentemente, a quedas de produção.

8. Não foram observados indícios de contaminação dos solos, plantas ou águas percoladas nas colunas de lixiviação por metais pesados, sugerindo que a escória tem grande potencial de uso na agricultura como corretivo da acidez dos solos; no entanto, pesquisas futuras devem ser realizadas com o propósito de se obter uma segurança em termos de contaminação ambiental.

APÊNDICE

APÊNDICE A

Quadro 1A – Teores de Zn determinados por espectrofotometria de emissão por plasma induzido (ICP – OES), em amostras de lixiviados, ao longo de 105 dias de teste de lixiviação com água. Valores médios (três repetições) ± erro padrão da média

Solo	Corretivo	Nível	Tempo (dias)					
			7	14	21	28	35	
			----- mg L ⁻¹ -----					
LVA	Testemunha	0,0	0,173 ± 0,02	0,070 ± 0,01	<0,001	<0,001	0,056 ± 0,00	
	CaCO ₃	0,6	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	0,019 ± 0,00	
		1,2	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	0,037 ± 0,01	
		2,4	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	0,020 ± 0,00	
		10	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	0,012 ± 0,00	
	Escória	0,6	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	0,012 ± 0,00	
		1,2	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	0,022 ± 0,00	
		2,4	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	0,016 ± 0,00	
		10	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	0,010 ± 0,00	
	LA	Testemunha	0,0	0,010 ± 0,00	<0,001	<0,001	<0,001	0,037 ± 0,01
		CaCO ₃	0,6	0,279 ± 0,01	<0,001	<0,001	<0,001	0,034 ± 0,00
			1,2	0,022 ± 0,00	<0,001	<0,001	<0,001	0,030 ± 0,00
			2,4	0,114 ± 0,00	<0,001	<0,001	<0,001	0,019 ± 0,00
			10	0,395 ± 0,00	<0,001	<0,001	<0,001	0,010 ± 0,00
Escória		0,6	0,444 ± 0,05	<0,001	<0,001	<0,001	0,053 ± 0,01	
		1,2	0,142 ± 0,00	<0,001	<0,001	<0,001	0,026 ± 0,00	
		2,4	0,062 ± 0,00	<0,001	<0,001	<0,001	0,008 ± 0,00	
		10	0,134 ± 0,02	<0,001	<0,001	<0,001	0,011 ± 0,00	

O número seguido do sinal < indica o limite de determinação do método analítico utilizado.

Quadro 1A, Cont.

Solo	Corretivo	Nível	Tempo (dias)					
			42	49	56	63	70	
			----- mg L ⁻¹ -----					
LVA	Testemunha	0,0	0,022 ± 0,00	0,014 ± 0,00	0,004 ± 0,00	0,004 ± 0,00	0,006 ± 0,00	
	CaCO ₃	0,6	0,017 ± 0,00	0,012 ± 0,00	0,007 ± 0,00	0,008 ± 0,00	0,006 ± 0,00	
		1,2	0,015 ± 0,00	0,008 ± 0,00	0,012 ± 0,00	0,019 ± 0,00	0,018 ± 0,00	
		2,4	0,008 ± 0,00	0,005 ± 0,00	0,005 ± 0,00	0,004 ± 0,00	0,004 ± 0,00	
		10	0,004 ± 0,00	0,005 ± 0,00	0,005 ± 0,00	0,004 ± 0,00	0,002 ± 0,00	
	Escória	0,6	0,011 ± 0,00	0,004 ± 0,00	0,006 ± 0,00	0,004 ± 0,00	0,009 ± 0,01	
		1,2	0,008 ± 0,00	0,019 ± 0,01	0,018 ± 0,00	0,010 ± 0,00	0,014 ± 0,00	
		2,4	0,008 ± 0,00	0,004 ± 0,00	0,004 ± 0,00	0,005 ± 0,00	0,003 ± 0,00	
		10	0,006 ± 0,00	0,003 ± 0,00	0,004 ± 0,00	0,006 ± 0,00	0,003 ± 0,00	
	LA	Testemunha	0,0	0,013 ± 0,00	0,025 ± 0,00	0,008 ± 0,00	0,005 ± 0,00	0,002 ± 0,00
		CaCO ₃	0,6	0,018 ± 0,00	0,015 ± 0,00	0,019 ± 0,00	0,015 ± 0,00	0,009 ± 0,00
			1,2	0,020 ± 0,00	0,014 ± 0,00	0,017 ± 0,00	0,015 ± 0,00	0,011 ± 0,00
2,4			0,009 ± 0,00	0,007 ± 0,00	0,012 ± 0,00	0,009 ± 0,00	0,007 ± 0,00	
10,0			0,003 ± 0,00	0,002 ± 0,00	0,006 ± 0,00	0,003 ± 0,00	0,003 ± 0,00	
Escória		0,6	0,025 ± 0,00	0,017 ± 0,01	0,017 ± 0,00	0,007 ± 0,00	0,007 ± 0,00	
		1,2	0,022 ± 0,00	0,017 ± 0,00	0,019 ± 0,00	0,014 ± 0,00	0,012 ± 0,00	
		2,4	0,012 ± 0,00	0,004 ± 0,00	0,013 ± 0,00	0,010 ± 0,00	0,008 ± 0,00	
		10	0,007 ± 0,00	0,006 ± 0,00	0,004 ± 0,00	0,004 ± 0,00	0,005 ± 0,00	

Quadro 1A, Cont.

Solo	Corretivo	Nível	Tempo (dias)					
			77	84	91	98	105	
			----- mg L ⁻¹ -----					
LVA	Testemunha	0,0	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	
	CaCO ₃	0,6	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	
		1,2	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	
		2,4	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	
		10	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	
	Escória	0,6	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	
		1,2	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	
		2,4	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	
		10	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	
	LA	Testemunha	0,0	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
		CaCO ₃	0,6	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
			1,2	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
2,4			<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	
10			<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	
Escória		0,6	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	
		1,2	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	
		2,4	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	
		10	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	

O número seguido do sinal < indica o limite de determinação do método analítico utilizado.

Quadro 2A – Teores de Cu determinados por espectrofotometria de emissão por plasma induzido (ICP – OES), em amostras de lixiviados, ao longo de 105 dias de teste de lixiviação com água. Valores médios (três repetições) ± erro padrão da média

Solo	Corretivo	Nível	Tempo (dias)				
			7	14	21	28	35
			----- mg L ⁻¹ -----				
LVA	Testemunha	0,0	0,274 ± 0,03	0,185 ± 0,01	0,157 ± 0,01	0,142 ± 0,01	0,050 ± 0,00
	CaCO ₃	0,6	0,146 ± 0,01	0,158 ± 0,01	0,130 ± 0,00	0,031 ± 0,00	0,052 ± 0,00
		1,2	0,124 ± 0,01	0,111 ± 0,00	0,129 ± 0,01	0,025 ± 0,00	0,048 ± 0,00
		2,4	0,147 ± 0,02	0,112 ± 0,00	0,127 ± 0,00	0,022 ± 0,00	0,052 ± 0,00
		10	0,140 ± 0,01	0,107 ± 0,01	0,114 ± 0,01	0,024 ± 0,00	0,053 ± 0,00
	Escória	0,6	0,143 ± 0,01	0,122 ± 0,00	0,127 ± 0,01	0,032 ± 0,00	0,048 ± 0,00
		1,2	0,197 ± 0,03	0,145 ± 0,01	0,113 ± 0,01	0,009 ± 0,00	0,045 ± 0,00
		2,4	0,151 ± 0,03	0,131 ± 0,01	0,132 ± 0,01	0,025 ± 0,00	0,064 ± 0,00
		10	0,125 ± 0,01	0,115 ± 0,01	0,108 ± 0,01	0,015 ± 0,00	0,048 ± 0,00
	LA	Testemunha	0,0	0,388 ± 0,01	0,160 ± 0,01	0,138 ± 0,01	0,037 ± 0,00
CaCO ₃		0,6	0,398 ± 0,04	0,150 ± 0,01	0,125 ± 0,01	0,022 ± 0,00	0,044 ± 0,00
		1,2	0,129 ± 0,01	0,105 ± 0,00	0,138 ± 0,01	0,038 ± 0,00	0,056 ± 0,00
		2,4	0,429 ± 0,04	0,126 ± 0,01	0,122 ± 0,01	0,007 ± 0,00	0,035 ± 0,00
		10	0,474 ± 0,03	0,123 ± 0,01	0,123 ± 0,01	0,009 ± 0,00	0,033 ± 0,00
Escória		0,6	0,476 ± 0,05	0,136 ± 0,01	0,124 ± 0,00	0,029 ± 0,00	0,046 ± 0,00
		1,2	0,337 ± 0,03	0,169 ± 0,02	0,134 ± 0,01	0,038 ± 0,00	0,058 ± 0,00
		2,4	0,425 ± 0,05	0,150 ± 0,01	0,132 ± 0,01	0,015 ± 0,00	0,040 ± 0,00
		10	0,202 ± 0,01	0,133 ± 0,02	0,105 ± 0,00	0,006 ± 0,00	0,035 ± 0,00

Quadro 2A, Cont.

Solo	Corretivo	Nível	Tempo (dias)					
			42	49	56	63	70	
----- mg L ⁻¹ -----								
LVA	Testemunha	0,0	0,051 ± 0,00	0,040 ± 0,00	0,091 ± 0,02	0,042 ± 0,00	0,016 ± 0,00	
	CaCO ₃	0,6	0,043 ± 0,00	0,034 ± 0,00	0,055 ± 0,00	0,025 ± 0,00	0,016 ± 0,00	
		1,2	0,036 ± 0,00	0,034 ± 0,00	0,037 ± 0,00	0,028 ± 0,00	0,024 ± 0,00	
		2,4	0,036 ± 0,00	0,028 ± 0,00	0,035 ± 0,00	0,019 ± 0,00	0,009 ± 0,00	
		10	0,034 ± 0,00	0,027 ± 0,00	0,034 ± 0,00	0,019 ± 0,00	0,010 ± 0,00	
		Escória	0,6	0,044 ± 0,00	0,034 ± 0,00	0,038 ± 0,00	0,021 ± 0,00	0,017 ± 0,00
	Escória	1,2	0,044 ± 0,00	0,023 ± 0,00	0,040 ± 0,01	0,019 ± 0,00	0,016 ± 0,00	
		2,4	0,044 ± 0,00	0,037 ± 0,00	0,033 ± 0,00	0,022 ± 0,00	0,011 ± 0,00	
		10	0,043 ± 0,00	0,021 ± 0,00	0,028 ± 0,00	0,018 ± 0,00	0,011 ± 0,00	
		Testemunha	0,0	0,035 ± 0,00	0,023 ± 0,00	0,023 ± 0,00	0,014 ± 0,00	0,006 ± 0,00
	LA	CaCO ₃	0,6	0,043 ± 0,00	0,030 ± 0,00	0,031 ± 0,00	0,018 ± 0,00	0,010 ± 0,00
			1,2	0,056 ± 0,00	0,041 ± 0,00	0,041 ± 0,00	0,030 ± 0,00	0,026 ± 0,00
			2,4	0,032 ± 0,00	0,028 ± 0,00	0,029 ± 0,00	0,016 ± 0,00	0,013 ± 0,00
			10	0,028 ± 0,00	0,015 ± 0,00	0,022 ± 0,00	0,013 ± 0,00	0,008 ± 0,00
Escória			0,6	0,042 ± 0,00	0,027 ± 0,00	0,032 ± 0,00	0,017 ± 0,00	0,014 ± 0,00
Escória	1,2	0,044 ± 0,00	0,028 ± 0,00	0,035 ± 0,01	0,020 ± 0,00	0,011 ± 0,00		
	2,4	0,033 ± 0,00	0,021 ± 0,00	0,025 ± 0,00	0,018 ± 0,00	0,013 ± 0,00		
	10	0,026 ± 0,00	0,018 ± 0,00	0,021 ± 0,00	0,009 ± 0,00	0,007 ± 0,00		

Quadro 2A, Cont.

Solo	Corretivo	Nível	Tempo (dias)					
			77	84	91	98	105	
			----- mg L ⁻¹ -----					
LVA	Testemunha	0,0	<0,0003	<0,0003	<0,0003	<0,0003	<0,0003	
	CaCO ₃	0,6	<0,0003	<0,0003	<0,0003	<0,0003	<0,0003	
		1,2	<0,0003	<0,0003	<0,0003	<0,0003	<0,0003	
		2,4	<0,0003	<0,0003	<0,0003	<0,0003	<0,0003	
		10	<0,0003	<0,0003	<0,0003	<0,0003	<0,0003	
	Escória	0,6	<0,0003	<0,0003	<0,0003	<0,0003	<0,0003	
		1,2	<0,0003	<0,0003	<0,0003	<0,0003	<0,0003	
		2,4	<0,0003	<0,0003	<0,0003	<0,0003	<0,0003	
		10	<0,0003	<0,0003	<0,0003	<0,0003	<0,0003	
	LA	Testemunha	0,0	<0,0003	<0,0003	<0,0003	<0,0003	<0,0003
		CaCO ₃	0,6	<0,0003	<0,0003	<0,0003	<0,0003	<0,0003
			1,2	<0,0003	<0,0003	<0,0003	<0,0003	<0,0003
2,4			<0,0003	<0,0003	<0,0003	<0,0003	<0,0003	
10			<0,0003	<0,0003	<0,0003	<0,0003	<0,0003	
Escória		0,6	<0,0003	<0,0003	<0,0003	<0,0003	<0,0003	
		1,2	<0,0003	<0,0003	<0,0003	<0,0003	<0,0003	
		2,4	<0,0003	<0,0003	<0,0003	<0,0003	<0,0003	
		10	<0,0003	<0,0003	<0,0003	<0,0003	<0,0003	

O número seguido do sinal < indica o limite de determinação do método analítico utilizado

Quadro 3A – Teores de Fe determinados por espectrofotometria de emissão por plasma induzido (ICP – OES), em amostras de lixiviados, ao longo de 105 dias de teste de lixiviação com água. Valores médios (três repetições) ± erro padrão da média

Solo	Corretivo	Nível	Tempo (dias)				
			7	14	21	28	35
----- mg L ⁻¹ -----							
LVA	Testemunha	0,0	2,207 ± 0,10	2,792 ± 0,12	2,021 ± 0,22	0,706 ± 0,06	0,660 ± 0,04
	CaCO ₃	0,6	0,368 ± 0,06	0,126 ± 0,01	0,067 ± 0,01	0,341 ± 0,02	0,414 ± 0,01
		1,2	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	0,068 ± 0,00
		2,4	0,003 ± 0,00	<0,001	<0,001	<0,001	0,015 ± 0,00
		10	0,532 ± 0,01	0,176 ± 0,01	<0,001	<0,001	0,046 ± 0,00
		Escória	0,6	0,205 ± 0,02	0,201 ± 0,00	0,075 ± 0,01	0,080 ± 0,00
		1,2	0,082 ± 0,00	<0,001	0,030 ± 0,00	<0,001	0,053 ± 0,00
		2,4	0,073 ± 0,00	<0,001	<0,001	<0,001	0,029 ± 0,00
		10	0,194 ± 0,01	<0,001	<0,001	<0,001	0,037 ± 0,00
	LA	Testemunha	0,0	2,880 ± 0,37	1,000 ± 0,03	1,123 ± 0,18	0,296 ± 0,00
CaCO ₃		0,6	0,915 ± 0,13	0,666 ± 0,06	0,188 ± 0,00	0,037 ± 0,00	0,451 ± 0,04
		1,2	0,393 ± 0,06	0,130 ± 0,01	<0,001	0,002 ± 0,00	0,241 ± 0,00
		2,4	0,109 ± 0,02	<0,001	<0,001	<0,001	0,008 ± 0,00
		10	0,281 ± 0,03	0,150 ± 0,02	0,024 ± 0,00	<0,001	0,189 ± 0,01
		Escória	0,6	0,350 ± 0,03	0,112 ± 0,01	0,186 ± 0,01	<0,001
		1,2	0,086 ± 0,00	<0,001	<0,001	<0,001	0,043 ± 0,00
		2,4	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	0,019 ± 0,00
		10	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	0,018 ± 0,00

O número seguido do sinal < indica o limite de determinação do método analítico utilizado.

Quadro 3A, Cont.

Solo	Corretivo	Nível	Tempo (dias)				
			42	49	56	63	70
			----- mg L ⁻¹ -----				
LVA	Testemunha	0,0	0,287 ± 0,04	0,039 ± 0,00	0,097 ± 0,01	0,028 ± 0,00	<0,001
	CaCO ₃	0,6	0,725 ± 0,03	0,857 ± 0,06	0,011 ± 0,00	<0,001	<0,001
		1,2	0,105 ± 0,00	0,104 ± 0,00	0,062 ± 0,00	0,537 ± 0,11	0,061 ± 0,00
		2,4	0,005 ± 0,00	0,117 ± 0,00	<0,001	<0,001	0,384 ± 0,04
		10	0,041 ± 0,00	<0,001	0,009 ± 0,00	0,413 ± 0,34	0,126 ± 0,04
	Escória	0,6	0,422 ± 0,03	0,309 ± 0,00	0,525 ± 0,06	0,003 ± 0,00	<0,001
		1,2	0,035 ± 0,00	0,040 ± 0,00	0,033 ± 0,00	0,035 ± 0,00	0,036 ± 0,00
		2,4	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
		10	<0,001	<0,001	<0,001	0,007 ± 0,00	0,009 ± 0,00
	LA	Testemunha	0,0	0,147 ± 0,01	0,071 ± 0,00	<0,001	<0,001
CaCO ₃		0,6	0,562 ± 0,04	0,476 ± 0,04	<0,001	0,003 ± 0,00	0,113 ± 0,01
		1,2	0,187 ± 0,01	0,171 ± 0,00	0,692 ± 0,08	0,103 ± 0,00	0,234 ± 0,03
		2,4	0,019 ± 0,00	0,004 ± 0,00	0,277 ± 0,04	0,199 ± 0,00	0,304 ± 0,06
		10	0,130 ± 0,00	0,058 ± 0,01	<0,001	<0,001	<0,001
Escória		0,6	0,166 ± 0,01	0,095 ± 0,01	0,039 ± 0,00	<0,001	<0,001
		1,2	0,047 ± 0,01	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
		2,4	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
		10	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001

O número seguido do sinal < indica o limite de determinação do método analítico utilizado.

Quadro 3A – Cont.

Solo	Corretivo	Nível	Tempo (dias)				
			77	84	91	98	105
----- mg L ⁻¹ -----							
LVA	Testemunha	0,0	0,160 ± 0,04	0,176 ± 0,03	0,388 ± 0,38	0,246 ± 0,24	0,115 ± 0,03
	CaCO ₃	0,6	0,537 ± 0,13	0,428 ± 0,04	1,446 ± 1,10	0,384 ± 0,34	0,319 ± 0,30
		1,2	1,451 ± 0,91	0,043 ± 0,03	0,149 ± 0,09	0,058 ± 0,04	0,215 ± 0,13
		2,4	0,019 ± 0,02	0,059 ± 0,08	0,148 ± 0,15	0,020 ± 0,05	<0,001
		10	<0,001	<0,001	0,044 ± 0,07	0,049 ± 0,04	0,200 ± 0,14
	Escória	0,6	0,608 ± 0,52	<0,001	0,350 ± 0,30	0,555 ± 0,30	1,252 ± 0,57
		1,2	0,032 ± 0,14	<0,001	0,024 ± 22,04	0,071 ± 0,06	0,134 ± 0,14
		2,4	0,015 ± 0,02	<0,001	0,333 ± 0,16	<0,001	0,013 ± 0,05
		10	<0,001	<0,001	0,001 ± 0,01	0,020 ± 0,04	0,083 ± 0,11
	LA	Testemunha	0,0	<0,001	<0,001	0,150 ± 0,08	0,021 ± 0,02
CaCO ₃		0,6	0,138 ± 0,06	<0,001	0,125 ± 0,08	<0,001	<0,001
		1,2	0,038 ± 0,02	<0,001	0,040 ± 0,03	<0,001	<0,001
		2,4	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
		10	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	0,005 ± 0,02
Escória		0,6	0,044 ± 0,02	<0,001	0,535 ± 0,51	<0,001	0,113 ± 0,08
		1,2	<0,001	<0,001	0,251 ± 0,25	0,222 ± 0,23	0,048 ± 0,07
		2,4	0,181 ± 0,20	<0,001	0,054 ± 0,04	0,030 ± 0,03	0,002 ± 0,01
		10	<0,001	1,206 ± 1,24	0,008 ± 0,02	0,060 ± 0,08	<0,001

O número seguido do sinal < indica o limite de determinação do método analítico utilizado.

Quadro 4A – Teores de Mn determinados por espectrofotometria de emissão por plasma induzido (ICP-OES), em amostras de lixiviados, ao longo de 105 dias de teste de lixiviação com água. Valores médios (três repetições) ± erro padrão da média

Solo	Corretivo	Nível	Tempo (dias)					
			7	14	21	28	35	
----- mg L ⁻¹ -----								
LVA	Testemunha	0,0	0,460 ± 0,03	0,385 ± 0,01	0,395 ± 0,03	0,020 ± 0,48	0,073 ± 0,12	
	CaCO ₃	0,6	0,064 ± 0,01	<0,0003	<0,0003	0,008 ± 0,00	0,005 ± 0,00	
		1,2	<0,0003	<0,0003	<0,0003	0,005 ± 0,00	<0,0003	
		2,4	<0,0003	<0,0003	<0,0003	0,001 ± 0,00	<0,0003	
		10	<0,0003	<0,0003	<0,0003	0,001 ± 0,00	<0,0003	
	Escória	0,6	1,400 ± 0,22	<0,0003	<0,0003	0,182 ± 0,00	0,052 ± 0,03	
		1,2	<0,0003	<0,0003	<0,0003	0,036 ± 0,00	0,001 ± 0,01	
		2,4	0,025 ± 0,00	<0,0003	<0,0003	0,001 ± 0,00	0,001 ± 0,00	
		10	<0,0003	<0,0003	<0,0003	0,053 ± 0,00	0,004 ± 0,00	
	LA	Testemunha	0,0	<0,0003	<0,0003	<0,0003	0,016 ± 0,00	0,012 ± 0,09
		CaCO ₃	0,6	0,047 ± 0,00	<0,0003	<0,0003	0,051 ± 0,00	0,004 ± 0,01
			1,2	<0,0003	<0,0003	<0,0003	0,002 ± 0,00	0,001 ± 0,01
2,4			<0,0003	<0,0003	<0,0003	<0,0003	0,004 ± 0,00	
10			<0,0003	<0,0003	<0,0003	0,001 ± 0,00	0,002 ± 0,00	
Escória		0,6	0,216 ± 0,02	<0,0003	<0,0003	0,010 ± 0,00	0,004 ± 0,01	
		1,2	<0,0003	<0,0003	<0,0003	0,005 ± 0,00	0,001 ± 0,00	
		2,4	<0,0003	<0,0003	<0,0003	<0,0003	0,025 ± 0,00	
		10	<0,0003	<0,0003	<0,0003	<0,0003	0,003 ± 0,00	

O número seguido do sinal < indica o limite de determinação do método analítico utilizado.

Quadro 4A, Cont.

Solo	Corretivo	Nível	Tempo (dias)					
			42	49	56	63	70	
----- mg L ⁻¹ -----								
LVA	Testemunha	0,0	0,007 ± 0,11	0,011 ± 0,38	0,061 ± 0,43	0,050 ± 0,71	0,080 ± 0,57	
	CaCO ₃	0,6	<0,0003	0,003 ± 0,01	0,001 ± 0,00	0,001 ± 0,01	<0,0003	
		1,2	<0,0003	<0,0003	<0,0003	0,001 ± 0,00	<0,0003	
		2,4	<0,0003	<0,0003	<0,0003	<0,0003	<0,0003	
		10	<0,0003	<0,0003	<0,0003	<0,0003	<0,0003	
	Escória	0,6	0,007 ± 0,02	0,001 ± 0,03	0,001 ± 0,02	<0,0003	0,007 ± 0,01	
		1,2	<0,0003	<0,0003	<0,0003	0,001 ± 0,01	0,001 ± 0,00	
		2,4	<0,0003	<0,0003	<0,0003	<0,0003	<0,0003	
		10	<0,0003	<0,0003	<0,0003	<0,0003	<0,0003	
	LA	Testemunha	0,0	0,011 ± 0,06	<0,0003	<0,0003	0,001 ± 0,02	0,002 ± 0,02
		CaCO ₃	0,6	0,001 ± 0,01	0,002 ± 0,01	<0,0003	0,002 ± 0,01	0,001 ± 0,01
			1,2	<0,0003	<0,0003	<0,0003	0,001 ± 0,00	<0,0003
			2,4	<0,0003	<0,0003	<0,0003	<0,0003	<0,0003
			10	<0,0003	<0,0003	<0,0003	<0,0003	<0,0003
Escória		0,6	0,001 ± 0,01	<0,0003	<0,0003	0,001 ± 0,00	<0,0003	
		1,2	<0,0003	<0,0003	<0,0003	0,001 ± 0,00	<0,0003	
		2,4	<0,0003	<0,0003	<0,0003	0,001 ± 0,00	<0,0003	
		10	<0,0003	<0,0003	<0,0003	<0,0003	<0,0003	

O número seguido do sinal < indica o limite de determinação do método analítico utilizado.

Quadro 4A – Cont.

Solo	Corretivo	Nível	Tempo (dias)				
			77	84	91	98	105
			----- mg L ⁻¹ -----				
LVA	Testemunha	0	<0,0003	<0,0003	<0,0003	<0,0003	<0,0003
	CaCO ₃	0,6	<0,0003	<0,0003	<0,0003	<0,0003	<0,0003
		1,2	<0,0003	<0,0003	<0,0003	<0,0003	<0,0003
		2,4	<0,0003	<0,0003	<0,0003	<0,0003	<0,0003
		10	<0,0003	<0,0003	<0,0003	<0,0003	<0,0003
	Escória	0,6	<0,0003	<0,0003	<0,0003	<0,0003	<0,0003
		1,2	<0,0003	<0,0003	<0,0003	<0,0003	<0,0003
		2,4	<0,0003	<0,0003	<0,0003	<0,0003	<0,0003
		10	<0,0003	<0,0003	<0,0003	<0,0003	<0,0003
	LA	Testemunha	0	<0,0003	<0,0003	<0,0003	<0,0003
CaCO ₃		0,6	<0,0003	<0,0003	<0,0003	<0,0003	<0,0003
		1,2	<0,0003	<0,0003	<0,0003	<0,0003	<0,0003
		2,4	<0,0003	<0,0003	<0,0003	<0,0003	<0,0003
		10	<0,0003	<0,0003	<0,0003	<0,0003	<0,0003
Escória		0,6	<0,0003	<0,0003	<0,0003	<0,0003	<0,0003
		1,2	<0,0003	<0,0003	<0,0003	<0,0003	<0,0003
		2,4	<0,0003	<0,0003	<0,0003	<0,0003	<0,0003
		10	<0,0003	<0,0003	<0,0003	<0,0003	<0,0003

O número seguido do sinal < indica o limite de determinação do método analítico utilizado.

Quadro 5A – Quantidade de corretivo utilizada para neutralizar a acidez dos solos, calculada com base no PN dos corretivos e da acidez potencial dos solos. Valores médios (três repetições)

Solo	Corretivo	CaCO ₃ p.a.	Escória < 1 mm	Escória 2-10 mm
	----- t ha ⁻¹ -----			
LVA ^{1/}		6,05	8,01	10,53
LA ^{2/}		3,22	4,26	5,61

^{1/} Latossolo Vermelho-Amarelo, coletado no município de Viana-ES.

^{2/} Latossolo Amarelo, coletado no município de Nova Almeida-ES.