

MAURO LÚCIO TORRES CORRÊA

**UTILIZAÇÃO DE ESCÓRIA DE ACIARIA COMO CORRETIVO DA ACIDEZ  
DE SOLOS PARA CULTIVOS DE SOJA E CANA-DE-AÇÚCAR E  
AVALIAÇÃO DA CONTAMINAÇÃO AMBIENTAL**

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

VIÇOSA  
MINAS GERAIS – BRASIL  
2006

MAURO LÚCIO TORRES CORRÊA

**UTILIZAÇÃO DE ESCÓRIA DE ACIARIA COMO CORRETIVO DA ACIDEZ  
DE SOLOS PARA CULTIVOS DE SOJA E CANA-DE-AÇÚCAR E  
AVALIAÇÃO DA CONTAMINAÇÃO AMBIENTAL**

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

APROVADA: 27 de março de 2006

---

Prof. Cláudio Pereira Jordão

---

Prof. Maria Eleonora Deschamps  
Pires Carneiro

---

Prof. Renildes Lúcio Ferreira Fontes  
(Conselheiro)

---

Prof. Walter Antônio Pereira Abrahão  
(Conselheiro)

---

Prof. Jaime Wilson Vargas de Mello  
(Orientador)

A meus pais, José Eugênio (in memoriam) e Maria das Mercês.

À minha esposa Abda.

A meus filhos Matheus, André e Luíza.

## **AGRADECIMENTO**

A Deus, por permitir que todas as dificuldades para a execução deste trabalho fossem transpostas.

À Universidade Federal de Viçosa, pela oportunidade de realização deste curso.

À FAPEMIG, à CAPES, à FINEPE e à Cia Siderúrgica de Tubarão, pelo suporte financeiro.

Ao meu pai, José Eugênio Corrêa (in memoriam), pelo exemplo de honestidade, dignidade e perseverança.

À minha mãe, Maria das Mercês Corrêa, pelo incentivo, apoio e presença sempre marcantes.

À minha esposa Abda, pelo incentivo, pela dedicação, paciência e carinho, que foram cruciais para que este trabalho se tornasse realidade.

Aos meus filhos Matheus, André e Luíza, meus grandes incentivadores.

Aos meus irmãos, tios e primos, pelo incentivo e apoio.

Ao professor Jaime Wilson Vargas de Mello, pela orientação, pelo incentivo, pela amizade e ensinamentos, sempre muito oportunos.

Ao professor Antônio Carlos Ribeiro, pelo incentivo, pela amizade e ensinamentos.

À professora Marluci Ribeiro pela amizade e incentivo.

Aos professores Walter Antônio Pereira Abrahão e Renildes Lúcio Ferreira Fontes, pelas críticas, sugestões e ensinamentos.

Aos professores Victor Hugo Alvarez V. e Maurício Paulo Ferreira Fontes, pelos ensinamentos e pela atenção dispensados durante a execução deste trabalho.

Aos professores Cláudio Pereira Jordão e Maria Eleonora Deschamps, pelas críticas e sugestões de grande valia.

Ao professor Márcio H. Pereira Barbosa (DFT/UFV) pelo imprescindível suporte para a condução de grande parte deste trabalho.

Ao técnico Adão Martins (DTA/UFV) pelo auxílio na realização de algumas análises que compuseram este trabalho.

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

A todos os funcionários, técnicos e estagiários do Departamento de Solos/UFV, em especial, a José Francisco Dias, Carlos Fonseca, Carlos Henriques (in memoriam) e Antônio Carlos Alves Pinto, pelo importante suporte na condução deste trabalho, além da amizade.

Aos estagiários Laila, Daniele, David, Márcio e Ígor, pelo imprescindível suporte na condução deste trabalho, além da fácil convivência e amizade.

À secretária de Pós-graduação do DPS/UFV, Luciana, pela presteza e amizade.

A todos os colegas de Pós-graduação, em especial, ao Waldir, Juscimar, Henrique, Salomão, Antônio Augusto, Reginaldo, Regina e Daniela, pelas sugestões, pela amizade e convivência agradáveis.

Aos pastores Marcos e Luciene (Igreja Batista Nacional), pelo carinho, pela atenção e amizade que têm dispensado a mim e à minha família.

A todos os amigos, em especial, a Puri, Zeca do PT, Valério, Escopa, Denílson, aos casais José Geraldo (Zeca) e Cássia Salgado, Sirlene e Luciano Salgado, Ildeu e Mara, Adriane e Adelson Moreira.

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

## **BIOGRAFIA**

MAURO LÚCIO TORRES CORRÊA, filho de José Eugênio Corrêa e Maria das Mercês Corrêa, nasceu em 20 de maio de 1965, na cidade de Viçosa, Minas Gerais, Brasil.

Em novembro de 1991, concluiu o curso de Agronomia pela Universidade Federal de Viçosa (UFV), onde, participou do Programa de Iniciação Científica e atuou como estagiário no Departamento de Solos (UFV).

Em março de 1992, ingressou na empresa agroflorestal Tecnoagro Ltda, sediada em Belo Horizonte, Minas Gerais.

Em outubro de 1992, retornou à Viçosa para a realização do Curso de Aperfeiçoamento/Pesquisa, no Departamento de Solos (UFV).

Em março de 1994, foi admitido pela UFV para exercer o cargo de técnico de laboratório, no Departamento de Biologia Geral. Nesta época, iniciou o Curso de Pós-graduação “Lato Sensu” em Fertilidade e Manejo do Solo, ministrado Pelo DPS/UFV, que foi concluído no mesmo ano.

Exonerou-se do cargo de técnico de laboratório para realizar o Curso de Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas (DPS/UFV), iniciado em outubro de 1996, na UFV, defendendo tese em abril de 2000.

Iniciou o curso de Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas (DPS/UFV) em abril de 2001, cuja tese foi defendida em Março de 2006.

## CONTEÚDO

LISTA DE QUADROS .....	ix
LISTA DE FIGURAS .....	xiv
RESUMO .....	xviii
ABSTRACT .....	xx
1. INTRODUÇÃO GERAL .....	1
1.1. Considerações gerais .....	1
1.2. Objetivos gerais .....	3
1.3. Escopo do trabalho .....	3
1.4. Referências bibliográficas .....	4
2. CARACTERIZAÇÃO, CLASSIFICAÇÃO E AVALIAÇÃO DO POTENCIAL CORRETIVO DA ACIDEZ DE ESCÓRIAS DE ACIARIA DA CIA. SIDERURGICA DE TUBARÃO .....	6
2.1. Introdução .....	6
2.2. Material e métodos .....	9
2.2.1. Solos .....	9
2.2.2. Determinação da composição química das amostras de escórias da CST e calcários comerciais .....	9
2.2.3. Classificação das escórias de aciaria segundo normas da ABNT	10
2.2.4. Avaliação do potencial corretivo da acidez das escórias de aciaria da CST .....	11
2.3. Resultados e discussão .....	13
2.3.1. Composição química das amostras de escórias da CST e	

calcários comerciais .....	13
2.3.2. Classificação das escórias de aciaria segundo a ABNT .....	22
2.3.2.1. Testes de lixiviação .....	22
2.3.2.2. Testes de solubilização .....	23
2.3.3. Avaliação do potencial corretivo da acidez das escórias de aciaria da CST .....	24
2.4. Conclusões .....	31
2.5. Referências bibliográficas .....	31
3. EFEITO DA UTILIZAÇÃO DE ESCÓRIA DE ACIARIA LD, DA CST, NA PRODUÇÃO E CONTAMINAÇÃO DE PLANTAS DE SOJA CULTIVADAS EM CASA-DE-VEGETAÇÃO .....	37
3.1. Introdução .....	37
3.2. Material e métodos .....	39
3.3. Resultados e discussão .....	42
3.3.1. Primeiro cultivo da soja .....	42
3.3.2. Segundo cultivo da soja .....	54
3.4. Conclusões .....	65
3.5. Referências bibliográficas .....	65
4. EFEITO DA UTILIZAÇÃO DE ESCÓRIA DE ACIARIA LD, DA CST, NA CONTAMINAÇÃO DE SOLOS CULTIVADOS COM SOJA EM CASA-DE-VEGETAÇÃO .....	70
4.1. Introdução .....	70
4.2. Material e métodos .....	72
4.3. Resultados e discussão .....	75
4.3.1. Teores totais de metais pesados nos solos .....	75
4.3.2. Teores disponíveis de metais pesados nos solos .....	85
4.4. Conclusões .....	89
4.5. Referências bibliográficas .....	90
5. EFEITO DA UTILIZAÇÃO DA ESCÓRIA DE ACIARIA LD, DA CST, NA PRODUÇÃO E CONTAMINAÇÃO DA CANA-DE-AÇÚCAR CULTIVADA EM CASA-DE-VEGETAÇÃO .....	97
5.1. Introdução .....	97
5.2. Material e métodos .....	98
5.3. Resultados e discussão .....	101
5.3.1. Produção e contaminação das folhas de cana-de-açúcar .....	101

5.3.2. Produção e contaminação dos colmos de cana-de-açúcar .....	108
5.3.3. Produção e contaminação dos caldos de cana-de-açúcar .....	111
5.4. Conclusões .....	119
5.5. Referências bibliográficas .....	119
6. CONTAMINAÇÃO E MOBILIZAÇÃO DE METAIS PESADOS EM SOLOS TRATADOS COM ESCÓRIA DE ACIARIA LD, DA CST, CULTIVADOS COM CANA-DE-AÇÚCAR, EM CASA-DE-VEGETAÇÃO	125
6.1. Introdução .....	125
6.2. Material e métodos .....	128
6.3. Resultados e discussão .....	133
6.3.1. Teores totais de metais pesados nos solos .....	133
6.3.2. Teores disponíveis de metais pesados nos solos .....	142
6.3.3. Contaminação das águas de lixiviação por metais pesados .....	148
6.4. Conclusões .....	156
6.5. Referências bibliográficas .....	157
7. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES GERAIS .....	164

## LISTA DE QUADROS

2.1. Análises químicas das amostras de solos utilizadas no experimento de incubação (média de 3 repetições) .....	12
2.2. Análises físicas das amostras de solos selecionadas utilizadas no experimento de incubação (média de 3 repetições) .....	12
2.3. Análises químicas de amostras de escórias, obtidas a partir dos dois processos de fabricação do aço utilizados na CST, com granulometrias < 1 mm e > 1 mm (média de 3 repetições) .....	14
2.4. Análises químicas, PN, ER, cálculo do PRNT e classificação das amostras de calcário, adquiridas em casas especializadas e junto aos produtores de várias localidades brasileiras (média de 3 repetições) .....	16
2.5. Análises químicas, PN, ER e cálculo do PRNT de amostras compostas de escórias, obtidas a partir dos dois processos de fabricação do aço utilizados na CST .....	18
2.6. Teores de Cr e Ni em fertilizantes, corretivos e esterco animais .....	19
2.7. Teores máximos admissíveis de poluentes no lodo e nos solos que recebem lodo, nos EUA .....	21
2.8. Teores de metais pesados nos extratos obtidos após submeterem-se as escórias A e B ao teste de lixiviação NBR 10.005 da ABNT .....	23

2.9. Teores de metais pesados nos extratos de água deionizada obtidos após submeterem-se as escórias A e B ao teste de solubilização NBR 10.006 da ABNT .....	23
2.10. Análise de variância para pH, Al <sup>3+</sup> , Ca <sup>2+</sup> e Mg <sup>2+</sup> nos solos, após 42 dias de incubação com as escórias A e B e o calcário A .....	25
3.1. Composição físico-química, equivalente de umidade e classe textural dos Latossolos Vermelho-amarelos de Sete Lagoas-MG e João Pinheiro-MG .....	40
3.2. Análises químicas, PN, ER e cálculo do PRNT de amostras compostas de escórias A e B e o calcário .....	41
3.3. Análise de variância para matéria seca (MS), Ca, Mg, Fe, Mn e Ni nos grãos e palhada da soja referentes ao primeiro cultivo nos Latossolos Vermelho-amarelos de Sete Lagoas-MG e João Pinheiro-MG tratados com as escórias A e B e o calcário .....	43
3.4. Análise de variância para matéria seca (MS), Ca, Mg, Fe, Mn e Ni nos grãos e palhada da soja referentes ao segundo cultivo nos Latossolos Vermelho-amarelos de Sete Lagoas-MG e João Pinheiro-MG tratados com as escórias A e B e o calcário .....	55
4.1. Composição físico-química, equivalente de umidade e classe textural dos Latossolos Vermelho-amarelos de Sete Lagoas-MG e João Pinheiro-MG .....	73
4.2. Teores totais e disponíveis de Fe, Mn, Cr, Ni e Cd nos Latossolos Vermelho-amarelos de Sete Lagoas-MG e João Pinheiro-MG .....	74
4.3. Análises químicas, PN, ER e cálculo do PRNT de amostras compostas de escórias LD da CST e calcário utilizados neste ensaio .....	74
4.4. Quantidades de corretivos utilizadas para neutralizar a acidez dos solos, referentes à dose de 1,0 NC nos Latossolos Vermelho-amarelos de Sete Lagoas-MG e João Pinheiro-MG, calculadas segundo as recomendações para a cultura da soja .....	75
4.5. Análise de variância para Fe, Mn, Cr e Ni nos Latossolos Vermelho-amarelos de Sete Lagoas-MG e João Pinheiro-MG tratados com as escórias A e B e um calcário, após ataque total .....	76
4.6. Teores totais de Fe, Mn Cr e Ni nos LVA de Sete Lagoas-MG e João Pinheiro-MG após os cultivos da soja para diferentes doses de escórias e calcário .....	77

4.7. Valores orientadores para contaminação de solos por metais pesados no Estado de São Paulo .....	79
4.8. Teores máximos admissíveis de poluentes no lodo e nos solos que recebem lodo, nos EUA .....	80
4.9. Teores de metais pesados adicionados aos LVA de Sete Lagoas-MG e João Pinheiro-MG, pelas escórias A e B na dose de 1,0 NC ....	81
4.10. Estimativas do número máximo de aplicações, com base no cálculo da contribuição teórica das escórias para se atingir os valores orientadores e os limites de acumulação para contaminação dos solos .....	82
4.11. Análise de variância para teores de Fe e Mn disponíveis nos solos tratados com as escórias A e B e o calcário .....	87
4.12. Classes de interpretação da disponibilidade para Fe e Mn no solo, extraídos por Mehlich-1 .....	87
4.13. Teores de Fe e Mn disponíveis nos solos, para as diferentes doses de calcário e escórias .....	88
5.1. Composição físico-química, equivalente de umidade e classe textural dos Latossolos Vermelho-amarelos de Sete Lagoas-MG e João Pinheiro-MG .....	99
5.2. Análises químicas, PN, ER e cálculo do PRNT de amostras compostas de escórias LD da CST e calcário utilizados neste ensaio	100
5.3. Análise de variância para matéria seca (MS), Ca, Mg, Fe, Mn e Ni nas folhas da cana-de-açúcar cultivada nos LVA de Oratórios-MG e LA de Linhares-ES, tratados com as escórias A e B e o calcário .....	102
5.4. Análise de variância para matéria seca (MS), Ca, Mg, Fe, Mn e Ni nos colmos da cana-de-açúcar cultivada nos LVA de Oratórios-MG e LA de Linhares-ES, tratados com as escórias A e B e o calcário, após extração dos caldos .....	109
5.5. Análise de variância para produção de caldos de cana, Ca, Mg, Fe, Mn e Ni nos caldos da cana-de-açúcar cultivada nos LVA de Oratórios-MG e LA de Linhares-ES, tratados com as escórias A e B e o calcário .....	114
6.1. Composição físico-química, equivalente de umidade e classe textural dos Latossolos Vermelho-amarelos de Sete Lagoas-MG e João Pinheiro-MG .....	130

6.2. Teores totais de Fe, Mn, Cr e Ni nos Latossolos Vermelho-amarelo de Oratórios-MG e Amarelo de Linhares-ES, nas profundidades de 0,20; 40-60; e 80-100 cm .....	131
6.3. Teores disponíveis de Fe, Mn, Cr e Ni nos Latossolos Vermelho-amarelo de Oratórios-MG e Amarelo de Linhares-ES, nas profundidades de 0,20; 40-60; e 80-100 cm .....	131
6.4. Análises químicas, PN, ER e cálculo do PRNT de amostras compostas de escórias LD da CST e o calcário utilizados neste ensaio .....	132
6.5. Quantidades de corretivos utilizadas para neutralizar a acidez dos solos, referentes à dose de 1,0 NC nos Latossolos Vermelho-amarelos de Sete Lagoas-MG e João Pinheiro-MG, calculadas segundo as recomendações para a cultura da cana-de-açúcar .....	132
6.6. Análise de variância para teores totais de Fe, Mn, Cr e Ni nos solos tratados com as escórias e o calcário, na profundidade de 0-20 cm, após o cultivo da cana-de-açúcar .....	134
6.7. Teores totais de Fe, Mn, Cr e Ni nos solos tratados com as escórias e o calcário, na profundidade de 0-20 cm, após o cultivo da cana-de-açúcar .....	135
6.8. Análise de variância para teores totais de Fe, Mn, Cr e Ni nos solos tratados com as escórias e o calcário, na profundidade de 40-60 cm, após o cultivo da cana-de-açúcar .....	136
6.9. Teores totais de Fe, Mn, Cr e Ni nos solos tratados com as escórias e o calcário, na profundidade de 40-60 cm, após o cultivo da cana-de-açúcar .....	137
6.10. Análise de variância para teores totais de Fe, Mn, Cr e Ni nos solos tratados com as escórias e o calcário, na profundidade de 80-100 cm, após o cultivo da cana-de-açúcar .....	138
6.11. Teores totais de Fe, Mn, Cr e Ni nos solos tratados com as escórias e o calcário, na profundidade de 80-100 cm, após o cultivo da cana-de-açúcar .....	139
6.12. Estimativa dos teores de metais pesados adicionados aos solos, pelas escórias na dose recomendada de 1,0 NC .....	139
6.13. Valores orientadores para contaminação de solos por metais pesados no estado de São Paulo .....	140

6.14. Concentrações máximas admissíveis de poluentes no lodo e nos solos que receberam lodo, nos EUA .....	140
6.15. Estimativas do número máximo de aplicações, com base na contribuição teórica das escórias e nos valores orientadores e limites de acumulação para contaminação dos solos .....	140
6.16. Análise de variância para teores disponíveis de Fe, Mn, Cr e Ni nos solos tratados com as escórias e o calcário, na profundidade de 0-20 cm, após o cultivo da cana-de-açúcar .....	143
6.17. Teores disponíveis de Fe e Mn nos solos tratados com as escórias e calcário, na profundidade de 0-20, após o cultivo da cana-de-açúcar	144
6.18. Análise de variância para teores disponíveis de Fe, Mn, Cr e Ni nos solos tratados com as escórias e o calcário, na profundidade de 40-60 cm, após o cultivo da cana-de-açúcar .....	145
6.19. Teores disponíveis de Fe e Mn nos solos tratados com as escórias e o calcário, na profundidade de 40-60 cm, após o cultivo da cana-de-açúcar .....	146
6.20. Análise de variância para teores disponíveis de Fe, Mn, Cr e Ni nos solos tratados com as escórias e o calcário, na profundidade de 80-100 cm, após o cultivo da cana-de-açúcar .....	147
6.21. Teores disponíveis de Fe e Mn nos solos tratados com as escórias e calcário, na profundidade de 80-100 cm, extraídos por Mehlich-3, após o cultivo da cana-de-açúcar .....	148
6.22. Análise de variância para os teores médios de Mn nos extratos lixiviados dos solos tratados com as escórias A e B e o calcário após 510 dias de experimentação .....	152

## LISTA DE FIGURAS

2.1. Modelo esquemático do mecanismo de oxidação do Cr (III) a Cr (VI) na presença de CaO e O <sub>2</sub> .....	19
2.2. Valores de pH das misturas (solos + materiais corretivos), após 42 dias de incubação, em resposta às doses dos corretivos .....	26
2.3. Teores de Al <sup>3+</sup> nas misturas (solos + materiais corretivos), após 42 dias de incubação, em resposta às doses dos corretivos .....	27
2.4. Teores de Ca <sup>2+</sup> nas misturas (solos + materiais corretivos), após 42 dias de incubação, em resposta às doses dos corretivos .....	28
2.5. Teores de Mg <sup>2+</sup> nas misturas (solos + materiais corretivos), após 42 dias de incubação, em resposta às doses dos corretivos .....	30
3.1. Produção de matéria seca (MS) de grãos e palhada de soja referentes ao primeiro cultivo nos Latossolos Vermelho-amarelos (LVA) de Oratórios-MG e João Pinheiro-MG, em resposta às doses dos corretivos .....	45
3.2. Teores de Ca na matéria seca (MS) dos grãos e palhada da soja referentes ao primeiro cultivo, nos Latossolos Vermelho-amarelos (LVA) de Oratórios-MG e João Pinheiro-MG, em resposta às doses dos corretivos .....	47
3.3. Teores de Mg na matéria seca (MS) dos grãos e palhada da soja referentes ao primeiro cultivo, nos Latossolos Vermelho-amarelos (LVA) de Oratórios-MG e João Pinheiro-MG, em resposta às doses dos corretivos .....	48

3.4. Teores de Fe na matéria seca (MS) dos grãos e palhada da soja refentes ao primeiro cultivo, nos Latossolos Vermelho-amarelos (LVA) de Oratórios-MG e João Pinheiro-MG, em resposta às doses dos corretivos .....	50
3.5. Teores de Mn na matéria seca (MS) dos grãos e palhada da soja refentes ao primeiro cultivo, nos Latossolos Vermelho-amarelos (LVA) de Oratórios-MG e João Pinheiro-MG, em resposta às doses dos corretivos .....	51
3.6. Teores de Ni na matéria seca (MS) dos grãos e palhada da soja refentes ao primeiro cultivo, nos Latossolos Vermelho-amarelos (LVA) de Oratórios-MG e João Pinheiro-MG, em resposta às doses dos corretivos .....	53
3.7. Produção de matéria seca (MS) de grãos e palhada de soja referentes ao segundo cultivo nos Latossolos Vermelho-amarelos (LVA) de Oratórios-MG e João Pinheiro-MG, em resposta às doses dos corretivos .....	57
3.8. Teores de Ca na matéria seca (MS) dos grãos e palhada da soja refentes ao primeiro cultivo, nos Latossolos Vermelho-amarelos (LVA) de Oratórios-MG e João Pinheiro-MG, em resposta às doses dos corretivos .....	58
3.9. Teores de Mg na matéria seca (MS) dos grãos e palhada da soja refentes ao primeiro cultivo, nos Latossolos Vermelho-amarelos (LVA) de Oratórios-MG e João Pinheiro-MG, em resposta às doses dos corretivos .....	59
3.10. Teores de Fe na matéria seca (MS) dos grãos e palhada da soja refentes ao primeiro cultivo, nos Latossolos Vermelho-amarelos (LVA) de Oratórios-MG e João Pinheiro-MG, em resposta às doses dos corretivos .....	62
3.11. Teores de Mn na matéria seca (MS) dos grãos e palhada da soja refentes ao primeiro cultivo, nos Latossolos Vermelho-amarelos (LVA) de Oratórios-MG e João Pinheiro-MG, em resposta às doses dos corretivos .....	63

3.12. Teores de Ca na matéria seca (MS) dos grãos e palhada da soja refentes ao primeiro cultivo, nos Latossolos Vermelho-amarelos (LVA) de Oratórios-MG e João Pinheiro-MG, em resposta às doses dos corretivos .....	64
5.1. Produção de matéria seca (MS) e teores de Ca nas folhas de cana-de-açúcar cultivada nos Latossolos Vermelho-amarelo (LVA) de Oratórios-MG e Amarelo (LA) de Linhares-ES, em resposta às doses dos corretivos .....	103
5.2. Teores de Mg e Fe nas folhas de cana-de-açúcar cultivada nos Latossolos Vermelho-amarelo (LVA) de Oratórios-MG e Amarelo (LA) de Linhares-ES, em resposta às doses dos corretivos .....	105
5.3. Teores de Mn e Ni nas folhas de cana-de-açúcar cultivada nos Latossolos Vermelho-amarelo (LVA) de Oratórios-MG e Amarelo (LA) de Linhares-ES, em resposta às doses dos corretivos .....	107
5.4. Produção de matéria seca (MS) e teores de Ca nos colmos de cana-de-açúcar cultivada nos Latossolos Vermelho-amarelo (LVA) de Oratórios-MG e Amarelo (LA) de Linhares-ES, em resposta às doses dos corretivos .....	110
5.5. Teores de Mg e Fe nos colmos de cana-de-açúcar cultivada nos Latossolos Vermelho-amarelo (LVA) de Oratórios-MG e Amarelo (LA) de Linhares-ES, em resposta às doses dos corretivos .....	112
5.6. Teores de Mn e Ni nos colmos de cana-de-açúcar cultivada nos Latossolos Vermelho-amarelo (LVA) de Oratórios-MG e Amarelo (LA) de Linhares-ES, em resposta às doses dos corretivos .....	113
5.7. Produção de matéria seca (MS) e teores de Ca no caldo da cana-de-açúcar cultivada nos Latossolos Vermelho-amarelo (LVA) de Oratórios-MG e Amarelo (LA) de Linhares-ES, em resposta às doses dos corretivos .....	115
5.8. Teores de Mg e Fe no caldo da cana-de-açúcar cultivada nos Latossolos Vermelho-amarelo (LVA) de Oratórios-MG e Amarelo (LA) de Linhares-ES, em resposta às doses dos corretivos .....	117
5.9. Teores de Mn e Ni no caldo da cana-de-açúcar cultivada nos Latossolos Vermelho-amarelo (LVA) de Oratórios-MG e Amarelo (LA) de Linhares-ES, em resposta às doses dos corretivos .....	118

6.1. Valores de pH nos lixiviados coletados na base dos vasos em que se cultivou cana-de-açúcar ao longo de 510 dias no Latossolo Vermelho-amarelo de Oratórios-MG, tratado com as escórias A e B e o calcário .....	150
6.2. Valores de pH nos lixiviados coletados na base dos vasos em que se cultivou cana-de-açúcar ao longo de 510 dias no Latossolo Vermelho-amarelo de Linhares-ES, tratado com as escórias A e B e o calcário .....	151
6.3. Teores de Mn nos lixiviados coletados na base dos vasos em que se cultivou cana-de-açúcar ao longo de 510 dias no Latossolo Vermelho-amarelo de Oratórios-MG, tratado com as escórias A e B e o calcário .....	154
6.4. Teores de Mn nos lixiviados coletados na base dos vasos em que se cultivou cana-de-açúcar ao longo de 510 dias no Latossolo Amarelo de Linhares-ES, tratado com as escórias A e B e o calcário .....	155
6.5. Teores médios de Mn nas soluções lixiviadas dos Latossolos Vermelho-amarelo (LVA) de Oratórios-MG e Amarelo (LA) de Linhares-ES, cultivados com cana-de-açúcar, tratados com doses crescentes das escórias A e B e o calcário .....	156

## RESUMO

CORRÊA, Mauro Lúcio Torres, D.S., Universidade Federal de Viçosa, março de 2006. **Utilização de escória de aciaria como corretivo da acidez de solos para cultivos de soja e cana-de-açúcar e avaliação da contaminação ambiental.** Orientador: Jaime Wilson Vargas de Mello. Conselheiros: Renildes Lúcio Ferreira Fontes e Walter Antônio Pereira Abrahão.

O emprego de escórias de siderurgia como fertilizantes e corretivos da acidez de solos tem se mostrado uma alternativa viável para o aproveitamento desses resíduos na agricultura. Entretanto, é necessário considerar a concentração de metais pesados e outros elementos tóxicos nesses materiais, que podem limitar seu uso. Em vista do exposto, este trabalho teve como objetivo avaliar a utilização de amostras de escórias obtidas a partir do processo de refino do aço do conversor de oxigênio LD (Linz-Donawitz), provenientes da Cia. Siderúrgica de Tubarão (CST), para a correção da acidez de solos a serem cultivados com soja e cana-de-açúcar; bem como avaliar a contaminação das plantas, dos solos e das águas de drenagem. Foram coletadas amostras de calcários e escórias com granulometria inferior a 50 mm, peneiradas (< 1 mm) e analisadas para determinação das concentrações de CaO, MgO e metais pesados. Foram realizados dois cultivos sucessivos de soja, variedade M-Soy 8400, nos quais as doses dos corretivos foram misturadas à camada superficial dos solos (0-20 cm de profundidade). Os cultivos foram realizados em vasos com 30 dm<sup>3</sup> de amostras de Latossolos

Vermelho-amarelos coletadas em Sete Lagoas e João Pinheiro, Minas Gerais. Para o ensaio com cana-de-açúcar, variedade RB855536, 205 dm<sup>3</sup> de Latossolo Vermelho-amarelo, coletado em Oratórios, Minas Gerais, e Latossolo Amarelo, de Linhares, Espírito Santo, foram acondicionados nos vasos, respeitando-se a seqüência de horizontes de cada perfil identificado no campo. Na camada de 0 a 20 cm de profundidade, foram aplicadas as doses de corretivos, duas escórias e um calcário de forma similar ao procedimento utilizado em cultivos de campo. Foram coletadas, periodicamente, as soluções lixiviadas dos vasos cultivados com cana-de-açúcar, que foram analisadas para se determinar as concentrações de metais pesados. A partir dos resultados obtidos pode-se concluir que: as escórias LD, da CST, mostraram-se tecnicamente viáveis para corrigir a acidez e neutralizar o Al trocável dos solos; bem como para fornecer Ca e Mg para as plantas; a eficiência das escórias LD foi ligeiramente inferior à do calcário comercial, em curto prazo; e não se verificou a contaminação expressiva dos solos, plantas e águas de drenagem e plantas em curto e médio prazo pelo uso das escórias LD. Não obstante, recomenda-se que as reaplicações devam ser criteriosamente avaliadas, do ponto de vista ambiental, principalmente em solos arenosos com lençol freático muito próximo à superfície e em solos com elevadas concentrações de Mn e, ou Cr. Recomenda-se, ainda, um rigoroso controle de qualidade quanto às concentrações de metais pesados das escórias LD, especialmente Mn, Cr e Ni.

## ABSTRACT

CORRÊA, Mauro Lúcio Torres, D.S., Universidade Federal de Viçosa, March, 2006. **Use of LD steel slag as correctives of the soils acidity to economically expressive crops and evaluation of the environmental risks.** Adviser: Jaime Wilson Vargas de Mello. Committee members: Renildes Lúcio Ferreira Fontes and Walter Antônio Pereira Abrahão.

The use of steel slags as fertilizers or liming materials in soils has been considered a feasible alternative to the development of such residues in agriculture. Nevertheless, it is necessary to consider the heavy metals and other toxic elements contents in these materials, which can impair its use. The present research aimed to evaluate the use of Blast Oxygen Furnace (BOF) steel slag samples, from Cia. Siderúrgica de Tubarão (CST), to remediate the acidity of soils cropped with soybean and sugarcane, as well as to evaluate the contamination of plants, soils and drained water. Samples of lime and steel slags less than 50 mm grained were collected, sieved (< 1 mm) and analysed to determine the CaO, MgO and heavy metals contents. Two successive crops of soybean, M-Soy 8400 cultivar, were grown with increasing doses of correctives mixed to the surface layer of the soils (0 – 20 cm deep). The plants were cropped in pots containing 30 dm<sup>3</sup> samples of Red-yellow Latosols from Sete Lagoas and João Pinheiro, Minas Gerais. For sugarcane, RB855536 cultivar, the plants were grown in 205 dm<sup>3</sup> pots containing samples of a Red-yellow Latosol, from Oratórios, Minas Gerais, and a Yellow Latosol, from Linhares, Espírito Santo. The soil samples were set in the pots following the natural

sequence of the soil profiles in the field. The steel slags and lime doses were applied to the surface layer (0 – 20 cm) of the soils in a similar way to the crop fields. The solutions leached from the soils cropped with sugarcane were periodically collected at the bottom of the pots and analyzed to determine the heavy metals contents. The results suggest that: the LD steel slags were technically suitable to neutralize soil acidity and exchangeable Al as well as to furnish Ca and Mg to the plants; the efficiency of the steel slags was slightly lower in relation to the lime, in a short term; and it was not verified contamination of soils, plants or drained water by the use of steel slags in a short to medium term. Nevertheless, it is advised that the long term use of steel slags should be wisely evaluated, from an environmental viewpoint, mainly in sandy soils with superficial water table and in soils rich in Mn and or Cr. It is also recommended a strict quality control of the steel slags concerning to heavy metals contents, mainly Mn, Cr and Ni.

## **1. INTRODUÇÃO GERAL**

### **1.1. Considerações gerais**

Os solos ácidos, como os Latossolos, ocupam grande parte do território brasileiro e, para um adequado aproveitamento agrícola destas áreas, a prática da calagem é de fundamental importância, pois promove a neutralização do alumínio tóxico e fornece cálcio e magnésio, elementos exigidos em grandes quantidades pelas plantas. A calagem possibilita a intensa proliferação de raízes e, conseqüentemente, um desenvolvimento satisfatório das plantas. Assim, a correção da acidez dos solos, associada a uma fertilização adequada, é a forma mais eficiente para eliminar as barreiras químicas para o pleno desenvolvimento das raízes e se obter uma maior produção agrícola.

A indústria siderúrgica produz diariamente grandes quantidades de escória (GEYER, 2001; MACHADO, 2000), subproduto da fabricação do aço, que apresenta teores relativamente elevados de CaO e MgO, além de outros nutrientes essenciais às plantas cultivadas. Estas características conferem à escória a capacidade de corrigir a acidez dos solos, bem como fornecer nutrientes às plantas, cujo grau de eficiência depende, evidentemente, de sua composição e granulometria. Nesse particular, o reaproveitamento desses resíduos reveste-se de grande importância, pois pode compatibilizar 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. Associado a isso deve-se ressaltar a possibilidade de redução da

mineração de calcário para fins agrícolas, com conseqüente redução na degradação ambiental, causada pela atividade mineradora. No Brasil são consumidos, atualmente, cerca de 20 milhões de toneladas de calcário por ano na agricultura (MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, 2002). Assim sendo, pelo menos, parte desse calcário pode ser substituído por corretivos alternativos, como a escória de siderurgia.

A escória, até o presente momento, é pouco utilizada na agricultura brasileira; contudo, tem se mostrado uma alternativa viável para uso agrícola (PAVAN e BINGHAN, 1982; RIBEIRO et al., 1986; LOUZADA, 1987; LÓPEZ et al 1989; NOGUEIRA, 1990; AMARAL, 1994; CORRÊA et al., 2003; SILVA, 2003). É amplamente utilizada em países como o Japão, a China, os EUA (PRADO et al., 2001; PRADO e NATALE, 2004) e a Alemanha (MOTZ e GEISELER, 2001). Entretanto, é necessário considerar o teor de metais pesados desses materiais que, em níveis elevados, podem limitar seu uso na agricultura (MENGEL e KIRKBY, 1987; COSTA et al., 1991; ACCIOLY et al., 2000).

A composição química das escórias é influenciada pela técnica de produção do aço, pelo tipo do aço a ser produzido (MACHADO, 2000) e pela qualidade da matéria-prima utilizada (MOTZ e GEISELER, 2001). Em países da Europa, como Alemanha, adota-se um rigoroso controle de qualidade da matéria-prima, bem como tratamentos subseqüentes da escória líquida, além de outros procedimentos para garantir uma qualidade mínima da mesma em função da sua utilização final (MOTZ e GEISELER, 2001).

Para se entender a interação destes resíduos com o solo é necessário o conhecimento das formas e reatividade dos constituintes do solo; a natureza e modo de ação dos agentes mobilizantes dos constituintes das escórias; a forma pela qual os metais presentes nas escórias são transportados no solo, em solução, complexados ou ligados a outros constituintes do solo; e a estabilidade dos compostos dos metais oriundos das escórias em face aos processos de oxiredução, ação microbiana, variações de pH, adsorção e, ou co-precipitação (SHEPPARD e THIBAUT, 1992).

Assim, estudos detalhados sobre a incorporação destes resíduos no solo são de suma importância. Deve-se conhecer não só a sua composição química, mas, também, sua interação com o solo (POMBO e KLAMT, 1986).

## **1.2. Objetivos gerais**

Este trabalho teve como objetivos avaliar a utilização de escória de aciaria, proveniente da Cia Siderúrgica de Tubarão, para a correção da acidez de solos cultivados com soja e cana-de-açúcar; bem como avaliar a possibilidade de contaminação do solo e mananciais d'água e a absorção de metais pesados pelas plantas cultivadas.

## **1.3. Escopo do trabalho**

O presente documento é composto deste e de mais seis capítulos contemplando todos os objetivos propostos:

- ❖ O capítulo 2 apresenta as características químicas das amostras de escórias de siderurgia, oriundas da Cia. Siderúrgica de Tubarão (CST); de calcários, encontrados no mercado brasileiro; e as características físico-químicas das amostras de solos utilizadas neste trabalho. São apresentadas, ainda, a classificação das amostras das escórias supra citadas, quanto ao grau de periculosidade, segundo a ABNT; bem como, o potencial desses resíduos como corretivos da acidez de solos;
- ❖ O capítulo 3 versa sobre o efeito na produção da soja e contaminação das plantas por metais pesados e elementos tóxicos, em função da aplicação das escórias nos solos;
- ❖ O Capítulo 4 trata da contaminação dos solos, por metais pesados e elementos tóxicos presentes nas escórias, cultivados com soja em casa-de-vegetação;
- ❖ O capítulo 5 aborda a o efeito na produção da cana-de-açúcar e contaminação dessas plantas por metais pesados e elementos tóxicos em decorrência da utilização das escórias nos solos;
- ❖ O capítulo 6 versa sobre a contaminação dos solos tratados com as escórias e cultivados com cana-de-açúcar em casa-de-vegetação; além da contaminação das águas de drenagem, por metais pesados e elementos tóxicos contidos nas escórias; e
- ❖ No capítulo 7 são apresentadas as conclusões gerais e as recomendações para a utilização das escórias de aciaria, provenientes da CST, na agricultura.

#### 1.4. Referências bibliográficas

ACCIOLY, A.M.A.; FURTINI NETO, A.E.; MUNIZ, J.A.; FAQUIN, V.; GUEDES, G.A.A. Pó de forno elétrico de siderurgia como fonte de micronutrientes e contaminantes para plantas de milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 35, n. 7, p. 1483-1491, 2000.

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

CORRÊA, M.L.T.; MELLO, J.W.V., SILVA J. Avaliação do Uso Agrícola de Uma Escória de Aciaria como Corretivo da Acidez de Solos. IN: 58º CONGRESSO ANUAL DA ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE METALURGIA E MATERIAIS. 2003. Rio de Janeiro. **Anais...** [CDROM]. / Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais – São Paulo, SP: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais. 2003.

COSTA, L.M.; AMARAL SOBRINHO, N.M.B.; DIAS, L.E.; BARROS, N.F. Application of a steel industry residue to an Oxisol including microbial activity. In: **Trace substances in environmental health conference**, 25. s. l., 1991. Proceeding. p. 245-356. 1991.

GEYER, R.M.T. **Estudo sobre a potencialidade de uso das escórias de aciaria como adição ao concreto**. Porto Alegre, RS: PPGEM/UFRGS, 2001. 190 f. Tese (Doutorado engenharia de minas, metalúrgica e de materiais) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS. 2001.

LÓPEZ, F.A.; FORMOSO, A.; MEDINA, F. Escórias LD. Coproductos de la indústria siderúrgica – I Parte. Composición, tratamiento y aplicaciones. **Revista de Metalurgia**, v. 25, n. 4, p. 247-254, 1989.

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

MACHADO, A.T. **Estudo comparativo dos métodos de ensaios para avaliação da expansibilidade das escórias de aciaria**. São Paulo, SP: USP. 2000. 135 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Construção Civil) – Universidade de São Paulo, Escola Politécnica, São Paulo, SP, 2000.

MENGEL, K.; KIRKBY, E.A. **Principles of plant nutrition**. New York, NY: International potash Institute, 1987. 687 p.

MINISTÉRIO DA AGRICULTURA. **Calcário – produção e consumo aparente – Brasil – 1992 a 2001**. 2002.  
Disponível em: <<http://www.agricultura.gov.br/portal>>. Acesso em: 2 jun. 2004.

MOTZ, H.; GEISELER, J. Products of steel slags an opportunity to save natural resources. **West Management**, v. 21, p. 285-293, 2001.

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

PAVAN, M.A.; BINGHAM, F.T. Toxidez de metais em plantas: II. Caracterização da toxidez do níquel em cafeeiros. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 17, p. 323-328, 1982.

POMBO, L.C.A.; KLAMT, E. Adsorção de zinco e cobre de dois solos do Estado do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, SP, v. 10, p. 191-194, 1986.

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

PRADO, R.M.; NATALE, W. Efeitos da aplicação da escória de siderurgia ferrocromo no solo, no estado nutricional e na produção de matéria seca de mudas de maracujazeiro. **Revista Brasileira de Fruticultura**, Jaboticabal, SP, v. 26, n. 1, p. 140-144, 2004.

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

SILVA, J. **Avaliação do potencial agronômico e de contaminação ambiental decorrente do uso de uma escória de aciaria como corretivo e fertilizante de solos**. Viçosa, MG: UFV, 2003. 134 f. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2003.

SHEPPARD, M.J.; THIBAUT, D.H. Desorption and extraction of selected Heavy Metal from soil. **Soil Science Society American Journal**, New York, NY, n. 56: p 415-423. 1992.

## **2. CARACTERIZAÇÃO, CLASSIFICAÇÃO E AVALIAÇÃO DO POTENCIAL CORRETIVO DA ACIDEZ DE ESCÓRIAS DE ACIARIA DA CIA. SIDERURGICA DE TUBARÃO**

### **2.1. Introdução**

Desde o final do século XIX as escórias de aciaria vêm sendo utilizadas na agricultura (INDUSTRY AND ENVIRONMENT, 1996). Em linhas gerais, no processo siderúrgico, o calcário, o minério de ferro e o coque ou carvão mineral são aquecidos a 1.900 °C, promovendo a redução do ferro e a produção de compostos indesejáveis (material inerte do ferro e carvão), que não foram reduzidos. Estes compostos combinam-se com o Ca e Mg do calcário dando origem às escórias (PEREIRA, 1978). Portanto, a escória apresenta constituintes neutralizantes,  $\text{SiO}_3^{2-}$  e CaO, e bases como Ca e Mg (ALCARDE, 1992; ALCARDE; RODELLA, 2003); além de ferro metálico e outras espécies que aparecem em menor proporção (PAVAN; BINGHAM, 1982; COSTA et al., 1991; LEE; LEE, 1995; FERRAND; EMERY, 1995; ARAUJO, 1997).

Tanto a produção da escória quanto a sua composição dependem de alguns fatores, dentre eles: o processo ou tipo de forno utilizado no beneficiamento do aço – Siemens-Martin Open Hearth, Conversor de Oxigênio LD (Linz-Donawitz) ou BOF (Blast Oxygen Furnace) e Forno de Arco Elétrico – (MONTGOMERY; WANG, 1991; ARAUJO, 1997), o tipo de matéria-prima utilizada, a especificação do aço produzido e o resfriamento do rejeito, dentre outros (GEORGE; SORRENTINO, 1980; ARAUJO, 1997; MACHADO, 2000). A

composição química de uma determinada escória pode também variar, em um mesmo dia de produção, de 30,0 % a 60,0 % para o CaO; de 0,0 % a 35,0 % para o Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; e de 15,0 % a 30,0 % para o SiO<sub>2</sub> (MACHADO, 2000). Os teores de metais pesados e demais impurezas também podem apresentar uma larga amplitude de variação.

A escória de aciaria gerada corresponde a cerca de 12,0 a 16,0 % da produção do aço mundial. No Brasil, para cada tonelada de aço produzido são gerados entre 70 e 170 kg dessa escória e por ano são produzidos mais de 4 milhões de toneladas. Cerca de 44 % da escória é destinada à sub-base de rodovias e 56 % é estocada. Assim, aproximadamente 2,24 milhões de toneladas são estocadas anualmente sem destinação imediata (MACHADO, 2000; CASTELO BRANCO, 2004; PRADO et al., 2002).

O resíduo siderúrgico praticamente não é utilizado no Brasil como insumo agrícola, contrariamente ao que acontece em países como o Japão (PRADO et al., 2001; PRADO; NATALE, 2004). A maioria das pesquisas realizadas com escórias mostra que sua ação neutralizante na acidez do solo assemelha-se à do calcário (PRADO et al., 2002; SILVA, 2003; CORRÊA et al., 2003). Entretanto, o teor de metais pesados e outros elementos tóxicos desses materiais podem restringir sua utilização agrícola (MENGEL; KIRKBY, 1987; LÓPEZ ET AL., 1989; ACCIOLY et al., 2000). Estes metais, se absorvidos em quantidades elevadas pelas plantas podem causar efeitos deletérios à saúde humana e animal (MENGEL; KIRKBY, 1987; COSTA et al., 1991; AMARAL et al., 1996). A dinâmica dos metais pesados no sistema solo-planta é influenciada, não só pelas características dos solos (POMBO; KLAMT, 1986), mas também pelas espécies vegetais e até mesmo pelos cultivares dentro de uma mesma espécie (HERNÁNDEZ et al., 1991).

Em países da Europa, como a Alemanha, adota-se um rigoroso controle de qualidade da matéria-prima, bem como tratamentos subseqüentes da escória líquida, além de outros procedimentos para garantir uma qualidade mínima da mesma em função da sua utilização final (MOTZ; GEISELER, 2001).

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT, 2004) classifica, em função do grau de periculosidade, os resíduos nos estados sólido e semi-sólido, que resultam de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Ficam inclusos nesta definição os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água, aqueles gerados em

equipamentos e instalações de controle de poluição, bem como determinados líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpos d'água, ou exijam para isso soluções técnicas e economicamente inviáveis em face à melhor tecnologia disponível.

A ABNT, por meio da NBR 10004:2004, atribui três classes aos resíduos industriais:

1. **Resíduos classe I – perigosos:** são aqueles que apresentam periculosidade, inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade e, ou patogenicidade, conforme estabelecido na norma mencionada acima.

2. **Resíduos classe II – não perigosos**

❖ **Resíduos classe II A – Não inertes:** são aqueles que não se enquadram nas classificações de *resíduos classe I – perigosos* ou de *resíduos classe II B – inertes*, nos termos dessa norma. Os *resíduos classe II A* podem ter propriedades tais como combustibilidade, biodegradabilidade ou solubilidade em água.

❖ **Resíduos de classe II B – Inertes:** quaisquer resíduos que, quando amostrados de forma representativa, segundo a ABNT NBR 10007:1987 e submetidos a um contato estático ou dinâmico com água destilada ou deionizada, à temperatura ambiente, conforme o teste de solubilização, ABNT NBR 10006:1987, não tiverem nenhum de seus constituintes solubilizados a concentrações superiores aos padrões de potabilidade da água estabelecidos pela ABNT, excetuando-se os padrões de aspecto, cor, turbidez e sabor (ABNT, 2004).

A ABNT (2004), por meio da NBR 10005:2004, fixa os requisitos exigíveis para a obtenção de extrato lixiviados de resíduos sólidos, visando diferenciar os resíduos classificados pela ABNT NBR 10004:2004 como *classe I – perigosos* e *classe II – não perigosos*. Esta norma define a lixiviação como sendo o processo para determinação da capacidade de transferência de substâncias orgânicas e inorgânicas presentes no resíduo sólido, por meio de dissolução no meio extrator.

Em vista do exposto, este trabalho teve como objetivo caracterizar quimicamente, classificar quanto à periculosidade, conforme normas da ABNT (2004), e avaliar o potencial corretivo da acidez de escórias de aciaria LD, provenientes da Cia. Siderúrgica de Tubarão (CST), visando sua utilização na agricultura.

Palavras-chave: escória de siderurgia, corretivo da acidez de solos, metais pesados, elementos tóxicos, meio ambiente.

## **2.2. Material e métodos**

### **2.2.1. Solos**

Foram coletadas e caracterizadas, de acordo com EMBRAPA (1997), amostras de solos de várias localidades dos estados de Minas Gerais e Espírito Santo. Dentre estas, selecionaram-se quatro amostras, coletadas na profundidade de 0 a 20 cm, para a execução do trabalho: amostra 1, Latossolo Amarelo, coletada na usina canavieira LASA no município de Linhares – ES; amostra 2, Latossolo Vermelho-amarelo, coletada no Centro Experimental de Cana-de-açúcar da Universidade Federal de Viçosa no município de Oratórios – MG; amostra 3, Latossolo Vermelho-amarelo, coletada na sede da EMBRAPA Milho-Sorgo, município de Sete Lagoas - MG; e amostra 4, Latossolo Vermelho-amarelo, coletada no município de João Pinheiro - MG. Todas as análises foram realizadas em triplicatas (Quadros 2.1 e 2.2).

### **2.2.2. Determinação da composição química das amostras de escórias da CST e calcários comerciais**

Foram coletadas, periodicamente na CST, dezesseis amostras de escória, com granulometria < 50 mm, provenientes dos dois processos de produção de aço utilizadas pela empresa: Convertedor LD e Lingotamento Contínuo. Estas amostras foram previamente peneiradas e separadas em: < 1 mm e > 1 mm, obtendo-se 16 sub-amostras por tipo de processo de produção do aço, que foram caracterizadas por meio de análises químicas. Foram determinadas as concentrações de CaO e MgO, o poder de neutralização (PN) e a eficiência relativa (ER), para cálculo do poder relativo de neutralização total (PRNT) (EMBRAPA, 1999). As concentrações de Fe, Mn, Cr, Cu, Zn, Ni, Cd e Pb foram determinadas após digestão com os ácidos fluorídrico, sulfúrico e perclórico, conforme descrito por Hossner (1996). Nesta técnica utilizaram-se amostras de 0,2 g de corretivos. Dezesseis amostras de calcários comerciais também foram caracterizadas de forma similar às escórias, sendo selecionada

uma amostra de calcário para utilização posterior em estudos de incubação. Todas as análises foram realizadas em triplicatas.

Em amostras compostas de escórias, obtidas a partir das sub-amostras citadas acima, foram determinados os teores de  $P_2O_5$  total, solúvel em água, ácido cítrico (EMBRAPA, 1999) e extraído por Mehlich-1 (DEFELIPO; RIBEIRO, 1996), além do  $SiO_2$  total após digestão com água régia e ácido fluorídrico, em cadinhos de Teflon<sup>®</sup> fechados, conforme descrito por Hossner (1996), utilizando-se, também, amostras de 0,2 g de corretivos.

### **2.2.3. Classificação das escórias de aciaria segundo normas da ABNT**

Para se avaliar o grau de periculosidade das escórias da CST, foram realizados testes de lixiviação (ABNT NBR 10005:2004) e de solubilização (ABNT NBR 10006:2004) nas amostras compostas das escórias, segundo as normas da ABNT (2004).

Para o teste de lixiviação, determinou-se, inicialmente, o tipo de solução extratora a ser utilizada, em função dos valores de pH das amostras A e B das escórias ( $\varnothing < 1$  mm), conforme descrito na ABNT NBR 10005:2004. A partir daí, utilizou-se, então, uma solução extratora obtida pela diluição de 5,7 mL de ácido acético glacial p.a. por 1.000 mL de água ultrapura, que foi aplicada às amostras na proporção de 1:20 (m/v). Determinaram-se, em triplicatas, nos extratos obtidos, os valores de pH, além dos teores de Cd, Cr total, Cu, Fe, Mn, Ni e Zn por ICP-OES.

Para o teste de solubilização amostras A e B das escórias ( $\varnothing < 1$  mm) foram, previamente, seca a 42 °C em estufa de circulação forçada de ar e exaustão. Amostras representativas das escórias foram adicionadas a erlenmeyers de 1.500 mL nos quais se adicionaram água ultrapura na proporção de 1:4 (m/v). Os recipientes foram fechados com filme de PVC, agitados, à baixa rotação, por 5 min. e submetidos a repouso por 7 dias. Após este período, as suspensões foram devidamente filtradas e determinados, em triplicatas, os valores de pH, além dos teores de Cd, Cr total, Cu, Fe, Mn, Ni e Zn por ICP-OES.

#### **2.2.4. Avaliação do potencial corretivo da acidez das escórias de aciaria da CST**

Foram realizados experimentos de incubação das escórias e calcário com quatro solos ácidos, pertencentes à classe dos Latossolos, segundo o delineamento em blocos casualizados, esquema fatorial (4 x 3 x 4), com três repetições, perfazendo um total de 144 parcelas, sendo:

- ❖ 4 solos;
- ❖ 3 corretivos da acidez (duas amostras compostas de escória na granulometria inferior a 1 mm e, para efeito de comparação, uma amostra de calcário comercial representativa dos calcários encontrados no mercado brasileiro); e
- ❖ 4 doses de corretivos, correspondentes a 0,0; 0,5; 1,0; e 1,5 vezes a necessidade de calagem (NC) calculada para cada amostra de solo.

A necessidade de calagem (NC) de cada solo foi estimada a partir da acidez potencial ( $H + Al$ ), extraída por acetato de Ca  $0,5 \text{ mol L}^{-1}$  a pH 7,0. As doses foram então calculadas com base no PRNT dos corretivos, e misturadas a amostras de  $1,0 \text{ dm}^3$  de cada solo, em sacos plásticos. Posteriormente, as amostras foram incubadas com umidade próxima à capacidade de campo dos solos e, periodicamente (a cada semana), foram determinados os valores de pH,  $Al^{3+}$ , Ca e Mg trocáveis em cada parcela.

Os resultados obtidos foram analisados estatisticamente, por meio de análises de variância e regressões lineares, utilizando-se o software Sistema de Análises Estatísticas e Genéticas (SAEG).

Quadro 2.1. Análises químicas das amostras de solos utilizadas no experimento de incubação (média de 3 repetições)

Amostra	pH (H <sub>2</sub> O)	M.O.	P	K	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Al <sup>3+</sup>	H+Al	SB	(t)	(T)	V	m	P-rem	Zn	Fe	Mn	Cu
		dag kg <sup>-1</sup>	mg dm <sup>-3</sup>		..... cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>							..... %		mg L <sup>-1</sup>		..... mg dm <sup>-3</sup>		
1	5,2	1,59	8,3	113	1,18	0,14	0,61	4,20	1,61	2,22	5,81	27,70	27,49	38,4	5,02	33,7	5,1	2,03
2	4,5	3,36	2,9	61	0,92	0,02	1,46	6,60	1,10	2,56	7,70	14,24	57,12	18,4	8,07	55,2	8,3	6,20
3	5,0	4,13	4,8	70	1,69	0,01	1,49	6,97	1,88	3,37	8,85	21,23	44,23	5,6	12,9	57,8	9,7	2,32
4	5,3	1,31	0,1	39	0,46	0,01	0,37	5,87	0,57	0,94	6,44	8,85	39,37	21,5	8,09	51,2	5,3	1,07

pH em água relação 1:25; M.O.: matéria orgânica, determinada pelo método Walkley & Black (M.O. = 1,724 x Carbono orgânico); P, K, Fe, Zn, Mn e Cu: Extrator Mehlich-1; Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup> e Al<sup>3+</sup>: Extrator KCl 1mol L<sup>-1</sup>; H + Al: Extrator Acetato de Cálcio 0,5 mol L<sup>-1</sup>, pH = 7,0; SB: Soma de Bases; CTC (t): Capacidade de Troca Catiônica Efetiva; CTC (T): Capacidade de Troca Catiônica a pH = 7,0; V: Índice de Saturação por Bases; M: Índice de Saturação por Alumínio; e P-rem: Fósforo Remanescente.

Amostra 1 = Latossolo Amarelo de Linhares-ES; Amostra 2 = Latossolo Vermelho-amarelo de Oratórios-MG; Amostra 3 = Latossolo Vermelho-amarelo de Sete lagoas-MG; e Amostra 4 = Latossolo Vermelho-amarelo de João Pinheiro-MG.

Quadro 2.2. Análises físicas das amostras de solos selecionadas utilizadas no experimento de incubação (média de 3 repetições)

Amostra	Areia Grossa	Areia Fina	Silte	Argila	Equivalente Umidade	Classe Textural
	..... dag kg <sup>-1</sup>				..... kg kg <sup>-1</sup>	
1	79	8	1	12	0,057	Areia-Franca
2	26	10	10	54	0,292	Argila
3	7	3	6	84	0,324	Muito Argilosa
4	25	49	5	21	0,168	Franco-Argilo-Arenosa

Amostra 1 = Latossolo Amarelo de Linhares-ES; Amostra 2 = Latossolo Vermelho-amarelo de Oratórios-MG; Amostra 3 = Latossolo Vermelho-amarelo de Sete lagoas-MG; e Amostra 4 = Latossolo Vermelho-amarelo de João Pinheiro-MG.

## 2.3. Resultados e discussão

### 2.3.1. Composição química das amostras de escórias da CST e calcários comerciais

De acordo com as análises químicas, tanto as escórias (Quadro 2.3) quanto os calcários (Quadro 2.4) satisfazem os requisitos legais para sua comercialização como corretivos da acidez de solos. A legislação brasileira, prevê a utilização de escórias como corretivos da acidez dos solos, estabelecendo limites mínimos de qualidade destes sub-produtos para uso agrícola (PORTARIA SEFIS Nº 01, 1983; BRASIL, 1986; CFSEMG, 1999):  $\text{CaO} + \text{MgO} \geq 30 \text{ dag kg}^{-1}$  e  $\text{PN} \geq 60 \%$ . Para os calcários, os limites mínimos são:  $\text{CaO} + \text{MgO} \geq 38 \text{ dag kg}^{-1}$  e  $\text{PN} \geq 67 \%$ . O valor mínimo de PRNT para os calcários é de 45 %; já para as escórias estes valores ainda não estão definidos na legislação brasileira. Vale ressaltar, que os teores de CaO e MgO foram similares para os dois tipos de escória e entre diferentes granulometrias (Quadro 2.3).

Dentre as amostras de calcário, observou-se uma maior variabilidade nos teores de CaO e MgO. Das amostras de calcário, selecionou-se a amostra A (Quadro 2.4), para compor as demais etapas deste trabalho.

A maior preocupação com relação à utilização das escórias como corretivo foi o teor de cromo (Quadro 2.3), considerado, a princípio, relativamente elevado. Em função dos teores de Cr foram separadas duas amostras compostas, de acordo com o processo de produção do aço (Quadro 2.3). Obteve-se, portanto, uma amostra composta com maior teor de Cr (convertedor LD) e outra amostra composta com menor teor de Cr (lingotamento contínuo) (Quadro 2.5).

A amostra composta, com maior teor de Cr foi então selecionada para as etapas posteriores do trabalho e denominada de “Escória A” (Quadro 2.5). Nesta fase do trabalho optou-se por mais uma coleta de escória proveniente do processo do Convertedor LD, por se tratar de uma escória com maior carga de Cr, conforme já mencionado. Foram coletadas, então, vinte amostras simples, peneiradas e misturadas em quantidades equivalentes para se obter outra amostra composta, denominada de “Escória B”, também utilizada nas etapas posteriores do trabalho (Quadro 2.5). A amostra composta obtida no processo

Quadro 2.3. Análises químicas de amostras de escórias, obtidas a partir dos dois processos de fabricação do aço utilizados na CST, com granulometrias < 1 mm e > 1 mm (média de 3 repetições)

Gran	Processo do Convertedor LD					Processo do Lingotamento Contínuo					
	Am	CaO	MgO	Fe	Mn	Am	CaO	MgO	Fe	Mn	
		..... dag kg <sup>-1</sup> .....							..... dag kg <sup>-1</sup> .....		
< 1 mm	1	44,34	10,44	12,82	2,14	4	42,19	8,09	14,12	1,20	
	2	44,95	11,28	12,28	2,84	6	47,53	8,28	12,69	3,18	
	3	45,87	10,65	14,76	2,37	7	47,28	10,56	14,00	3,42	
	5	42,09	10,02	13,14	3,08	8	38,12	11,12	13,28	2,08	
	9	45,74	8,18	12,29	2,89	11	41,72	8,07	14,21	2,94	
	10	44,87	9,29	11,48	3,75	12	43,99	9,18	15,13	2,07	
	13	47,98	7,14	13,64	2,99	14	42,99	11,43	12,01	3,19	
	16	42,34	8,19	14,76	3,02	15	43,27	12,18	13,13	2,89	
<b>Média ± s<sup>§</sup></b>		<b>44,77 ± 1,92</b>	<b>9,40 ± 1,45</b>	<b>13,15 ± 1,18</b>	<b>2,89 ± 0,48</b>		<b>43,39 ± 3,04</b>	<b>9,86 ± 1,66</b>	<b>13,57 ± 0,99</b>	<b>2,62 ± 0,76</b>	
> 1mm	1	45,09	10,22	14,90	2,87	4	45,12	10,02	14,50	1,03	
	2	46,18	10,34	13,18	2,08	6	41,08	12,20	12,82	3,02	
	3	43,19	11,86	14,24	3,69	7	48,14	10,99	13,26	3,21	
	5	44,76	9,04	13,16	2,23	8	40,89	8,04	14,69	3,70	
	9	41,98	9,14	11,99	3,02	11	44,45	7,18	13,75	3,08	
	10	37,76	8,29	14,89	2,00	12	45,67	9,14	14,13	1,88	
	13	49,13	7,46	13,77	2,08	14	40,09	12,12	15,18	2,43	
	16	44,18	9,58	13,28	2,69	15	47,14	11,82	12,89	2,85	
<b>Média ± s<sup>§</sup></b>		<b>44,03 ± 3,31</b>	<b>9,49 ± 1,35</b>	<b>13,68 ± 0,99</b>	<b>2,58 ± 0,60</b>		<b>44,07 ± 3,04</b>	<b>10,19 ± 1,92</b>	<b>13,90 ± 0,87</b>	<b>2,65 ± 0,85</b>	

Gran = granulometria; Am = amostra; e

<sup>§</sup> Média de 8 amostras ± desvio padrão amostral.

Quadro 2.3, Cont.

Gran	Processo Convertedor LD						Processo Lingotamento Contínuo						
	Am	Cr	Ni	Zn	Cu	Cd	Am	Cr	Ni	Zn	Cu	Cd	
mg kg <sup>-1</sup>						mg kg <sup>-1</sup>							
< 1 mm	1	786,67	15,21	68,20	27,12	2,15	4	327,59	12,05	32,12	20,20	n.d.	
	2	756,12	28,19	63,14	48,56	2,78	6	614,12	44,12	48,87	89,12	4,15	
	3	768,35	29,13	77,19	32,14	2,98	7	487,02	n.d.	79,28	48,18	3,45	
	5	788,75	18,68	82,15	89,15	1,02	8	499,27	89,14	99,12	56,19	5,22	
	9	623,18	23,27	56,17	26,17	3,14	11	302,14	25,12	85,12	32,14	n.d.	
	10	852,24	33,85	59,12	29,18	0,15	12	674,12	18,14	63,14	24,15	n.d.	
	13	674,13	20,12	63,17	29,58	29,58	5,12	14	487,26	n.d.	56,74	16,17	2,25
	16	665,89	12,87	78,14	28,12	28,12	4,58	15	399,10	n.d.	69,48	12,09	n.d.
<b>Média ± s<sup>§</sup></b>		<b>739,42 ± 102,60</b>	<b>22,67 ± 7,29</b>	<b>68,41 ± 9,65</b>	<b>38,75 ± 21,59</b>	<b>2,74 ± 1,66</b>		<b>473,83 ± 129,42</b>	<b>37,71 ± 31,17</b>	<b>66,73 ± 21,32</b>	<b>37,28 ± 26,01</b>	<b>3,77 ± 1,25</b>	
> 1mm	1	752,13	13,12	72,14	22,13	7,14	4	358,12	28,78	68,48	13,25	n.d.	
	2	736,45	7,12	74,12	15,45	7,45	6	485,89	12,15	59,14	9,18	5,14	
	3	998,15	38,45	69,89	12,48	4,87	7	305,14	18,42	68,15	15,14	3,14	
	5	651,35	9,61	68,78	19,42	6,14	8	652,10	4,07	63,12	6,45	8,18	
	9	578,81	13,14	78,14	12,47	3,14	11	428,12	36,56	98,17	11,57	n.d.	
	10	988,08	8,87	82,17	11,57	2,58	12	239,09	26,09	99,09	22,23	2,01	
	13	658,62	13,27	75,14	16,78	16,78	1,89	14	424,89	44,12	101,54	21,09	5,18
	16	525,27	11,16	103,00	13,14	13,14	5,12	15	333,04	22,89	135,12	20,18	5,46
<b>Média ± s<sup>§</sup></b>		<b>736,11 ± 175,17</b>	<b>14,34 ± 10,00</b>	<b>77,92 ± 11,02</b>	<b>15,43 ± 3,78</b>	<b>4,79 ± 2,09</b>		<b>403,30 ± 127,27</b>	<b>24,14 ± 12,87</b>	<b>86,60 ± 26,30</b>	<b>14,89 ± 5,83</b>	<b>4,85 ± 2,13</b>	

Gran = granulometria; Am = amostra; e

<sup>§</sup> Média de 8 amostras ± desvio padrão amostral.

Quadro 2.4. Análises químicas, PN, ER, cálculo do PRNT e classificação das amostras de calcário, adquiridas em casas especializadas e junto aos produtores de várias localidades brasileiras (média de 3 repetições)

Amostra	CaO	MgO	PN	ER	PRNT	Cr	Ni	Zn	Cu	Cd	Classificação
	..... dag kg <sup>-1</sup> .....		..... % .....					..... mg kg <sup>-1</sup> .....			
A	<b>36,84</b>	<b>11,95</b>	<b>83,08</b>	<b>99,28</b>	<b>82,50</b>	<b>6,29</b>	<b>7,12</b>	<b>8,14</b>	<b>6,78</b>	<b>1,07</b>	<b>Magnesiano/Grupo C</b>
B	37,83	14,70	91,43	98,00	89,60	3,18	2,18	6,80	12,45	1,03	Dolomítico/Grupo C
C	42,30	3,20	96,29	97,20	93,60	4,23	3,14	4,17	15,23	n.d.	Calcítico/Grupo D
D	34,00	10,29	96,67	99,00	95,70	7,18	3,29	12,32	8,23	0,08	Magnesiano/Grupo D
E	34,85	4,43	80,06	65,2	52,20	6,12	3,18	3,21	4,02	1,34	Calcítico/Grupo A
F	31,00	12,50	92,01	86,95	79,95	9,18	2,48	3,29	1,08	n.d.	Dolomítico/Grupo C
G	29,20	21,80	101,00	92,77	93,70	4,23	3,02	6,42	7,14	n.d.	Dolomítico/Grupo D
H	29,17	10,18	96,81	93,17	90,20	5,59	3,12	6,19	5,29	n.d.	Magnesiano/Grupo D
I	36,21	12,79	96,00	96,88	93,00	4,22	2,14	7,13	4,56	n.d.	Dolomítico/Grupo D
J	39,17	11,53	99,02	91,20	90,31	4,12	n.d.	6,23	6,65	0,78	Magnesiano/Grupo D
K	36,89	4,85	95,23	93,69	89,22	n.d.	n.d.	3,02	7,48	n.d.	Calcítico Grupo C
L	36,18	15,32	99,18	89,74	89,00	n.d.	n.d.	4,18	3,02	n.d.	Dolomítico/Grupo C
M	38,18	14,36	98,75	90,43	89,31	2,02	n.d.	4,12	7,23	n.d.	Dolomítico/Grupo C
N	28,18	16,00	98,98	96,30	95,32	n.d.	n.d.	5,90	3,45	n.d.	Dolomítico/Grupo D
O	38,14	12,18	98,59	99,58	98,18	n.d.	n.d.	8,02	6,02	n.d.	Filler
P	32,17	8,17	92,84	92,20	85,60	2,12	n.d.	3,34	3,14	n.d.	Magnesiano/Grupo C
<b>Média ± s<sup>§</sup></b>	<b>35,02 ± 4,06</b>	<b>11,52 ± 4,76</b>	<b>94,75 ± 5,84</b>	<b>92,60 ± 8,23</b>	<b>87,96 ± 10,66</b>	<b>4,87 ± 2,10</b>	<b>3,30 ± 1,50</b>	<b>5,78 ± 2,47</b>	<b>6,36 ± 3,56</b>	<b>0,86 ± 0,48</b>	

<sup>§</sup> Média das 16 amostras de calcário ± desvio padrão amostral.

de Lingotamento Contínuo (“Escória C”), não foi utilizada nas demais etapas por ser produzida em menor escala pela empresa e apresentar menor teor de Cr (Quadro 2.5).

Os teores de Cr presentes em todas as amostras de escória provenientes do processo do Convertedor LD são superiores àqueles mencionadas na literatura para calcários, fertilizantes nitrogenados e esterco animais. No entanto, estão dentro da faixa mencionada para fertilizantes fosfatados, potássicos e mistos (Quadros 2.3, 2.4, 2.5 e 2.6). Não obstante, tem-se que os fertilizantes são utilizados em doses bem menores do que os corretivos. Vale ressaltar, que os teores de Cr das amostras de escórias foram, em média, cerca de 150 vezes maiores que os teores desse mesmo elemento encontrados nos calcários comerciais utilizados neste trabalho (Quadros 2.3 e 2.4).

Segundo Klein e Hurlbut Jr (1985), McGrath e Smith (1990), ATSDR (2000) e Outridge e Schuehammer (1993) os processos industriais produzem o metal elementar e o Cr (VI), que é 1.000 vezes mais tóxico que o Cr (III). É importante mencionar que o Cr (VI) não é essencial para os seres humanos, cujos compostos são corrosivos e causam reações alérgicas na pele logo após o contato, independente da dose, que podem resultar na ulceração da pele exposta, perfurações no trato respiratório e irritação do trato gastrointestinal (ROSS et al., 1981; YASSI; NIEBOER, 1988; SHEEHAN et al., 1991; ASTR, 2000). Além disso, os compostos de Cr (VI) são carcinogênicos conhecidos (FRANCHINI et al., 1983; CALDER, 1988; BURKE et al., 1991; IARC, 1998; KIMBROUGH et al., 1999). Para Pillay et al. (2003) o Cr ocorre nas escórias, originalmente na forma trivalente, encerrado na matriz das mesmas, ligado a vários silicatos. O Cr (III) é considerado um micronutriente essencial, necessário para o metabolismo da glicose, das proteínas e da gordura em mamíferos (MERTZ, 1969). No entanto, embora seja um nutriente essencial para animais, doses muito altas podem ser prejudiciais (BERGLUND et al., 1984; GOYER 1996; COHEN; COSTA, 1998; MUKHERJEE, 1998). Mesmo que o Cr (III) se encontre ligado a silicatos na matriz das escórias (PILLAY et al., 2003) a exposição das partículas das mesmas ao oxigênio atmosférico pode promover a oxidação gradual do Cr (III) a Cr (VI) nas partes em contato com o CaO das partículas de escória (KILAU; SHAH, 1984; PILLAY et al., 2003) (Figura 2.1). Barnhart (1997) menciona que a oxidação direta do Cr (VI),

Quadro 2.5. Análises químicas, PN, ER e cálculo do PRNT de amostras compostas de escórias, obtidas a partir dos dois processos de fabricação do aço utilizados na CST

Característica	Escórias de aciaria §		
	..... Convertedor LD .....	Ling. Contínuo	
	A	B	C
CaO (dag kg <sup>-1</sup> ) <sup>1/</sup>	45,53 ± 0,79	42,70 ± 0,21	45,51 ± 0,60
MgO (dag kg <sup>-1</sup> ) <sup>1/</sup>	9,80 ± 0,03	8,21 ± 0,05	9,61 ± 0,36
SiO <sub>2</sub> (dag kg <sup>-1</sup> ) <sup>2/</sup>	12,66 ± 0,24	14,69 ± 0,64	15,65 ± 0,95
MnO <sub>2</sub> (dag kg <sup>-1</sup> ) <sup>3/</sup>	5,27 ± 0,12	4,42 ± 0,08	3,29 ± 0,33
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (dag kg <sup>-1</sup> ) <sup>3/</sup>	21,20 ± 0,02	20,19 ± 0,17	18,71 ± 0,34
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> total (dag kg <sup>-1</sup> ) <sup>3/</sup>	1,78 ± 0,16	2,40 ± 0,21	2,27 ± 0,15
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> solúvel em ác. cítrico (dag kg <sup>-1</sup> ) <sup>3/</sup>	n.d.‡	n.d.	n.d.
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> Mehlich-1 (mg kg <sup>-1</sup> ) <sup>4/</sup>	52,13 ± 2,32	43,78 ± 1,73	50,33 ± 1,44
Cr (mg kg <sup>-1</sup> ) <sup>3/</sup>	745,12 ± 4,34	574,18 ± 5,69	444,12 ± 37,87
Ni (mg kg <sup>-1</sup> ) <sup>3/</sup>	28,58 ± 0,70	26,14 ± 0,41	32,36 ± 1,29
Zn (mg kg <sup>-1</sup> ) <sup>3/</sup>	70,14 ± 0,83	54,16 ± 0,56	68,18 ± 0,34
Cu (mg kg <sup>-1</sup> ) <sup>3/</sup>	34,05 ± 0,69	30,14 ± 0,90	22,13 ± 1,02
Cd (mg kg <sup>-1</sup> ) <sup>3/</sup>	5,98 ± 0,07	4,98 ± 0,07	4,08 ± 0,23
Pb (mg kg <sup>-1</sup> ) <sup>3/</sup>	n.d.	n.d.	n.d.
PN (%) <sup>1/</sup>	90,48 ± 0,54	89,04 ± 0,71	85,11 ± 0,99
ER (%) <sup>1/</sup>	75,23 ± 0,37	80,61 ± 0,53	73,97 ± 0,57
PRNT (%) <sup>1/</sup>	68,07 ± 0,73	71,78 ± 0,11	62,95 ± 0,39

§ Média de 3 repetições ± erro-padrão da média;

<sup>1/</sup> Digestão com os ácidos fluorídrico, sulfúrico e perclórico (HOSSNER, 1996);

<sup>2/</sup> Digestão com água régia e ácido fluorídrico em cadinhos de Teflon<sup>®</sup> fechados (HOSSNER, 1996);

<sup>3/</sup> EMBRAPA (1999);

<sup>4/</sup> Extraído por Mehlich-1 (DEFELIPO; RIBEIRO, 1996); e

‡ Não detectado pela técnica analítica utilizada.

no estado sólido, é muito lenta em condições ambientais. Segundo Pillay et al. (2003), esta taxa de oxidação é inversamente proporcional ao tamanho das partículas, sendo favorecida pela presença de umidade e cálcio. Kilau e Shah (1984) propuseram a seguinte reação para a oxidação do Cr (III):



Em escórias que continham entre 10.000 e 30.000 µg g<sup>-1</sup> de cromo, após um período de exposição à atmosfera, de 6 a 9 meses, verificou-se a presença de Cr VI entre 1.000 e 10.000 µg g<sup>-1</sup>. Esta taxa de oxidação decresce exponencialmente e a reação pode cessar após um período de 12 meses (PILLAY et al., 2003).

Quadro 2.6. Teores de Cr e Ni em fertilizantes, corretivos e esterco animais

	Cr	Ni	Referências
	..... mg kg <sup>-1</sup> .....		
<b>Fertilizantes</b>			Mattigod e Page (1983)
<b>Nitrogenados</b>	Tr – 50	Tr – 80	
<b>Fosfatados</b>	Tr – 1.000	Tr – 300	
<b>Potássicos</b>	Tr – 1.000	Tr – 80	
<b>Mistos</b>	Tr – 900	Tr – 800	
<b>Calcários</b>	Tr – 300	Tr – 130	Caper et al. (1978)
<b>Estercos</b>			
<b>Gado</b>	56	29	Furr et al. (1976)
<b>Suíno</b>	14	---	Arora et al. (1975)
<b>Frango</b>	06	---	Caper et al. (1978)

Tr = traços (baixo nível de detecção).  
 Fonte: ALLOWAY (1990).

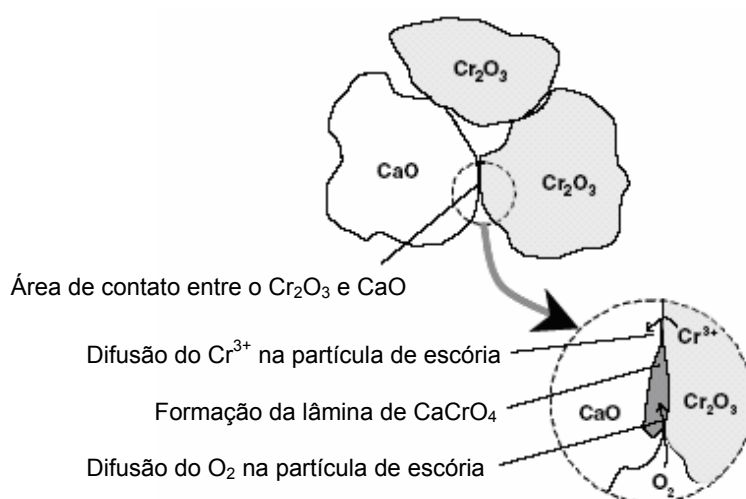


Figura 2.1. Modelo esquemático do mecanismo de oxidação do Cr (III) a Cr (VI) na presença de CaO e O<sub>2</sub>.  
 Fonte: (PILLAY et al., 2003).

Em vista do exposto, é possível inferir que se deve avaliar criteriosamente o potencial de risco do uso das escórias para o meio ambiente e a saúde humana e animal, em relação aos corretivos tradicionais aqui avaliados, no que se refere ao Cr (Quadros 2.3, 2.4 e 2.5).

Apesar dos riscos que os metais pesados apresentam, ainda não estão prescritos na legislação vigente os teores máximos desses em resíduos siderúrgicos. Assim sendo, serão adotados como valores de referência, os

teores máximos desses metais em lodos de esgoto nos EUA (Quadro 2.7). Supõe-se que os lodos de esgoto são materiais menos recalcitrantes quando comparados às escórias e, assim sendo, acredita-se que estes têm a capacidade de liberar os metais pesados e elementos tóxicos, neles contidos, mais rapidamente para o meio ambiente que as escórias. Desta forma, considera-se válido adotar estes valores como referência para as escórias. Partindo-se, então, dessa base de dados, verificou-se que o teor de Cr das escórias A e B equivalem a cerca de 24,8 e 19,1 % do teor máximo admissível para este elemento nos lodos de esgotos dos EUA (Quadros 2.5 e 2.7), respectivamente.

O níquel ocorre na crosta terrestre em um teor médio de  $75 \text{ mg kg}^{-1}$  (CETESB, 2001). O teor de Ni no solo depende muito do material de origem e dos processos pedogenéticos. Por exemplo, solos formados a partir de serpentina podem conter entre 100 e  $7.000 \text{ mg kg}^{-1}$  de Ni. Em ambientes reduzidos, forma sulfetos insolúveis. Em condições aeróbicas e pH's inferiores a 9,0 se complexa com hidróxidos, carbonatos, sulfatos e ligantes orgânicos. Também, pode se aderir reversivelmente a compostos de alumínio e manganês. Segundo McGrath e Smith (1990), há uma significativa correlação entre os teores de níquel e alumínio no solo. A fotólise, volatilização e biotransformação não parecem ser processos significantes para a biodisponibilização do Ni.

Os teores de Ni nas amostras de escórias e calcários avaliados podem ser considerados normais, quando comparadas àqueles mencionados na literatura para fertilizantes, corretivos e esterco animais (Quadros 2.3, 2.5 e 2.6). No entanto, as concentrações deste elemento nas escórias foram superiores àquelas verificadas nos calcários estudados (Quadros 2.3, 2.4 e 2.5). Os teores de Ni nas escórias A e B equivalem, aproximadamente, a 6,8 e 6,2 % do teor máximo admissível para o Ni nos lodos de esgoto dos EUA (Quadros 2.5 e 2.7), não sugerindo, portanto, problemas de contaminação ambiental em curto prazo.

O manganês ocorre na crosta terrestre em uma concentração média de  $950 \text{ mg kg}^{-1}$  (O'NEIL, 1985). Todas as rochas da terra contêm manganês em concentrações geralmente muito superiores aos outros micronutrientes, exceto o ferro (SMITH, 1990). É um elemento traço essencial, recomendável na dosagem de 2 a  $5 \text{ mg dia}^{-1}$  para um indivíduo adulto (ATSDR, 1997).

Quadro 2.7. Teores máximos admissíveis de poluentes no lodo e nos solos que recebem lodo, nos EUA

Poluentes	Teor máximo no lodo	Teor médio	Limites de acumulação no solo	Limites de aplicação anual no solo
	..... mg kg <sup>-1</sup> §	.....	..... kg ha <sup>-1</sup> ‡	.....
<b>Arsênio</b>	75	41	41	2,00
<b>Cádmio</b>	85	39	39	1,90
<b>Cromo</b>	3.000	1.200	3.000	150,00
<b>Cobre</b>	4.300	1.500	1.500	75,00
<b>Chumbo</b>	840	300	300	15,00
<b>Mercúrio</b>	57	17	17	0,85
<b>Molibdênio</b>	75	18	18	0,90
<b>Níquel</b>	420	420	420	21,00
<b>Selênio</b>	100	36	100	5,00
<b>Zinco</b>	7.500	2.800	2.800	140,00

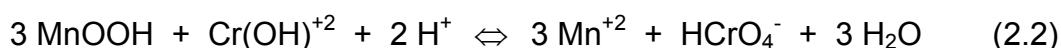
§ Em mg do poluente por kg de lodo (em bases secas); e

‡ Em kg de poluente por ha de solo (em bases secas).

Fonte: USEPA (1993).

No entanto, a exposição humana e animal a níveis altos podem causar problemas graves (DISSANAYAKE; CHANDRAJITH 1999; ATSDR 1997; WENBERG 1991).

Problemas de poluição ambiental envolvendo diretamente o Mn são relativamente pequenos quando comparados a alguns metais pesados (SMITH, 1990). No entanto, o manganês pode desempenhar um papel importante na toxidez de outros metais, dentre eles o cromo, em função das reações de oxirredução envolvendo estes dois elementos. A redução do manganês promove a oxidação do Cr III a Cr VI (OHLWEILER, 1973), que é altamente tóxico, conforme já mencionado:



De acordo com a equação acima (Reação 2.2), 3 mols de Mn têm a capacidade de oxidar 1 mol de Cr. Desta forma, tomando-se como base os valores médios dos teores de Mn e Cr contidos na escória LD (nas duas granulometrias) equivalentes a 2,7 dag kg<sup>-1</sup> e 738 mg kg<sup>-1</sup>, respectivamente (Quadro 2.3), observa-se que 0,043 moles ou 2,339 g ou, ainda, apenas 8,53 % desse Mn seria, teoricamente, suficiente para oxidar todo o Cr presente na

escória, caso este se encontre em formas reduzidas. Assim, existe o risco de oxidação do cromo introduzido no meio ambiente pela utilização das escórias. Como o cromo VI é altamente tóxico e não essencial, deve-se considerar os riscos de utilização destes resíduos, também, devido à presença de Mn, em uma concentração relativamente alta nas escórias (Quadros 2.3 e 2.5).

Os demais elementos encontrados na escória não sugerem, pelo menos de imediato, problemas de contaminação ambiental.

## **2.3.2. Classificação das escórias de aciaria segundo a ABNT**

### **2.3.2.1. Testes de lixiviação**

Dentre os constituintes das escórias, aqueles que conferem periculosidade aos resíduos, listados no Anexo C (normativo), ABNT NBR 10.004 (ABNT, 2004) e no Anexo H, listagem nº 8 da ABNT NBR 10.004 (ABNT, 1987) encontram-se: Cd, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni e Zn.

Apesar de não estarem listados os limites máximos para Cu, Fe, Mn Ni e Zn nos lixiviados, no anexo F (normativo) da ABNT NBR 10.004 (ABNT, 2004) os resultados obtidos (Quadro 2.8) sugerem que as escórias A e B podem ser classificadas como resíduo de classe II – não perigosos. Essa classificação se baseia nos teores desses elementos que foram muito baixos (Quadro 2.8), inferiores ao limite de detecção do ICP-OES, marca Perkin Elmer Optima 3300 DV, utilizado para a determinação desses elementos (Quadro 2.8). Além disso, os testes de lixiviação da USEPA (2003), nos quais se baseia a técnica da ABNT NBR 10.005, apresentam uma lista com quarenta substâncias e elementos tóxicos potencialmente tóxicos. Caso se verifique nos extratos em questão, um ou mais elementos, em concentrações iguais ou superiores aos valores estabelecidos na listagem da USEPA (2003), indica se tratar de resíduos potencialmente tóxicos. O que não foi verificado nos extratos das escórias A e B. O Cu, o Fe, o Mn, o Ni e o Zn não aparecem na listagem de substâncias e elementos potencialmente tóxicos adotada pela USEPA (2003).

Quadro 2.8. Teores de metais pesados nos extratos obtidos após submeterem-se as escórias A e B ao teste de lixiviação NBR 10.005 da ABNT

Escória	pH	Cd	Cr total	Cu	Fe	Mn	Ni	Zn
..... mg L <sup>-1</sup> .....								
A	8,5	< 0,001	< 0,002	< 0,0004	< 0,002	< 0,0004	< 0,005	0,032 ± 0,003
B	8,5	< 0,001	< 0,002	< 0,0004	< 0,002	< 0,0004	< 0,005	0,033 ± 0,003
L. M. ABNT <sup>§</sup>	—	0,5	5,0	—	—	—	—	—
L. M. USEPA <sup>‡</sup>		1,0	5,0	—	—	—	—	—

L. M.: Limite máximo de metais pesados nos extratos de lixiviação;

<sup>§</sup> Anexo F (normativo) da ABNT NBR 10.004 (ABNT, 2004); e

<sup>‡</sup> USEPA (2003).

### 2.3.2.2. Testes de solubilização

A ABNT por meio do anexo H, listagem nº 8 da ABNT NBR 10.004 (ABNT, 1987) e do Anexo G (normativo) da ABNT NBR 10.004 (ABNT, 2004) estabeleceu padrões para o ensaio de solubilização dos resíduos sólidos, que permitiram classificar as escórias A e B como resíduo de classe II B – inertes (Quadro 2.9). Os teores de Cd, Cr total, Cu, Fe, Mn e Ni nos extratos foram inferiores aos limites de detecção do ICP-OES, marca Perkin Elmer Optima 3300 DV, que coincidiu com os limites de determinação da técnica utilizada; pois as análises foram realizadas diretamente nos extratos obtidos.

Quadro 2.9. Teores de metais pesados nos extratos de água deionizada obtidos após submeterem-se as escórias A e B ao teste de solubilização NBR 10.006 da ABNT

Escória	pH	Cd	Cr total	Cu	Fe	Mn	Ni	Zn
..... mg L <sup>-1</sup> .....								
A	11,8	< 0,001	< 0,002	< 0,0004	< 0,002	< 0,0004	< 0,005	0,024 ± 0,002
B	11,9	< 0,001	< 0,002	< 0,0004	< 0,002	< 0,0004	< 0,005	0,024 ± 0,003
Lim. Máx	—	0,005 <sup>§</sup>	0,05 <sup>§</sup>	2,0 <sup>§</sup>	0,3 <sup>§</sup>	0,1 <sup>§</sup>	0,03 <sup>‡</sup>	5,0 <sup>§</sup>

<sup>§</sup> Anexo G (normativo) da ABNT NBR 10.004 (ABNT, 2004); e

<sup>‡</sup> Anexo H, listagem nº 8 da ABNT NBR 10.004 (ABNT, 1987).

### 2.3.3. Avaliação do potencial corretivo da acidez das escórias de aciaria da CST

Dentre as diversas características do solo avaliaram-se a acidez ativa e o alumínio, o cálcio e o magnésio trocáveis, após 42 dias de incubação (Quadro 2.10 e Figuras 2.2, 2.3, 2.4, e 2.5).

Em todos os solos estudados a dose de 1,0 NC foi suficiente para elevar o pH acima de 6,0. Segundo CFSEMG (1999), uma faixa de pH adequado (bom) para a maioria das culturas, varia de 5,5 a 6,0, assim, a dose dos corretivos equivalente a 1,0 NC foi suficiente para elevar o pH acima da faixa considerada adequada para as culturas (Figura 2.2).

O alumínio trocável apresentou-se em níveis muito baixos (CFSEMG, 1999) para o Latossolo Amarelo de Linhares-ES e para os Latossolos Vermelho-amarelos de Oratórios-MG e João Pinheiro-MG (Figuras 2.3a, 2.3d) na dose de 1,0 NC. Para o Latossolo Vermelho-amarelo de Sete Lagoas-MG, o alumínio trocável encontrou-se abaixo de  $0,4 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$  na dose de 1,0 NC, o que é considerado baixo (CFSEMG, 1999), não oferecendo restrições para um bom desenvolvimento radicular, nem problemas de fitotoxidez (Figura 2.3c). Nesse solo, o calcário foi mais eficiente para reduzir o alumínio trocável, notadamente na dose equivalente a 1,0 NC (Figura 2.3). Para todos os solos e corretivos, a dose de 1,5 NC reduziu o  $\text{Al}^{3+}$  a níveis próximos de zero (Figura 2.3).

Os teores de cálcio trocável foram classificados como bons (CFSEMG, 1999), já na dose de 0,5 NC para todos os corretivos e em todos os solos estudados (Figura 2.4). Na dose de 1,0 NC apresentou-se como muito bom (CFSEMG, 1999) para o Latossolo Vermelho-amarelo de Sete Lagoas-MG (Figura 2.4c).

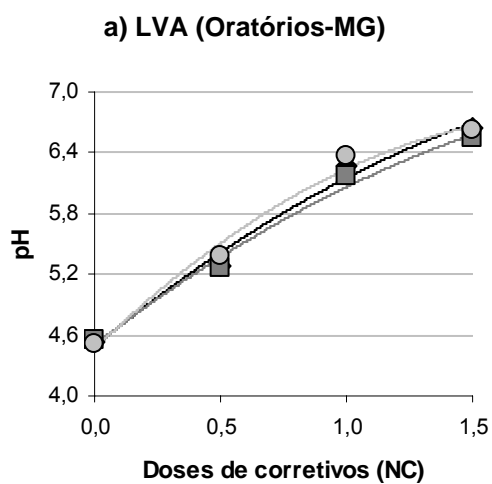
Os teores de magnésio trocável foram classificados como médios (CFSEMG, 1999) para todos os corretivos, quando a dose foi de 0,5 NC, aplicados ao LVA de Oratórios-MG e bons superando o nível crítico ( $0,9 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ ) para este elemento (CFSEMG, 1999) para todos os corretivos, quando a dose aplicada foi de 1,0 NC (Figura 2.5a). Quando os corretivos foram aplicados no LA de Linhares-ES na dose de 0,5 NC, os teores de Mg (Figura 2.5b) foram classificados como baixos para as escórias e bom para o calcário A (CFSEMG, 1999). Na dose de 1,0 NC, para este solo, os teores de Mg foram

Quadro 2.10. Análise de variância para pH, Al<sup>3+</sup>, Ca<sup>2+</sup> e Mg<sup>2+</sup> nos solos, após 42 dias de incubação com as escórias A e B e o calcário A

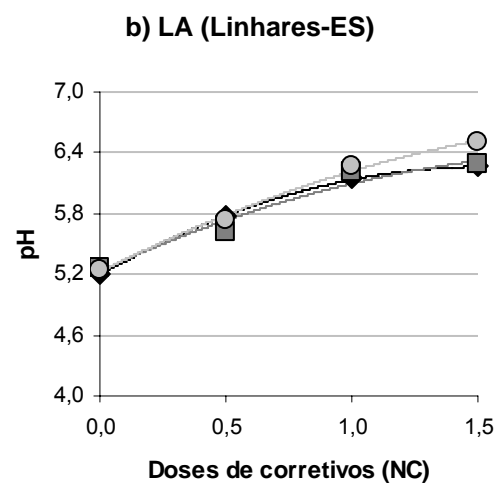
F.V.	G.L.	Q.M.			
		pH	Al <sup>3+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>
Solo (S)	3	0,4060179**	0,9906647**	11,7886200**	0,5379105**
Corretivo (C)	2	0,0935601**	0,0350196**	3,0517620**	0,0403876 <sup>n.s.</sup>
Dose (D)	3	16,7072700**	6,5270250**	128,0232000**	14,6618100**
D x C	6	0,0242640*	0,0197996**	0,5882009**	0,0670680**
D x S	9	0,4318008**	0,6500874**	1,8151690**	0,2457153**
C x S	6	0,0089194 <sup>n.s.</sup>	0,0033348**	0,2827022**	0,0072931 <sup>n.s.</sup>
D x C x S	18	0,0064880 <sup>n.s.</sup>	0,0045944**	0,2070316**	0,0199767 <sup>n.s.</sup>
S/C = Esc. A x D = 0,0 NC	3	0,3358670**	0,9879784**	0,7992536**	0,0149764 <sup>n.s.</sup>
S/C = Esc. A x D = 0,5 NC	3	0,2160666**	0,0173972**	0,5079015**	0,1867196**
S/C = Esc. A x D = 1,0 NC	3	0,0155639 <sup>n.s.</sup>	0,0252064**	2,4545670**	0,2188340**
S/C = Esc. A x D = 1,5 NC	3	0,0900999**	0,0000001 <sup>n.s.</sup>	1,6808280**	0,0545917 <sup>n.s.</sup>
S/C = Esc. B x D = 0,0 NC	3	0,3754891**	0,9235935**	0,8515769**	0,0154592 <sup>n.s.</sup>
S/C = Esc. B x D = 0,5 NC	3	0,1592668**	0,0043366**	0,3237974**	0,2342367**
S/C = Esc. B x D = 1,0 NC	3	0,0074306 <sup>n.s.</sup>	0,3753158**	0,7472346**	0,1949612**
S/C = Esc. B x D = 1,5 NC	3	0,0622444**	0,0000324 <sup>n.s.</sup>	2,4729350**	0,1017358**
S/C = Cal. A x D = 0,0 NC	3	0,4009116**	0,9612868**	0,7669659**	0,0083694 <sup>n.s.</sup>
S/C = Cal. A x D = 0,5 NC	3	0,1296972**	0,0174656**	0,0907338 <sup>n.s.</sup>	0,0301236 <sup>n.s.</sup>
S/C = Cal. A x D = 1,0 NC	3	0,0055222 <sup>n.s.</sup>	0,0003265 <sup>n.s.</sup>	3,0954470**	0,3081112**
S/C = Cal. A x D = 1,5 NC	3	0,0141889 <sup>n.s.</sup>	0,0000488 <sup>n.s.</sup>	5,5418890**	0,0448622 <sup>n.s.</sup>
C/S1 e D = 0,0 NC	2	0,0010111 <sup>n.s.</sup>	0,0002652 <sup>n.s.</sup>	0,0005013 <sup>n.s.</sup>	0,0001156 <sup>n.s.</sup>
C/S1 e D = 0,5 NC	2	0,0127444 <sup>n.s.</sup>	0,0171443**	0,3913689**	0,0064100 <sup>n.s.</sup>
C/S1 e D = 1,0 NC	2	0,0227078 <sup>n.s.</sup>	0,0004413 <sup>n.s.</sup>	1,1379850**	0,0471542 <sup>n.s.</sup>
C/S1 e D = 1,5 NC	2	0,0097001 <sup>n.s.</sup>	0,0000100 <sup>n.s.</sup>	0,2493657**	0,0228335 <sup>n.s.</sup>
C/S2 e D = 0,0 NC	2	0,0037444 <sup>n.s.</sup>	0,0008781 <sup>n.s.</sup>	0,0030208 <sup>n.s.</sup>	0,0009135 <sup>n.s.</sup>
C/S2 e D = 0,5 NC	2	0,0172445 <sup>n.s.</sup>	0,0192986**	0,0996832 <sup>n.s.</sup>	0,0391646 <sup>n.s.</sup>
C/S2 e D = 1,0 NC	2	0,0126777 <sup>n.s.</sup>	0,0001209 <sup>n.s.</sup>	0,1493578*	0,1001749*
C/S2 e D = 1,5 NC	2	0,0540777**	0,0000428 <sup>n.s.</sup>	0,0126594 <sup>n.s.</sup>	0,0407888 <sup>n.s.</sup>
C/S3 e D = 0,0 NC	2	0,0220779 <sup>n.s.</sup>	0,0005883 <sup>n.s.</sup>	0,0023486 <sup>n.s.</sup>	0,0000022 <sup>n.s.</sup>
C/S3 e D = 0,5 NC	2	0,0155112 <sup>n.s.</sup>	0,0227164**	0,1835005*	0,0300850 <sup>n.s.</sup>
C/S3 e D = 1,0 NC	2	0,0236334 <sup>n.s.</sup>	0,4541911**	1,3821770**	0,0196345 <sup>n.s.</sup>
C/S3 e D = 1,5 NC	2	0,0035111 <sup>n.s.</sup>	0,0000006 <sup>n.s.</sup>	2,3081380**	0,0460368 <sup>n.s.</sup>
C/S4 e D = 0,0 NC	2	0,0019111 <sup>n.s.</sup>	0,0000279 <sup>n.s.</sup>	0,0000043 <sup>n.s.</sup>	0,0000010 <sup>n.s.</sup>
C/S4 e D = 0,5 NC	2	0,0034777 <sup>n.s.</sup>	0,0386734**	0,3057332**	0,0517065 <sup>n.s.</sup>
C/S4 e D = 1,0 NC	2	0,0337001*	0,0001408 <sup>n.s.</sup>	0,2660323**	0,0377252 <sup>n.s.</sup>
C/S4 e D = 1,5 NC	2	0,0093777 <sup>n.s.</sup>	0,0000012 <sup>n.s.</sup>	1,0173030**	0,0005149 <sup>n.s.</sup>
Resíduo	96	0,0098518	0,0008442	0,0408471	0,0212548
C.V. (%)		1,7088	7,5285	6,1622	18,6900

Esc A = escória A; Esc. B = escória B; Cal. A = calcário A; S1 = Latossolo Vermelho-amarelo de Oratórios-MG; S2 = Latossolo Amarelo de Linhares-ES, S3 = Latossolo Vermelho-amarelo de Sete Lagoas-MG; S4 = Latossolo Vermelho-amarelo de João Pinheiro-MG, NC = necessidade de calagem (CFSEMG, 1999).

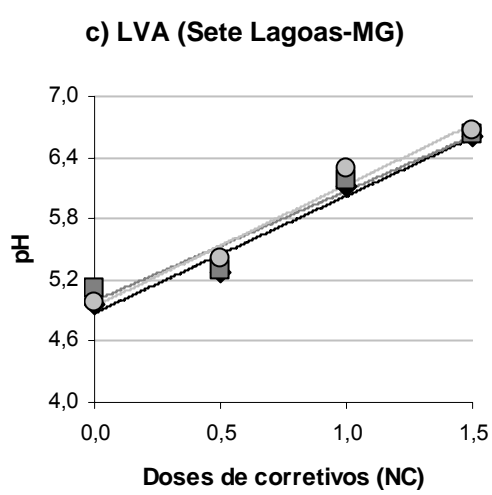
<sup>n.s.</sup>; \*\*, \* coeficientes não-significativos; significativos a 1; e 5 %, respectivamente.



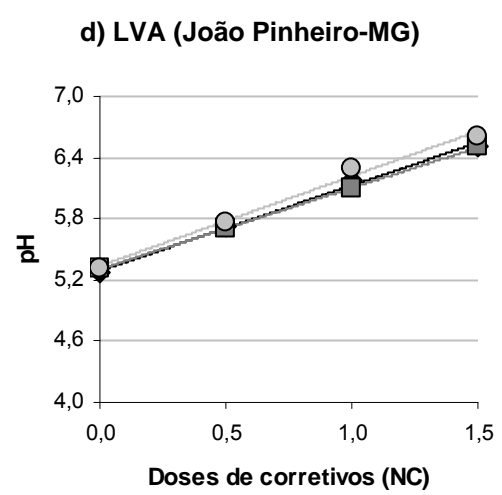
◆  $\hat{Y} = 4,4848 + 2,0563^{***}X - 0,3900^{***}X^2$   $R^2 = 0,9874$   
 ■  $\hat{Y} = 4,5042 + 1,9083^{***}X - 0,3500^{***}X^2$   $R^2 = 0,9875$   
 ○  $\hat{Y} = 4,4638 + 2,4010^{***}X - 0,6233^{***}X^2$   $R^2 = 0,9870$



◆  $\hat{Y} = 5,1970 + 1,3907^{***}X - 0,4533^{***}X^2$   $R^2 = 0,9870$   
 ■  $\hat{Y} = 5,2332 + 1,1397^{***}X - 0,2767^{***}X^2$   $R^2 = 0,9614$   
 ○  $\hat{Y} = 5,2248 + 1,2497^{***}X - 0,2567^{***}X^2$   $R^2 = 0,9929$



◆  $\hat{Y} = 4,8770 + 1,1473^{***}X$   $R^2 = 0,9723$   
 ■  $\hat{Y} = 4,9957 + 1,0780^{***}X$   $R^2 = 0,9442$   
 ○  $\hat{Y} = 4,9417 + 1,1900^{***}X$   $R^2 = 0,9748$

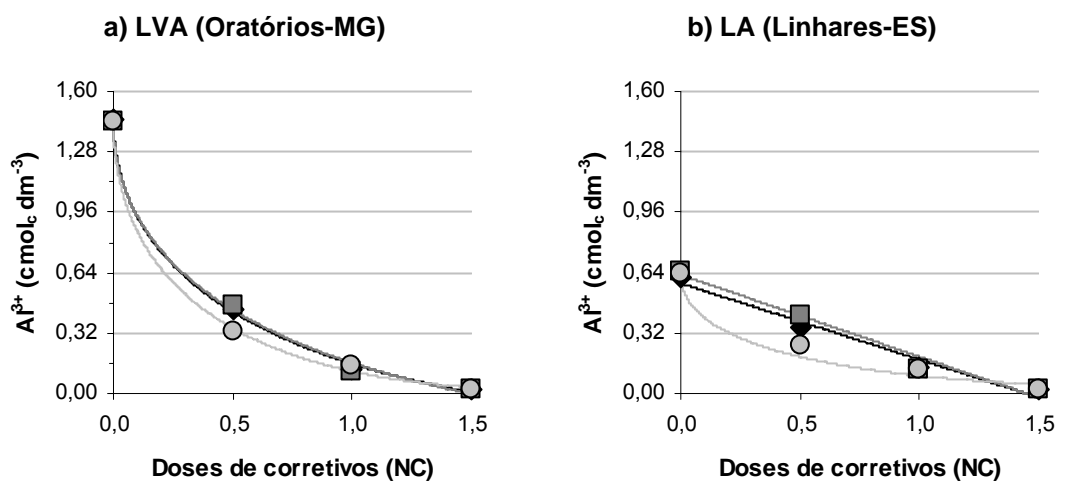


◆  $\hat{Y} = 5,2900 + 0,8367^{***}X$   $R^2 = 0,9952$   
 ■  $\hat{Y} = 5,3073 + 0,7947^{***}X$   $R^2 = 0,9998$   
 ○  $\hat{Y} = 5,3383 + 0,8800^{***}X$   $R^2 = 0,9889$

◆ Escória A      ■ Escória B      ○ Calcário A

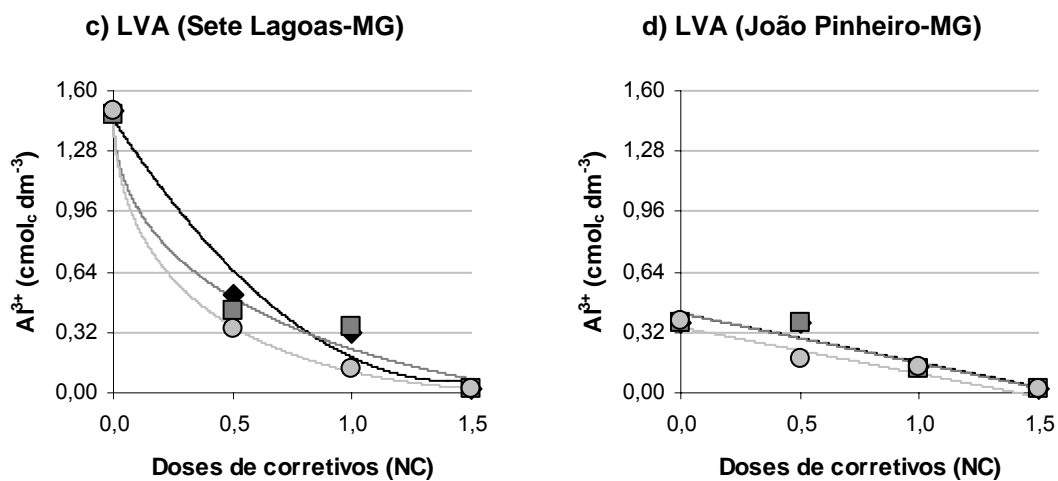
\*\*\* coeficientes significativos a 0,1 % de probabilidade.

Figura 2.2. Valores de pH das misturas (solos + materiais corretivos), após 42 dias de incubação, em resposta às doses dos corretivos.



◆  $\hat{Y} = 1,4585 - 1,8149^{***}\sqrt{X} + 0,5139^{**}X$   $R^2 = 0,9992$   
 ■  $\hat{Y} = 1,4409 - 1,7303^{***}\sqrt{X} + 0,4506^*X$   $R^2 = 0,9980$   
 ○  $\hat{Y} = 1,4434 - 2,1019^{***}\sqrt{X} + 0,7758^{***}X$   $R^2 = 0,9990$

◆  $\hat{Y} = 0,5825 - 0,4028^{***}X$   $R^2 = 0,9735$   
 ■  $\hat{Y} = 0,6289 - 0,4343^{***}X$   $R^2 = 0,9683$   
 ○  $\hat{Y} = 0,6269 - 0,8041^{***}X + 0,2706^*X^2$   $R^2 = 0,9861$



◆  $\hat{Y} = 1,4466 - 1,9297^{***}X + 0,6712^{***}X^2$   $R^2 = 0,9685$   
 ■  $\hat{Y} = 1,4614 - 1,6552^{***}\sqrt{X} + 0,4253^*X$   $R^2 = 0,9817$   
 ○  $\hat{Y} = 1,4965 - 2,1903^{***}\sqrt{X} + 0,8056^{***}X$   $R^2 = 0,9999$

◆  $\hat{Y} = 0,4205 - 0,2596^{***}X$   $R^2 = 0,8980$   
 ■  $\hat{Y} = 0,4225 - 0,2639^{***}X$   $R^2 = 0,8930$   
 ○  $\hat{Y} = 0,3468 - 0,2456^{***}X$   $R^2 = 0,9312$

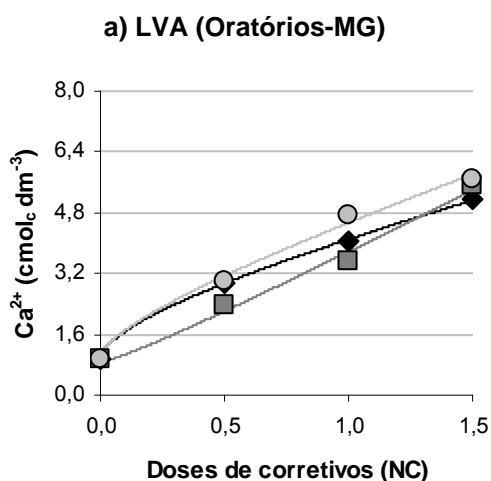
◆ Escória A

■ Escória B

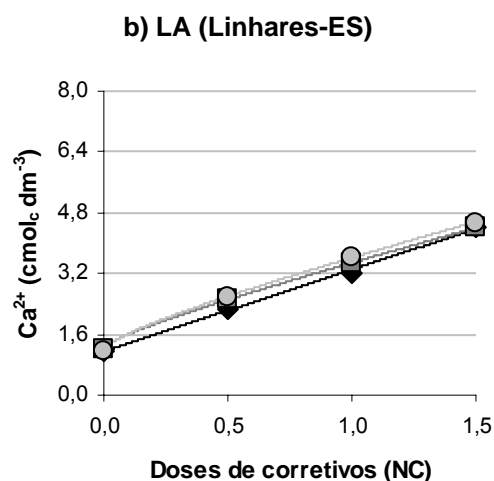
○ Calcário A

\*, \*\*, e \*\*\* coeficientes significativos a 5; 1; e 0,1 % de probabilidade, respectivamente.

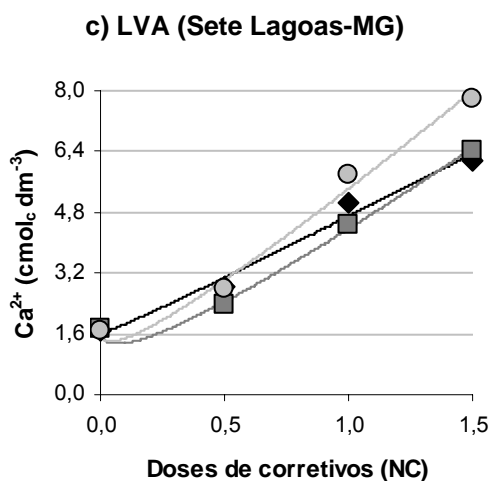
Figura 2.3. Teores de  $Al^{3+}$  nas misturas (solos + materiais corretivos), após 42 dias de incubação, em resposta às doses dos corretivos.



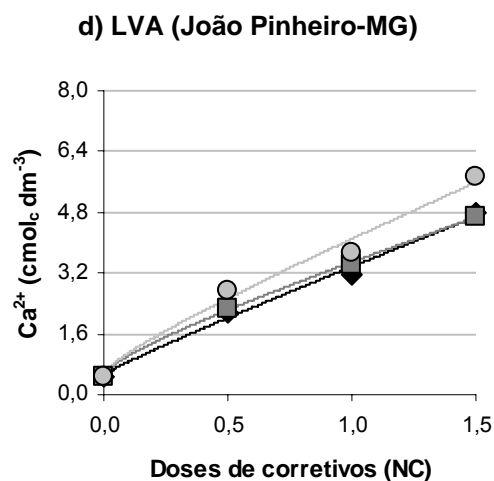
◆  $\hat{Y} = 0,9255 + 2,0599^{***} \sqrt{X} + 1,1187^{***} X \quad R^2 = 0,9999$   
 ■  $\hat{Y} = 0,9568 - 0,7641^{**} \sqrt{X} + 3,5800^{***} X \quad R^2 = 0,9917$   
 ○  $\hat{Y} = 0,9323 + 1,9315^{***} \sqrt{X} + 1,6754^{***} X \quad R^2 = 0,9940$



◆  $\hat{Y} = 1,1522 + 2,1517^{***} X \quad R^2 = 0,9974$   
 ■  $\hat{Y} = 1,2148 + 0,7728^{**} \sqrt{X} + 1,4964^{***} X \quad R^2 = 0,9998$   
 ○  $\hat{Y} = 1,1464 + 1,0494^{***} \sqrt{X} + 1,4206^{***} X \quad R^2 = 0,9996$



◆  $\hat{Y} = 1,6657 - 0,4872^* \sqrt{X} + 3,5187^{***} X \quad R^2 = 0,9822$   
 ■  $\hat{Y} = 1,7241 - 2,8957^{***} \sqrt{X} + 5,5391^{***} X \quad R^2 = 0,9991$   
 ○  $\hat{Y} = 1,6462 - 2,4845^{***} \sqrt{X} + 6,2590^{***} X \quad R^2 = 0,9896$



◆  $\hat{Y} = 0,4733 + 0,4852^{***} \sqrt{X} + 2,4096^{***} X \quad R^2 = 0,9919$   
 ■  $\hat{Y} = 0,4616 + 1,2156^{***} \sqrt{X} + 1,8129^{***} X \quad R^2 = 0,9988$   
 ○  $\hat{Y} = 0,4816 + 1,1901^{***} \sqrt{X} + 2,4308^{***} X \quad R^2 = 0,9855$

◆ Escória A

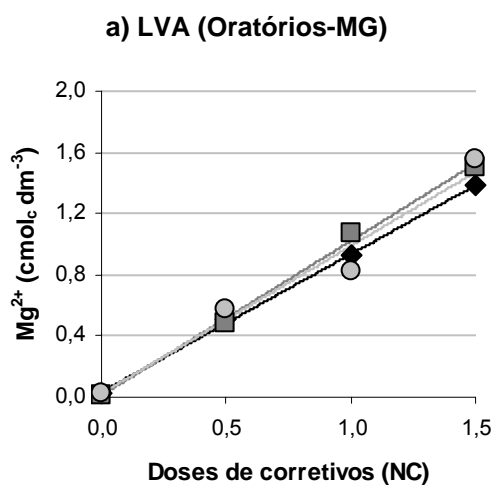
■ Escória B

○ Calcário A

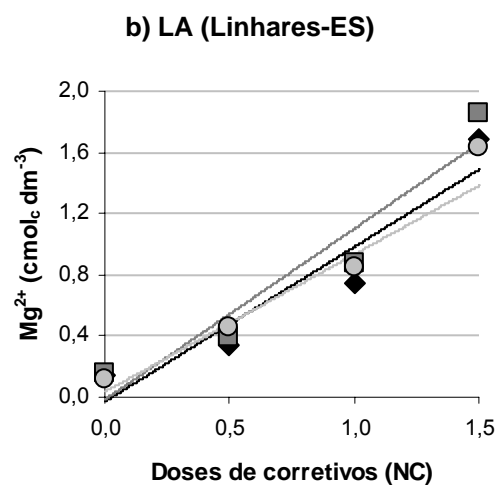
\*, \*\*, e \*\*\* coeficientes significativos a 5; 1; e 0,1 % de probabilidade, respectivamente.

Figura 2.4. Teores de  $Ca^{2+}$  nas misturas (solos + materiais corretivos), após 42 dias de incubação, em resposta às doses dos corretivos.

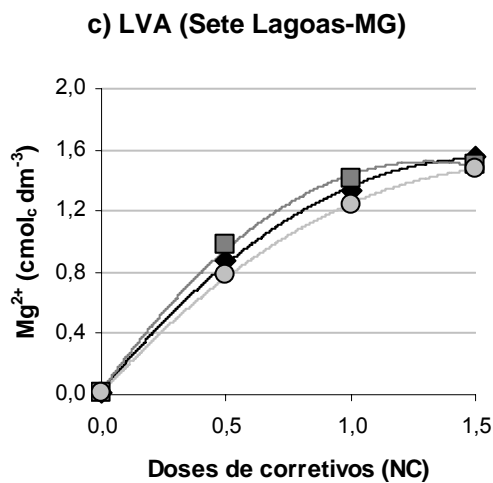
classificados como médios para todos os corretivos (Figura 2.5b). Para o LVA de Sete Lagoas-MG, na dose de 0,5 NC apenas a escória B forneceu um teor médio de  $Mg^{2+}$ . Já, na dose de 1,0 NC o nível crítico para este elemento foi superado nos tratamentos com todos os corretivos (Figura 2.5c). Os teores de  $Mg^{2+}$  foram classificados como médios para todos os corretivos aplicados ao LVA de João Pinheiro-MG e superaram o nível crítico, apenas na dose superior a 1,0 NC (Figura 2.5d).



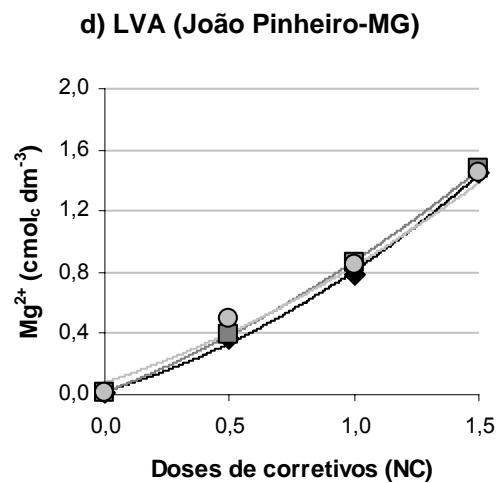
◆  $\hat{Y} = 0,0337 + 0,9008^{***}X$   $R^2 = 0,9991$   
 ■  $\hat{Y} = 0,0110 + 1,0105^{***}X$   $R^2 = 0,9972$   
 ○  $\hat{Y} = 0,0247 + 0,9639^{***}X$   $R^2 = 0,9664$



◆  $\hat{Y} = -0,0290 + 1,0103^{***}X$   $R^2 = 0,8971$   
 ■  $\hat{Y} = -0,0161 + 1,1167^{***}X$   $R^2 = 0,9154$   
 ○  $\hat{Y} = 0,0346 + 0,8978^{***}X$   $R^2 = 0,7974$



◆  $\hat{Y} = 0,0236 + 1,9826^{***}X - 0,6456^{***}X^2$   $R^2 = 0,9989$   
 ■  $\hat{Y} = 0,0253 + 2,2815^{***}X - 0,8687^{***}X^2$   $R^2 = 0,9986$   
 ○  $\hat{Y} = 0,0180 + 1,7583^{***}X - 0,5267^{***}X^2$   $R^2 = 0,9969$



◆  $\hat{Y} = 0,0215 + 0,4727^{**}X + 0,3147^{**}X^2$   $R^2 = 0,9989$   
 ■  $\hat{Y} = 0,0150 + 0,6330^{***}X + 0,2240^{**}X^2$   $R^2 = 0,9999$   
 ○  $\hat{Y} = 0,0789 + 0,5445^{***}X + 0,2173^{**}X^2$   $R^2 = 0,9670$

◆ Escória A

■ Escória B

○ Calcário A

°, \*\*, e \*\*\* coeficientes significativos a 10; 1; e 0,1 % de probabilidade, respectivamente.

Figura 2.5. Teores de  $Mg^{2+}$  nas misturas (solos + materiais corretivos), após 42 dias de incubação, em resposta às doses dos corretivos.

## 2.4. Conclusões

- ❖ As amostras de escória, submetidas aos testes de lixiviação e solubilização foram classificadas como pertencentes às classes dos resíduos não perigosos (II) e inertes (II B);
- ❖ As amostras de escória mostraram-se eficientes para corrigir a acidez, neutralizar o alumínio tóxico e elevar os teores de  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{Mg}^{2+}$  dos solos a níveis considerados adequados para as plantas;
- ❖ Os teores de Fe e Mn, presentes nas escórias são relativamente altos. Estes elementos, de modo geral, não preocupam do ponto de vista ambiental. Contudo, há que se avaliar convenientemente os riscos da presença de manganês e cromo associados, pois existe a possibilidade de, ao longo do tempo, o Mn oxidar Cr III presente nesses resíduos a Cr VI, que é considerado altamente tóxico e não essencial para seres humanos; e
- ❖ Os demais metais pesados presentes encontram-se em teores considerados baixos nas escórias e, provavelmente, não oferecem riscos ao meio ambiente.

## 2.5. Referências bibliográficas

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 10.006:1987** – Solubilização de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, RJ. 2 p. 1987.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. Resíduos Sólidos. Coletânea de Normas. **ABNT NBR 10004:2004, ABNT NBR 10005:2004, ABNT NBR 10006:2004, ABNT NBR 10007:2004**. Rio de Janeiro, RJ. 71 p. 2004.

ACCIOLY, A.M.A.; FURTINI NETO, A.E.; MUNIZ, J.A.; FAQUIN, V.; GUEDES, G.A.A. Pó de forno elétrico de siderurgia como fonte de micronutrientes e contaminantes para plantas de milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 35, n. 7, p. 1483-1491, 2000.

ALCARDE, J.C. **Corretivos da acidez dos solos: características e interpretações técnicas**. São Paulo, SP: ANDA, 1992. (Boletim Técnico nº 6).

ALCARDE, J.C.; RODELLA, A.A. Qualidade e legislação de fertilizantes e corretivos. In: **Tópicos em ciência do solo**. Vol. III. Viçosa, MG: SBCS. 2003. p. 291-334.

ALLOWAY, B.J. **Heavy metals in soils**. New York, NY: John Wiley, 1990. 339 p.

AMARAL, R.D.; BARROS, N.F.; COSTA, L.M.; FONTES, M.P.F. Efeito de um resíduo da indústria de zinco sobre a química de amostras de solo e plantas de milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, SP, v. 20, n. 3. p. 433-440, 1996.

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

ATSDR – Agency for Toxic Substances and Disease Registry, U.S. Public Health Service. CRC Publishers. ARSDR's. **Toxicological profiles**. CD ROM. 1997.

ATSDR – Agency for Toxic Substances and Disease Registry Division of Toxicology. **Toxicological Profile for Chromium**. Atlanta, GA: U.S. Department of Health and Human Services. Public Health Services. 2000. Endereço eletrônico: <<http://atsdr1.atsdr.cdc.gov/tfacts7.pdf>>. Acesso em 20 jun. 2004.

BARNHART, J. Chromium chemistry and implications for environmental fate and toxicity. In: Proctor, D.M., Finley, B.L., Harris, M.A., Paustenbach, D.J., Rabbe, D. (Eds.), **Chromium in Soil: Perspectives in Chemistry and Environmental Regulation**. Journal of Soil Contamination, v. 6, p. 561–568. 1997.

BERGLUND, S.; DAVIS, R.D.; L'HERMITE, P. **Utilization of sewage sludge on land: rates of application and long-term effects of metals**. Dordrecht: D. Reidel Publ. 216 p. 1984.

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

BURKE, T.; FAGLIANO, J.; GOLDOFT, M.; HAZEN, R.E.; IGLEWIZE, R.; MCKEE, T. Chromite ore processing residue in Hudson county, New Jersey. **Environmental Health Perspective**, v. 92, p. 131-137. 1991.

CALDER, L.M. Chromium contamination in ground water. In: Nriagu, J.O. (Ed.), **Chromium in the Human and Natural Environment**. New York, NY: John Wiley and Sons, p. 215–229. 1988.

CASTELO BRANCO, V.T.F. **Caracterização de misturas asfálticas com o uso de escória de aciaria como agregado**. Rio de Janeiro, RJ: COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro. 2004. 135 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 2004.

CETESB – **Relatório de estabelecimento de valores orientadores para solos e águas subterrâneas no estado de São Paulo**. Dorothy C. P. Casarini [et al.]. São Paulo, SP: CETESB, 2001. 73 p.

CFSEMG – Comissão de fertilidade do solo do estado de minas gerais.  
**Recomendação para uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais – 5<sup>a</sup>**  
Aproximação. Viçosa, MG. 359 p.1999.

COHEN M.D.; COSTA M. Chromium compounds. In: Rom WN, editor.  
**Environmental and occupational medicine.** Philadelphia: Lippincott-Raven  
Publishers. p. 1045–1052. 1998.

CORRÊA, M.L.T.; MELLO, J.W.V., SILVA J. Avaliação do Uso Agrícola de Uma  
Escória de Aciaria como Corretivo da Acidez de Solos. In: 58° CONGRESSO  
ANUAL DA ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE METALURGIA E MATERIAIS.  
2003. Rio de Janeiro. **Anais...** [CDROM]. / Associação Brasileira de Metalurgia  
e Materiais – São Paulo, SP: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais.  
2003.

COSTA, L.M.; AMARAL SOBRINHO, N.M.B.; DIAS, L.E.; BARROS, N.F.  
Application of a steel industry residue to an Oxisol including microbial activity. In:  
**Trace substances in environmental health conference**, 25. s. I., 1991.  
Proceeding. p. 245-356. 1991.

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

DISSANAYAKE C.B.; CHANDRAJITH R. Medical geochemistry of tropical  
environments. **Earth-Science Review**. v. 47, p. 219-258. 1999.

EMBRAPA – EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA.  
Centro Nacional de Pesquisa de Solos. EMBRAPA-CNPS. **Manual de  
métodos de análise de solo**. 2<sup>a</sup> ed., Rio de Janeiro, RJ, 1997. 212 p.

EMBRAPA – EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA.  
**Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes.** Organizador:  
Fábio César da Silva. – Brasília: Embrapa Comunicação para Transferência de  
Tecnologia, 1999. 370 p.

FERRAND, B.; EMERY, J. Recent improvements in quality of steel slag  
aggregate. **Transportation Research Record**. n. 1486. p. 137-141, 1995.

FRANCHINI, J., MAGNANI, E., MUTTI, A. Mortality experienced among  
chrome-plating workers. **Scandinavian Journal of Work Environment and  
Health**, v. 9, p. 247–252. 1983.

GEORGE, C.M.; SORRENTINO, F.P. Valorization of basis oxygen steel slag.  
In: **International congress on the chemistry of cement**, 7, Paris.  
Proceedings. p. 39-44. 1980.

GOYER, R.A. Toxic effects of metals. In Casarett & Doull's Toxicology. **The  
Basic Science of Poisons**, Fifth Edition, Klaassen, C.D. [Ed]. McGraw-Hill  
Health Professions Division. 1996.

HERNÁNDEZ, T.; MORENO, J.I.; COSTA, F. Influence of sewage sludge application on crop yields and heavy metal availability. **Soil Science and Plant Nutrition**, Tokyo, n. 37, p. 201-210, 1991.

HOSSNER, L.R. Dissolution for total elemental analysis. In: **Methods of soil analysis. Part 3. Chemical methods**. Madison: Soil Science Society of America, Inc., p. 49-64. 1996.

IARC monographs on the evaluation of the carcinogenic risk of chemicals to humans. **Chemicals, industrial processes and industries associated with cancer in humans**. IARC monographs, v. 1 to 29. 1998.

INDUSTRY AND ENVIRONMENT. Construction and the environment: facts and figures. **UNEP IE**, v. 19, n. 2, April-June, p. 4-9. 1996.

KILAU, H.W., SHAH, I.D. Chromium bearing waste slag: evaluation of leachability when exposed to simulated acid rain. In: Jackson, L.P., Rohlik A.R. (Eds.), **Third Symposium, Hazardous Industrial Waste Management and Testing**. Philadelphia: ASTM STP, v. 851, p. 61-81. 1984.

KIMBROUGH D.E; COHEN Y.; WINER A.M.; CREELMAN L.; MABUNI C. A critical assessment of chromium in the Environment. **Critical Reviews in Environmental Science and Technology**. v. 29, n. 1, p. 1-46. 1999.

KLEIN, C.; HURLBUT, Jr. **Manual of mineralogy** (after James D. Dana).20<sup>th</sup>. Republic of Singapore: John Wiley & Sons. 1985. 598 p.

LEE, F.T.; LEE, C.H. Study on the reduction behavior of FeO in EAF slag. **Steel Times International**. v. 1, p. 20-25, 1995.

LÓPEZ, F.A.; FORMOSO, A.; MEDINA, F. Escórias LD. Coprodutos de la indústria siderúrgica – I Parte. Composición, tratamiento y aplicaciones. **Revista de Metalurgia**, v. 25, n. 4, p. 247-254, 1989.

MACHADO, A.T. **Estudo comparativo dos métodos de ensaios para avaliação da expansibilidade das escórias de aciaria**. São Paulo, SP: USP. 2000. 135 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Construção Civil) – Universidade de São Paulo, Escola Politécnica, São Paulo, SP, 2000.

McGRATH, S.P.; SMITH, S. Chromium and nickel. In: ALLOWAY, B.J. (Ed.) **Heavy metals in soil**. New York: John Wiley. p.125-150. 1990.

MENGEL, K.; KIRKBY, E.A. **Principles of plant nutrition**. New York, NY: International potash Institute, 1987. 687 p.

MERTZ, W. Chromium occurrence and function in biological systems. **Physiological Reviews**, v. 49, p. 163-239. 1969.

MONTGOMERY, D.G.; WANG, G. Preliminary Laboratory study of steel slag for blended cement manufacture. **Material Forum**, v. 15, n. 4, p. 374-382. 1991.

MOTZ, H.; GEISELER, J. Products of steel slags an opportunity to save natural resources. **West Management**, v. 21, p. 285-293, 2001.

MUKHERJEE, A.B. Chromium in the environment of Finland. **The Science of the Total Environment**, v. 217, p. 9-19. 1998.

OHLWEILER, O.A. **Química Inorgânica**, vol. II, Ed. Edgard Blücher LTDA, São Paulo-SP. 226 p. 1973.

O'NEIL, P. **Environmental Chemistry**. London: G. Allen & Unwin. 232 p. 1985.

OUTRIDGE, P.M.; SCHUEHAMMER, A.M. Bioaccumulation and toxicology of chromium: implications for wildlife. **Reviews of Environmental Contamination and Toxicology**, v. 130, p. 31-77. 1993.

PAVAN, M.A.; BINGHAM, F.T. Toxidez de metais em plantas: II. Caracterização da toxidez do níquel em cafeeiros. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 17, p. 323-328, 1982.

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

PILLAY, K.; VON BLOTTNITZ, H.; PETERSEN, J. Ageing of chromium(III)-bearing slag and its relation to the atmospheric oxidation of solid chromium(III)-oxide in the presence of calcium oxide. **Chemosphere**, v. 52, p. 1771-1779. 2003.

POMBO, L.C.A.; KLAMT, E. Adsorção de zinco e cobre de dois solos do Estado do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, SP, v. 10, p. 191-194, 1986.

PORTARIA SEFIS Nº 01. Normas sobre especificações, garantias, tolerâncias e procedimentos para coleta de amostras de produtos e modelos oficiais a serem usados pela inspeção e fiscalização de fertilizantes, corretivos, inoculantes, estimulantes ou biofertilizantes. **Diário Oficial da União**, 04 de março de 1983.

PRADO, R.M.; COUTINHO, E.L.M., ROQUE, C.G.; VILLAR, M.L.P. Avaliação da escória de siderurgia e de calcários como corretivo da acidez de solos no cultivo da alface. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 37, n. 4, p. 539-546, 2002.

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

PRADO, R.M.; NATALE, W. Efeitos da aplicação da escória de siderurgia ferrocromo no solo, no estado nutricional e na produção de matéria seca de

mudas de maracujazeiro. **Revista Brasileira de Fruticultura**, Jaboticabal, SP, v. 26, n. 1, p. 140-144, 2004.

ROSS, D.S., SJOGREN, R.E.; BARTLETT, R.J. Behavior of chromium in soils: Toxicity to microorganisms. **Journal of Environmental Quality**, v.10, n. 2, p. 142-148, 1981.

SILVA, J. **Avaliação do potencial agrônomo e de contaminação ambiental decorrente do uso de uma escória de aciaria como corretivo e fertilizante de solos**. Viçosa, MG: UFV, 2003. 134 f. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2003.

SHEEHAN, P.J., MEYER, D.M., SAUER, M.M., PAUSTENBACH, D.J. Assessment of the human health risks posed by exposure to chromium contaminated soil. **J. Toxicological Environmental Health**, v. 12, p. 161–201. 1991.

SMITH, K.A. Manganese and cobalt. In: ALLOWAY, B.J. (Ed.) **Heavy metals in soil**. New York, NY: John Wiley. p. 197-211. 1990.

USEPA – United States Environmental Protection Agency. **Standards for the use or disposal of sewage sludge**. Fed. Regist., v. 58, p. 9284-9415. 1993.

USEPA – United States Environmental Protection Agency. Washington DC. SW 486 On Line. **Test Methods for Evaluating Solid Wastes, Physical/Chemical Methods**. 2003.

WENNBERG A., IREGREN A., STRUWE G., CIZINSKY G., HAGMAN M., JOHANSON L. Manganese exposure in steel smelters a health-hazard to the nervous-system. **Scandinavian Journal of Work Environment and Health**. v. 17, n. 4, p. 255-262. 1991.

YASSI, A., NIEBOER, E. Carcenogenicity of chromium compounds. In: Nriagu, J.O. (Ed.), **Chromium in the Human and Natural Environment**. New York, NY: John Wiley and Sons, p. 443-479. 1988.

### **3. EFEITO DA UTILIZAÇÃO DE ESCÓRIA DE ACIARIA LD, DA CST, NA PRODUÇÃO E CONTAMINAÇÃO DE PLANTAS DE SOJA CULTIVADAS EM CASA-DE-VEGETAÇÃO**

#### **3.1. Introdução**

Os solos ácidos, como os Latossolos, ocupam grande parte do território brasileiro (CAMARGO et al., 1987; KER, 1997) e, para um adequado aproveitamento agrícola destas áreas, a prática da calagem é de fundamental importância (ALCARDE, 1992; ALCARDE; RODELLA, 2003). Assim, a correção da acidez dos solos, associada a uma fertilização adequada, é a forma mais eficiente para eliminar as barreiras químicas para o pleno desenvolvimento das plantas.

A indústria siderúrgica produz diariamente grandes quantidades de escória, subproduto da fabricação do aço, que apresenta teores relativamente elevados de CaO e MgO, além de outros nutrientes essenciais às plantas cultivadas. Estas características conferem à escória a capacidade de corrigir a acidez dos solos, bem como fornecer alguns nutrientes às plantas, cujo grau de eficiência depende de sua composição, granulometria e grau de cristalização (LOUZADA, 1987; MONTGOMERY; WANG, 1991; MACHADO, 2000; PRADO et al., 2001; GEYER, 2001). Nesse particular, o reaproveitamento desses resíduos reveste-se de grande importância, pois pode compatibilizar 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. Associado a isso deve-se ressaltar a possibilidade de redução da mineração de calcário para fins agrícolas, com conseqüente redução na degradação ambiental, causada pela atividade mineradora. No Brasil são consumidos, atualmente, cerca de 20 milhões de toneladas de calcário por ano na agricultura (MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, 2002) e, pelo menos parte desse calcário pode ser substituído por corretivos alternativos, como a escória de siderurgia.

As escórias, até o presente momento, são pouco utilizadas na agricultura brasileira; contudo, têm se mostrado uma alternativa viável para uso agrícola (RIBEIRO et al., 1986; LOUZADA, 1987; NOGUEIRA, 1990; AMARAL, 1994; CORRÊA et al., 2003; SILVA, 2003). São amplamente utilizadas em países como o Japão, a China, os EUA (PRADO et al., 2001; PRADO; NATALE, 2004) e a Alemanha (MOTZ; GEISELER, 2001). Entretanto, é necessário considerar o teor de metais pesados desses materiais que, em níveis elevados, podem limitar sua utilização na agricultura (PAVAN; BINGHAN, 1982; MENGEL; KIRKBY, 1987; LÓPEZ et al., 1989; COSTA et al., 1991; ACCIOLY et al., 2000).

A composição química das escórias é influenciada pela técnica de produção do aço, pelo tipo do aço a ser produzido (MACHADO, 2000) e pela qualidade da matéria-prima utilizada (MOTZ; GEISELER, 2001).

Existem três processos principais para o refino do aço, sendo o processo do conversor de oxigênio LD (Linz-Donawitz) ou BOF (Blast Oxigen Furnace) utilizado em maior proporção na Cia Siderúrgica de Tubarão (CST). Nesse processo, o oxigênio atua como agente oxidante e o CaO como agente escorificante no fluxo de refino (ARAUJO, 1997). O processo de refino do aço em conversores a oxigênio tem por objetivo reduzir os teores de carbono do ferro gusa de 4 % para 0,1 % e de outros elementos como o manganês, enxofre, silício e fósforo, conforme o tipo de aço a ser produzido (GEORGE; SORRENTINO, 1980; ILFA, 1995; ARAUJO, 1997; MACHADO, 2000). Desta forma, as escórias LD são constituídas basicamente por uma mistura de óxidos e silicatos de Ca e Mg; ferro metálico; e outras espécies que aparecem em menor proporção. Elevado teor dos elementos de liga presentes na sucata, muitas vezes utilizada na produção do aço, pode resultar em escórias com altos teores de metais pesados, dentre eles o cromo, o níquel e o chumbo

(COSTA, et al., 1991; LEE; LEE, 1995; FERRAND; EMERY, 1995; BORGOS, 1999).

O objetivo do presente trabalho foi de avaliar a produção de plantas de soja cultivadas em casa-de-vegetação e a contaminação dessas plantas por metais pesados e outros elementos tóxicos, em resposta à utilização de uma escória de aciaria LD, como corretivo da acidez do solo.

Palavras-chave: escória de siderurgia, corretivo da acidez de solos, metais pesados, elementos tóxicos, soja, meio ambiente.

### **3.2. Material e métodos**

Neste ensaio foram realizados dois cultivos sucessivos de soja, variedade M-Soy 8.400. As doses de corretivos foram misturadas à fração superficial dos solos (coletados de 0-20 cm de profundidade) e os cultivos foram realizados em vasos com 30 dm<sup>3</sup> de solo. Para tanto, foram utilizadas amostras de Latossolo Vermelho-amarelo do cerrado de Minas Gerais coletadas nos municípios de Sete Lagoas e João Pinheiro, analisadas conforme as metodologias descritas pela EMBRAPA (1997) (Quadro 3.1).

O experimento foi montado, em casa-de-vegetação, no delineamento em blocos casualizados e esquema fatorial (2 x 3 x 4), em três repetições, perfazendo um total de 72 parcelas, sendo:

- ❖ 2 solos;
- ❖ 3 corretivos (duas amostras de escória na granulometria inferior a 1 mm e uma amostra de calcário) (Quadro 3.2); e
- ❖ 4 níveis de corretivo: 0,0; 0,5; 1,0 e 1,5 vezes a necessidade de calagem (CFSEMG, 1999).

As parcelas receberam seus respectivos tratamentos, além de adubação complementar com P, 300 mg dm<sup>-3</sup> (ALVAREZ V, 1974), e foram mantidas com umidade próxima à capacidade de campo por 15 dias. Após esse período foram plantadas 25 sementes por vaso. Decorridos 15 dias após o plantio, procedeu-se ao desbaste, mantendo-se 10 plantas em cada vaso.

Após o plantio foram aplicados em cobertura: 100 mg dm<sup>-3</sup> de N; 150 mg dm<sup>-3</sup> de K; 50 mg dm<sup>-3</sup> de S; 0,81 mg dm<sup>-3</sup> de B; 1,33 mg dm<sup>-3</sup> de Cu; 1,56 mg dm<sup>-3</sup> de Fe; 3,66 mg dm<sup>-3</sup> de Mn; 0,15 mg dm<sup>-3</sup> de Mo; e 4,00 mg dm<sup>-3</sup> de

Quadro 3.1. Composição físico-química, equivalente de umidade e classe textural dos Latossolos Vermelho-amarelos de Sete Lagoas-MG e João Pinheiro-MG

Característica <sup>‡</sup>	LVA (Sete Lagoas-MG)	LVA (João Pinheiro-MG)
pH H <sub>2</sub> O	5,0	5,3
M.O. (dag kg <sup>-1</sup> )	4,13	1,31
P (mg dm <sup>-3</sup> )	4,8	0,1
K (mg dm <sup>-3</sup> )	70,0	39,0
Ca <sup>2+</sup> (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	1,69	0,46
Mg <sup>2+</sup> (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	0,01	0,01
Al <sup>3+</sup> (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	1,49	0,37
H + Al (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	6,97	5,87
SB (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	1,88	0,57
(t) (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	3,37	0,94
(T) (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	8,85	6,44
V (%)	21,24	8,85
m (%)	44,21	39,36
P-rem (mg L <sup>-1</sup> )	5,6	21,5
Zn (mg dm <sup>-3</sup> )	12,90	8,09
Fe (mg dm <sup>-3</sup> )	57,80	51,20
Mn (mg dm <sup>-3</sup> )	9,70	5,30
Cu (mg dm <sup>-3</sup> )	2,32	1,07
Areia Grossa (dag kg <sup>-1</sup> )	7	25
Areia Fina (dag kg <sup>-1</sup> )	3	49
Silte (dag kg <sup>-1</sup> )	6	5
Argila (dag kg <sup>-1</sup> )	84	21
Equivalente de umidade (kg kg <sup>-1</sup> )	0,324	0,168
Classe Textural	Muito Argilosa	Franco-Argilo-Arenosa

<sup>‡</sup> Média de três repetições;

pH em água relação 1:25; M.O.: Método Walkley & Black (M.O. = 1,724 x Carbono Orgânico); P, K, Fe, Zn, Mn e Cu: Extrator Mehlich 1; Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup> e Al<sup>3+</sup>: Extrator KCl 1mol L<sup>-1</sup>; H + Al: Extrator Acetato de Cálcio 0,5 mol L<sup>-1</sup> a pH = 7,0; SB: Soma de Bases; CTC (t): Capacidade de Troca Catiônica Efetiva; CTC (T): Capacidade de Troca Catiônica a pH = 7,0; V: Índice de Saturação de Bases; m: Índice de Saturação de Alumínio; e P-rem: Fósforo Remanescente.

Zn (ALVAREZ V., 1974), divididos em quatro aplicações. A primeira adubação de cobertura foi realizada no dia do plantio, as demais depois de decorridos 30, 60 e 90 após o plantio. As adubações de cobertura foram assim distribuídas porque o ciclo da variedade M-Soy 8.400 dura aproximadamente 130 dias entre a emergência e a maturação. Depois de completado o primeiro ciclo as plantas foram cortadas e separaram-se os grãos do restante da planta para avaliação da produção de matéria seca e determinação dos teores de Ca, Mg, Fe, Mn, Cr, Ni, Cd e Pb.

Quadro 3.2. Análises químicas, PN, ER e cálculo do PRNT de amostras compostas de escórias A e B e o calcário

Característica	Escórias de aciaria LD §		Calcário §
	A	B	
CaO (dag kg <sup>-1</sup> ) <sup>1/</sup>	45,53 ± 0,79	42,70 ± 0,21	36,84 ± 0,55
MgO (dag kg <sup>-1</sup> ) <sup>1/</sup>	9,80 ± 0,03	8,21 ± 0,05	11,95 ± 0,05
SiO <sub>2</sub> (dag kg <sup>-1</sup> ) <sup>2/</sup>	12,66 ± 0,24	14,69 ± 0,64	---
MnO <sub>2</sub> (dag kg <sup>-1</sup> ) <sup>3/</sup>	5,27 ± 0,12	4,42 ± 0,08	---
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (dag kg <sup>-1</sup> ) <sup>3/</sup>	21,20 ± 0,02	20,19 ± 0,17	---
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> total (dag kg <sup>-1</sup> ) <sup>3/</sup>	1,78 ± 0,16	2,40 ± 0,21	---
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> solúvel em ác. cítrico (dag kg <sup>-1</sup> ) <sup>1/</sup>	n.d.‡	n.d.	---
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> Mehlich-1 (mg kg <sup>-1</sup> ) <sup>4/</sup>	52,13 ± 2,32	43,78 ± 1,73	---
Cr (mg kg <sup>-1</sup> ) <sup>3/</sup>	745,12 ± 4,34	574,18 ± 5,69	6,29 ± 0,25
Ni (mg kg <sup>-1</sup> ) <sup>3/</sup>	28,58 ± 0,70	26,14 ± 0,41	7,12 ± 0,12
Zn (mg kg <sup>-1</sup> ) <sup>3/</sup>	70,14 ± 0,83	54,16 ± 0,56	8,14 ± 0,21
Cu (mg kg <sup>-1</sup> ) <sup>3/</sup>	34,05 ± 0,69	30,14 ± 0,90	6,78 ± 0,14
Cd (mg kg <sup>-1</sup> ) <sup>3/</sup>	5,98 ± 0,07	4,98 ± 0,07	1,07 ± 0,21
Pb (mg kg <sup>-1</sup> ) <sup>3/</sup>	n.d.	n.d.	n.d.
PN (%) <sup>1/</sup>	90,48 ± 0,54	89,04 ± 0,71	83,08 ± 0,58
ER (%) <sup>1/</sup>	75,23 ± 0,37	80,61 ± 0,53	99,28 ± 0,28
PRNT (%) <sup>1/</sup>	68,07 ± 0,73	71,78 ± 0,11	82,50 ± 0,75

§ Média de 3 repetições ± erro-padrão da média;

<sup>1/</sup> EMBRAPA (1999);

<sup>2/</sup> Digestão com água régia e ácido fluorídrico em cadinhos de Teflon® fechados (HOSSNER, 1996);

<sup>3/</sup> Digestão com os ácidos fluorídrico, sulfúrico e perclórico (HOSSNER, 1996);

<sup>4/</sup> Extraído por Mehlich-1 (DEFELIPO; RIBEIRO, 1996); e

‡ Não detectado pela técnica analítica utilizada.

Antes do segundo plantio, foram feitos orifícios nos vasos, com diâmetro de 2 cm, até a profundidade mediana dos mesmos, nos quais foram aplicados novamente 300 mg dm<sup>-3</sup> de P. As demais adubações de cobertura foram realizadas de forma similar àquelas aplicadas no primeiro cultivo. Optou-se por uma nova adubação fosfatada, no segundo cultivo, para prevenir uma possível limitação desse nutriente para as plantas, em função das características físico-químicas dos dois solos utilizados (Quadro 3.1). Depois de completado o segundo cultivo as plantas foram cortadas e analisadas de forma similar àquelas realizadas no primeiro cultivo.

Os resultados obtidos foram analisados estatisticamente, por meio de análises de variância e regressões lineares, utilizando-se o software Sistema de Análises Estatísticas e Genéticas (SAEG).

### 3.3. Resultados e discussão

#### 3.3.1. Primeiro cultivo da soja

A produção de matéria seca dos grãos e palhada da soja aumentou significativamente com as doses de corretivos aplicadas (Quadro 3.3 e Figura 3.1). A produção de matéria seca nos dois solos mostra um melhor desempenho do calcário, em relação às escórias LD, o que pode ser constatado pelos coeficientes angulares das curvas de regressão ajustadas (Figura 3.1). Partindo-se dessas equações e tomando-se como base a estimativa de produção de matéria seca de grãos, em função da aplicação do calcário (Figura 3.1a), verificou-se que para a dose de 1,0 NC (CFSEMG, 1999) o calcário, superou a escória A em 14,2 % e a escória B em 16,9 %, aproximadamente, quando esses corretivos foram aplicados no Latossolo Vermelho-amarelo (LVA) de Sete Lagoas-MG. Para o LVA de João Pinheiro-MG essa diferença foi ainda maior. A aplicação do calcário promoveu um acréscimo na produção da ordem de aproximadamente 33,1 % em relação à escória A e de aproximadamente 30,4 % em relação à escória B, (Figura 3.1b). Para a produção de matéria seca de palhada no LVA de Sete Lagoas-MG (Figura 3.1c), também na dose de 1,0 NC, o calcário superou a escória A em 24,8 % e a escória B em 17,7 %, aproximadamente. No LVA de João Pinheiro, o calcário superou a escória A em 18,6 % e a escória B em 16,0 %, aproximadamente (Figura 3.1d). Amaral et al. (1994) ao estudarem escória de siderurgia (alto forno) e calcário em doses equivalentes de  $\text{CaCO}_3$ , concluíram que não houve diferença na produção de matéria seca de alface. Em milho (PIAU, 1995) e cana-de-açúcar (PRADO, 2000) obtiveram produções semelhantes entre escórias e calcários. Entretanto, Prado et al. (2002) observaram que a resposta da alface à aplicação de escória foi menor em relação aos calcários por eles avaliados. Fortes (1993), Prado e Fernandes (2000a), Prado e Fernandes (2000b) e Prado et al, (2002) mencionam que as escórias apresentaram reação mais lenta no solo quando comparadas ao calcário, possivelmente em função de uma menor solubilidade das escórias. Desta forma, supõe-se, que as diferenças de produção observadas neste ensaio, em favor do calcário, se devam a essa característica das escórias.

Quadro 3.3. Análise de variância para matéria seca (MS), Ca, Mg, Fe, Mn e Ni nos grãos e palhada da soja referentes ao primeiro cultivo nos Latossolos Vermelho-amarelos de Sete Lagoas-MG e João Pinheiro-MG tratados com as escórias A e B e o calcário

FV	GL	QM					
		MS Grãos	Ca Grãos	Mg Grãos	Fe Grãos	Mn Grãos	Ni Grãos
Blocos (B)	2	0,51031 <sup>n.s.</sup>	0,00271 <sup>n.s.</sup>	0,00115 <sup>n.s.</sup>	43,79919 <sup>n.s.</sup>	1,17152 <sup>n.s.</sup>	0,10040*
Solos (S)	1	1.243,47500**	0,04320**	0,02385**	87,42941 <sup>n.s.</sup>	586,18130**	0,35111**
Corretivos (C)	2	115,78550**	0,20130**	0,04602**	3.027,48400**	46,67975 <sup>n.s.</sup>	0,02695 <sup>n.s.</sup>
Doses (D)	3	4.008,83400**	1,49146**	0,40609**	124,60020**	87,82172*	0,76322**
D x C	6	21,13547**	0,02235**	0,00788**	344,59930**	14,03208 <sup>n.s.</sup>	0,02274 <sup>n.s.</sup>
D x S	3	32,53838**	0,00876**	0,00148 <sup>n.s.</sup>	239,27620**	98,72604*	0,07151 <sup>n.s.</sup>
C x S	2	272,77430**	0,00256 <sup>n.s.</sup>	0,00366**	53,12431 <sup>n.s.</sup>	25,80894 <sup>n.s.</sup>	0,02925 <sup>n.s.</sup>
D x C x S	6	31,95724**	0,00061 <sup>n.s.</sup>	0,00178 <sup>n.s.</sup>	9,91155 <sup>n.s.</sup>	19,55723 <sup>n.s.</sup>	0,01270 <sup>n.s.</sup>
S/C = Esc. A x D = 0,0 NC	1	36,23092**	0,00296 <sup>n.s.</sup>	0,00179 <sup>n.s.</sup>	396,13750**	302,07340**	0,14380*
S/C = Esc. A x D = 0,5 NC	1	140,28270**	0,00754*	0,02260**	13,57803 <sup>n.s.</sup>	4,87802 <sup>n.s.</sup>	0,14776*
S/C = Esc. A x D = 1,0 NC	1	262,23190**	0,00020 <sup>n.s.</sup>	0,00501*	5,08971 <sup>n.s.</sup>	96,81113 <sup>n.s.</sup>	0,03784 <sup>n.s.</sup>
S/C = Esc. A x D = 1,5 NC	1	405,64070**	0,00101 <sup>n.s.</sup>	0,00018 <sup>n.s.</sup>	2,80544 <sup>n.s.</sup>	0,26703 <sup>n.s.</sup>	0,00042 <sup>n.s.</sup>
S/C = Esc. B x D = 0,0 NC	1	37,05135**	0,00280 <sup>n.s.</sup>	0,00171 <sup>n.s.</sup>	105,87740 <sup>n.s.</sup>	226,92170**	0,11205 <sup>n.s.</sup>
S/C = Esc. B x D = 0,5 NC	1	10,68801 <sup>n.s.</sup>	0,02550**	0,00417 <sup>n.s.</sup>	5,57570 <sup>n.s.</sup>	16,55893 <sup>n.s.</sup>	0,22073**
S/C = Esc. B x D = 1,0 NC	1	0,06594 <sup>n.s.</sup>	0,00383 <sup>n.s.</sup>	0,00691*	17,93954 <sup>n.s.</sup>	30,97437 <sup>n.s.</sup>	8,0E-05 <sup>n.s.</sup>
S/C = Esc. B x D = 1,5 NC	1	0,00001 <sup>n.s.</sup>	0,00022 <sup>n.s.</sup>	0,00067 <sup>n.s.</sup>	0,16708 <sup>n.s.</sup>	158,02890*	0,00058 <sup>n.s.</sup>
S/C = Calc. x D = 0,0 NC	1	39,53693**	0,00265 <sup>n.s.</sup>	0,00182 <sup>n.s.</sup>	315,18440**	186,15990**	0,02953 <sup>n.s.</sup>
S/C = Calc. x D = 0,5 NC	1	334,11850**	0,02726**	0,00073 <sup>n.s.</sup>	49,25487 <sup>n.s.</sup>	1,64214 <sup>n.s.</sup>	0,00637 <sup>n.s.</sup>
S/C = Calc. x D = 1,0 NC	1	408,09450**	0,00124 <sup>n.s.</sup>	0,00052 <sup>n.s.</sup>	51,64459 <sup>n.s.</sup>	5,89580 <sup>n.s.</sup>	0,00011 <sup>n.s.</sup>
S/C = Calc. x D = 1,5 NC	1	404,44090**	0,00307 <sup>n.s.</sup>	2,3E-05 <sup>n.s.</sup>	7,72189 <sup>n.s.</sup>	21,37403 <sup>n.s.</sup>	0,00108 <sup>n.s.</sup>
C/S1 e D = 0,0 NC	2	0,03741 <sup>n.s.</sup>	0,00002 <sup>n.s.</sup>	1,7E-07 <sup>n.s.</sup>	47,68039 <sup>n.s.</sup>	1,81381 <sup>n.s.</sup>	0,01544 <sup>n.s.</sup>
C/S1 e D = 0,5 NC	2	55,07067**	0,03967**	0,00828**	677,54970**	11,01862 <sup>n.s.</sup>	0,00275 <sup>n.s.</sup>
C/S1 e D = 1,0 NC	2	34,57661**	0,05909**	0,01692**	588,17360**	49,63845 <sup>n.s.</sup>	0,00271 <sup>n.s.</sup>
C/S1 e D = 1,5 NC	2	0,01317 <sup>n.s.</sup>	0,00001 <sup>n.s.</sup>	3,6E-07 <sup>n.s.</sup>	6,55680 <sup>n.s.</sup>	1,78132 <sup>n.s.</sup>	0,00129 <sup>n.s.</sup>
C/S2 e D = 0,0 NC	2	0,04432 <sup>n.s.</sup>	0,00001 <sup>n.s.</sup>	1,6E-07 <sup>n.s.</sup>	44,66543 <sup>n.s.</sup>	1,83004 <sup>n.s.</sup>	0,01033 <sup>n.s.</sup>
C/S2 e D = 0,5 NC	2	63,77665**	0,04164**	0,00977**	688,99833**	10,88634 <sup>n.s.</sup>	0,00133 <sup>n.s.</sup>
C/S2 e D = 1,0 NC	2	37,55433**	0,06376**	0,02077**	609,29543**	37,99876 <sup>n.s.</sup>	0,00133 <sup>n.s.</sup>
C/S2 e D = 1,5 NC	2	0,009554 <sup>n.s.</sup>	0,00001 <sup>n.s.</sup>	3,4E-07 <sup>n.s.</sup>	588,43565 <sup>n.s.</sup>	1,453323 <sup>n.s.</sup>	0,00433 <sup>n.s.</sup>
Resíduo	46	3,07266	0,00137	0,00111	28,01664	25,07521	0,02971758
CV (%)		5,922	4,603	9,245	9,560	16,225	36,602

Esc A = escória A; Esc. B = escória B; Calc. = calcário; S1 = Latossolo Vermelho-amarelo de Sete Lagoas-MG; S2 = Latossolo Vermelho-amarelo de João Pinheiro-MG; e NC = necessidade de calagem (CFSEMG, 1999).

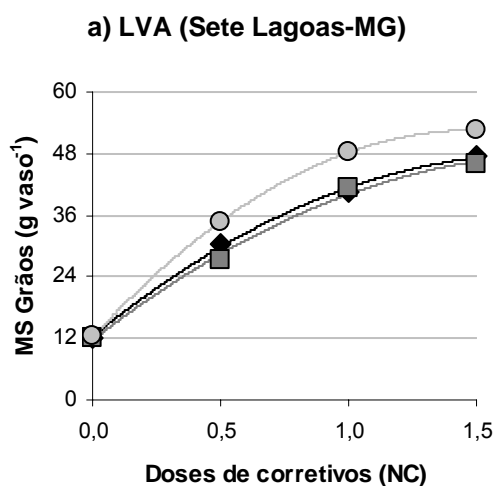
<sup>n.s.</sup>, \*, e \*\* coeficientes não-significativos; significativos a 1; e 5 %, respectivamente.

Quadro 3.3, Cont.

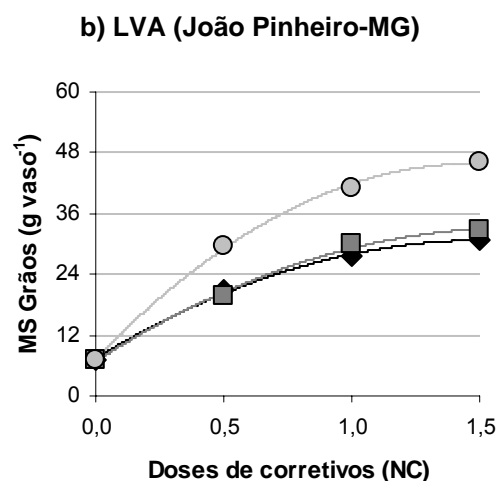
FV	GL	QM					
		MS Palhada	Ca Palhada	Mg Palhada	Fe Palhada	Mn Palhada	Ni Palhada
Blocos (B)	2	0,49002 <sup>n.s.</sup>	0,00077 <sup>n.s.</sup>	0,00102 <sup>n.s.</sup>	195,07010 <sup>n.s.</sup>	13,96707 <sup>n.s.</sup>	0,00370 <sup>n.s.</sup>
Solos (S)	1	316,91170**	0,64711**	0,03225**	56,21016 <sup>n.s.</sup>	1.286,60400**	8,48072**
Corretivos (C)	2	309,73580**	0,34517**	0,05212**	691,32060**	17,67962 <sup>n.s.</sup>	0,00595 <sup>n.s.</sup>
Doses (D)	3	2.958,26800**	0,82009**	0,53747**	7.800,77000**	483,26300**	1,69669**
D x C	6	39,02015**	0,04427**	0,01027**	63,61930 <sup>n.s.</sup>	37,64164 <sup>n.s.</sup>	0,00852 <sup>n.s.</sup>
D x S	3	3,96453 <sup>n.s.</sup>	0,03655**	0,00117*	54,68296 <sup>n.s.</sup>	15,73194 <sup>n.s.</sup>	0,17625**
C x S	2	13,06296*	0,00669**	0,00264**	1.142,00600**	381,85840**	0,03593 <sup>n.s.</sup>
D x C x S	6	3,16616 <sup>n.s.</sup>	0,00241 <sup>n.s.</sup>	0,00072 <sup>n.s.</sup>	168,87200 <sup>n.s.</sup>	65,58750*	0,02371 <sup>n.s.</sup>
S/C = Esc. A x D = 0,0 NC		10,89993 <sup>n.s.</sup>	0,15029**	0,00311**	2,53626 <sup>n.s.</sup>	102,29580*	1,68673**
S/C = Esc. A x D = 0,5 NC		12,43584*	0,05976**	1,2E-05 <sup>n.s.</sup>	129,99550 <sup>n.s.</sup>	238,86680**	0,67498**
S/C = Esc. A x D = 1,0 NC		3,82083 <sup>n.s.</sup>	0,00648*	0,00055 <sup>n.s.</sup>	822,67730**	146,39260*	0,60347**
S/C = Esc. A x D = 1,5 NC		21,00761**	0,01191**	0,00323**	724,01390**	137,75440*	0,43682**
S/C = Esc. B x D = 0,0 NC		15,17210*	0,15350**	0,00294**	9,96417 <sup>n.s.</sup>	79,44004 <sup>n.s.</sup>	1,15854**
S/C = Esc. B x D = 0,5 NC		56,16936**	0,03148**	0,00357**	9,83333 <sup>n.s.</sup>	646,51060**	0,54829**
S/C = Esc. B x D = 1,0 NC		23,42350**	0,00995**	0,00066 <sup>n.s.</sup>	191,31540 <sup>n.s.</sup>	894,89430**	0,67420**
S/C = Esc. B x D = 1,5 NC		18,06136*	0,03194**	0,00064 <sup>n.s.</sup>	566,62980*	135,38880*	0,93378**
S/C = Calc. x D = 0,0 NC		11,69569*	0,15153**	0,00300**	93,53073 <sup>n.s.</sup>	48,38364 <sup>n.s.</sup>	1,51527**
S/C = Calc. x D = 0,5 NC		46,92806**	0,06644**	0,01002**	82,15686 <sup>n.s.</sup>	3,46130 <sup>n.s.</sup>	0,47443**
S/C = Calc. x D = 1,0 NC		70,66488**	0,06518**	0,00638**	106,06690 <sup>n.s.</sup>	55,86278 <sup>n.s.</sup>	0,33344**
S/C = Calc. x D = 1,5 NC		83,64907**	0,04615**	0,00806**	778,78190**	1,79012 <sup>n.s.</sup>	0,18365*
C/S1 e D = 0,0 NC		0,03657 <sup>n.s.</sup>	2,1E-05 <sup>n.s.</sup>	5,5E-06 <sup>n.s.</sup>	18,65240 <sup>n.s.</sup>	0,58719 <sup>n.s.</sup>	0,00894 <sup>n.s.</sup>
C/S1 e D = 0,5 NC		153,04600**	0,12612**	0,02123**	211,82480 <sup>n.s.</sup>	129,83210**	0,00217 <sup>n.s.</sup>
C/S1 e D = 1,0 NC		102,89580**	0,12380**	0,03065**	526,87900**	41,77566 <sup>n.s.</sup>	0,05784 <sup>n.s.</sup>
C/S1 e D = 1,5 NC		0,40075 <sup>n.s.</sup>	0,00006 <sup>n.s.</sup>	1,6E-06 <sup>n.s.</sup>	158,62470 <sup>n.s.</sup>	3,73633 <sup>n.s.</sup>	0,00483 <sup>n.s.</sup>
C/S2 e D = 0,0 NC		0,02344 <sup>n.s.</sup>	2,5 E-05 <sup>n.s.</sup>	4,7E-06 <sup>n.s.</sup>	20,44322 <sup>n.s.</sup>	0,47556 <sup>n.s.</sup>	0,00332 <sup>n.s.</sup>
C/S2 e D = 0,5 NC		147,54678**	0,13224**	0,03345**	223,64454 <sup>n.s.</sup>	142,44353**	0,00132 <sup>n.s.</sup>
C/S2 e D = 1,0 NC		104,55436**	0,43556**	0,0497743**	573,66543**	37,44356 <sup>n.s.</sup>	0,02344 <sup>n.s.</sup>
C/S2 e D = 1,5 NC		0,33456 <sup>n.s.</sup>	0,00003 <sup>n.s.</sup>	1,5E-06 <sup>n.s.</sup>	163,55673 <sup>n.s.</sup>	2,74334 <sup>n.s.</sup>	0,00332 <sup>n.s.</sup>
Resíduo	46	2,77045	0,00093	0,00037	90,68740	21,43394	0,03380
CV (%)		4,840	3,354	5,646	10,27	8,969	20,533

Esc A = escória A; Esc. B = escória B; Calc. = calcário; S1 = Latossolo Vermelho-amarelo de Sete Lagoas-MG; S2 = Latossolo Vermelho-amarelo de João Pinheiro-MG; e NC = necessidade de calagem (CFSEMG, 1999).

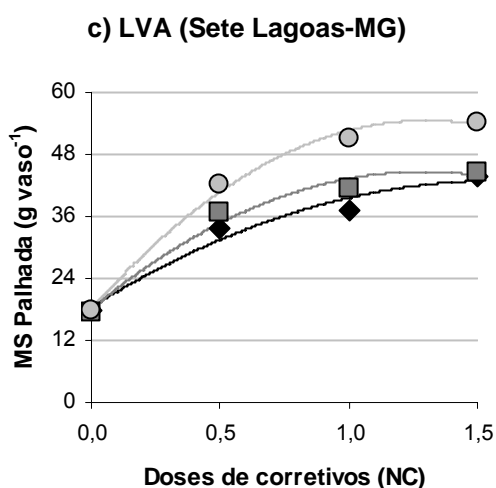
<sup>n.s.</sup>, \*, e \*\* coeficientes não-significativos; significativos a 1; e 5 %, respectivamente.



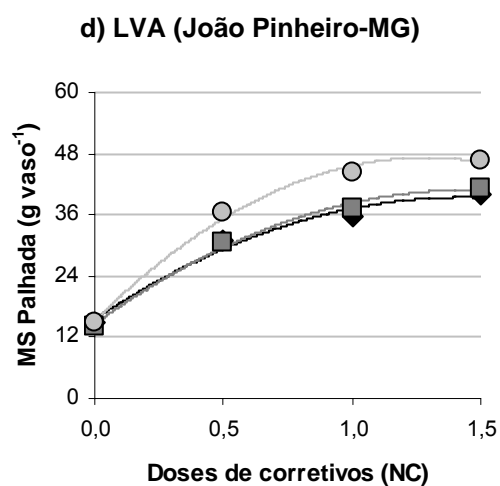
◆  $\hat{Y} = 12,3582 + 40,5817^{***}X - 11,5797^{***}X^2$   $R^2 = 0,9985$   
 ■  $\hat{Y} = 11,6236 + 38,7735^{***}X - 10,3420^{***}X^2$   $R^2 = 0,9947$   
 ○  $\hat{Y} = 12,2118 + 54,2188^{***}X - 18,2070^{***}X^2$   $R^2 = 0,9999$



◆  $\hat{Y} = 7,3997 + 30,6534^{***}X - 10,0463^{***}X^2$   $R^2 = 0,9980$   
 ■  $\hat{Y} = 6,8671 + 32,0600^{***}X - 9,7747^{**}X^2$   $R^2 = 0,9940$   
 ○  $\hat{Y} = 7,3338 + 52,3269^{***}X - 17,7746^{***}X^2$   $R^2 = 0,9986$



◆  $\hat{Y} = 18,4871 + 30,8398^{***}X - 9,7233^{***}X^2$   $R^2 = 0,9664$   
 ■  $\hat{Y} = 18,1269 + 41,1520^{***}X - 15,9540^{***}X^2$   $R^2 = 0,9813$   
 ○  $\hat{Y} = 18,1144 + 56,0868^{***}X - 21,5560^{***}X^2$   $R^2 = 0,9941$



◆  $\hat{Y} = 15,5466 + 33,4125^{***}X - 11,6860^{***}X^2$   $R^2 = 0,9836$   
 ■  $\hat{Y} = 14,6069 + 36,2809^{***}X - 12,5334^{***}X^2$   $R^2 = 0,9956$   
 ○  $\hat{Y} = 15,2789 + 49,7320^{***}X - 19,3590^{***}X^2$   $R^2 = 0,9936$

◆ Escória A

■ Escória B

○ Calcário

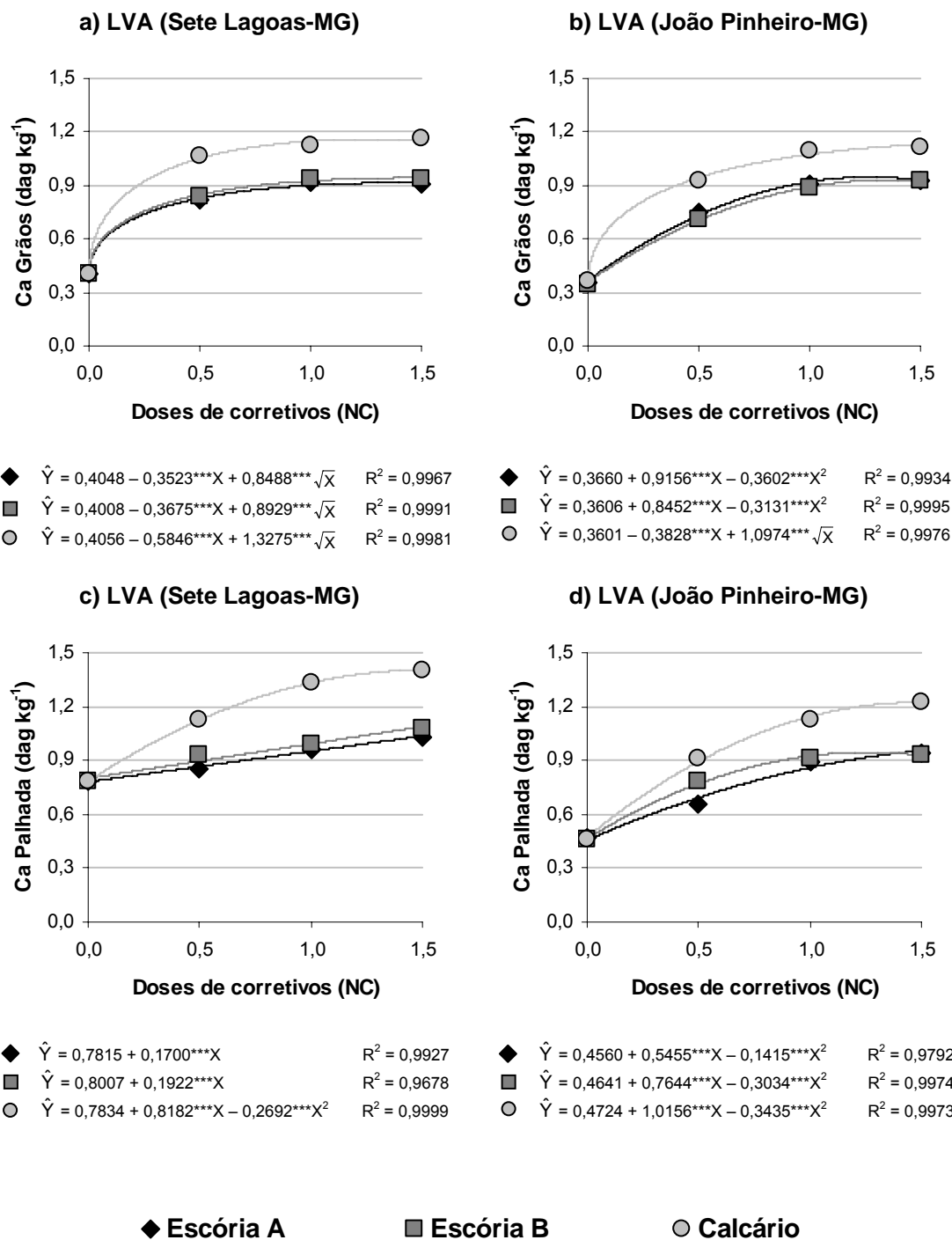
\*\*; e \*\*\* coeficientes significativos a 1; e 0,1 % de probabilidade, respectivamente.

Figura 3.1. Produção de matéria seca (MS) de grãos e palhada de soja referentes ao primeiro cultivo nos Latossolos Vermelho-amarelos (LVA) de Oratórios-MG e João Pinheiro-MG, em resposta às doses dos corretivos.

Verificaram-se, também, diferenças significativas de produção de matéria seca de grãos e palhada entre os dois solos utilizados (Quadro 3.3).

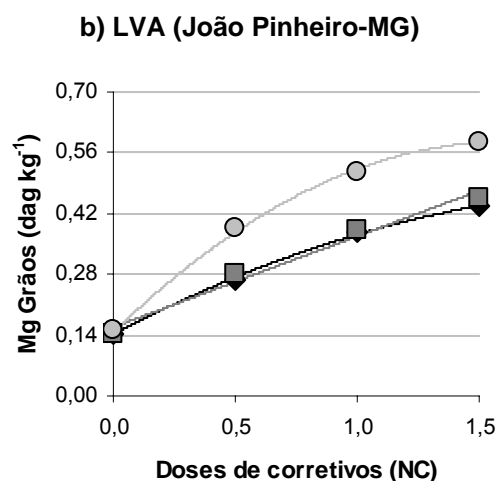
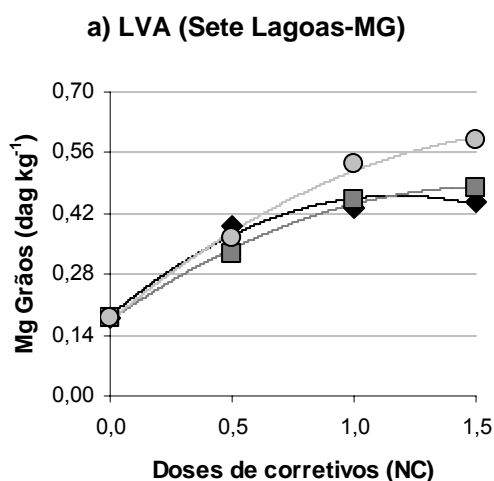
De maneira geral, a resposta positiva da soja a aplicação de corretivos, especialmente dos calcários, está relacionada com a neutralização da acidez dos solos e o fornecimento de nutrientes como o Ca e Mg. O Ca favorece o crescimento radicular, participa da estrutura e funcionamento de membranas, de reações hormonais e da ativação enzimática (via calmodulina). Tanto o Ca quanto o Mg favorecem a absorção e acúmulo de outros nutrientes e o Mg atua na fotossíntese, respiração, armazenameto e transferência de energia, síntese orgânica, balanço eletrolítico e estabilidade dos ribossomos (MALAVOLTA et al., 1989).

Verificaram-se diferenças significativas nos teores de Ca e Mg pelas plantas de soja nos dois solos avaliados, bem como para os corretivos e doses aplicados (Quadro 3.3). Os teores de Ca e Mg na matéria seca, dose de 1,0 NC, foi superior para o calcário em relação às duas escórias LD avaliadas (Figuras 3.2 e 3.3). A CFSEMG (1999) informa os teores de referência de Ca e Mg para a interpretação dos resultados de análises de tecidos; sendo que, para a soja, os teores de Ca e Mg adequados equivalem a 1,00 e 0,40 dag kg<sup>-1</sup>, respectivamente. Vale ressaltar, que estes teores se referem a amostragens realizadas na época do florescimento da cultura, em que se coleta a terceira folha a partir do ápice na haste principal, com pecíolo. No caso do ensaio em questão foram analisados os grãos e o restante da parte aérea (palhada), depois de completado o ciclo da cultura. Estes teores serão aqui adotados como referência, pois não foram verificados na literatura pertinente teores de referência para o caso em questão. Deve ficar claro que estes teores podem não ser os mais apropriados para esta situação. No entanto, tomando-se como base a dose de 1,0 NC, observou-se que o teor de Ca na matéria seca da soja foi superior ao valor de referência (CFSEMG, 1999) apenas para o calcário (Figura 3.2), sugerindo uma menor liberação desse elemento para a solução do solo, por parte das escórias, em decorrência de sua menor solubilidade, conforme já mencionado.



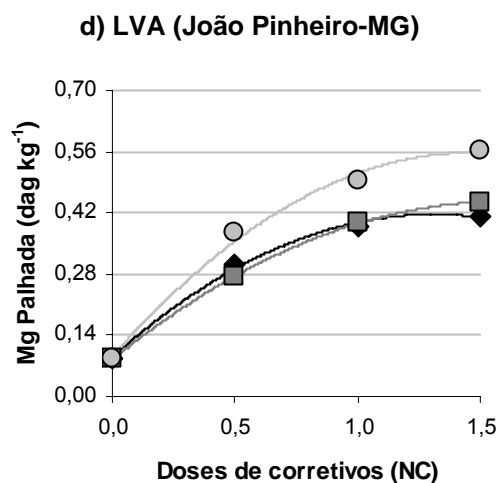
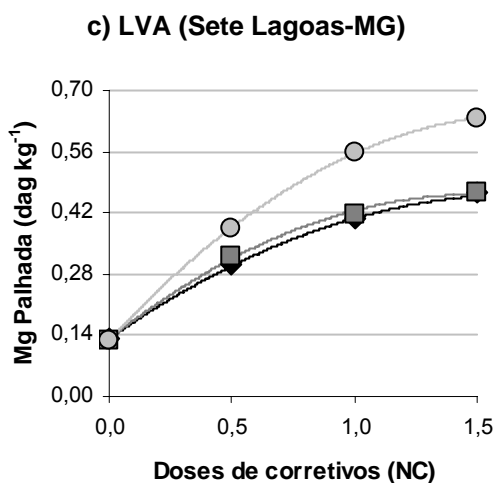
\*\*\* coeficientes significativos a 0,1 % de probabilidade.

Figura 3.2. Teores de Ca na matéria seca (MS) dos grãos e palhada da soja referentes ao primeiro cultivo, nos Latossolos Vermelho-amarelos (LVA) de Oratórios-MG e João Pinheiro-MG, em resposta às doses dos corretivos.



◆  $\hat{Y} = 0,1848 + 0,4707^{***}X - 0,2003^{***}X^2$   $R^2 = 0,9796$   
 ■  $\hat{Y} = 0,1742 + 0,3923^{***}X - 0,1246^{***}X^2$   $R^2 = 0,9957$   
 ○  $\hat{Y} = 0,1733 + 0,4728^{***}X - 0,1277^{***}X^2$   $R^2 = 0,9954$

◆  $\hat{Y} = 0,1417 + 0,2953^{***}X - 0,0652^{***}X^2$   $R^2 = 0,9990$   
 ■  $\hat{Y} = 0,1581 + 0,2098^{***}X$   $R^2 = 0,9843$   
 ○  $\hat{Y} = 0,1461 + 0,5466^{***}X - 0,1700^{***}X^2$   $R^2 = 0,9987$



◆  $\hat{Y} = 0,1326 + 0,3900^{***}X - 0,1151^{***}X^2$   $R^2 = 0,9999$   
 ■  $\hat{Y} = 0,1319 + 0,4394^{***}X - 0,1460^{***}X^2$   $R^2 = 0,9981$   
 ○  $\hat{Y} = 0,1301 + 0,6005^{***}X - 0,1748^{***}X^2$   $R^2 = 0,9999$

◆  $\hat{Y} = 0,0903 + 0,4985^{***}X - 0,1903^{***}X^2$   $R^2 = 0,9959$   
 ■  $\hat{Y} = 0,0847 + 0,4519^{***}X - 0,1411^{***}X^2$   $R^2 = 0,9999$   
 ○  $\hat{Y} = 0,0920 + 0,6343^{***}X - 0,2158^{***}X^2$   $R^2 = 0,9944$

◆ Escória A

■ Escória B

○ Calcário

°, \*\*, e \*\*\* coeficientes significativos a 10; 1; e 0,1 % de probabilidade, respectivamente.

Figura 3.3. Teores de Mg na matéria seca (MS) dos grãos e palhada da soja referentes ao primeiro cultivo, nos Latossolos Vermelho-amarelos (LVA) de Oratórios-MG e João Pinheiro-MG, em resposta às doses dos corretivos.

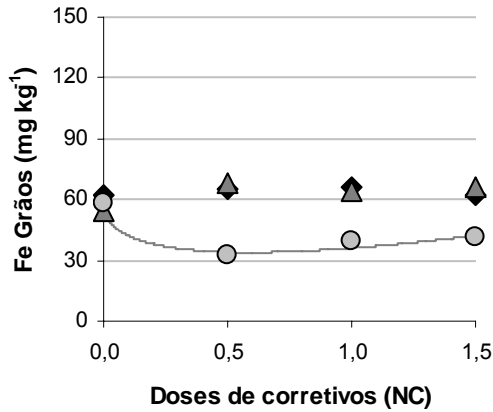
O teor de Mg na parte aérea das plantas também foi inferior para as escórias em comparação com o calcário. As escórias superaram o valor de referência (CFSEMG, 1999), na dose de 1,0 NC, apenas no LVA de Sete Lagoas-MG, sugerindo também, uma menor disponibilização desse elemento para a solução do solo pelas escórias e, por consequência, uma menor absorção desse elemento (Figura 3.3).

Para o LVA de Sete Lagoas-MG não houve variação no teor de Fe em função das doses crescentes de escórias na parte aérea dos grãos de soja (Figura 3.4a); já para o calcário foi verificada uma redução no teor deste elemento, nos grãos, para todas as doses em comparação com a testemunha, cuja variação foi ajustada matematicamente pelo modelo raiz quadrático (Figura 3.4a). Não verificou-se incremento no teor desse elemento quando se aplicou o calcário no LVA de João Pinheiro (Figura 3.4b). No entanto, para este solo, observou-se um incremento do Ca nos grãos da soja, em função das doses de escórias com relação à testemunha (Figura 3.4b). A resposta dos grãos de soja, nesse solo, pela adição da escória A seguiu o modelo quadrático, havendo uma redução no teor desse elemento a partir da dose de 1,0 NC, e a escória B seguiu o modelo raiz quadrático, havendo para essa escória uma redução no teor de Fe a partir da dose de 0,5 NC (Figura 3.4b). Para a palhada, em ambos os solos, houve redução no teor desse elemento, cujo modelo ajustado, para todos os casos foi o quadrático, exceto para a escória B no LVA de Sete Lagoas, que seguiu o modelo raiz quadrático (Figuras 3.4c e 3.4d). Essa redução no teor de Fe pode ser explicada pelo aumento do pH com o incremento de corretivos, o que reduz a disponibilidade de Fe para as plantas. Os equilíbrios de Fe mostrados por Lindsay (1979) indicam a precipitação de  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  com o aumento do pH, justificando a menor absorção desse elemento pela soja.

O teor de referência (nível crítico de deficiência) para o Mn, em soja, é de  $20 \text{ mg kg}^{-1}$  (CFSEMG, 1999). Em todas as situações avaliadas o nível de Mn esteve acima da referência (Figura 3.5). Vale ressaltar, que foi fornecido esse micronutriente como adubação complementar em todos os tratamentos.

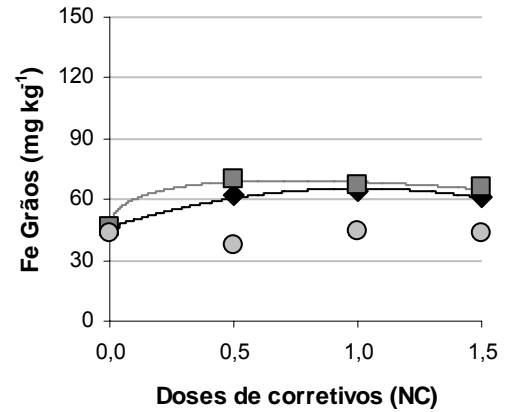
O excesso de Mn induz à deficiência de Fe, que não foi observada neste experimento. Outros sintomas de fitotoxidez causada pelo Mn são: manchas necróticas ao longo do tecido condutor, encarquilhamento das folhas e menor nodulação (MALAVOLTA et al. 1989; MARSCHNER, 1995).

a) LVA (Sete Lagoas-MG)



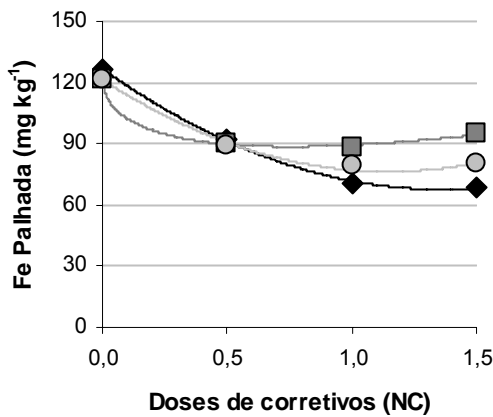
◆  $\hat{Y} = \bar{Y} = 63,8171$   
 ■  $\hat{Y} = \bar{Y} = 63,0391$   
 ○  $\hat{Y} = 57,6316 + 40,0598^{***}X - 61,6301^{***}\sqrt{X}$   $R^2 = 0,9600$

b) LVA (João Pinheiro-MG)



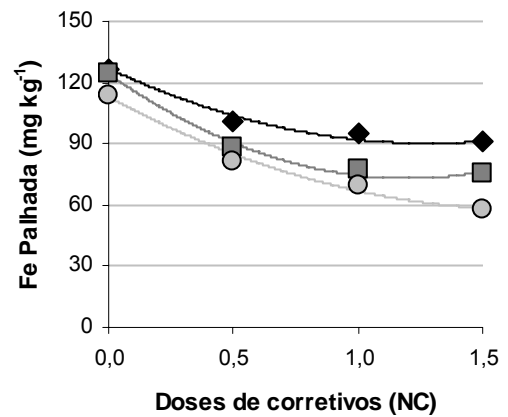
◆  $\hat{Y} = 46,3414 + 38,0368^{***}X - 18,9218^{**}X^2$   $R^2 = 0,9873$   
 ■  $\hat{Y} = 45,9833 - 32,3762^{**}X + 55,1693^{***}\sqrt{X}$   $R^2 = 0,9895$   
 ○  $\hat{Y} = \bar{Y} = 42,4235$

c) LVA (Sete Lagoas-MG)



◆  $\hat{Y} = 126,660 - 86,636^{***}X + 31,794^{**}X^2$   $R^2 = 0,9994$   
 ■  $\hat{Y} = 122,462 + 44,933X - 77,9600^{***}\sqrt{X}$   $R^2 = 0,9970$   
 ○  $\hat{Y} = 121,329 - 78,533^{***}X + 34,284^{**}X^2$   $R^2 = 0,9953$

d) LVA (João Pinheiro-MG)



◆  $\hat{Y} = 126,877 - 57,225^{**}X + 22,336^{*}X^2$   $R^2 = 0,9834$   
 ■  $\hat{Y} = 124,130 - 85,162^{***}X + 35,523^{**}X^2$   $R^2 = 0,9916$   
 ○  $\hat{Y} = 112,839 - 65,360^{***}X + 19,412^{*}X^2$   $R^2 = 0,9856$

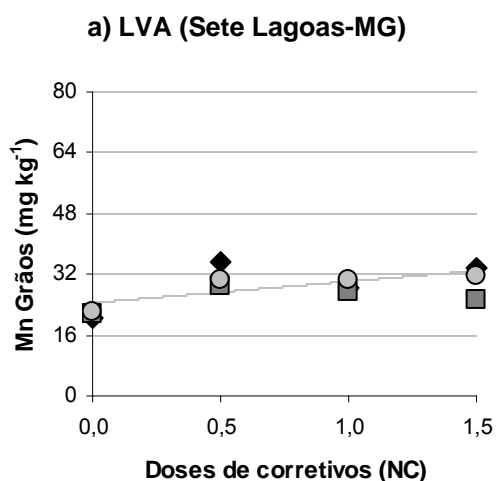
◆ Escória A

■ Escória B

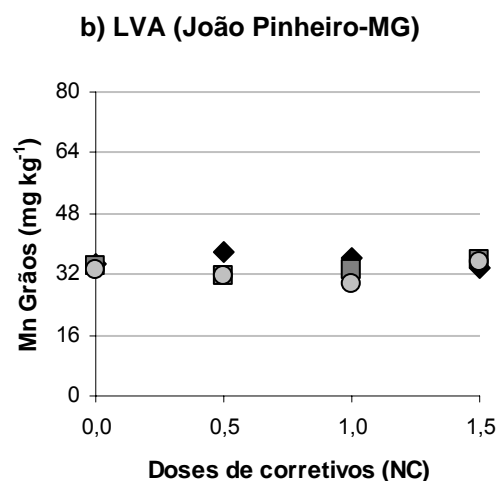
○ Calcário

°, \*, \*\*, e \*\*\* coeficientes significativos a 10; 5; 1; e 0,1 % de probabilidade, respectivamente.

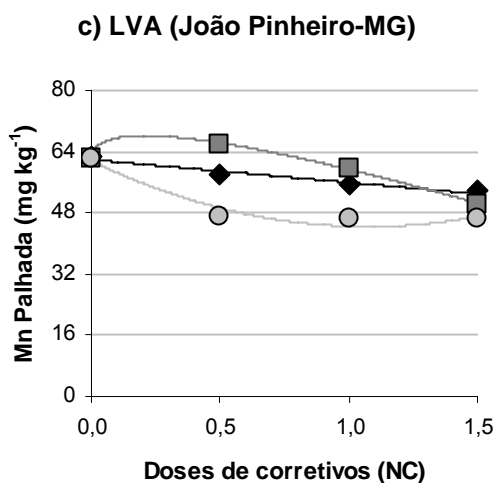
Figura 3.4. Teores de Fe na matéria seca (MS) dos grãos e palhada da soja referentes ao primeiro cultivo, nos Latossolos Vermelho-amarelos (LVA) de Oratórios-MG e João Pinheiro-MG, em resposta às doses dos corretivos.



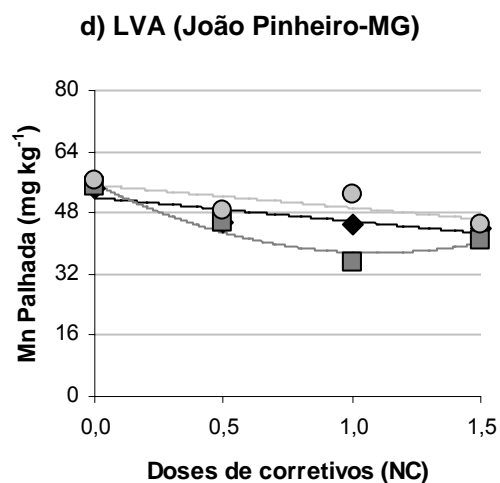
◆  $\hat{Y} = \bar{Y} = 29,4695$   
 ■  $\hat{Y} = \bar{Y} = 25,9460$   
 ○  $\hat{Y} = 24,5183 + 5,6265 \cdot X$   $R^2 = 0,6868$



◆  $\hat{Y} = \bar{Y} = 35,5947$   
 ■  $\hat{Y} = \bar{Y} = 33,5767$   
 ○  $\hat{Y} = \bar{Y} = 32,4004$



◆  $\hat{Y} = 61,8826 - 5,9408 \cdot X$   $R^2 = 0,9330$   
 ■  $\hat{Y} = 61,9278 - 29,8487 \cdot X + 27,2733 \cdot \sqrt{X}$   $R^2 = 0,9994$   
 ○  $\hat{Y} = 61,4983 - 31,8372 \cdot X + 14,8175 \cdot X^2$   $R^2 = 0,9424$



◆  $\hat{Y} = 51,9829 - 6,1877 \cdot X$   $R^2 = 0,6829$   
 ■  $\hat{Y} = 55,5169 - 32,8910 \cdot X + 15,0765 \cdot X^2$   $R^2 = 0,9291$   
 ○  $\hat{Y} = 55,2547 - 5,9420 \cdot X$   $R^2 = 0,6128$

◆ Escória A

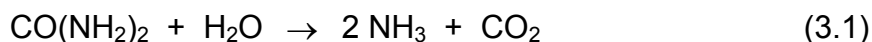
■ Escória B

○ Calcário

\*, \*\*, e \*\*\* coeficientes significativos a 5; 1; e 0,1 % de probabilidade, respectivamente.

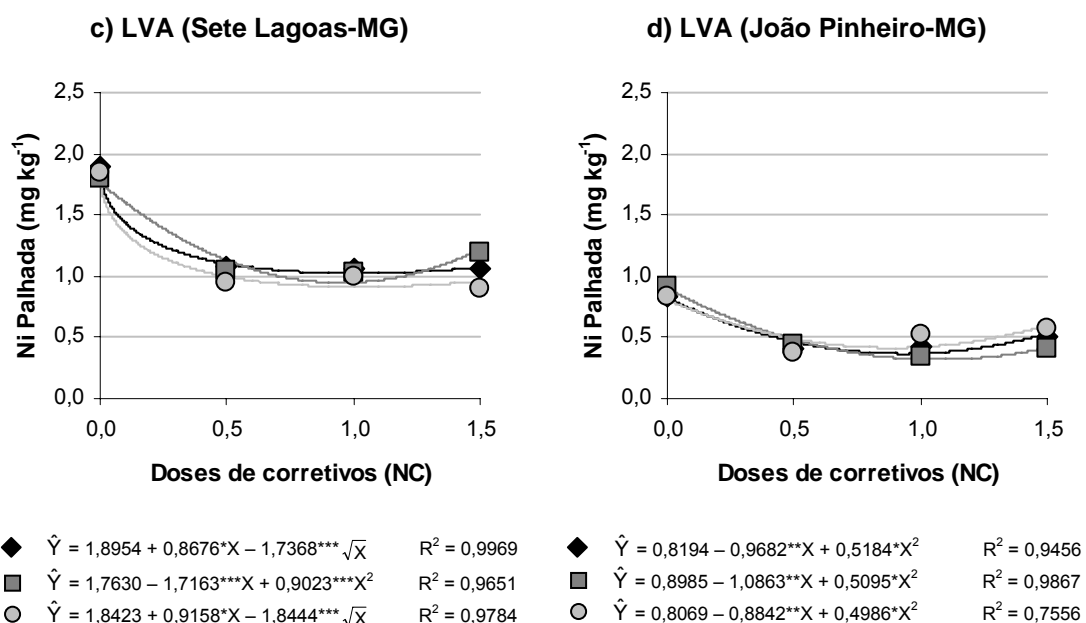
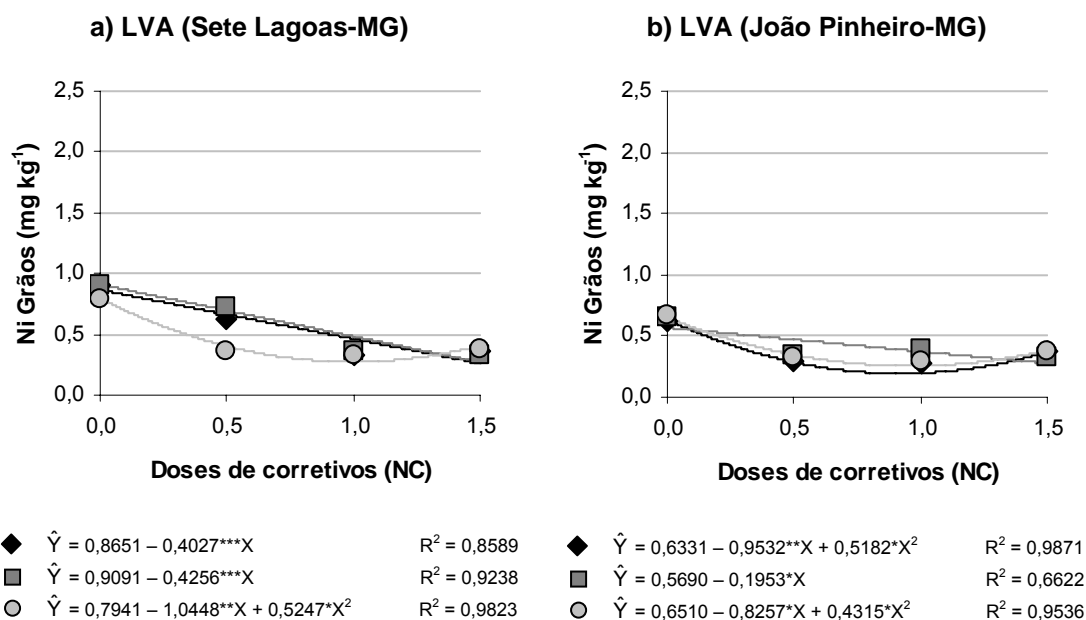
Figura 3.5. Teores de Mn na matéria seca (MS) dos grãos e palhada da soja referentes ao primeiro cultivo, nos Latossolos Vermelho-amarelos (LVA) de Oratórios-MG e João Pinheiro-MG, em resposta às doses dos corretivos.

O níquel ocorre normalmente nas plantas na faixa de 0,1 a 1,0 mg kg<sup>-1</sup> de matéria seca. Níveis críticos de toxidez para plantas sensíveis ocorrem a partir de 10,0 mg kg<sup>-1</sup> de matéria seca e para plantas tolerantes a partir de 50,0 mg kg<sup>-1</sup> (WELCH, 1981; BOLLARD, 1983). Em plantas que se desenvolvem em solos derivados de serpentina, o teor de Ni pode atingir a 50.000 mg kg<sup>-1</sup> de matéria seca (WELCH, 1981; BOLLARD, 1983; MARSCHNER, 1995). Uma elevada proporção do Ni nestas plantas é complexada por ácidos orgânicos em espécies adaptadas como o *Hyperaccu mulators*, que podem contribuir para a tolerância a esse elemento; no entanto outros mecanismos, ainda não muito bem conhecidos podem contribuir para essa tolerância (WOOLHOUSE, 1983). Altos níveis de Ni nas plantas e substrato podem induzir à deficiência de Zn e Fe (ANDERSON et al., 1973). Segundo Mishra e Kar (1974), baixas concentrações de Ni no substrato estimulam a germinação e o crescimento de várias espécies cultivadas, porém não há consenso a respeito do papel desempenhado pelo Ni nas plantas superiores. Alguns estudos bioquímicos indicam que esse elemento é componente da urease, enzima que cataliza a reação de hidrólise da uréia (DIXON et al., 1975):



Foi verificada uma redução nos teores de Ni nas plantas de soja cultivadas nos solos tratados com os corretivos, em comparação com as testemunhas (Figura 3.6). Não foram observadas, porém, diferenças significativas entre o calcário e as escórias (Quadro 3.3) Os teores de Ni observados podem ser considerados normais e estão muito abaixo dos níveis que normalmente provocam fitotoxidez.

Não foram detectados Cd e Cr nas plantas de soja, apesar da presença destes metais pesados nas amostras de escória (Quadro 3.2). De modo geral, os resultados indicam que não houve contaminação das plantas de soja, neste primeiro cultivo, pelos metais pesados avaliados, nas condições estudadas.



◆ Escória A

■ Escória B

○ Calcário

\*, \*\*, e \*\*\* coeficientes significativos a 5; 1; e 0,1 % de probabilidade, respectivamente.

Figura 3.6. Teores de Ni na matéria seca (MS) dos grãos e palhada da soja referentes ao primeiro cultivo, nos Latossolos Vermelho-amarelos (LVA) de Oratórios-MG e João Pinheiro-MG, em resposta às doses dos corretivos.

### 3.3.2. Segundo cultivo da soja

De forma similar ao primeiro cultivo, houve acréscimo significativo na produção de matéria seca da soja com o incremento das doses dos corretivos e o efeito da aplicação do calcário se sobrepôs, novamente, ao efeito das duas escórias avaliadas (Quadro 3.4 e Figura 3.7). Com base nas equações ajustadas para produção de matéria seca em função das doses de corretivos (Figura 3.7), verificou-se que a utilização do calcário, na dose recomendada de 1,0 NC, promoveu uma produção de grãos cerca de 34,5 e 28,8 % superior às escórias A e B, respectivamente, no LVA de Sete Lagoas-MG. Para o LVA de João Pinheiro-MG esta diferença subiu para aproximadamente 48,8 e 40,6 %, respectivamente. Com relação à produção de palhada no LVA de Sete Lagoas-MG a dose de 1,0 NC de calcário promoveu um acréscimo de produção cerca de 14,9 e 18,0 % superior às escórias A e B, respectivamente. Para o LVA de João Pinheiro esta diferença foi cerca de 33,4 e 31,9 % na produção de palhada em relação às escórias A e B, respectivamente, em favor do calcário. O desempenho das escórias na produção de matéria seca de grãos neste cultivo foi inferior àquele obtido no primeiro cultivo nos dois solos. Apesar de não terem sido comparados estatisticamente o primeiro e o segundo cultivos, observou-se, ainda, uma menor produção de matéria seca no segundo cultivo em relação ao primeiro (Figuras 3.1 e 3.7).

O teor de Ca na parte aérea das plantas em função da aplicação dos corretivos, na dose de 1,0 NC, não foi superior ao valor de referência (nível crítico de deficiência), 1,00 dag kg<sup>-1</sup> (CFSEMG, 1999) (Figura 3.8).

Para os dois solos avaliados, na dose 1,0 NC, apenas no tratamento com calcário verificou-se que os teores de Mg na matéria seca dos grãos da soja superaram o valor de referência, 0,40 dag kg<sup>-1</sup> (CFSEMG, 1999). Para todas as situações observadas, o calcário apresentou melhor eficiência em fornecer Mg para as plantas do que as escórias (Figura 3.9).

Não observou-se acréscimo do teor de ferro na matéria seca de grãos em função da aplicação dos corretivos no LVA de Sete Lagoas-MG (Figura 3.10a). No LVA de João Pinheiro-MG, verificou-se redução linear no teor de Fe com o incremento das doses de escória A (Figura 3.10b). Nos demais casos, o teor de Fe nos grãos não se alterou significativamente com as doses de corretivos (Figura 3.10b). O teor de Fe na palhada da soja cultivada no

Quadro 3.4. Análise de variância para matéria seca (MS), Ca, Mg, Fe, Mn e Ni nos grãos e palhada da soja referentes ao segundo cultivo nos Latossolos Vermelho-amarelos de Sete Lagoas-MG e João Pinheiro-MG tratados com as escórias A e B e o calcário

FV	GL	QM					
		MSV Grãos	Ca Grãos	Mg Grãos	Fe Grãos	Mn Grãos	Ni Grãos
Blocos (B)	2	25,85818**	0,00074 <sup>n.s.</sup>	0,00063 <sup>n.s.</sup>	140,54130 <sup>n.s.</sup>	88,08805*	0,14119 <sup>n.s.</sup>
Solos (S)	1	506,56400**	0,03089**	0,01012**	237,41220 <sup>n.s.</sup>	24,61228 <sup>n.s.</sup>	7,9E-05 <sup>n.s.</sup>
Corretivos (C)	2	870,92750**	0,08884**	0,08834**	77,09580 <sup>n.s.</sup>	11,32323 <sup>n.s.</sup>	0,01573 <sup>n.s.</sup>
Doses (D)	3	3.679,93500**	2,30570**	0,43341**	211,66790 <sup>n.s.</sup>	196,71090**	0,07132 <sup>n.s.</sup>
D x C	6	108,07430**	0,01977**	0,00998**	71,62886 <sup>n.s.</sup>	8,23699 <sup>n.s.</sup>	0,01210 <sup>n.s.</sup>
D x S	3	92,59927**	0,02017**	0,00172 <sup>n.s.</sup>	203,79770 <sup>n.s.</sup>	83,60683*	0,04182 <sup>n.s.</sup>
C x S	2	63,30528**	0,00072 <sup>n.s.</sup>	0,00084 <sup>n.s.</sup>	284,27080 <sup>n.s.</sup>	14,46946 <sup>n.s.</sup>	0,00591 <sup>n.s.</sup>
D x C x S	6	27,37873**	0,00369 <sup>n.s.</sup>	0,00194*	232,80870 <sup>n.s.</sup>	8,69013 <sup>n.s.</sup>	0,00890 <sup>n.s.</sup>
S/C = Esc. A x D = 0,0 NC		11,27785 <sup>n.s.</sup>	0,00469 <sup>n.s.</sup>	0,00018 <sup>n.s.</sup>	61,37878 <sup>n.s.</sup>	45,87173 <sup>n.s.</sup>	0,03002 <sup>n.s.</sup>
S/C = Esc. A x D = 0,5 NC		48,79201**	5,7E-06 <sup>n.s.</sup>	0,00083 <sup>n.s.</sup>	171,49210 <sup>n.s.</sup>	0,26869 <sup>n.s.</sup>	0,00016 <sup>n.s.</sup>
S/C = Esc. A x D = 1,0 NC		26,21697**	0,01359**	0,00630**	108,67570 <sup>n.s.</sup>	3,91999 <sup>n.s.</sup>	0,03650 <sup>n.s.</sup>
S/C = Esc. A x D = 1,5 NC		375,93080**	0,00820*	0,00727**	626,20100*	53,38071 <sup>n.s.</sup>	0,00645 <sup>n.s.</sup>
S/C = Esc. B x D = 0,0 NC		11,39330 <sup>n.s.</sup>	0,00512 <sup>n.s.</sup>	0,00012 <sup>n.s.</sup>	101,03000 <sup>n.s.</sup>	21,57483 <sup>n.s.</sup>	0,06585 <sup>n.s.</sup>
S/C = Esc. B x D = 0,5 NC		84,44520**	0,00198 <sup>n.s.</sup>	3,1E-05 <sup>n.s.</sup>	313,44380 <sup>n.s.</sup>	15,47630 <sup>n.s.</sup>	0,00892 <sup>n.s.</sup>
S/C = Esc. B x D = 1,0 NC		31,95195**	0,01309**	0,00358*	544,67020*	29,16714 <sup>n.s.</sup>	0,00661 <sup>n.s.</sup>
S/C = Esc. B x D = 1,5 NC		298,55350**	0,02295**	0,00719**	114,74920 <sup>n.s.</sup>	82,46824 <sup>n.s.</sup>	0,00736 <sup>n.s.</sup>
S/C = Cal. A x D = 0,0 NC		11,65105 <sup>n.s.</sup>	0,00435 <sup>n.s.</sup>	7,1E-05 <sup>n.s.</sup>	68,31921 <sup>n.s.</sup>	10,01881 <sup>n.s.</sup>	0,00613 <sup>n.s.</sup>
S/C = Cal. A x D = 0,5 NC		84,87071**	0,26387**	0,00271 <sup>n.s.</sup>	93,36346 <sup>n.s.</sup>	13,88074 <sup>n.s.</sup>	0,01803 <sup>n.s.</sup>
S/C = Cal. A x D = 1,0 NC		41,34900**	0,01449**	2,4E-05 <sup>n.s.</sup>	355,18440 <sup>n.s.</sup>	39,72256 <sup>n.s.</sup>	0,00014 <sup>n.s.</sup>
S/C = Cal. A x D = 1,5 NC		48,81482**	0,00014 <sup>n.s.</sup>	0,00027 <sup>n.s.</sup>	255,69100 <sup>n.s.</sup>	40,76271 <sup>n.s.</sup>	0,00464 <sup>n.s.</sup>
C/S1 e D = 0,0 NC		0,00008 <sup>n.s.</sup>	3,8E-06 <sup>n.s.</sup>	1,8E-05 <sup>n.s.</sup>	10,42596 <sup>n.s.</sup>	0,63153 <sup>n.s.</sup>	0,00141 <sup>n.s.</sup>
C/S1 e D = 0,5 NC		31,15414**	0,00103 <sup>n.s.</sup>	0,01462**	53,85864 <sup>n.s.</sup>	31,18762 <sup>n.s.</sup>	0,01367 <sup>n.s.</sup>
C/S1 e D = 1,0 NC		310,46620**	0,01592**	0,03262**	348,28630 <sup>n.s.</sup>	19,64091 <sup>n.s.</sup>	0,01093 <sup>n.s.</sup>
C/S1 e D = 1,5 NC		59,92734**	0,07554**	0,02439**	96,74603 <sup>n.s.</sup>	3,15121 <sup>n.s.</sup>	0,01059 <sup>n.s.</sup>
C/S2 e D = 0,0 NC		0,00159 <sup>n.s.</sup>	3,4E-05 <sup>n.s.</sup>	4,7E-06 <sup>n.s.</sup>	2,55545 <sup>n.s.</sup>	3,35134 <sup>n.s.</sup>	0,02244 <sup>n.s.</sup>
C/S2 e D = 0,5 NC		367,01420**	0,01379**	0,03158**	40,18933 <sup>n.s.</sup>	2,88163 <sup>n.s.</sup>	0,00225 <sup>n.s.</sup>
C/S2 e D = 1,0 NC		279,11390**	0,19994**	0,01624**	141,76690 <sup>n.s.</sup>	4,25760 <sup>n.s.</sup>	0,02250 <sup>n.s.</sup>
C/S2 e D = 1,5 NC		292,91450**	0,03661**	0,00545**	580,85050*	11,47221 <sup>n.s.</sup>	0,00089 <sup>n.s.</sup>
Resíduo	46	3,388867	0,00167	0,00079	99,48686	21,48465	0,08559
CV (%)		8,0834	6,7374	9,3090	20,6910	18,0880	55,2

Esc A = escória A; Esc. B = escória B; Calc. = calcário; S1 = Latossolo Vermelho-amarelo de Sete Lagoas-MG; S2 = Latossolo Vermelho-amarelo de João Pinheiro-MG; e NC = necessidade de calagem (CFSEMG, 1999).

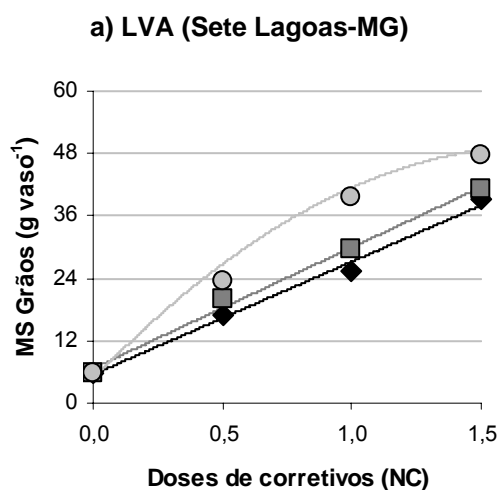
<sup>n.s.</sup>, \*, e \*\* coeficientes não-significativos; significativos a 1; e 5 %, respectivamente.

Quadro 3.4, Cont.

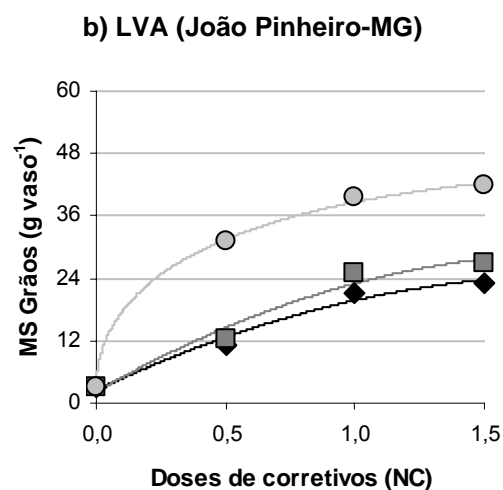
FV	GL	QM					
		MSV Palhada	Ca Palhada	Mg Palhada	Fe Palhada	Mn Palhada	Ni Palhada
Blocos (B)	2	0,05452 <sup>n.s.</sup>	0,00104 <sup>n.s.</sup>	0,00118 <sup>n.s.</sup>	4,50837 <sup>n.s.</sup>	14,78903 <sup>n.s.</sup>	0,23186 <sup>n.s.</sup>
Solos (S)	1	2.710,62700**	0,17918**	0,00090 <sup>n.s.</sup>	283,58590**	5,06932 <sup>n.s.</sup>	1,84756**
Corretivos (C)	2	302,14720**	0,17549**	0,03737**	292,75300**	97,04098**	0,37906 <sup>n.s.</sup>
Doses (D)	3	2.807,28600**	0,55699**	0,03353**	3.086,66100**	2.869,08000**	1,07820**
D x C	6	35,57607**	0,02899**	0,00422**	126,34440**	58,95603**	0,07902 <sup>n.s.</sup>
D x S	3	61,13660**	0,02371**	0,00323**	826,63150**	64,68282*	0,29311 <sup>n.s.</sup>
C x S	2	28,33073**	0,00363*	2,9E-05 <sup>n.s.</sup>	39,60385 <sup>n.s.</sup>	11,03284 <sup>n.s.</sup>	0,18098 <sup>n.s.</sup>
D x C x S	6	5,07016*	0,00139 <sup>n.s.</sup>	0,00097 <sup>n.s.</sup>	36,58756 <sup>n.s.</sup>	18,72681 <sup>n.s.</sup>	0,05407 <sup>n.s.</sup>
S/C = Esc. A x D = 0,0 NC		79,93500**	0,05997**	7,3E-09 <sup>n.s.</sup>	845,42250**	3,76483 <sup>n.s.</sup>	0,77966*
S/C = Esc. A x D = 0,5 NC		307,76540**	0,00038 <sup>n.s.</sup>	0,00092 <sup>n.s.</sup>	87,83575*	101,07140*	0,01827 <sup>n.s.</sup>
S/C = Esc. A x D = 1,0 NC		431,76770**	0,00814**	1,8E-07 <sup>n.s.</sup>	107,28090*	0,14650 <sup>n.s.</sup>	0,05753 <sup>n.s.</sup>
S/C = Esc. A x D = 1,5 NC		434,72490**	0,00886**	7,9E-05 <sup>n.s.</sup>	16,83706 <sup>n.s.</sup>	16,10436 <sup>n.s.</sup>	0,14366 <sup>n.s.</sup>
S/C = Esc. B x D = 0,0 NC		81,56383**	0,05903**	1,9E-05 <sup>n.s.</sup>	881,44500**	8,50297 <sup>n.s.</sup>	0,60377 <sup>n.s.</sup>
S/C = Esc. B x D = 0,5 NC		211,93930**	0,01686**	0,00928**	1,06754 <sup>n.s.</sup>	15,43517 <sup>n.s.</sup>	0,26593 <sup>n.s.</sup>
S/C = Esc. B x D = 1,0 NC		341,89420**	0,00603**	0,00025 <sup>n.s.</sup>	23,25520 <sup>n.s.</sup>	7,06502 <sup>n.s.</sup>	0,01993 <sup>n.s.</sup>
S/C = Esc. B x D = 1,5 NC		489,58870**	0,03020**	0,00393**	18,14520 <sup>n.s.</sup>	39,82728 <sup>n.s.</sup>	0,55869 <sup>n.s.</sup>
S/C = Cal. A x D = 0,0 NC		93,88379**	0,06881**	4,1E-06 <sup>n.s.</sup>	849,18590**	2,59237 <sup>n.s.</sup>	0,74285*
S/C = Cal. A x D = 0,5 NC		90,17126**	0,00015 <sup>n.s.</sup>	0,00192*	141,48250**	88,47009*	0,00018 <sup>n.s.</sup>
S/C = Cal. A x D = 1,0 NC		181,99530**	0,00203 <sup>n.s.</sup>	3,0E-05 <sup>n.s.</sup>	6,39924 <sup>n.s.</sup>	0,03762 <sup>n.s.</sup>	0,00152 <sup>n.s.</sup>
S/C = Cal. A x D = 1,5 NC		235,88990**	0,00546*	4,2E-05 <sup>n.s.</sup>	83,85635*	50,52667 <sup>n.s.</sup>	0,05679 <sup>n.s.</sup>
C/S1 e D = 0,0 NC		0,07395 <sup>n.s.</sup>	1,1E-05 <sup>n.s.</sup>	4,9E-07 <sup>n.s.</sup>	0,10914 <sup>n.s.</sup>	0,91088 <sup>n.s.</sup>	0,01322 <sup>n.s.</sup>
C/S1 e D = 0,5 NC		27,17924**	0,00959**	0,00807**	10,80792 <sup>n.s.</sup>	50,57725*	0,15227 <sup>n.s.</sup>
C/S1 e D = 1,0 NC		42,04754**	0,04231**	0,00633**	79,90990*	110,27840**	0,27544 <sup>n.s.</sup>
C/S1 e D = 1,5 NC		33,84615**	0,05734**	0,01376**	462,51460**	47,18927 <sup>n.s.</sup>	0,13491 <sup>n.s.</sup>
C/S2 e D = 0,0 NC		0,11240 <sup>n.s.</sup>	0,00020 <sup>n.s.</sup>	1,6E-05 <sup>n.s.</sup>	0,04739 <sup>n.s.</sup>	0,21899 <sup>n.s.</sup>	0,01185 <sup>n.s.</sup>
C/S2 e D = 0,5 NC		106,11920**	0,02326**	0,01081**	122,29370**	22,65703 <sup>n.s.</sup>	0,01637 <sup>n.s.</sup>
C/S2 e D = 1,0 NC		129,29840**	0,05548**	0,00592**	12,28402 <sup>n.s.</sup>	78,23827*	0,10754 <sup>n.s.</sup>
C/S2 e D = 1,5 NC		113,73980**	0,08206**	0,00808**	133,18620**	31,05220 <sup>n.s.</sup>	0,24767 <sup>n.s.</sup>
Resíduo	46	1,64049	0,00082	0,00046	17,08560	15,68834	0,17562
CV (%)		5,0298	4,1981	8,6542	6,4215	7,4650	28,587

Esc A = escória A; Esc. B = escória B; Calc. = calcário; S1 = Latossolo Vermelho-amarelo de Sete Lagoas-MG; S2 = Latossolo Vermelho-amarelo de João Pinheiro-MG; e NC = necessidade de calagem (CFSEMG, 1999).

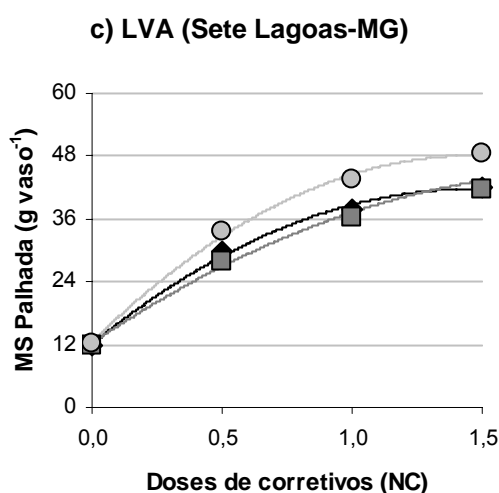
<sup>n.s.</sup>, \*, e \*\* coeficientes não-significativos; significativos a 1; e 5 %, respectivamente.



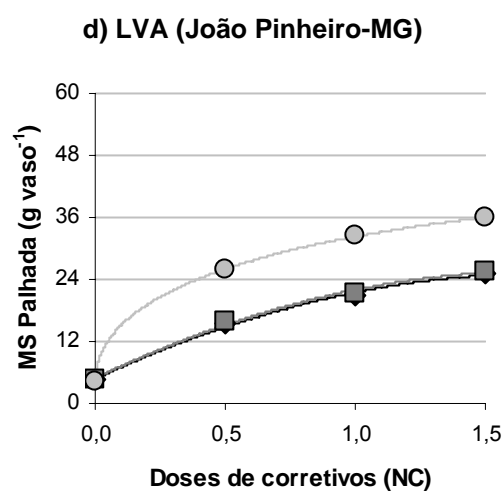
◆  $\hat{Y} = 5,5126 + 21,6855^{***}X$   $R^2 = 0,9911$   
 ■  $\hat{Y} = 6,6938 + 23,2355^{***}X$   $R^2 = 0,9945$   
 ○  $\hat{Y} = 4,6032 + 51,7077^{***}X - 14,8597^{***}X^2$   $R^2 = 0,9796$



◆  $\hat{Y} = 2,4969 + 23,5151^{***}X - 6,2523^{**}X^2$   $R^2 = 0,9847$   
 ■  $\hat{Y} = 2,2303 + 28,3609^{***}X - 7,5727^{***}X^2$   $R^2 = 0,9738$   
 ○  $\hat{Y} = 2,8433 - 16,0192^{***}X + 51,8415^{***}\sqrt{X}$   $R^2 = 0,9989$



◆  $\hat{Y} = 12,1569 + 40,2926^{***}x - 13,7097^{***}X^2$   $R^2 = 0,9975$   
 ■  $\hat{Y} = 12,3081 + 33,4761^{***}x - 8,5237^{***}X^2$   $R^2 = 0,9973$   
 ○  $\hat{Y} = 12,5351 + 48,5053^{***}x - 16,5140^{***}X^2$   $R^2 = 0,9973$



◆  $\hat{Y} = 4,7671 + 23,4807^{***}X - 6,7437^{***}X^2$   $R^2 = 0,9975$   
 ■  $\hat{Y} = 4,8810 + 24,1030^{***}X - 6,9800^{***}X^2$   $R^2 = 0,9961$   
 ○  $\hat{Y} = 4,2805 - 9,3298^{***}X + 37,3500^{***}\sqrt{X}$   $R^2 = 0,9999$

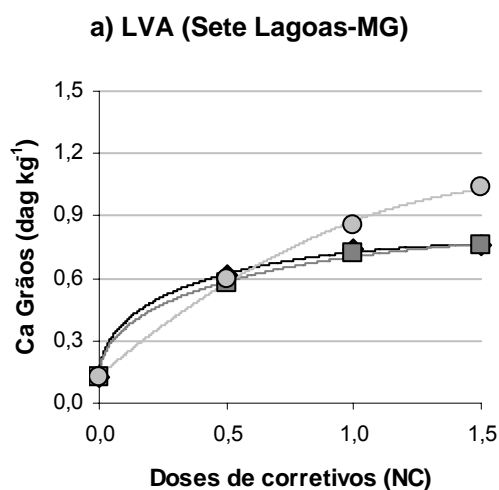
◆ Escória A

■ Escória B

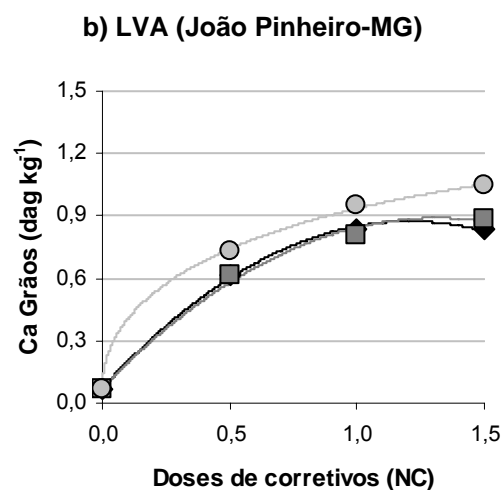
○ Calcário

\*\*; e \*\*\* coeficientes significativos a 1; e 0,1 %, respectivamente.

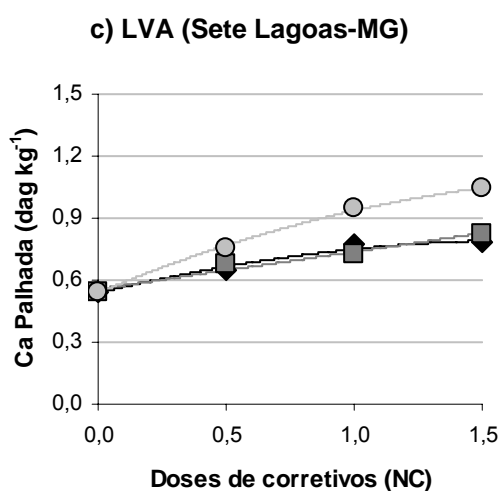
Figura 3.7. Produção de matéria seca (MS) de grãos e palhada de soja referentes ao segundo cultivo nos Latossolos Vermelho-amarelos (LVA) de Oratórios-MG e João Pinheiro-MG, em resposta às doses dos corretivos.



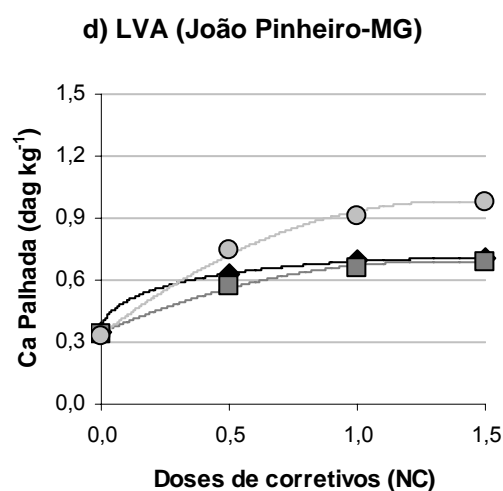
◆  $\hat{Y} = 0,1223 - 0,3510^{***}X + 0,9547^{***}\sqrt{X}$   $R^2 = 0,9988$   
 ■  $\hat{Y} = 0,1219 - 0,2454^{**}X + 0,8278^{***}\sqrt{X}$   $R^2 = 0,9989$   
 ○  $\hat{Y} = 0,1324 + 1,0353^{***}X - 0,2923^{***}X^2$   $R^2 = 0,9977$



◆  $\hat{Y} = 0,0728 + 1,3286^{***}X - 0,5503^{***}X^2$   $R^2 = 0,9986$   
 ■  $\hat{Y} = 0,0758 + 1,2430^{***}X - 0,4739^{***}X^2$   $R^2 = 0,9937$   
 ○  $\hat{Y} = 0,0700 - 0,2846^{***}X + 1,1505^{***}\sqrt{X}$   $R^2 = 0,9993$



◆  $\hat{Y} = 0,5382 + 0,2977^{***}x - 0,0860x^2$   $R^2 = 0,9751$   
 ■  $\hat{Y} = 0,5576 + 0,1797^{***}x$   $R^2 = 0,9659$   
 ○  $\hat{Y} = 0,5400 + 0,5141^{***}x - 0,1178^{***}x^2$   $R^2 = 0,9976$



◆  $\hat{Y} = 0,3446 - 0,2104^{***}X + 0,5563^{***}\sqrt{X}$   $R^2 = 0,9993$   
 ■  $\hat{Y} = 0,3470 + 0,5304^{***}X - 0,2055^{***}X^2$   $R^2 = 0,9957$   
 ○  $\hat{Y} = 0,3375 + 0,9428^{***}X - 0,3457^{***}X^2$   $R^2 = 0,9955$

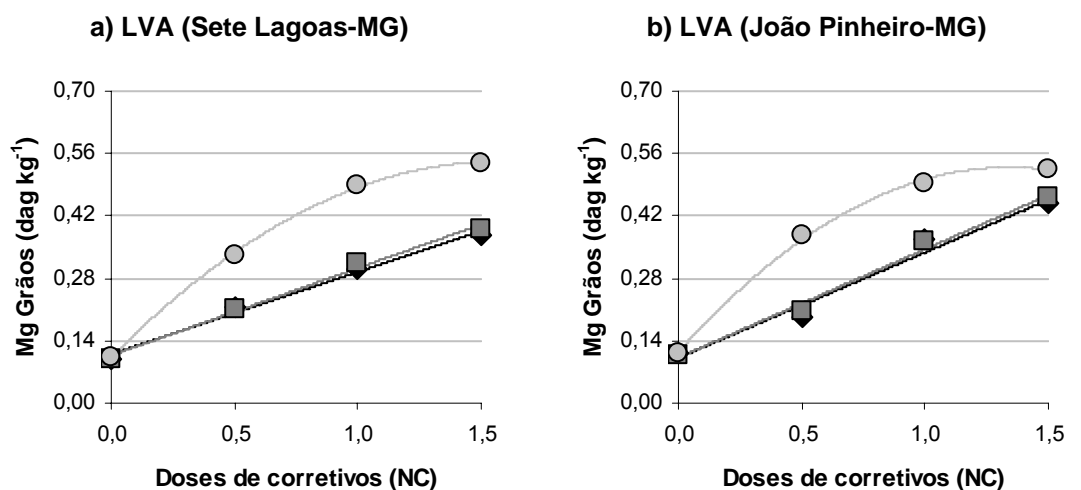
◆ Escória A

■ Escória B

○ Calcário

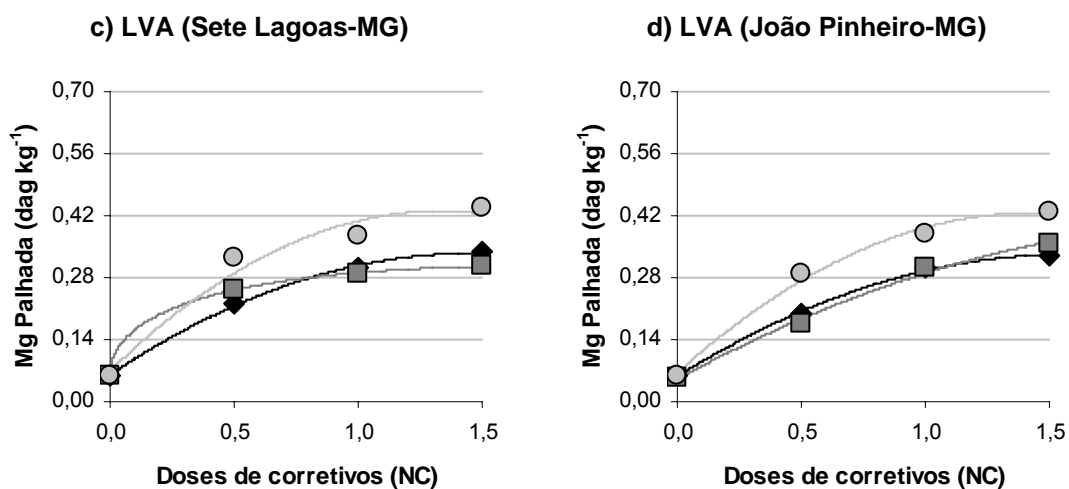
\*, \*\*, e \*\*\* coeficientes significativos a 5; 1; e 0,1 % de probabilidade, respectivamente.

Figura 3.8. Teores de Ca na matéria seca (MS) dos grãos e palhada da soja referentes ao primeiro cultivo, nos Latossolos Vermelho-amarelos (LVA) de Oratórios-MG e João Pinheiro-MG, em resposta às doses dos corretivos.



◆  $\hat{Y} = 0,1106 + 0,1839^{***}X$   $R^2 = 0,9905$   
 ■  $\hat{Y} = 0,1070 + 0,1960^{***}X$   $R^2 = 0,9934$   
 ○  $\hat{Y} = 0,1025 + 0,5594^{***}X - 0,1778^{***}X^2$   $R^2 = 0,9997$

◆  $\hat{Y} = 0,1014 + 0,2368^{***}X$   $R^2 = 0,9764$   
 ■  $\hat{Y} = 0,1025 + 0,2428^{***}X$   $R^2 = 0,9899$   
 ○  $\hat{Y} = 0,1141 + 0,6190^{***}X - 0,2307^{***}X^2$   $R^2 = 0,9978$



◆  $\hat{Y} = 0,0608 + 0,3740^{***}x + 0,1274^{***}X^2$   $R^2 = 0,9977$   
 ■  $\hat{Y} = 0,0588 - 0,1392^{**}x + 0,3716^{***}\sqrt{X}$   $R^2 = 0,9998$   
 ○  $\hat{Y} = 0,0693 + 0,5428^{***}x - 0,2040^{***}X^2$   $R^2 = 0,9686$

◆  $\hat{Y} = 0,0567 + 0,3487^{***}X - 0,1101^{***}X^2$   $R^2 = 0,9985$   
 ■  $\hat{Y} = 0,0511 + 0,3032^{***}X - 0,0643^{**}X^2$   $R^2 = 0,9941$   
 ○  $\hat{Y} = 0,0646 + 0,5053^{***}X - 0,1765^{***}X^2$   $R^2 = 0,9937$

◆ Escória A

■ Escória B

○ Calcário

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

Figura 3.9. Teores de Mg na matéria seca (MS) dos grãos e palhada da soja referentes ao primeiro cultivo, nos Latossolos Vermelho-amarelos (LVA) de Oratórios-MG e João Pinheiro-MG, em resposta às doses dos corretivos.

LVA de Sete Lagoas-MG foi superior ao nível crítico de deficiência,  $50 \text{ mg kg}^{-1}$  (CFSEMG, 1999), em todas as situações, exceto para o calcário na dose de 1,5 NC (Figuras 3.10c e 3.10d). Nesta situação, o teor de Fe calculado foi de  $44,49 \text{ mg kg}^{-1}$  de matéria seca. Não foi observado qualquer sintoma de fitotoxidez causada por Fe neste cultivo.

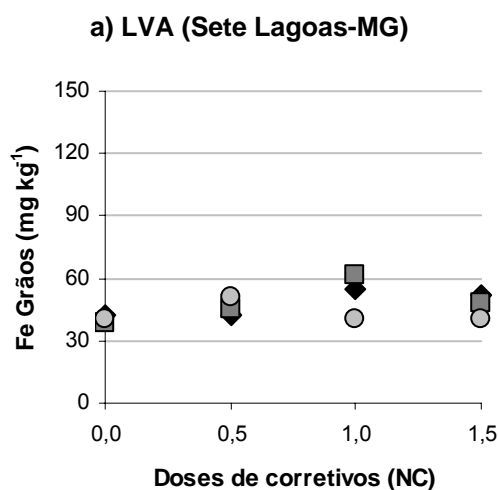
O teor de Mn nos grãos da soja cultivada no LVA de Sete Lagoas-MG decresceu linearmente com o aumento das doses dos corretivos (Figura 3.11a). Para as escórias A e B os teores de Mn estimados pela equação de regressão, para a dose de 1,5 NC foram de  $20,6$  e  $19,1 \text{ mg kg}^{-1}$  de matéria seca, respectivamente, e o teor ajustado de Mn, para o calcário, foi de  $17,5 \text{ mg kg}^{-1}$ . O valor de referência (nível crítico de deficiência) para Mn adotado neste trabalho foi de  $20,0 \text{ mg kg}^{-1}$  de matéria seca (CFSEMG, 1999). Portanto, na situação mencionada acima, apenas a escória A superou o limite adequado (Figura 3.11a). O efeito decrescente dos corretivos sobre o teor de Mn na matéria seca dos grãos cultivados no LVA de Sete Lagoas-MG pode ser atribuído à menor disponibilidade desse micronutriente com a elevação do pH (LINDSAY, 1979). Na matéria seca dos grãos da soja cultivada no LVA de João Pinheiro-MG não se observou efeito significativo das doses de corretivos sobre os teores de Mn, cujos valores médios estiveram acima do nível crítico adotado neste trabalho (Figura 3.11b). O ajuste matemático para o Mn na palhada que preponderou para ambos os solos foi o raiz quadrático (Figuras 3.11c e 3.11d). Apenas para a escória A, aplicada ao LVA de Sete Lagoas-MG, o modelo mais adequado foi o quadrático (Figura 3.11c). Na palhada, o valor de referência para Mn foi superado em todos os casos, sendo que as testemunhas apresentaram maiores teores de Mn, indicando mais uma vez a redução da disponibilidade deste micronutriente com o aumento do pH dos solos (Figuras 3.11c e 3.11d).

Não se observou ajuste matemático significativo para Ni na matéria seca dos grãos da soja em ambos os solos (Figuras 3.12a e 3.12b). Na palhada de soja cultivada no LVA de Sete Lagoas-MG (Figura 3.12c) observou-se uma queda linear no teor de Ni em função do incremento nas doses dos corretivos, o que foi também observado para escória B aplicada ao LVA de João Pinheiro-MG (Figura 3.12d). Para a escória A e para o calcário, neste solo, não houve ajuste significativo entre as doses e o teor de Ni na palhada (Figura 3.12d). Os teores desse elemento observados em todos os casos

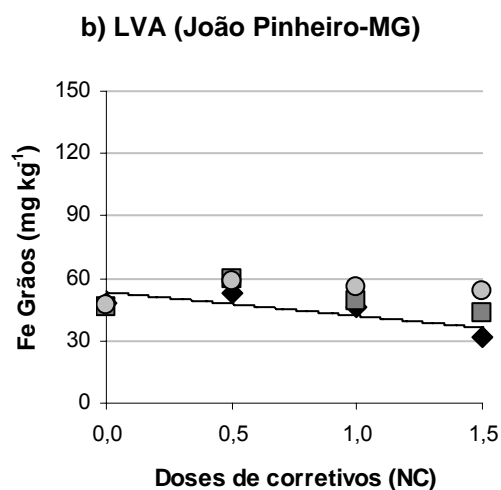
apresentaram-se abaixo do limite de fitotoxidez mencionado por Welch (1981) e Bollard (1983), isto é,  $< 10 \text{ mg kg}^{-1}$ .

Não foram detectados Cd e Cr na parte aérea das plantas nesse cultivo.

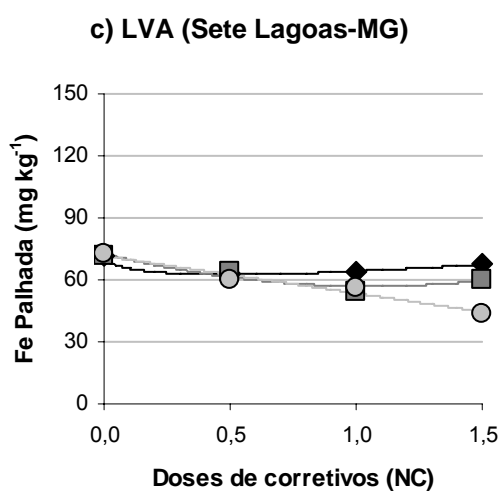
De modo geral, os resultados obtidos neste cultivo corroboraram os resultados obtidos no primeiro, em que o calcário mostrou-se mais eficiente na produção de matéria seca e fornecimento de Ca e Mg para as plantas. Também não foram detectados problemas de contaminação das plantas de soja com metais pesados, pelo uso das escórias.



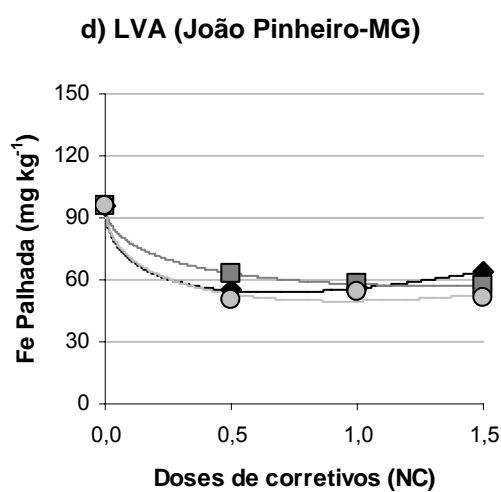
◆  $\hat{Y} = \bar{Y} = 47,7700$   
 ■  $\hat{Y} = \bar{Y} = 48,2944$   
 ○  $\hat{Y} = \bar{Y} = 43,1059$



◆  $\hat{Y} = 53,4066 - 11,4669 * X$   $R^2 = 0,6303$   
 ■  $\hat{Y} = \bar{Y} = 49,7161$   
 ○  $\hat{Y} = \bar{Y} = 53,8765$



◆  $\hat{Y} = 72,046 + 18,881 * X - 26,813 ** \sqrt{X}$   $R^2 = 0,9996$   
 ■  $\hat{Y} = 72,633 - 29,761 *** X + 14,062 *** X^2$   $R^2 = 0,9135$   
 ○  $\hat{Y} = 71,500 - 18,008 *** X$   $R^2 = 0,9599$



◆  $\hat{Y} = 95,806 + 62,1800 *** X - 102,075 *** \sqrt{X}$   $R^2 = 0,9999$   
 ■  $\hat{Y} = 96,004 + 28,456 *** X - 66,544 *** \sqrt{X}$   $R^2 = 0,9996$   
 ○  $\hat{Y} = 95,616 + 48,803 *** X - 94,617 *** \sqrt{X}$   $R^2 = 0,9770$

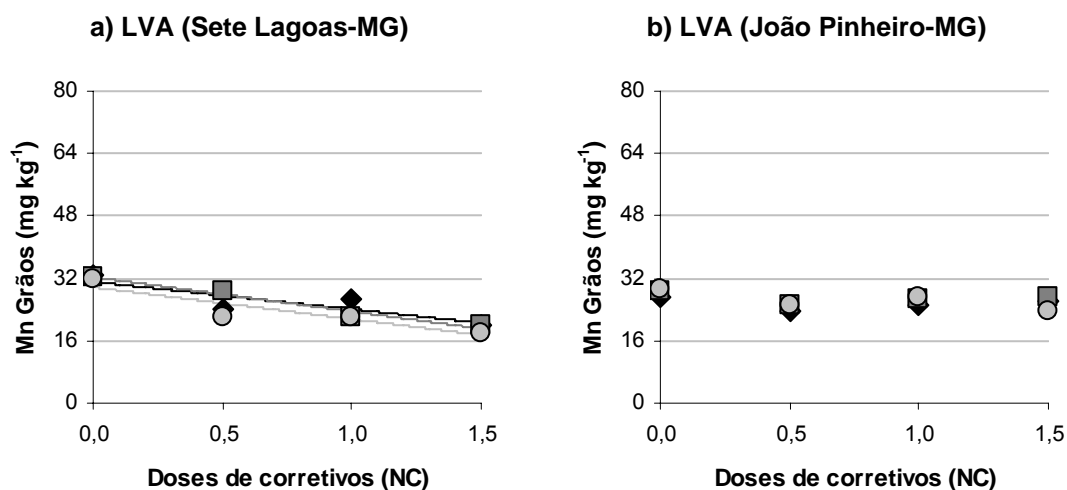
◆ Escória A

■ Escória B

○ Calcário

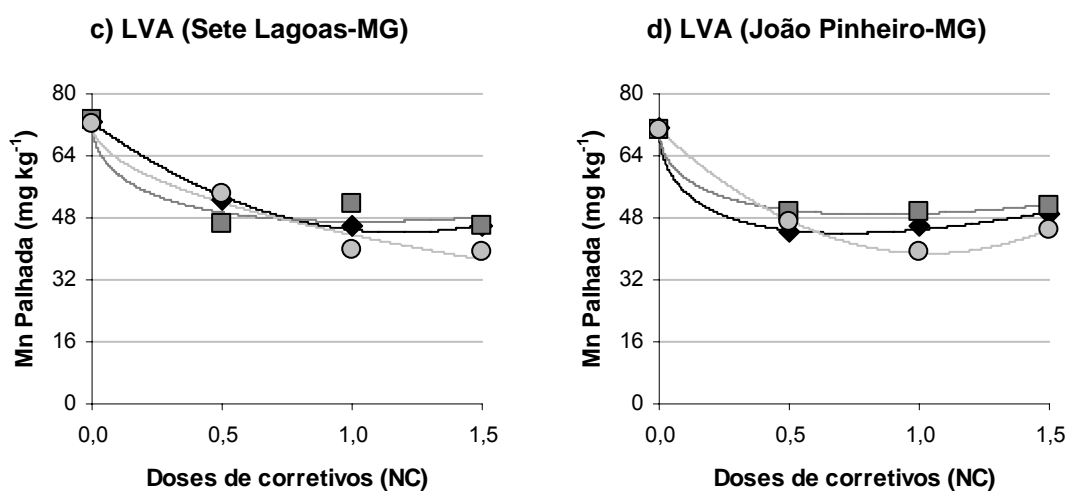
\*, \*\* e \*\*\* coeficientes significativos a 5, 1 e 0,1 % de probabilidade, respectivamente.

Figura 3.10. Teores de Fe na matéria seca (MS) dos grãos e palhada da soja referentes ao primeiro cultivo, nos Latossolos Vermelho-amarelos (LVA) de Oratórios-MG e João Pinheiro-MG, em resposta às doses dos corretivos.



◆  $\hat{Y} = 31,0940 - 7,0161^{**}X$   $R^2 = 0,7385$   
 ■  $\hat{Y} = 32,3147 - 8,8114^{***}X$   $R^2 = 0,9731$   
 ○  $\hat{Y} = 29,6979 - 8,1534^{**}X$   $R^2 = 0,8330$

◆  $\hat{Y} = \bar{Y} = 25,4315$   
 ■  $\hat{Y} = \bar{Y} = 26,9111$   
 ○  $\hat{Y} = \bar{Y} = 26,2870$



◆  $\hat{Y} = 72,4604 - 47,7020^{***}X + 20,1470^{***}X^2$   $R^2 = 0,9933$   
 ■  $\hat{Y} = 72,8422 + 25,2005^{**}X - 50,9973^{***}\sqrt{X}$   $R^2 = 0,9290$   
 ○  $\hat{Y} = 72,4240 + 0,4109^{***}X - 29,2448^{**}\sqrt{X}$   $R^2 = 0,9654$

◆  $\hat{Y} = 71,2144 + 38,0500^{***}X - 64,3232^{***}\sqrt{X}$   $R^2 = 0,9975$   
 ■  $\hat{Y} = 70,7804 + 26,1670^{**}X - 47,8740^{***}\sqrt{X}$   $R^2 = 0,9988$   
 ○  $\hat{Y} = 70,5984 - 61,2725^{***}X + 29,5035^{***}X^2$   $R^2 = 0,9985$

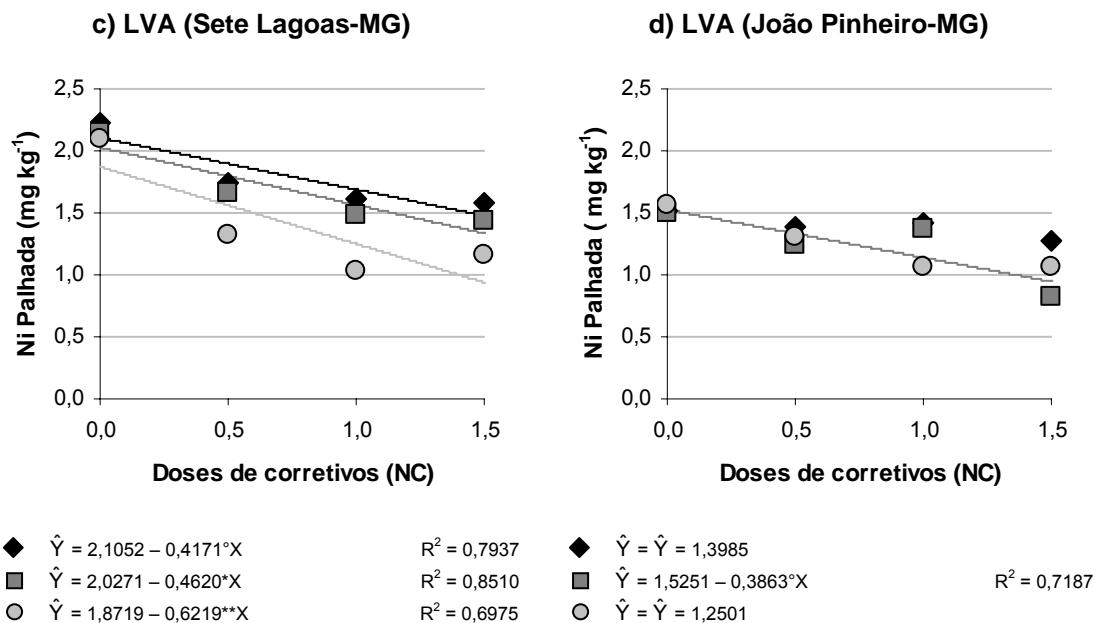
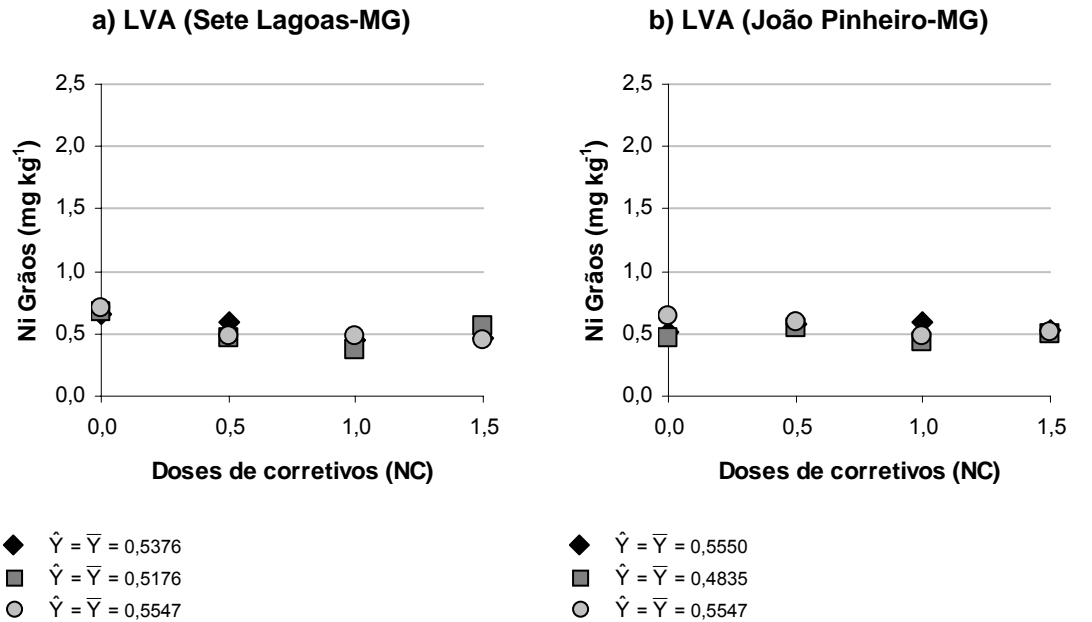
◆ Escória A

■ Escória B

○ Calcário

\*\* e \*\*\* coeficientes significativos a 1 e 0,1 % de probabilidade, respectivamente.

Figura 3.11. Teores de Mn na matéria seca (MS) dos grãos e palhada da soja referentes ao primeiro cultivo, nos Latossolos Vermelho-amarelos (LVA) de Oratórios-MG e João Pinheiro-MG, em resposta às doses dos corretivos.



◆ Escória A      ■ Escória B      ○ Calcário

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

Figura 3.12. Teores de Ca na matéria seca (MS) dos grãos e palhada da soja referentes ao primeiro cultivo, nos Latossolos Vermelho-amarelos (LVA) de Oratórios-MG e João Pinheiro-MG, em resposta às doses dos corretivos.

### 3.4. Conclusões

- ❖ Os corretivos utilizados foram eficientes para aumentar a produção de matéria seca vegetal e os teores de Ca e Mg nas plantas de soja;
- ❖ O calcário foi mais eficiente que as escórias na correção da acidez dos solos; e
- ❖ Não foi verificado, nas condições estudadas, qualquer contaminação ou problemas de toxidez das plantas de soja por metais pesados, em ambos os cultivos, a despeito dos teores de Fe, Mn, Cr, Ni, Zn, Cu e Cd nas escórias de aciaria LD.

### 3.5. Referências bibliográficas

ACCIOLY, A.M.A.; FURTINI NETO, A.E.; MUNIZ, J.A.; FAQUIN, V.; GUEDES, G.A.A. Pó de forno elétrico de siderurgia como fonte de micronutrientes e contaminantes para plantas de milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 35, n. 7, p. 1483-1491, 2000.

ALCARDE, J.C. **Corretivos da acidez dos solos: características e interpretações técnicas**. São Paulo, SP: ANDA, 1992. (Boletim Técnico nº 6).

ALCARDE, J.C.; RODELLA, A.A. Qualidade e legislação de fertilizantes e corretivos. In: **Tópicos em ciência do solo**. Vol. III. Viçosa, MG: SBCS. 2003. p. 291-334.

ALVAREZ V. V.H. **Equilíbrio de formas disponíveis de fósforo e enxofre em dois latossolos de Minas Gerais**. Viçosa, Viçosa, MG: UFV, 1974. 134 f. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 1974.

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

ANDERSON, A.J.; MEYER, D.R.; MAYER, F.K. Heavy metals toxicities: levels of nickel, cobalt and chromium in the soil and plants associated with visual symptoms and variation in growth of an oat crop. **Australian Journal of Agriculture Research**, v. 24, p. 557-571. 1973.

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

BOLLARD, E.G. Involvement of unusual elements in plant growth and nutrition. In: **Enciclopedia of plant physiology, new series** (A. Läuchli and R.L. Bielecki, Eds.), v. 15B, p. 695-755. Springer-Verlag, Berlin and New York. 1983.

BORGOS, E.C. Pyrometallurgical treatment of bof slags for the production of construction materials and refining fluxes. In: **Japan-Brazil symposium dust processing-energy-environment in metallurgical industries**, 1. Proceeding. São Paulo. 1999.

CAMARGO, M.N.; KLAMT, E.; KAUFFMAN, J.H. **Classificação de solos usada em levantamentos pedológicos no Brasil**. Boletim informativo da Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, Campinas, v. 12, n. 1, p. 11-33, 1987.

CFSEMG – Comissão de fertilidade do solo do estado de Minas Gerais. **Recomendação para uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais – 5ª Aproximação**. Viçosa, MG. 359 p.1999.

CORRÊA, M.L.T.; MELLO, J.W.V., SILVA J. Avaliação do Uso Agrícola de Uma Escória de Aciaria como Corretivo da Acidez de Solos. IN: 58º CONGRESSO ANUAL DA ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE METALURGIA E MATERIAIS. 2003. Rio de Janeiro. **Anais...** [CDROM]. / Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais – São Paulo, SP: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais. 2003.

COSTA, L.M.; AMARAL SOBRINHO, N.M.B.; DIAS, L.E.; BARROS, N.F. Application of a steel industry residue to an Oxisol including microbial activity. In: **Trace substances in environmental health conference**, 25. s. l., 1991. Proceeding. p. 245-356. 1991.

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

DIXON, N.E.; GAZOLA, C.; BLAKELEY, R.L.; ZERNER, B. Jack bean uréase, a metalloenzyme. A simple biological role for nickel? **Journal of American Chemistry Society**, v. 97, p. 4131-4133. 1975.

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

EMBRAPA – EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes**. Organizador: Fábio César da Silva. – Brasília: Embrapa Comunicação para Transferência de Tecnologia, 1999. 370 p.

FERRAND, B.; EMERY, J. Recent improvements in quality of steel slag aggregate. **Transportation Research Record**, v. 1486, p. 137-141, 1995.

FORTES, J.L.O. **Eficiência de duas escórias de siderurgia, do Estado do Maranhão, na correção da acidez do solo**. Viçosa, MG: UFV, 1993. 66 f.

Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 1993.

GEORGE, C.M.; SORRENTINO, F.P. Valorization of basis oxygen steel slag. In: **International congress on the chemistry of cement**, 7, Paris: Proceedings, p. 39-44. 1980.

GEYER, R.M.T. **Estudo sobre a potencialidade de uso das escórias de aciaria como adição ao concreto**. Porto Alegre, RS: PPGEM/UFRGS, 2001. 190 f. Tese (Doutorado em engenharia de minas, metalúrgica e de materiais) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS. 2001.

HOSSNER, L.R. Dissolution for total elemental analysis. In: **Methods of soil analysis. Part 3. Chemical methods**. Madison: Soil Science Society of America, Inc., p. 49-64. 1996.

ILFA – Instituto Latino Americano del Fierro y el Acero. **Reciclaje de escorias de aceria. Manual II**. 1995. 395 p.

KER, J.C. Latossolos do Brasil: uma revisão. **Geonomos**, Belo Horizonte, MG, v. 5, n. 1, p. 17-40, 1997.

LEE, F.T.; LEE, C.H. Study on the reduction behavior of FeO in EAF slag. **Steel Times International**. v. 1, p. 20-25, 1995.

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

LÓPEZ, F.A.; FORMOSO, A.; MEDINA, F. Escórias LD. Coproductos de la indústria siderúrgica – I Parte. Composición, tratamiento y aplicaciones. **Revista de Metalurgia**, v. 25, n. 4, p. 247-254, 1989.

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

MACHADO, A.T. **Estudo comparativo dos métodos de ensaios para avaliação da expansibilidade das escórias de aciaria**. São Paulo, SP: USP. 2000. 135 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Construção Civil) – Universidade de São Paulo, Escola Politécnica, São Paulo, SP, 2000.

MALAVOLTA, E. VITTI, G.C., OLIVEIRA, S.A. **Avaliação do estado nutricional das plantas. Princípios e aplicações**. Piracicaba, SP: Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato. 1989. 201 p.

MARSCHNER H. **Mineral nutrition of higher plants**. San Diego: Academic Press Inc., 1995. 902 p.

MENGEL, K.; KIRKBY, E.A. **Principles of plant nutrition**. New York, NY: International potash Institute, 1987. 687 p.

MINISTÉRIO DA AGRICULTURA. **Calcário – produção e consumo aparente – Brasil – 1992 a 2001**. 2002.  
Disponível em: <<http://www.agricultura.gov.br/portal>>. Acesso em: 2 jun. 2004.

MISHRA, D.; KAR, M. Nickel in plant growth and metabolism. **Botanical Review**. v. 40, p. 395-452, 1974.

MONTGOMERY, D.G.; WANG, G. Preliminary Laboratory study of steel slag for blended cement manufacture. **Material Forum**, v. 15, n. 4, p. 374-382, 1991.

MOTZ, H.; GEISELER, J. Products of steel slags an opportunity to save natural resources. **West Management**, v. 21, p. 285-293, 2001.

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

PAVAN, M.A.; BINGHAM, F.T. Toxidez de metais em plantas: II. Caracterização da toxidez do níquel em cafeeiros. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 17, p. 323-328, 1982.

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

PRADO, R.M. **Resposta da cana-de-açúcar à aplicação de escória silicatada como corretivo de acidez do solo**. Ilha Solteira, SP: ENESP, 2000, 97 f. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) – Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, SP, 2000.

PRADO, R.M.; COUTINHO, E.L.M., ROQUE, C.G.; VILLAR, M.L.P. Avaliação da escória de siderurgia e de calcários como corretivo da acidez de solos no cultivo da alface. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 37, n. 4, p. 539-546, 2002.

PRADO, R.M.; FERNANDES, F.M. Eficiência da escória de siderurgia em Areia Quartzosa na nutrição e na produção de matéria seca de cana-de-açúcar cultivada em vaso. **STAB Açúcar, Álcool e Subprodutos**, Piracicaba, SP, v. 18, n. 4, p. 36-39, 2000a.

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**, Piracicaba, SP, v. 57, n. 4, p. 739-744, 2000b.

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

PRADO, R.M.; NATALE, W. Efeitos da aplicação da escória de siderurgia ferrocromo no solo, no estado nutricional e na produção de matéria seca de mudas de maracujazeiro. **Revista Brasileira de Fruticultura**, Jaboticabal, SP, v. 26, n. 1, p. 140-144, 2004.

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

SILVA, J. **Avaliação do potencial agrônômico e de contaminação ambiental decorrente do uso de uma escória de aciaria como corretivo e fertilizante de solos.** Viçosa, MG: UFV, 2003. 134 f. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2003.

WELCH, R.M. The biological significance of nickel. **Journal of Plant Nutrition**, v. 3, p. 345-356, 1981.

WOOLHOUSE, H.W. Toxicity and tolerance in response of plants to metals. In: **Encyclopedia of plant physiology, new series** (A. Läuchli and R.L. Bielecki, Eds.), v. 12C, p. 246-300. Springer-Verlag, Berlin and New York. 1983.

## **4. EFEITO DA UTILIZAÇÃO DE ESCÓRIA DE ACIARIA LD, DA CST, NA CONTAMINAÇÃO DE SOLOS CULTIVADOS COM SOJA EM CASA-DE-VEGETAÇÃO**

### **4.1. Introdução**

O solo atua freqüentemente como um “filtro”, tendo a capacidade de depuração e imobilização de grande parte das impurezas nele depositadas. No entanto, essa capacidade é limitada, podendo ocorrer alteração da qualidade do solo, devido ao efeito cumulativo da deposição de poluentes (MOREIRA-NODERMANN, 1987).

A contaminação do solo por metais pesados e outros elementos tóxicos é um tema bastante discutido atualmente, devido à presença desses elementos em diversos materiais adicionados ao solo, como as escórias de siderurgia. Os processos de descontaminação são muito trabalhosos e, até certo ponto, pouco eficientes (ABREU, et al., 1995; ABREU; ABREU, 1998; USEPA, 1991; USEPA, 2003). Portanto, uma vez contaminado, o solo tende a permanecer dessa forma por longo tempo. O problema é agravado quando o solo é usado para fins agrícolas, pois os poluentes podem ser absorvidos pelas plantas e entrar na cadeia alimentar (PAVAN; BINGHAN, 1982; MENGEL; KIRKBY, 1987; COSTA et al., 1991; AMARAL et al., 1994; AMARAL et al., 1996; ACCIOLY et al., 2000).

Na Europa, a partir de 1982, a utilização de escórias, na agricultura, passou a ser controlada em função dos seus elevados teores de CaO e P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>,

além de metais pesados e outros elementos tóxicos (INDUSTRY AND ENVIRONMENT, 1996; MACHADO, 2000; CASTELO BRANCO, 2004). Não obstante, a incorporação de resíduos industriais, ricos em nutrientes e elementos tóxicos, pode ser uma prática viável, desde que se conheça a composição química do material e as propriedades físico-químicas do solo (POMBO; KLAMT, 1986; SHEPPARD; THIBAUT, 1992); bem como as doses desses materiais incorporados ao solo, além da periodicidade ou quantidade de aplicações numa mesma área.

A dinâmica dos metais pesados e elementos tóxicos no sistema solo-planta são influenciados, também, pelo comportamento das diferentes espécies vegetais (CABRERA et al., 1988; HAGEMEYER; WAISEL, 1989; HERNÁNDEZ et al., 1991). A poluição dos solos por metais pesados e elementos tóxicos está ligada a processos de acúmulo e transporte dessas espécies que dependem, em grande parte, das suas interações com a fase sólida do sistema. Tal interação é bastante complexa, envolvendo reações de adsorção/dessorção, precipitação/dissolução, complexação e oxirredução, tanto com a fase inorgânica quanto com a fase orgânica dos solos (DOWDY; VOLK, 1983; ELLIS et al., 1983; SPOSITO, 1989; ALLOWAY, 1990; AMARAL SOBRINHO, 1993).

Segundo Kabata-Pendias e Pendias (2000) e Alloway (1990) o aumento anormal das concentrações de metais pesados nos solos de agricultura altamente tecnificada têm como uma das fontes a utilização de resíduos industriais. Estudos realizados por Amaral Sobrinho et al. (1992) mostraram que o resíduo obtido a partir da mineração de Pb e Zn, em Paracatu-MG e comercializado como calcário agrícola, poderia acarretar graves problemas de contaminação ambiental por Cd, Zn e Pb. Esses autores recomendaram que os níveis de metais pesados absorvidos pelas plantas devem ser monitorados, levando-se também em conta o manejo e, ou a cultura empregados.

No Brasil predominam solos ácidos altamente intemperizados (CAMARGO et al., 1987; KER, 1997; SILVA et al., 1999), com baixa reserva de nutrientes e com presença de argilas, quartzo, óxidos e sesquióxidos de Fe e Al de baixa atividade (SILVA et al., 1999). Desta forma, estudos correlatos à incorporação de resíduos ricos em poluentes são muito importantes, visto que a disseminação de poluentes nos solos brasileiros pode ser altamente danosa,

em função das características desses solos, a despeito de algumas características positivas desses resíduos.

Em vista do exposto, este trabalho teve como objetivo avaliar o efeito da utilização de uma escória de aciaria LD, da Cia Siderúrgica de Tubarão na contaminação de solos por metais pesados cultivados com soja em casa-de-vegetação.

Palavras-chave: escória de siderurgia, resíduos industriais, corretivos da acidez de solos, metais pesados, contaminação ambiental, soja.

#### **4.2. Material e métodos**

Foram realizados dois cultivos sucessivos de soja, variedade M-Soy 8.400, em vasos contendo 30 dm<sup>3</sup> de dois Latossolos Vermelho-amarelos de Sete Lagoas-MG e João Pinheiro-MG, coletados de 0-20 cm de profundidade (Quadro 4.1), que foram analisados conforme as metodologias propostas pela EMBRAPA (1997). Foram determinados, ainda, os teores totais (HOSSNER, 1996) e disponíveis (MEHLICH, 1984) de Fe, Mn, Cr, Ni, Cd e Pb nessas amostras de solo (Quadro 4.2). A detecção dos metais pesados nos extratos foi realizada por ICP-OES

O experimento foi montado, em casa-de-vegetação, no delineamento em blocos casualizados e esquema fatorial (2 x 3 x 4), em três repetições, perfazendo um total de 72 parcelas, sendo:

- ❖ 2 solos;
- ❖ 3 corretivos (duas amostras de escória de aciaria LD, da CST, na granulometria inferior a 1 mm e uma amostra de calcário) (Quadro 4.3); e
- ❖ 4 níveis de corretivo: 0,0; 0,5; 1,0 (Quadro 4.4) e 1,5 vezes a necessidade de calagem (CFSEMG, 1999).

As parcelas receberam seus respectivos tratamentos, além de adubação complementar com P, 300 mg dm<sup>-3</sup> (ALVAREZ V, 1974), e foram mantidas com umidade próxima à capacidade de campo por 15 dias.

Quadro 4.1. Composição físico-química, equivalente de umidade e classe textural dos Latossolos Vermelho-amarelos de Sete Lagoas-MG e João Pinheiro-MG

Característica <sup>‡</sup>	LVA (Sete Lagoas-MG)	LVA (João Pinheiro-MG)
pH H <sub>2</sub> O	5,0	5,3
M.O. (dag kg <sup>-1</sup> )	4,13	1,31
P (mg dm <sup>-3</sup> )	4,8	0,1
K (mg dm <sup>-3</sup> )	70,0	39,0
Ca <sup>2+</sup> (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	1,69	0,46
Mg <sup>2+</sup> (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	0,01	0,01
Al <sup>3+</sup> (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	1,49	0,37
H + Al (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	6,97	5,87
SB (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	1,88	0,57
(t) (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	3,37	0,94
(T) (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	8,85	6,44
V (%)	21,24	8,85
m (%)	44,21	39,36
P-rem (mg L <sup>-1</sup> )	5,6	21,5
Zn (mg dm <sup>-3</sup> )	12,90	8,09
Fe (mg dm <sup>-3</sup> )	57,80	51,20
Mn (mg dm <sup>-3</sup> )	9,70	5,30
Cu (mg dm <sup>-3</sup> )	2,32	1,07
Areia Grossa (dag kg <sup>-1</sup> )	7	25
Areia Fina (dag kg <sup>-1</sup> )	3	49
Silte (dag kg <sup>-1</sup> )	6	5
Argila (dag kg <sup>-1</sup> )	84	21
Equivalente de umidade (kg kg <sup>-1</sup> )	0,324	0,168
Classe Textural	Muito Argilosa	Franco-Argilo-Arenosa

<sup>‡</sup> Média de três repetições.

pH em água relação 1:25; M.O.: Método Walkley & Black (M.O. = 1,724 x Carbono Orgânico); P, K, Fe, Zn, Mn e Cu: Extrator Mehlich 1; Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup> e Al<sup>3+</sup>: Extrator KCl 1mol L<sup>-1</sup>; H + Al: Extrator Acetato de Cálcio 0,5 mol L<sup>-1</sup> a pH = 7,0; SB: Soma de Bases; CTC (t): Capacidade de Troca Catiônica Efetiva; CTC (T): Capacidade de Troca Catiônica a pH = 7,0; V: Índice de Saturação de Bases; m: Índice de Saturação de Alumínio; e P-rem: Fósforo Remanescente.

Após o plantio foram realizadas adubações de cobertura: 100 mg dm<sup>-3</sup> de N; 150 mg dm<sup>-3</sup> de K; 50 mg dm<sup>-3</sup> de S; 0,81 mg dm<sup>-3</sup> de B; 1,33 mg dm<sup>-3</sup> de Cu; 1,56 mg dm<sup>-3</sup> de Fe; 3,66 mg dm<sup>-3</sup> de Mn; 0,15 mg dm<sup>-3</sup> de Mo; e 4,00 mg dm<sup>-3</sup> de Zn (ALVAREZ V., 1974), divididos em quatro aplicações. Após dois cultivos de soja, foram coletadas amostras dos solos de cada parcela, as quais foram secas, peneiradas (< 2,0 mm) e preparadas para determinações de pH e teores totais (HOSSNER, 1996) e disponíveis (MEHLICH, 1984) de Fe, Mn, Cr, Ni e Cd. Outros metais pesados não foram determinados em razão de não terem sido detectados nas escórias utilizadas.

Os resultados obtidos foram submetidos a análises estatísticas, por meio do software Sistema de Análises Estatísticas e Genéticas (SAEG).

Quadro 4.2. Teores totais e disponíveis de Fe, Mn, Cr, Ni e Cd nos Latossolos Vermelho-amarelos de Sete Lagoas-MG e João Pinheiro-MG

Característica <sup>§</sup>	LVA (Sete Lagoas-MG)	LVA (João Pinheiro-MG)
Fe (g kg <sup>-1</sup> ) <sup>1/</sup>	96,32 ± 4,73	37,502 ± 3,01
Mn (mg kg <sup>-1</sup> ) <sup>1/</sup>	333,28 ± 14,17	147,273 ± 5,43
Cr (mg kg <sup>-1</sup> ) <sup>1/</sup>	115,37 ± 4,03	59,793 ± 2,72
Ni (mg kg <sup>-1</sup> ) <sup>1/</sup>	37,702 ± 2,14	31,133 ± 1,78
Cd (mg kg <sup>-1</sup> ) <sup>1/</sup>	n.d. <sup>3/</sup>	n.d. <sup>3/</sup>
Fe (mg dm <sup>-3</sup> ) <sup>2/</sup>	100,81 ± 3,08	99,101 ± 3,23
Mn (mg dm <sup>-3</sup> ) <sup>2/</sup>	21,00 ± 1,23	9,324 ± 0,47
Cr (mg kg <sup>-1</sup> ) <sup>2/</sup>	n.d. <sup>3/</sup>	n.d. <sup>3/</sup>
Ni (mg kg <sup>-1</sup> ) <sup>2/</sup>	n.d. <sup>3/</sup>	n.d. <sup>3/</sup>
Cd (mg kg <sup>-1</sup> ) <sup>2/</sup>	n.d. <sup>3/</sup>	n.d. <sup>3/</sup>

<sup>§</sup> Média de 3 repetições ± erro-padrão da média;

<sup>1/</sup> Extração com os ácidos fluorídrico, sulfúrico e perclórico (HOSSNER, 1996);

<sup>2/</sup> Extração com Mehlich-3 (MEHLICH, 1984); e

<sup>3/</sup> Não detectado pela técnica analítica utilizada (ICP-OES).

Quadro 4.3. Análises químicas, PN, ER e cálculo do PRNT de amostras compostas de escórias LD da CST e calcário utilizados neste ensaio

Característica	Escórias de aciaria LD <sup>§</sup>		Calcário <sup>§</sup>
	A	B	
CaO (dag kg <sup>-1</sup> ) <sup>1/</sup>	45,53 ± 0,79	42,70 ± 0,21	36,84 ± 0,55
MgO (dag kg <sup>-1</sup> ) <sup>1/</sup>	9,80 ± 0,03	8,21 ± 0,05	11,95 ± 0,05
SiO <sub>2</sub> (dag kg <sup>-1</sup> ) <sup>2/</sup>	12,66 ± 0,24	14,69 ± 0,64	---
MnO <sub>2</sub> (dag kg <sup>-1</sup> ) <sup>3/</sup>	5,27 ± 0,12	4,42 ± 0,08	---
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (dag kg <sup>-1</sup> ) <sup>3/</sup>	21,20 ± 0,02	20,19 ± 0,17	---
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> total (dag kg <sup>-1</sup> ) <sup>3/</sup>	1,78 ± 0,16	2,40 ± 0,21	---
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> solúvel em ác. cítrico (dag kg <sup>-1</sup> ) <sup>1/</sup>	n.d. <sup>‡</sup>	n.d.	---
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> Mehlich-1 (mg kg <sup>-1</sup> ) <sup>4/</sup>	52,13 ± 2,32	43,78 ± 1,73	---
Cr (mg kg <sup>-1</sup> ) <sup>3/</sup>	745,12 ± 4,34	574,18 ± 5,69	6,29 ± 0,25
Ni (mg kg <sup>-1</sup> ) <sup>3/</sup>	28,58 ± 0,70	26,14 ± 0,41	7,12 ± 0,12
Zn (mg kg <sup>-1</sup> ) <sup>3/</sup>	70,14 ± 0,83	54,16 ± 0,56	8,14 ± 0,21
Cu (mg kg <sup>-1</sup> ) <sup>3/</sup>	34,05 ± 0,69	30,14 ± 0,90	6,78 ± 0,14
Cd (mg kg <sup>-1</sup> ) <sup>3/</sup>	5,98 ± 0,07	4,98 ± 0,07	1,07 ± 0,21
Pb (mg kg <sup>-1</sup> ) <sup>3/</sup>	n.d.	n.d.	n.d.
PN (%) <sup>1/</sup>	90,48 ± 0,54	89,04 ± 0,71	83,08 ± 0,58
ER (%) <sup>1/</sup>	75,23 ± 0,37	80,61 ± 0,53	99,28 ± 0,28
PRNT (%) <sup>1/</sup>	68,07 ± 0,73	71,78 ± 0,11	82,50 ± 0,75

<sup>§</sup> Média de 3 repetições ± erro-padrão da média;

<sup>1/</sup> EMBRAPA (1999);

<sup>2/</sup> Digestão com água régia e ácido fluorídrico em cadinhos de Teflon<sup>®</sup> fechados (HOSSNER, 1996);

<sup>3/</sup> Digestão com os ácidos fluorídrico, sulfúrico e perclórico (HOSSNER, 1996);

<sup>4/</sup> Extraído por Mehlich-1 (DEFELIPO; RIBEIRO, 1996); e

<sup>‡</sup> Não detectado pela técnica analítica utilizada (ICP-OES).

Quadro 4.4. Quantidades de corretivos utilizadas para neutralizar a acidez dos solos, referentes à dose de 1,0 NC nos Latossolos Vermelho-amarelos de Sete Lagoas-MG e João Pinheiro-MG, calculadas segundo as recomendações para a cultura da soja

Solo	Escória A	Escória B	Calcário
	Média <sup>‡</sup> (t ha <sup>-1</sup> )		
LVA Sete Lagoas-MG	4,42	4,33	3,64
LVA João Pinheiro-MG	2,73	2,67	2,25

<sup>‡</sup> Média de três repetições. Quantidades calculadas segundo (CFSEMG, 1999)

### 4.3. Resultados e discussão

#### 4.3.1. Teores totais de metais pesados nos solos

Segundo Alves et al. (1999), embora não seja um bom critério para avaliar a contaminação dos solos por metais pesados, os teores totais têm sido os mais utilizados, uma vez que ainda não foram selecionados e não há consenso entre os pesquisadores sobre os extratores mais adequados para a determinação dos teores disponíveis desses metais para as plantas. Neste trabalho, os teores totais de metais pesados nos solos foram determinados conforme descrito por Hossner (1996).

Verificaram-se diferenças significativas nos teores totais de Fe, Mn, Cr e Ni entre os dois latossolos utilizados (Quadros 4.5 e 4.6). Por outro lado, não foram observadas diferenças significativas nos teores totais de Fe, Cr e Ni com o incremento das doses. No entanto, os teores totais de Mn mostraram incrementos significativos ( $p < 0,01$ ) com o aumento das doses de escórias aplicadas nos solos (Quadros 4.5 e 4.6). O Cd não foi detectado em nenhum dos solos.

O contraste C1 mostra diferenças significativas nos teores de Fe, Mn, Cr e Ni entre os dois solos estudados. Além disso, verificou-se, nos contrastes C2 e C4, que as escórias forneceram um teor de Mn significativamente maior do que o calcário para os dois solos. Para o Latossolo Vermelho-amarelo de Sete Lagoas-MG, o incremento no teor de Mn foi significativamente maior (contraste C3) quando se aplicou a escória A em relação à escória B (Quadro 4.5). O mesmo não ocorreu no LVA de João Pinheiro-MG, onde não houve diferença significativa entre as escórias quanto ao teor de Mn (contraste C5).

Quadro 4.5. Análise de variância para Fe, Mn, Cr e Ni nos Latossolos Vermelho-amarelos de Sete Lagoas-MG e João Pinheiro-MG tratados com as escórias A e B e um calcário, após ataque total

FV	GL	QM			
		Fe	Mn	Cr	Ni
Blocos (B)	2	0,019 <sup>n.s.</sup>	86,460 <sup>n.s.</sup>	195,550 <sup>n.s.</sup>	30,995*
Solos (S)	1	65.161,110**	728.625,700**	53.685,280**	48,996**
Corretivos (C)	2	0,811 <sup>n.s.</sup>	15.184,120**	89,092 <sup>n.s.</sup>	0,108 <sup>n.s.</sup>
Doses (D)	3	0,180 <sup>n.s.</sup>	10.519,980**	38,888 <sup>n.s.</sup>	18,419 <sup>n.s.</sup>
D x C	6	0,040 <sup>n.s.</sup>	3.187,638**	19,973 <sup>n.s.</sup>	3,232 <sup>n.s.</sup>
D x S	3	0,003 <sup>n.s.</sup>	649,093**	18,060 <sup>n.s.</sup>	30,020**
C x S	2	0,047 <sup>n.s.</sup>	781,113**	5,026 <sup>n.s.</sup>	0,270 <sup>n.s.</sup>
D x C x S	6	0,018 <sup>n.s.</sup>	106,137**	9,827 <sup>n.s.</sup>	0,604 <sup>n.s.</sup>
S/C = Esc. A x D = 0,0 NC	1	5.414,069**	52.417,120**	5.086,915**	30,765*
S/C = Esc. A x D = 0,5 NC	1	5.429,320**	64.415,750**	4.864,261**	0,449 <sup>n.s.</sup>
S/C = Esc. A x D = 1,0 NC	1	5.415,474**	69.103,410**	3.938,225**	0,865 <sup>n.s.</sup>
S/C = Esc. A x D = 1,5 NC	1	5.395,017**	80.117,990**	4.606,530**	15,552 <sup>n.s.</sup>
S/C = Esc. B x D = 0,0 NC	1	5.413,898**	53.144,700**	5.087,481**	33,191*
S/C = Esc. B x D = 0,5 NC	1	5.410,276**	60.609,610**	3.970,487**	0,034 <sup>n.s.</sup>
S/C = Esc. B x D = 1,0 NC	1	5.439,505**	64.352,960**	4.193,072**	0,327 <sup>n.s.</sup>
S/C = Esc. B x D = 1,5 NC	1	5.463,248**	75.842,550**	4.769,430**	4,828 <sup>n.s.</sup>
S/C = Calc. x D = 0,0 NC	1	5.445,761**	51.578,560**	4.703,163**	44,410*
S/C = Calc. x D = 0,5 NC	1	5.446,183**	52.664,950**	3.961,686**	0,323 <sup>n.s.</sup>
S/C = Calc. x D = 1,0 NC	1	5.438,815**	53.458,500**	4.631,656**	4,795 <sup>n.s.</sup>
S/C = Calc. x D = 1,5 NC	1	5.449,750**	55.065,890**	3.995,563**	7,684 <sup>n.s.</sup>
C/S1 e D = 0,0 NC	2	0,007 <sup>n.s.</sup>	4,888 <sup>n.s.</sup>	3,775 <sup>n.s.</sup>	1,126 <sup>n.s.</sup>
C/S1 e D = 0,5 NC	2	0,045 <sup>n.s.</sup>	1.072,705**	27,259 <sup>n.s.</sup>	2,501 <sup>n.s.</sup>
C/S1 e D = 1,0 NC	2	0,134 <sup>n.s.</sup>	5.019,457**	1,627 <sup>n.s.</sup>	2,860 <sup>n.s.</sup>
C/S1 e D = 1,5 NC	2	0,203 <sup>n.s.</sup>	11.934,450**	91,306 <sup>n.s.</sup>	0,468 <sup>n.s.</sup>
C/S2 e D = 0,0 NC	2	0,064 <sup>n.s.</sup>	1,594 <sup>n.s.</sup>	0,277 <sup>n.s.</sup>	1,173 <sup>n.s.</sup>
C/S2 e D = 0,5 NC	2	0,114 <sup>n.s.</sup>	254,977**	11,211 <sup>n.s.</sup>	0,852 <sup>n.s.</sup>
C/S2 e D = 1,0 NC	2	0,169 <sup>n.s.</sup>	2.307,767**	21,172 <sup>n.s.</sup>	0,295 <sup>n.s.</sup>
C/S2 e D = 1,5 NC	2	0,295 <sup>n.s.</sup>	5.250,718**	26,890 <sup>n.s.</sup>	2,613 <sup>n.s.</sup>
Resíduo	46	0,233	30,083	65,990	6,713
CV (%)		0,735	2,072	9,473	8,518
C1	1	65.161,120**	728.625,700**	53.685,300**	48,996**
C2	1	0,524 <sup>n.s.</sup>	22.417,390**	132,103 <sup>n.s.</sup>	0,025 <sup>n.s.</sup>
C3	1	0,015 <sup>n.s.</sup>	408,875**	0,334 <sup>n.s.</sup>	0,033 <sup>n.s.</sup>
C4	1	1,161 <sup>n.s.</sup>	9.027,090**	54,377 <sup>n.s.</sup>	0,006 <sup>n.s.</sup>
C5	1	0,015 <sup>n.s.</sup>	77,088 <sup>n.s.</sup>	1,421 <sup>n.s.</sup>	0,693 <sup>n.s.</sup>

Esc A = escória A; Esc. B = escória B; Calc. = calcário; S1 = Latossolo Vermelho-amarelo de Sete Lagoas-MG; S2 = Latossolo Vermelho-amarelo de João Pinheiro-MG; NC = necessidade calagem (CFSEMG, 1999).

C1 = m S1 vs m S2; C2 = S1/m Esc.A + m Esc.B vs 2m Calc.; C3 = S1/m Esc.A vs m Esc.B; C4 = S2/m Esc. A + m Esc. B vs 2m Calc.; e C5 = S2/m Esc. A vs m Esc. B.

<sup>n.s.</sup> coeficientes não-significativos; \*\*, e \* coeficientes significativos a 1; e 5 %, respectivamente.

Este último efeito talvez tenha ocorrido em função da menor diluição do Mn quando aplicado ao LVA de Sete Lagoas-MG (Quadro 4.2), mas vale ressaltar que o teor de Mn na escória A é maior que aquele apresentado pela escória B (Quadro 4.3).

As quantidades das escórias A e B utilizadas nos dois latossolos foram superiores àquelas utilizadas de calcário em função do menor PRNT (CFSEMG, 1999) das escórias (Quadros 4.3 e 4.4). No entanto, não foram observadas diferenças significativas, entre os corretivos, para os teores de Fe,

Quadro 4.6. Teores totais de Fe, Mn Cr e Ni nos LVA de Sete Lagoas-MG e João Pinheiro-MG após os cultivos da soja para diferentes doses de escórias e calcário

Solo	Corretivo	Dose (NC)	Fe	Mn	Cr	Ni
			Média ± E.P. <sup>‡</sup> (g kg <sup>-1</sup> )	..... Média ± E.P. <sup>‡</sup> (mg kg <sup>-1</sup> ) .....		
1	Escória A	0,0	95,65 ± 1,03	330,53 ± 5,71	114,16 ± 3,60	33,54 ± 2,38
		0,5	95,81 ± 0,21	366,64 ± 1,46	113,57 ± 0,58	31,03 ± 2,78
		1,0	95,79 ± 0,06	404,59 ± 4,54	114,90 ± 2,41	29,32 ± 2,33
		1,5	95,90 ± 0,03	446,83 ± 2,98	115,48 ± 2,47	31,31 ± 0,87
	Escória B	0,0	95,60 ± 0,25	332,71 ± 5,18	114,63 ± 3,95	34,74 ± 2,43
		0,5	95,71 ± 0,28	362,78 ± 2,52	111,18 ± 5,07	29,33 ± 1,94
		1,0	95,92 ± 0,08	390,71 ± 5,01	113,46 ± 2,31	29,42 ± 1,88
		1,5	96,12 ± 0,33	429,37 ± 3,24	117,91 ± 7,59	31,42 ± 2,20
	Calcário	0,0	95,55 ± 0,10	330,47 ± 7,33	112,50 ± 3,66	34,35 ± 2,74
		0,5	95,57 ± 0,14	332,13 ± 3,74	107,58 ± 4,50	30,77 ± 0,12
		1,0	95,51 ± 0,39	327,83 ± 1,05	113,94 ± 4,71	27,68 ± 1,71
		1,5	95,60 ± 0,11	329,91 ± 1,19	107,37 ± 6,47	32,04 ± 2,20
2	Escória A	0,0	35,57 ± 0,19	143,59 ± 1,48	55,93 ± 4,84	29,01 ± 0,90
		0,5	35,65 ± 0,16	159,41 ± 2,41	56,63 ± 8,90	30,49 ± 0,57
		1,0	35,71 ± 0,05	189,96 ± 0,89	63,66 ± 4,07	30,08 ± 0,67
		1,5	35,93 ± 0,04	215,72 ± 1,48	60,06 ± 6,08	28,09 ± 1,61
	Escória B	0,0	35,53 ± 0,25	144,48 ± 0,86	56,39 ± 5,25	30,04 ± 0,49
		0,5	35,65 ± 0,03	161,77 ± 3,13	59,74 ± 6,31	29,48 ± 0,12
		1,0	35,70 ± 0,09	183,58 ± 4,91	60,59 ± 4,37	29,88 ± 0,18
		1,5	35,77 ± 0,13	204,51 ± 0,51	61,52 ± 4,98	29,62 ± 0,95
	Calcário	0,0	35,30 ± 0,16	145,04 ± 0,68	56,50 ± 5,77	28,90 ± 1,35
		0,5	35,32 ± 0,14	144,75 ± 2,54	56,19 ± 4,14	30,30 ± 0,15
		1,0	35,29 ± 0,10	139,05 ± 0,90	58,38 ± 4,70	29,47 ± 1,20
		1,5	35,32 ± 0,07	138,31 ± 1,56	55,76 ± 2,03	29,78 ± 0,46

<sup>‡</sup> Média de três repetições ± erro padrão da média; e

Solo 1 = LVA de Sete Lagoas-MG e Solo = 2 LVA de João Pinheiro-MG.

Cr e Ni (Quadro 4.5), indicando que as escórias não contribuíram para aumentar os teores desses metais nos solos, a despeito da presença dos mesmos nas amostras desses corretivos.

A versão preliminar da Lei Federal de Proteção do Solo foi enviada aos Estados e às organizações não governamentais, a fim de obter comentários e sugestões, sendo finalmente promulgada em 1999, em caráter nacional, contemplando estratégias de prevenção e também de controle de áreas contaminadas. Nessa Lei, foram estabelecidos valores de investigação para 14 substâncias prioritárias, dentre estas se encontram o cádmio, o cromo e o níquel (CETESB 2001), que estão presentes nas escórias LD da CST, mas que não foram transferidos para as plantas, o que é uma observação de grande importância para a utilização desses resíduos na agricultura.

A CETESB (2001) informa os valores orientadores para contaminação de solos por metais pesados no Estado de São Paulo (Quadro 4.7). O valor de referência indica o nível de qualidade para um determinado solo e será utilizado em ações de prevenção da poluição do solo na etapa de “investigação confirmatória”, no controle de áreas contaminadas. O valor de alerta, indica a alteração da qualidade natural dos solos e será utilizado em caráter preventivo e quando excedido no solo, deverá ser exigido o monitoramento do solo, efetuando-se um diagnóstico de qualidade desses meios, identificando-se e controlando-se as possíveis fontes de poluição. O valor de intervenção, utilizado em caráter corretivo, indica a existência de contaminação do solo ou das águas subterrâneas. Quando excedido, a área será declarada contaminada, pois existe risco potencial de efeito deletério para a saúde humana, devendo-se efetuar a investigação detalhada, incluindo modelagem de fluxo, transporte e avaliação de risco com objetivos de intervenção na área, executando-se medidas emergenciais; além de restrição de acesso a pessoas, restrição da utilização das águas locais e ações de remediação. A CETESB (2001) não informa os valores de referência, alerta e intervenção para Fe e Mn nos solos, certamente em função dos teores totais relativamente altos nos solos.

O valor de referência (Quadro 4.7) indica o limite de qualidade para um solo considerado limpo. Foi estabelecido com base em análises químicas de diversas amostras de solos do Estado de São Paulo, nas quais se utilizou o método USEPA 3050 do SW 8462 descrito pela USEPA (1986).

Quadro 4.7. Valores orientadores para contaminação de solos por metais pesados no Estado de São Paulo

Elemento	Valores Orientadores		
	Referência	Alerta	Intervenção
		mg kg <sup>-1</sup>	
Cd	< 0,5	3	10
Cr	40	75	300
Fe	—	—	—
Mn	—	—	—
Ni	13	30	50

Fonte: adaptado de CETESB (2001).

Segundo a CETESB (2001) um solo pode ser considerado “limpo” quando a concentração de um elemento ou substância de interesse ambiental é menor ou igual ao valor de ocorrência natural. O valor de referência de qualidade não foi fixado como padrões em legislação. Por outro lado, uma área será considerada contaminada se, entre outras situações, as concentrações dos elementos ou substâncias de interesse ambiental estiverem acima do valor de intervenção.

Embora as escórias não tenham contribuído significativamente para aumentar os teores totais de Fe, Cr e Ni nos solos (Quadros 4.5 e 4.6), não se pode descartar a possibilidade de contaminação dos solos pelo uso continuado das mesmas, posto que o presente estudo é limitado a um prazo relativamente curto. Partindo-se da hipótese de acúmulo dos metais pesados, como consequência das reaplicações de escórias em um mesmo solo, é lícito supor que o uso destas escórias poderá produzir alguma contaminação no longo prazo. Para avaliar tal hipótese, serão considerados neste estudo os valores de alerta e de intervenção adotados pela CETESB (2001) (Quadro 4.7), bem como as concentrações máximas admissíveis de poluentes no lodo de ETS's e nos solos que recebem lodo, nos EUA segundo USEPA (1993) (Quadro 4.8), com o intuito de avaliar e projetar, da melhor maneira a adição de metais pesados em áreas agricultáveis por resíduos siderúrgicos.

Os valores orientadores obtidos com base no critério de uso do solo, assim como outros procedimentos de avaliação ambiental, envolvem algumas questões de ordem prática, como, a definição do cenário, nos casos em que ocorre mais de uma possibilidade de uso do solo; a quantificação de um grande número de variáveis e a necessidade de lidar-se com as incertezas em todos

Quadro 4.8. Teores máximos admissíveis de poluentes no lodo e nos solos que recebem lodo, nos EUA

Elemento	Teor máximo no lodo	Teor médio	Limites de acumulação no solo	Limites de aplicação anual no solo
	..... mg kg <sup>-1</sup> § .....			
Cd	85	39	19,5	0,95
Cr	3.000	1.200	1.500	75,00
Fe	—	—	—	—
Mn	—	—	—	—
Ni	420	420	210	10,50

§ Em mg do poluente por kg de lodo (em bases secas).  
 Fonte: USEPA (1993).

os estágios da derivação de critérios numéricos, o que também é inerente às metodologias de avaliação de risco. Além disso, uma avaliação da qualidade do solo dependente de valores estabelecidos com base somente na questão da saúde humana, em detrimento de outros importantes aspectos do meio ambiente, pode desconsiderar efeitos sobre os processos biológicos e outras funções do solo. Os valores de intervenção são, em geral, derivados com base, no risco à saúde humana e no critério de uso e ocupação do solo. Em alguns países como Canadá, Alemanha, Holanda e Inglaterra, são considerados também os riscos ecotoxicológicos. No Canadá e Inglaterra, o nível de remediação é definido diretamente por uma avaliação de risco caso a caso (CETESB, 2001).

Embora, de modo geral, a contribuição das escórias sobre a concentração de metais pesados nos solos não tenha sido significativa, pode-se calcular a quantidade teórica destes metais que foram adicionadas aos solos pelo uso das escórias (Quadro 4.9). Tomando-se por base os teores originais destes metais pesados nos solos (Quadro 4.2), e as quantidades teóricas adicionadas pelo uso das escórias (Quadro 4.9), foram calculados os números máximos de aplicações que poderiam ser feitas em um mesmo solo para se atingir os limites de referência, alerta e intervenção da CETESB (quadro 4.7) e os limites de acumulação da USEPA (Quadro 4.8). Vale salientar que estes cálculos são meras projeções que partem da hipótese de acúmulo destes metais nos solos e assumindo que a contribuição teórica das escórias na primeira aplicação deverá se repetir nas aplicações subseqüentes. As estimativas obtidas (Quadro 4.10) são discutidas a seguir.

Quadro 4.9. Teores de metais pesados adicionados aos LVA de Sete Lagoas-MG e João Pinheiro-MG, pelas escórias A e B na dose de 1,0 NC

Elemento	LVA Sete Lagoas-MG		LVA João Pinheiro-MG	
	Escória A	Escória B	Escória A	Escória B
	..... Média <sup>‡</sup> (mg kg <sup>-1</sup> ) .....			
Cd	0,013	0,011	0,008	0,007
Cr	1,647	1,243	1,017	0,767
Fe	327,699	305,741	202,402	188,529
Mn	72,93	60,468	45,045	37,287
Ni	0,063	0,057	0,039	0,035

<sup>‡</sup> Média de três repetições.

O cádmio não tem função bioquímica ou nutricional, e é altamente tóxico para plantas e animais (MUELLER et al., 1992; IWATA et al., 1993; ROELS et al., 1993; ELINDER; JARUP, 1996; USPHS, 1997). O cádmio ocorre na crosta terrestre em uma concentração média de 0,2 mg kg<sup>-1</sup>. Este metal é introduzido no ambiente terrestre por mineração, produção de metais não ferrosos, aterros e aplicação de fertilizantes fosfatados, lodo de efluentes domiciliares e resíduos industriais. As concentrações naturais no solo variam entre 0,1 e 0,4 mg kg<sup>-1</sup> e podem atingir a 4,5 mg kg<sup>-1</sup> em rochas vulcânicas. Concentrações de até 160 mg kg<sup>-1</sup> foram observadas nas proximidades de fontes de processamento de metais (WHO, 1994; BRIGDEN et al., 2000).

Não foi detectada a presença de Cd nos LVA de Sete Lagoas-MG e João Pinheiro-MG (Quadro 4.2). Não obstante, com base nos valores teóricos de Cd adicionado aos solos, pelas escórias (Quadro 4.9), pode-se estimar que serão necessárias cerca de 38 aplicações da escória A no LVA de Sete Lagoas-MG para se atingir o valor de referência, cerca de 230 aplicações para o limite de alerta e, aproximadamente, 670 aplicações para o limite de intervenção adotado pela CETESB (2001). Para se chegar ao limite de acumulação da USEPA (1993) serão necessárias cerca de 1.500 aplicações dessa mesma escória no LVA de Sete Lagoas-MG (Quadro 4.10). Ainda, no LVA de Sete Lagoas-MG serão necessárias, aproximadamente, 45 aplicações da escória B para se atingir o limite de referência, cerca de 273 aplicações para se o limite de alerta e, aproximadamente, 909 aplicações para o limite de intervenção da CETESB (2001). Para se atingir o limite de acumulação de Cd (USEPA, 1993) no LVA de Sete Lagoas-MG serão necessárias, aproximadamente, 1.773 aplicações da escória B. Com relação ao LVA de

Quadro 4.10. Estimativas do número máximo de aplicações, com base no cálculo da contribuição teórica das escórias para se atingir os valores orientadores e os limites de acumulação para contaminação dos solos

Solo	Metal	Valores Orientadores						Limites de Acumulação	
		Referência		Alerta		Intervenção		A	B
		A <sup>1/</sup>	B <sup>2/</sup>	A	B	A	B		
LVA Sete Lagoas	Cd	38	45	230	273	670	909	1.500	1.773
	Cr	n.e. <sup>3/</sup>	n.e.	n.e.	n.e.	112	445	840	1.114
	Ni	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	195	331	3.333	3.684
LVA João Pinheiro	Cd	62	71	375	428	1.250	1.428	2.447	2.785
	Cr	n.e.	n.e.	15	20	236	313	1.416	1.878
	Ni	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	315	540	5.384	6.000

<sup>1/</sup> Escória A;

<sup>2/</sup> Escória B; e

<sup>3/</sup> Não estimados, posto que os teores originais no solo eram superiores ao valor em questão.

João Pinheiro-MG serão necessárias cerca de 62 aplicações da escória A para se atingir o limite de referência, aproximadamente, 375 aplicações para o limite de alerta e, ainda, aproximadamente, 1.250 aplicações para se chegar ao limite de intervenção adotado pela CETESB (2001). Para se atingir o limite de acumulação de Cd nesse mesmo solo, serão necessárias cerca de 2.437 aplicações da escória A. Com relação à aplicação da escória B, no LVA de João Pinheiro-MG poderão ser realizadas, aproximadamente, 71 aplicações para se chegar ao limite de referência, cerca de 428 aplicações para o limite de alerta e, aproximadamente, 1.428 aplicações para o limite de intervenção da CETESB (2001). Já para se chegar ao limite de acumulação de Cd (USEPA, 1993), no LVA de João Pinheiro-MG serão necessárias, cerca de 2.785 aplicações escória B (Quadro 4.10).

O cromo (III) é considerado um elemento essencial, necessário para o metabolismo de glicose, proteínas e gordura em mamíferos (MERTZ, 1969). Os sinais de deficiência em humanos incluem perda de peso e tolerância diminuída à glicose (GOYER 1996; ASTR, 2000). Estima-se, para humanos, que uma ingestão de 50-200 µg dia<sup>-1</sup> de Cr (III) seja segura e adequada. No entanto, em doses muito altas pode ser prejudicial (ROSS et al, 1981; FRANCHINI et al., 1983; BERGLUND et al., 1984; Calder, 1988; YASSI; NIEBOER, 1988; BURKE et al., 1991; COHEN; COSTA, 1998; MUKHERJEE, 1998; KIMBROUGH, 1999). O cromo (VI) é não-essencial e tóxico (IARC, 1998; SHEEHAN et al., 1991; DISSANAYAKE; CHANDRAJITH, 1999).

O cromo ocorre na crosta terrestre em uma concentração média de 100 mg kg<sup>-1</sup> (BRYAN; LANGSTON, 1992; WHO, 1994; ATSDR, 2000). Apresenta-se na natureza em estados de oxidação que variam de -II a VI, sendo que os mais importantes são 0 (metal elementar), III (trivalente) e VI (hexavalente). O teor de Cr determinado, originalmente, no LVA de Sete Lagoas-MG foi de aproximadamente 115,4 mg kg<sup>-1</sup> (Quadro 4.2). Este valor, embora próximo ao teor médio da crosta terrestre, está acima dos valores de referência e alerta estipulados para solos no estado de São Paulo (Quadro 4.7), no entanto abaixo do valor de intervenção (CETESB, 2001) e abaixo do limite de acumulação deste metal estipulado pela USEPA (1993). Tomando-se como referência o valor de intervenção (CETESB, 2001), o teor de Cr nesse solo (Quadro 4.2) e a contribuição teórica da escória A para esse elemento (Quadro 4.9), poderiam ser realizadas, aproximadamente, 112 aplicações de escória A na dose recomendada de 1,0 NC (CFSEMG, 1999), ou seja, essa escória poderia ser utilizada na mesma área por cerca de 336 anos, considerando-se uma aplicação a cada triênio. Considerando-se, agora, o limite de acumulação de Cr no solo adotado pela USEPA (1993), de 1.500 mg kg<sup>-1</sup>, e descontando-se o teor desse elemento presente no LVA de Sete Lagoas-MG (Quadro 4.2), poderiam ser realizadas cerca de 840 aplicações na mesma área para se atingir tal limite, ou seja, cerca de 2.525 anos de utilização na mesma área com aplicações trianuais, para a dose recomendada de 1,0 NC (CFSEMG, 1999) e tendo em vista a contribuição teórica da escória A nesse solo. O teor de Cr determinado, inicialmente, no LVA de João Pinheiro-MG foi de 59,8 mg kg<sup>-1</sup>, aproximadamente, (Quadro 4.2). Teor este, que está abaixo da concentração média crustal, mas acima do valor de referência da CETESB (2001). Adotando-se o mesmo raciocínio que o utilizado para o LVA de Sete Lagoas-MG, poderiam ser realizadas cerca de 15 aplicações da escória A no LVA de João Pinheiro-MG para se atingir o limite de alerta ou 45 anos de utilização da mesma área com aplicações trianuais e, aproximadamente, 236 aplicações, cerca de 708 anos de utilização da área com aplicações trianuais para se atingir o limite de intervenção (CETESB, 2001). Considerando-se o limite de acumulação de Cr no solo (USEPA, 1993), poderiam ser realizadas 1.416 aplicações da escória A no LVA de João Pinheiro-MG, cerca de 4.248 anos de utilização no mesmo solo, com aplicações a cada três anos. Cada aplicação da escória B no LVA de Sete Lagoas-MG promove um incremento teórico de Cr da

ordem de 1,243 mg kg<sup>-1</sup> de solo (Quadro 4.9), assim sendo, poderiam ser realizadas cerca de 148 aplicações, aproximadamente 445 anos de aplicações trianuais na mesma área para se atingir o limite de intervenção (CETESB, 2001). Para se atingir o limite máximo de acumulação no solo (USEPA, 1993), poderiam ser realizadas cerca de 1.114 aplicações ou, aproximadamente, 3.342 anos de uso nesse solo, com aplicações trianuais. No LVA de João Pinheiro-MG poderiam ser realizadas cerca de 20 aplicações da escória B, para se atingir o limite de alerta (CETESB, 2001) e, aproximadamente, 313 aplicações para se chegar ao limite de intervenção adotado pela CETESB (2001). Para se atingir o limite de acumulação adotado pela USEPA (1993) poderiam ser realizadas, aproximadamente, 1.878 aplicações da escória B no LVA de João Pinheiro-MG (Quadro 4.10).

O níquel é um metal pesado tóxico para os humanos. A inalação é uma via importante de exposição ao níquel e seus sais, em relação a riscos à saúde humana. A ocorrência de toxicidade aguda é rara, mas a exposição crônica pode provocar irritação de pele e olhos. Dermatites são um resultado comum da exposição ao Ni, principalmente para mulheres. Rinite, sinusite, perfurações no septo nasal e asma têm sido reportadas para exposição ocupacional em trabalhadores de refinarias e siderúrgicas (CETESB, 2001; WHO, 1994). O níquel ocorre na crosta terrestre em uma concentração média de 75 mg kg<sup>-1</sup> (CETESB, 2001). A concentração de Ni no solo depende muito do material de origem e dos processos pedogênicos. Solos formados a partir de serpentina, por exemplo, podem conter entre 100 e 7.000 mg kg<sup>-1</sup> de Ni. Segundo Camargo et al. (1989), Camargo et al., (2001) e Moreira (2004), no solo, a concentração de Ni total varia entre 5 e 500 mg kg<sup>-1</sup> e o Ni solúvel entre 1 a 10 mg kg<sup>-1</sup>.

Os teores totais de Ni originalmente encontrados nos LVA de Sete Lagoas-MG e João Pinheiro-MG foram de, aproximadamente, 37,7 e 31,1 mg kg<sup>-1</sup>, respectivamente (Quadro 4.2). Estes teores, embora inferiores à concentração média da crosta terrestre, estão acima dos valores de referência e alerta adotados pela CETESB (2001). Neste caso, para se atingir o valor de intervenção, adotado pelo mesmo órgão, serão necessárias cerca de 195 aplicações da escória A no LVA de Sete Lagoas-MG e cerca de 315 aplicações da mesma escória no LVA de João Pinheiro-MG. Para se atingir o limite de acumulação estipulado pela USEPA (1993) serão necessárias,

aproximadamente, 3.333 aplicações da escória A no LVA de Sete Lagoas-MG e cerca de 5.384 aplicações da mesma escória no LVA de João Pinheiro-MG. Com relação à escória B serão necessárias cerca de 331 aplicações para se atingir o limite de intervenção (CETESB, 2001) no LVA de Sete Lagoas-MG e, cerca de 540 aplicações para se chegar ao mesmo limite no LVA de João Pinheiro-MG. Para se chegar ao limite de acumulação de Ni no solo (USEPA, 1993) serão necessárias, aproximadamente, 3.684 aplicações da escória B no LVA de Sete Lagoas-MG e, cerca de 6.000 aplicações da mesma escória no LVA de João Pinheiro-MG (Quadro 4.10).

As projeções indicam que o Cr é o elemento mais limitante para utilização das escórias nos dois Latossolos (Quadro 4.10), tomando-se como base o teor desse elemento nos solos estudados (Quadro 4.2), a contribuição teórica das escórias na dose recomendada de 1,0 NC (CFSEMG, 1999) (Quadros 4.4 e 4.9) e o valor de intervenção adotado pela CETESB (2001) (Quadro 4.7).

#### **4.3.2. Teores disponíveis de metais pesados nos solos**

O extrator Mehlich-3 foi introduzido para o uso em solos ácidos, dentre os métodos de extração ácida. Embora não haja consenso entre os autores, quanto ao extrator mais adequado para avaliar a disponibilidade de metais pesados, o Mehlich-3 tem sido considerado apropriado e econômico para a análise em laboratório devido à sua capacidade de extrair, do solo, vários nutrientes simultaneamente (N, P, K, Ca, Mg, S, Al, Na, B, Cu, Fe, Mn, Ni, Cd, Pb e Zn) (TRAN et al., 1990; MULCHI et al., 1991; RAIJ, 1994; ABREU et al., 1995). O Mehlich-3 tem como princípio a solubilização e quelação dos elementos. O quelato é um tipo de composto químico em que o íon metálico encontra-se firmemente combinado com uma molécula, mediante múltiplos vínculos químicos (BRADY, 1989). Este método foi adaptado a partir do extrator Mehlich-2 pela associação do princípio da quelação (EDTA), com a acidez para melhorar a eficiência de extração dos micronutrientes. A adição de EDTA aumentou as extrações de Cu em 170 %, a de Mn em 50 % e a de Zn em 25 % (MEHLICH, 1984).

Observaram-se diferenças significativas entre solos, corretivos e doses de Fe e Mn extraídos por Mehlich-3. Não foram detectadas diferenças

significativas entre escórias nos dois solos estudados, mas as escórias contribuíram significativamente para o aumento de Fe e Mn disponíveis nos solos comparativamente ao calcário (Quadro 4.11).

A CFSEMG (1999) informa as classes de interpretação Para Fe e Mn disponíveis extraídos por Mehlich-1 (Quadro 4.12). Comparando-se esses valores de referência com aqueles obtidos neste ensaio (Quadro 4.13), extraídos por Mehlich-3, verifica-se que os teores disponíveis de Fe para os dois solos avaliados e os teores de Mn para o LVA de João Pinheiro-MG estão muito acima do valor considerado alto para estes elementos no solo. No entanto, deve-se ressaltar que o poder de extração do Mehlich-3 é, teoricamente, superior ao Mehlich-1. Os teores de Mn disponível nos dois solos em que se aplicaram as escórias A e B aumentaram com o incremento das doses (Quadro 4.13), estando acima do valor considerado alto pela CFSEMG (1999) para todos os tratamentos aplicados ao LVA de Sete Lagoas-MG.

Para as doses das duas escórias aplicadas ao LVA de João Pinheiro-MG, os teores de Mn, disponíveis por Mehlich-3, foram superiores àqueles considerados altos pela CFSEMG (1999), apenas a partir da dose de 1,0 NC (Quadros 4.12 e 4.13). Quando se aplicou o calcário no LVA de João Pinheiro-MG (Quadro 4.13) não foi observado incremento no Mn disponível com o aumento das doses que permaneceu, segundo a CFSEMG (1999) classificado como médio (Quadro 4.12). Vale, novamente, ressaltar que estas comparações estão sendo realizadas apesar do tipo de extrator, Mehlich-1, para as classes de interpretação utilizada pela CFSEMG (1999) ser diferente do Mehlich-3 utilizado neste trabalho. É importante lembrar, ainda, que foram aplicados Fe e Mn na forma de adubação de cobertura para todos os tratamentos, para suprir uma eventual deficiência desse elemento nas testemunhas e nas plantas cultivadas nos solos em que se aplicou o calcário como corretivo, segundo recomendado pela CFSEMG (1999). Segundo Malavolta et al. (1989) o excesso de Fe e Mn nos solos brasileiros está relacionado a condições de baixo pH.

A contribuição das escórias para o Fe disponível dos solos, em princípio, não preocupa do ponto de vista ambiental. Isto porque este elemento é um dos constituintes relativamente abundantes nos solos, podendo ser deficiente para as plantas mesmo em solos ricos em Fe quando estes são corrigidos com calcário ou outros corretivos. Por outro lado, o aumento nos

Quadro 4.11. Análise de variância para teores de Fe e Mn disponíveis nos solos tratados com as escórias A e B e o calcário

FV	GL	QM	
		Fe	Mn
Blocos (B)	2	23,642 <sup>n.s.</sup>	0,094 <sup>n.s.</sup>
Solos (S)	1	1.415,072 <sup>**</sup>	1.761,207 <sup>**</sup>
Corretivos (C)	2	844,229 <sup>**</sup>	120,472 <sup>**</sup>
Doses (D)	3	437,491 <sup>**</sup>	69,821 <sup>**</sup>
D x C	6	307,855 <sup>**</sup>	35,938 <sup>**</sup>
D x S	3	130,173 <sup>**</sup>	5,769 <sup>n.s.</sup>
C x S	2	107,336 <sup>**</sup>	0,783 <sup>n.s.</sup>
D x C x S	6	73,613 <sup>**</sup>	4,387 <sup>n.s.</sup>
S/C = Esc. A x D = 0,0 NC	1	3,783 <sup>n.s.</sup>	174,664 <sup>**</sup>
S/C = Esc. A x D = 0,5 NC	1	278,936 <sup>**</sup>	180,680 <sup>**</sup>
S/C = Esc. A x D = 1,0 NC	1	119,199 <sup>*</sup>	123,663 <sup>**</sup>
S/C = Esc. A x D = 1,5 NC	1	17,358 <sup>n.s.</sup>	77,377 <sup>**</sup>
S/C = Esc. B x D = 0,0 NC	1	2,083 <sup>n.s.</sup>	180,932 <sup>**</sup>
S/C = Esc. B x D = 0,5 NC	1	33,245 <sup>n.s.</sup>	168,603 <sup>**</sup>
S/C = Esc. B x D = 1,0 NC	1	121,661 <sup>*</sup>	200,403 <sup>**</sup>
S/C = Esc. B x D = 1,5 NC	1	123,475 <sup>*</sup>	65,987 <sup>**</sup>
S/C = Calc. x D = 0,0 NC	1	2,767 <sup>n.s.</sup>	165,168 <sup>**</sup>
S/C = Calc. x D = 0,5 NC	1	298,574 <sup>**</sup>	170,963 <sup>**</sup>
S/C = Calc. x D = 1,0 NC	1	143,912 <sup>*</sup>	106,763 <sup>**</sup>
S/C = Calc. x D = 1,5 NC	1	1.316,948 <sup>**</sup>	191,196 <sup>**</sup>
C/S = 1 e D = 0,0 NC	2	0,001 <sup>n.s.</sup>	0,283 <sup>n.s.</sup>
C/S = 1 e D = 0,5 NC	2	16,863 <sup>n.s.</sup>	1,571 <sup>n.s.</sup>
C/S = 1 e D = 1,0 NC	2	267,370 <sup>**</sup>	53,754 <sup>**</sup>
C/S = 1 e D = 1,5 NC	2	177,127 <sup>**</sup>	41,328 <sup>**</sup>
C/S = 2 e D = 0,0 NC	2	0,114 <sup>n.s.</sup>	0,022 <sup>n.s.</sup>
C/S = 2 e D = 0,5 NC	2	26,427 <sup>n.s.</sup>	0,837 <sup>n.s.</sup>
C/S = 2 e D = 1,0 NC	2	294,641 <sup>**</sup>	27,523 <sup>**</sup>
C/S = 2 e D = 1,5 NC	2	1.313,426 <sup>**</sup>	116,912 <sup>**</sup>
Resíduo	46	20,246	4,069
CV (%)		4,899	13,670
C1	1	1.415,071 <sup>**</sup>	1.761,207 <sup>**</sup>
C2	1	345,140 <sup>**</sup>	105,494 <sup>**</sup>
C3	1	4,380 <sup>n.s.</sup>	0,294 <sup>n.s.</sup>
C4	1	1.535,268 <sup>**</sup>	136,444 <sup>**</sup>
C5	1	18,340 <sup>n.s.</sup>	0,279 <sup>n.s.</sup>

Esc A = escória A; Esc. B = escória B; Calc. = calcário; S1 = Latossolo Vermelho-amarelo de Sete Lagoas-MG; e S2 = Latossolo Vermelho-amarelo de João Pinheiro-MG; e NC = necessidade de calagem (CFSEMG, 1999).

C1 = m S1 vs m S2; C2 = S1/m Esc.A + m Esc.B vs 2m Calc.; C3 = S1/m Esc.A vs m Esc.B; C4 = S2/m Esc. A + m Esc. B vs 2m Calc.; e C5 = S2/m Esc. A vs m Esc. B.

<sup>n.s.</sup> coeficientes não-significativos; \*\* e \* coeficientes significativos a 1 e 5 %, respectivamente.

Quadro 4.12. Classes de interpretação da disponibilidade para Fe e Mn no solo, extraídos por Mehlich-1

Elemento	Classificação				
	Muito baixo	Baixo	Médio <sup>§</sup>	Bom	Alto
	..... mg dm <sup>-3</sup> .....				
Fe	≤ 8	9 – 18	19 – 30	31 – 45	> 45
Mn	≤ 2	3 – 5	6 – 8	9 – 12	> 12

<sup>§</sup> O limite superior desta classe indica o nível crítico; e

Fonte: CFSEMG (1999).

Quadro 4.13. Teores de Fe e Mn disponíveis nos solos, para as diferentes doses de calcário e escórias

Solo	Corretivo	Dose (NC)	pH H <sub>2</sub> O (1:2,5)	Fe <sup>§</sup>	Mn <sup>§</sup>
				..... Média ± E.P. ‡ (mg dm <sup>-3</sup> ) .....	
1	Escória A	0,0	4,7	98,48 ± 0,71	18,56 ± 0,41
		0,5	5,2	99,84 ± 6,24	19,33 ± 1,12
		1,0	5,6	98,27 ± 2,58	21,67 ± 1,72
		1,5	6,1	95,58 ± 1,52	23,65 ± 1,93
	Escória B	0,0	4,9	98,46 ± 0,73	18,91 ± 0,53
		0,5	5,1	96,25 ± 2,59	18,03 ± 1,81
		1,0	5,8	101,20 ± 4,33	23,72 ± 1,28
		1,5	6,1	99,70 ± 0,47	23,44 ± 0,95
	Calcário	0,0	4,9	98,50 ± 0,70	18,30 ± 0,31
		0,5	5,4	100,72 ± 3,96	18,13 ± 2,60
		1,0	5,8	83,58 ± 0,62	15,58 ± 1,08
		1,5	6,4	84,82 ± 0,75	17,12 ± 1,59
2	Escória A	0,0	5,2	96,90 ± 3,45	7,77 ± 0,81
		0,5	5,6	86,21 ± 0,44	8,35 ± 0,39
		1,0	5,9	89,36 ± 4,41	12,59 ± 0,28
		1,5	6,2	92,18 ± 0,73	16,47 ± 0,47
	Escória B	0,0	5,3	97,28 ± 3,25	7,93 ± 0,97
		0,5	5,6	91,54 ± 2,24	7,43 ± 1,03
		1,0	5,8	92,19 ± 1,45	12,16 ± 1,27
		1,5	6,2	90,62 ± 2,17	16,80 ± 0,40
	Calcário	0,0	5,2	97,14 ± 3,44	7,81 ± 1,01
		0,5	5,6	86,61 ± 0,69	6,45 ± 0,12
		1,0	6,0	73,79 ± 1,88	7,14 ± 0,69
		1,5	6,5	55,19 ± 1,02	5,83 ± 0,16

§ Extraído por Mehlich-3 (MEHLICH, 1984);

‡ Média de três repetições ± erro padrão da média; e

Solo 1 = Latossolo Vermelho-amarelo de Sete Lagoas-MG; Solo 2 = Latossolo Vermelho-amarelo de João Pinheiro-MG.

teores de Mn disponível, pode suscitar alguma preocupação. Embora o Mn seja geralmente encontrado nos solos, em concentrações apreciáveis, ele é tido como um referencial importante de problemas ambientais, apesar de não ser tão tóxico quanto outros metais pesados.

De modo geral, as condições que favorecem a mobilização do Mn, também favorecem a mobilidade de outros metais pesados considerados mais tóxicos. No entanto, as condições ambientais, principalmente de pH e potencial redox (Eh) do meio, afetam o Mn prioritariamente em relação aos demais metais pesados. Assim sendo, a ausência de problemas com a mobilidade de Mn nos solos, águas e sedimentos, de modo geral indica condições ambientais seguras para os demais metais tóxicos. Além disso, o Mn pode provocar problemas indiretos afetando a mobilidade de outros metais. este é o caso do Cr, posto que a redução do Mn pode acarretar oxidação do Cr (III) a Cr (VI), sendo este último considerado muito mais tóxico e carcinogênico.

Diante do exposto, embora a contribuição das escórias para os teores de Cr nos solos possa ser considerada negligível em curto prazo, o possível acúmulo de Mn e seus efeitos na mobilidade de Cr (VI), por aplicações continuadas de escória, devem ser convenientemente avaliados em estudos de longo prazo (décadas). Posto que os resultados do presente trabalho se limitam ao curto prazo e que não existem valores orientadores ou limites de acumulação de Mn nos solos, não se pode fazer projeções sobre limites seguros de reaplicações das escórias em longo prazo. Não obstante, pode-se recomendar o monitoramento dos solos quanto a teores de Cr e Mn para usos prolongados das escórias. Neste sentido, sugere-se a observância dos valores de alerta e intervenção estipulados pela CETESB, bem como monitorar o aparecimento de sintomas de toxidez de Mn nas plantas, como indicadores para considerar a suspensão das reaplicações das escórias em uma mesma área.

#### **4.4. Conclusões**

- ❖ As escórias promoveram acréscimos nos teores totais de Mn nos solos. Por outro lado, as escórias não contribuíram para os teores totais de Fe, Cr, Ni ou Cd dos solos e não foram detectados Cr, Ni e Cd disponíveis nos solos;
- ❖ Os teores de Cr e Ni originalmente presentes nos solos estudados foram maiores que os valores de referência estipulados pela CETESB;
- ❖ Os teores de Cr e Ni originalmente presentes no LVA de Sete Lagoas-MG foram maiores que os valores de alerta estipulados pela CETESB;
- ❖ Os teores de Mn disponíveis nos solos estudados aumentaram com o incremento das doses das escórias; e
- ❖ A utilização das escórias LD, da Cia. Siderúrgica de Tubarão, como corretivos da acidez dos solos, mostrou-se viável do ponto de vista ambiental em curto prazo. Projeções para longo prazo, sugerem que as escórias poderão ser utilizadas por décadas com relativa segurança ambiental, a depender das características dos solos. Não obstante, as reaplicações em longo prazo, devem ser avaliadas caso a caso. Neste sentido, é recomendável o controle de qualidade destas escórias, principalmente quanto a teores de Cr e Mn, bem como o monitoramento dos teores de metais pesados nos solos.

#### 4.5. Referências bibliográficas

ABREU, C.A.; ABREU, M.F. Micronutrientes e metais pesados em solos: monitoramento de áreas agrícolas. In: **Reunião brasileira de fertilidade de solos e nutrição de plantas, 23; Reunião brasileira sobre micorrizas, 7; Simpósio brasileiro de microbiologia do solo, 5; Reunião brasileira de biologia do solo, 2**; Caxambu, 1998. Resumos. Lavras: UFLA; SBCS; SBM, 1998. 455 p.

ABREU, C.A.; ABREU, M.F.; RAIJ, B. van; SANTOS, W.R. Comparação de métodos de análise para avaliar a disponibilidade de metais pesados em solos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas-SP, n.19, p. 463-468. 1995.

ACCIOLY, A.M.A.; FURTINI NETO, A.E.; MUNIZ, J.A.; FAQUIN, V.; GUEDES, G.A.A. Pó de forno elétrico de siderurgia como fonte de micronutrientes e contaminantes para plantas de milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 35, n. 7, p. 1483-1491, 2000.

ALLOWAY, B.J. The origins of heavy metals in soils. In: ALLOWAY, B.J. ED. **Heavy metals in soils**. New York: John Wiley, 1990. p. 29-39.

ALVAREZ V. V.H. **Equilíbrio de formas disponíveis de fósforo e enxofre em dois latossolos de Minas Gerais**. Viçosa, Viçosa, MG: UFV, 1974. 134 f. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 1974.

ALVES, W.L.; MELO, W.J. FERREIRA, M.E. Efeito do composto de lixo urbano em um solo arenoso e em plantas de sorgo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 23, n. 3, p. 729-736, 1999.

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

AMARAL SOBRINHO, N.M.B., do. **Interação dos metais pesados de resíduos siderúrgicos com um solo podzólico vermelho-amarelo**. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 1993. 163 f. (Tese de Doutorado) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 1993.

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

AMARAL, R.D.; BARROS, N.F.; COSTA, L.M.; FONTES, M.P.F. Efeito de um resíduo da indústria de zinco sobre a química de amostras de solo e plantas de milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, SP, v. 20, n. 3, p. 433-440, 1996.

ATSDR – Agency for Toxic Substances and Disease Registry Division of Toxicology. **Toxicological Profile for Chromium**. Atlanta, GA: U.S. Department of Health and Human Services. Public Health Services. 2000. Endereço eletrônico: <<http://atsdr1.atsdr.cdc.gov/tfacts7.pdf>>. Acesso em 20 jun. 2004.

BERGLUND, S.; DAVIS, R.D.; L'HERMITE, P. **Utilization of sewage sludge on land: rates of application and long-term effects of metals**. Dordrecht: D. Reidel Publ., 216 p. 1984.

BRADY, N.C. **Natureza e propriedade dos solos**/Nyle C. Brady “The nature and properties of soils”. Trad. Antônio B. Neiva Figueiredo F°. 7ª ed. Rio de Janeiro, Freitas Bastos, 1989. 898 p.

BRIGDEN, K.; STRINGER, R.; LABUNSKA, I. **Poluição por organoclorados e metais pesados associada ao fundidor de ferro da Gerdau em Sapucaia do Sul, Brasil**. Tradução: Michael Duncan, Cristina Bonfiglioli. Laboratórios de Pesquisa do GREENPEACE, Departamento de Ciências Biológicas, Universidade de Exeter, Exeter, Reino Unido, 2000. 24 p.

BRYAN, G.W.; LANGSTON, W.J. Bioavailability, accumulation and effects of heavy metals in sediments with special reference to United Kingdom estuaries: a review. **Environmental Pollution**, v. 76, p. 89-131. 1992.

BURKE, T., FAGLIANO, J., GOLDOFT, M., HAZEN, R.E., IGLEWIZE, R., MCKEE, T. Chromite ore processing residue in Hudson county, New Jersey. **Environmental Health Perspective**, v. 92, p. 131-137. 1991.

CABRERA, D.; YOUNG, S.D.; ROWELL, D.L. The toxicity of cadmium to barley plants as affected by complex formation with humic acid. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 105, n. 2, p. 195-204, 1988.

CALDER, L.M. Chromium contamination in ground water. In: Nriagu, J.O. (Ed.), **Chromium in the Human and Natural Environment**. New York, NY: John Wiley and Sons, p. 215–229. 1988.

CAMARGO, M.N.; KLAMT, E.; KAUFFMAN, J.H. **Classificação de solos usada em levantamentos pedológicos no Brasil**. Boletim informativo da Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, Campinas, SP, v. 12, n. 1, p. 11-33, 1987.

CAMARGO, O.A.; ALLEONI, L.R.F.; CASAGRANDE, J.C. Reações dos micronutrientes e elementos tóxicos. IN: FERREIRA, M.E.; CRUZ, M.C.P. da; RAIJ, B. van; ABREU, C.A. de (Ed.). **Micronutrientes elementos tóxicos na agricultura**. Jaboticabal: CNPq/FAPESP/POTAFOS. Cap. 5, p. 89-124. 2001.

CAMARGO, O.A.; ROVERS, H.; VALADARES, J.M.A.S. Adsorção de níquel em Latossolos paulistas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, SP, v. 13, p. 125-129. 1989.

CASTELO BRANCO, V.T.F. **Caracterização de misturas asfálticas com o uso de escória de aciaria como agregado**. Rio de Janeiro, RJ: COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro. 2004. 135 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 2004.

CETESB – **Relatório de estabelecimento de valores orientadores para solos e águas subterrâneas no estado de São Paulo**. Dorothy C. P. Casarini [et al.]. São Paulo, SP: CETESB, 2001. 73 p.

CFSEMG – Comissão de fertilidade do solo do estado de Minas Gerais. **Recomendação para uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais – 5ª Aproximação**. Viçosa, MG. 359 p. 1999.

COHEN M.D.; COSTA M. Chromium compounds. In: Rom WN, editor. **Environmental and occupational medicine**. Philadelphia: Lippincott-Raven Publishers, p. 1045-1052. 1998.

COSTA, L.M.; AMARAL SOBRINHO, N.M.B.; DIAS, L.E.; BARROS, N.F. Application of a steel industry residue to an Oxisol including microbial activity. In: **Trace substances in environmental health conference**, 25. s. l., 1991. Proceeding, p. 245-356. 1991.

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

DISSANAYAKE C.B.; CHANDRAJITH R. Medical geochemistry of tropical environments. **Earth-Science Review**, v. 47, p. 219-258. 1999.

DOWDY, R.H.; VOLK, U.V. Movement of heavy metals in soils. In: NELSON, D.W.; ELRICK, D.E; TANGI, K.K., EDS. Chemical mobility and reactivity in soil system. Madson, **Soil Science Society of America**, 1983, p. 229-240. (SSSA Special Publication, 11).

ELINDER, C.G.; JARUP, L. Cadmium exposure and health risks: recent findings. **Ambio**, v. 25, n. 5, p. 370-373. 1996.

ELLIS, B.G.; KNEZEK, B.D.; JACOBS, L.W. The movement of micronutrients in soil. In: NELSON, D.W.; ELRICK, D.E; TANGI, K.K., EDS. Chemical mobility and reactivity in soil system. Madson, **Soil Science Society of America**, 1983. p. 109-122. (SSSA Special Publication, 11).

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

EMBRAPA – EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes**. Organizador: Fábio César da Silva. – Brasília: Embrapa Comunicação para Transferência de Tecnologia, 1999. 370 p.

FRANCHINI, J., MAGNANI, E., MUTTI, A. Mortality experienced among chrome-plating workers. **Scandinavian Journal of Work Environment and Health**, v. 9, p. 247–252. 1983.

GOYER, R.A. Toxic effects of metals. In Casarett & Doull's Toxicology. **The Basic Science of Poisons**, Fifth Edition, Klaassen, C.D. [Ed]. McGraw-Hill Health Professions Division, 1996.

HAGEMEYER, T.; WAISEL, Y. Uptake of Cd<sup>2+</sup> and Fe<sup>2+</sup> by excised roots of *Tomarisc aphylla*. **Physiologia Plantarum**, Copenhagen, v. 77, n. 4, p. 247-253. 1989.

HERNÁNDEZ, T.; MORENO, J.I.; COSTA, F. Influence of sewage sludge application on crop yields and heavy metal availability. **Soil Science and Plant Nutrition**, Tokyo, v. 37, p. 201-210, 1991.

HOSSNER, L.R. Dissolution for total elemental analysis. In: **Methods of soil analysis. Part 3. Chemical methods**. Madison: Soil Science Society of America, Inc., p.49-64. 1996.

IARC monographs on the evaluation of the carcinogenic risk of chemicals to humans. **Chemicals, industrial processes and industries associated with cancer in humans**. IARC monographs, v. 1 to 29. 1998.

INDUSTRY AND ENVIRONMENT. Construction and the environment: facts and figures. **UNEP IE**, v. 19, n. 2, p. 4-9. 1996.

IWATA, K.; SAITO, H.; MORIYAMA, M; AND NAKANO, A. Renal tubular function after reduction of environmental cadmium exposure: a ten year follow-up. **Archives of Environmental Health**, v. 48, n. 3, p. 157-163. 1993.

KABATA-PENDIAS, A.; PENDIAS, H. **Trace elements in soil and plants**. 4 ed. Boca Raton: CRC Press, 2000. 331 p.

KER, J.C. Latossolos do Brasil: uma revisão. **Geonomos**, Belo Horizonte, MG, v. 5, n. 1, p. 17-40. 1997.

KIMBROUGH D.E; COHEN Y.; WINER A.M.; CREELMAN L.; MABUNI C. A critical assessment of chromium in the Environment. **Critical Reviews in Environmental Science and Technology**, v. 29, n. 1, p. 1-46. 1999.

MACHADO, A.T. **Estudo comparativo dos métodos de ensaios para avaliação da expansibilidade das escórias de aciaria**. São Paulo, SP: USP. 2000. 135 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Construção Civil) – Universidade de São Paulo, Escola Politécnica, São Paulo, SP, 2000.

MALAVOLTA, E. VITTI, G.C., OLIVEIRA, S.A. **Avaliação do estado nutricional das plantas. Princípios e aplicações**. Piracicaba, SP: Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato, 1989. 201 p.

MEHLICH, A. Mehlich 3 soil test extractant: a modification of Mehlich 2 extractant. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 15, p. 1409-1416, 1984.

MENGEL, K.; KIRKBY, E.A. **Principles of plant nutrition**. New York, NY: International potash Institute, 1987. 687 p.

MERTZ, W. Chromium occurrence and function in biological systems. **Physiol. Rev.**, v. 49, p. 163-239. 1969.

MOREIRA, C.S. **Adsorção competitiva de cádmio, cobre, níquel e zinco em solos**. Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, SP. 2004. 108p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, SP, 2004.

MOREIRA-NODERMANN, L.M. A geoquímica e o meio ambiente. **Geochimica Brasiliensis**, v.1, n.1, p. 89-107, 1987.

MUELLER, P.W.; PASCHAL, D.C.; HAMMEL, R.R.; KLINCEWICZ, S.L.; MACNEIL, M.L. Chronic renal effects in three studies of men and women occupationally exposed to cadmium. **Archives of Environmental Contamination and Toxicology**, v. 23, p. 125-136, 1992.

MUKHERJEE, A.B. Chromium in the environment of Finland. **The Science of the Total Environment**, v. 217, p. 9-19, 1998.

MULCHI, C.L.; ADAMU, C.A.; BELL, P.F.; CHANEY, R.L. Residual Heavy metal concentrations in sludge-amended Coastal Plain soils: 1. Comparison of extractants. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, NY, v. 22, n. 9/10, p. 919-941, 1991.

PAVAN, M.A.; BINGHAM, F.T. Toxidez de metais em plantas: II. Caracterização da toxidez do níquel em cafeeiros. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 17, p. 323-328, 1982.

POMBO, L.C.A.; KLAMT, E. Adsorção de zinco e cobre de dois solos do Estado do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, SP, v. 10, p. 191-194, 1986.

RAIJ, B. van. New diagnostic techniques, universal soil extractants. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, NY, v. 25, n. 7/8, p. 799-816, 1994.

ROELS H.; BERNARD A.M.; CARDENAS A.; BUCHET J.P.; LAUWERYS R.R.; HOTTER G.; RAMIS I.; MUTTI A.; FRANCHINI I.; BUNDSHUH I.; STOLTE H.; DE BROE M.E.; NUYTS G.D.; TAYLOR S.A.; PRICE R.G. Markers of early

renal changes induced by industrial pollutants. III. Application to workers exposed to cadmium. **British Journal of Industrial Medicine**, v 50, p. 37-48, 1993.

ROSS, D.S., SJOGREN, R.E.; BARTLETT, R.J. Behavior of chromium in soils: Toxicity to microorganisms. **Journal of Environmental Quality**, v. 10, n. 2, p. 142-148, 1981.

SHEEHAN, P.J., MEYER, D.M., SAUER, M.M., PAUSTENBACH, D.J. Assessment of the human health risks posed by exposure to chromium contaminated soil. **Journal of Toxicological Environmental Health**, v. 12, p. 161–201, 1991.

SHEPPARD, M.J.; THIBAUT, D.H. Desorption and extraction of selected Heavy Metal from soil. **Soil Science Society American Journal**, New York, NY, v. 56, p. 415-423, 1992.

SILVA, C.A.; ANDERSON, S.J.; VALE, F.R. Carbono, nitrogênio e enxofre em frações granulométricas de dois latossolos submetidos à calagem e adubação fosfatada. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 23, n. 3, 1999.

SPOSITO, G. **The surface chemistry of soils**. New York, NY: Oxford University Press, 1989. 234 p.

TRAN, T.S.; GIROUX, M.; GUILBEAUT, J.; AUDES, P. Evaluation of Mehlich-III extractant to estimate the available P in Quebec Soils. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 21, p. 1-28, 1990.

USEPA – United States Environmental Agency. **Innovative treatment technologies: overview and guide to information sources**. CD-ROM. EPA/540/9-91/002, number 2, 1991.

USEPA – United States Environmental Protection Agency. **Standards for the use or disposal of sewage sludge**. Fed. Regist., v. 58, p. 9284-9415, 1993.

USEPA – United States Environmental Protection Agency. Washington DC. SW 486 On Line. **Test Methods for Evaluating Solid Wastes, Physical/Chemical Methods**. 2003.

USEPA. – United States Environmental Protection Agency. **Test Methods for Evaluating Solid Waste – SW846. Office of Solid Waste and Emergency Response**. CD-ROM. Washington, USA, Terceira edição. 1986.

USPHS. Toxicological profile for cadmium on CD-ROM. **Agency for Toxic Substances and Disease Registry**. 1997.

WHO – World Health Organization. **Assessing human health risks of chemicals: derivation of guidance values for health based exposure limits**. Geneve : WHO, 1994. 73 p. (Environmental health criteria 170).

YASSI, A., NIEBOER, E. Carcenogenicity of chromium compounds. In: Nriagu, J.O. (Ed.), **Chromium in the Human and Natural Environment**. New York, NY: John Wiley and Sons, p. 443-479. 1988.

## **5. EFEITO DA UTILIZAÇÃO DA ESCÓRIA DE ACIARIA LD, DA CST, NA PRODUÇÃO E CONTAMINAÇÃO DA CANA-DE-AÇÚCAR CULTIVADA EM CASA-DE-VEGETAÇÃO**

### **5.1. Introdução**

As indústrias siderúrgicas produzem, no Brasil, aproximadamente 4 milhões de toneladas por ano de escórias, das quais cerca de 56 % são estocadas anualmente sem destinação imediata, aproximadamente 2,24 milhões de toneladas (MACHADO, 2000; CASTELO BRANCO, 2004), gerando um passivo ambiental de grandes proporções.

O aproveitamento das escórias, na agricultura, é pouco difundido no Brasil; no entanto, têm sido utilizadas em várias partes do mundo (PRADO, 2000; MOTZ; GEISELER, 2001; PRADO et al., 2002). Diante da possibilidade de reciclagem desses resíduos siderúrgicos na agricultura é importante considerar a grande disponibilidade de escórias, cuja ação neutralizante na acidez do solo assemelha-se à do calcário (RIBEIRO et al., 1986; ALCARDE, 1992; AMARAL et al., 1994; PRADO et al., 2002; SILVA, 2003; CORRÊA et al., 2003; ALCARDE; RODELLA, 2003); um ambiente agrícola propício, solos ácidos e de baixa fertilidade, em grande parte do território nacional (CAMARGO et al., 1987; KER, 1997; SILVA et al., 1999); e uma cultura sócio-economicamente importante, a cana-de-açúcar, tendo em vista a vasta área cultivada no País.

A cana-de-açúcar apresenta considerável potencial de resposta na produção a partir do uso da escória de siderurgia (KHALID et al., 1978; ELAWAD et al., 1982; ANDERSON et al., 1987; ANDERSON et al., 1991; ORLANDO FILHO et al., 1996; PRADO; FERNANDES, 2001; PRADO et al., 2002; PRADO et al., 2003). É necessário, entretanto, estudar as alterações nas propriedades do solo e a resposta das plantas para avaliar o potencial corretivo desses resíduos e a possível contaminação por metais pesados, que podem restringir sua utilização na agricultura (PAVAN; BINGHAN, 1982; MENGEL; KIRKBY, 1987; LÓPEZ et al., 1989; COSTA et al., 1991; AMARAL, 1994; AMARAL et al., 1996; ACCIOLY et al., 2000). Na Europa adota-se um rigoroso controle de qualidade da matéria-prima, bem como tratamentos subseqüentes da escória líquida, além de outros procedimentos para garantir uma qualidade mínima compatível com sua utilização final (MOTZ; GEISELER, 2001)

A dinâmica dos metais pesados no sistema solo-planta é influenciada, não só pelas características dos solos (POMBO; KLAMT, 1986; CAMARGO, 2001), mas também pelas espécies vegetais e até mesmo pelos cultivares dentro de uma mesma espécie (CABRERA et al., 1988; HERNÁNDEZ et al., 1991).

Em vista do exposto, o objetivo do presente trabalho foi avaliar a produção de plantas de cana-de-açúcar cultivadas em casa-de-vegetação e os riscos de contaminação por metais pesados, em função do uso de escórias de aciaria LD, da Cia Siderúrgica de Tubarão, como corretivo da acidez de solos.

Palavras-chave: escória de siderurgia, corretivo da acidez de solos, metais pesados, cana-de-açúcar, meio ambiente.

## **5.2. Material e métodos**

Foi realizado o cultivo de cana-de-açúcar, variedade RB855536, com doses crescentes de corretivos (calcário e escórias) misturados à camada superficial dos solos (coletados de 0-20 cm de profundidade). O cultivo foi realizado em vasos com 205 dm<sup>3</sup> de solo. Para tanto, foram utilizadas amostras de Latossolos Vermelho-amarelo e Amarelo coletadas nos municípios de Oratórios-MG e Linhares-ES, respectivamente, caracterizadas conforme descrito pela EMBRAPA (1997) (Quadro 5.1). Estas amostras de solos foram

Quadro 5.1. Composição físico-química, equivalente de umidade e classe textural dos Latossolos Vermelho-amarelos de Sete Lagoas-MG e João Pinheiro-MG

Característica <sup>‡</sup>	LVA (Oratórios-MG)	LA (Linhares-ES)
pH H <sub>2</sub> O	4,5	5,2
M.O. (dag kg <sup>-1</sup> )	4,13	1,31
P (mg dm <sup>-3</sup> )	2,9	8,3
K (mg dm <sup>-3</sup> )	61	113
Ca <sup>2+</sup> (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	0,92	1,18
Mg <sup>2+</sup> (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	0,02	0,14
Al <sup>3+</sup> (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	1,46	0,61
H + Al (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	6,60	4,20
SB (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	1,10	1,61
(t) (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	2,56	2,22
(T) (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	7,70	5,81
V (%)	14,24	27,70
m (%)	57,12	27,49
P-rem (mg L <sup>-1</sup> )	18,4	38,4
Zn (mg dm <sup>-3</sup> )	8,07	5,02
Fe (mg dm <sup>-3</sup> )	55,2	33,7
Mn (mg dm <sup>-3</sup> )	8,3	5,1
Cu (mg dm <sup>-3</sup> )	6,20	2,03
Areia Grossa (dag kg <sup>-1</sup> )	26	79
Areia Fina (dag kg <sup>-1</sup> )	10	8
Silte (dag kg <sup>-1</sup> )	10	1
Argila (dag kg <sup>-1</sup> )	54	12
Equivalente de umidade (kg kg <sup>-1</sup> )	0,292	0,057
Classe Textural	Argila	Areia-Franca

<sup>‡</sup> Média de três repetições;

pH em água relação 1:25; M.O.: Método Walkley & Black (M.O. = 1,724 x Carbono Orgânico); P, K, Fe, Zn, Mn e Cu: Extrator Mehlich 1; Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup> e Al<sup>3+</sup>: Extrator KCl 1mol L<sup>-1</sup>; H + Al: Extrator Acetato de Cálcio 0,5 mol L<sup>-1</sup> a pH = 7,0; SB: Soma de Bases; CTC (t): Capacidade de Troca Catiônica Efetiva; CTC (T): Capacidade de Troca Catiônica a pH = 7,0; V: Índice de Saturação de Bases; m: Índice de Saturação de Alumínio; e P-rem: Fósforo Remanescente.

aconditionadas nos vasos respeitando-se a seqüência de horizontes de cada perfil de solo identificada no campo. Na camada superficial destes solos (0 – 20 cm de profundidade) foram aplicadas doses de escórias e calcário para correção da acidez (CFSEMG, 1999) de forma similar ao procedimento utilizado em cultivos de campo.

O experimento foi montado, em casa-de-vegetação, no delineamento em blocos casualizados e esquema fatorial (2 x 3 x 4), em três repetições, perfazendo um total de 72 parcelas, sendo:

- ❖ 2 solos;
- ❖ 3 corretivos (duas amostras de escória na granulometria inferior a 1 mm e uma amostra de calcário) (Quadro 5.2); e

Quadro 5.2. Análises químicas, PN, ER e cálculo do PRNT de amostras compostas de escórias LD da CST e calcário utilizados neste ensaio

Característica	Escórias de aciaria LD <sup>§</sup>		Calcário <sup>§</sup>
	A	B	
CaO (dag kg <sup>-1</sup> ) <sup>1/</sup>	45,53 ± 0,79	42,70 ± 0,21	36,84 ± 0,55
MgO (dag kg <sup>-1</sup> ) <sup>1/</sup>	9,80 ± 0,03	8,21 ± 0,05	11,95 ± 0,05
SiO <sub>2</sub> (dag kg <sup>-1</sup> ) <sup>2/</sup>	12,66 ± 0,24	14,69 ± 0,64	---
MnO <sub>2</sub> (dag kg <sup>-1</sup> ) <sup>3/</sup>	5,27 ± 0,12	4,42 ± 0,08	---
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (dag kg <sup>-1</sup> ) <sup>3/</sup>	21,20 ± 0,02	20,19 ± 0,17	---
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> total (dag kg <sup>-1</sup> ) <sup>3/</sup>	1,78 ± 0,16	2,40 ± 0,21	---
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> solúvel em ác. cítrico (dag kg <sup>-1</sup> ) <sup>1/</sup>	n.d. <sup>‡</sup>	n.d.	---
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> Mehlich-1 (mg kg <sup>-1</sup> ) <sup>4/</sup>	52,13 ± 2,32	43,78 ± 1,73	---
Cr (mg kg <sup>-1</sup> ) <sup>3/</sup>	745,12 ± 4,34	574,18 ± 5,69	6,29 ± 0,25
Ni (mg kg <sup>-1</sup> ) <sup>3/</sup>	28,58 ± 0,70	26,14 ± 0,41	7,12 ± 0,12
Zn (mg kg <sup>-1</sup> ) <sup>3/</sup>	70,14 ± 0,83	54,16 ± 0,56	8,14 ± 0,21
Cu (mg kg <sup>-1</sup> ) <sup>3/</sup>	34,05 ± 0,69	30,14 ± 0,90	6,78 ± 0,14
Cd (mg kg <sup>-1</sup> ) <sup>3/</sup>	5,98 ± 0,07	4,98 ± 0,07	1,07 ± 0,21
Pb (mg kg <sup>-1</sup> ) <sup>3/</sup>	n.d.	n.d.	n.d.
PN (%) <sup>1/</sup>	90,48 ± 0,54	89,04 ± 0,71	83,08 ± 0,58
ER (%) <sup>1/</sup>	75,23 ± 0,37	80,61 ± 0,53	99,28 ± 0,28
PRNT (%) <sup>1/</sup>	68,07 ± 0,73	71,78 ± 0,11	82,50 ± 0,75

<sup>§</sup> Média de 3 repetições ± erro-padrão da média;

<sup>1/</sup> EMBRAPA (1999);

<sup>2/</sup> Digestão com água régia e ácido fluorídrico em cadinhos de Teflon<sup>®</sup> fechados (HOSSNER, 1996);

<sup>3/</sup> Digestão com os ácidos fluorídrico, sulfúrico e perclórico (HOSSNER, 1996);

<sup>4/</sup> Extraído por Mehlich-1 (DEFELIPO; RIBEIRO, 1996); e

<sup>‡</sup> Não detectado pela técnica analítica utilizada.

❖ 4 níveis de corretivo: 0,0; 0,5; 1,0 e 1,5 vezes a necessidade de calagem (CFSEMG, 1999).

As parcelas receberam seus respectivos tratamentos, além de adubação complementar com P, 300 mg dm<sup>-3</sup> (ALVAREZ V, 1974), e foram mantidas com umidade próxima à capacidade de campo por 15 dias. Após esse período foram plantadas 2 mudas de cana-de-açúcar por vaso. Após o plantio foram aplicados em cobertura: 100 mg dm<sup>-3</sup> de N; 150 mg dm<sup>-3</sup> de K; 50 mg dm<sup>-3</sup> de S; 0,81 mg dm<sup>-3</sup> de B; 1,33 mg dm<sup>-3</sup> de Cu; 1,56 mg dm<sup>-3</sup> de Fe; 3,66 mg dm<sup>-3</sup> de Mn; 0,15 mg dm<sup>-3</sup> de Mo; e 4,00 mg dm<sup>-3</sup> de Zn (ALVAREZ V., 1974), divididos em seis aplicações. Decorridos dezessete meses de cultivo as plantas foram colhidas, separou-se as folhas dos colmos e extraiu-se o caldo das canas para avaliar a produção, por meio do método da prensa hidráulica (FERNANDES, 2000). Também foram determinados os teores de Ca, Mg, Fe, Mn, Cr e Ni nos tecidos de folhas, colmos e caldo da cana após digestões nitro-

perclóricas em ICP-OES. Utilizaram-se, nas digestões, 0,2 g de amostras de matéria seca vegetal e 2 mL do caldo da cana, sobre os quais adicionaram-se 4 mL de solução nitro-perclória 3:1 (3 partes de ácido nítrico: 1 parte de ácido perclórico).

Os resultados obtidos foram analisados estatisticamente, por meio de análises de variância e regressões lineares, utilizando-se o software Sistema de Análises Estatísticas e Genéticas (SAEG).

### **5.3. Resultados e discussão**

#### **5.3.1. Produção e contaminação das folhas de cana-de-açúcar**

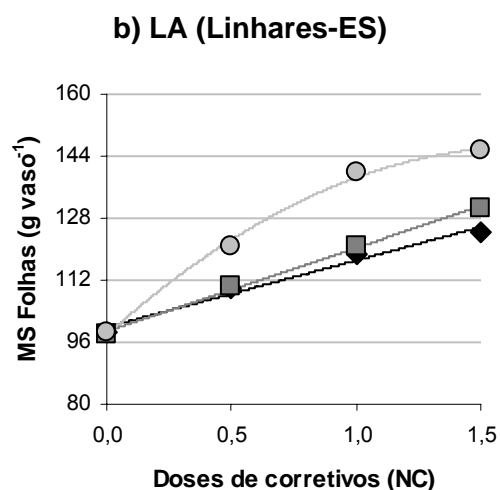
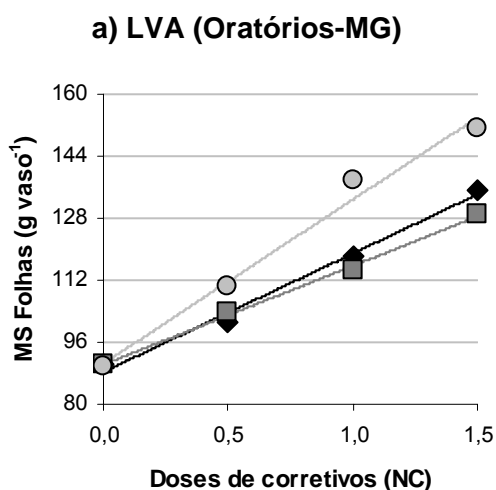
Verificaram-se diferenças significativas entre solos, corretivos e doses de corretivos aplicadas nos dois Latossolos para a produção de matéria seca de folhas (Quadro 5.3 e Figura 5.1). A produção de matéria seca nos dois solos indica uma melhor resposta das plantas para o calcário em relação às duas escórias LD (Figuras 5.1a e 5.1b). Tomando-se como base as estimativas de produção de matéria seca das folhas de cana-de-açúcar, em função da aplicação do calcário no LVA de Oratórios-MG, verificou-se que na dose recomendada pela CFSEMG (1999), de 1,0 NC, o calcário superou as escórias A e B em 10,49 e 12,88 %, respectivamente. Para o LA de Linhares-ES, na mesma dose, o calcário superou as escórias A e B em 15,41 e 13,07 %, respectivamente. A maioria das pesquisas realizadas com as escórias mostra que sua ação neutralizante na acidez do solo assemelha-se à do calcário (AMARAL et al., 1994; PIAU, 1995; PRADO, 2000; CORRÊA et al., 2003). Entretanto, alguns experimentos sugerem que as escórias apresentam reações mais lentas no solo quando comparadas ao calcário (FORTES, 1993; PRADO; FERNANDES, 2000). Em estudo comparativo entre uma escória de siderurgia e calcários como corretivos da acidez de solos, Prado et al. (2002) observaram que todos os corretivos aumentaram a produção de matéria seca das plantas de alface, com destaque para os calcários. Estes autores concluíram, ainda, que a escória de siderurgia avaliada não foi o corretivo mais apropriado para a cultura da alface. Prado et al. (2003), concluíram que tanto uma escória de siderurgia quanto um calcário calcítico promoveram efeito residual benéfico na correção da acidez dos solos após 48 meses de aplicação. No entanto, para a

Quadro 5.3. Análise de variância para matéria seca (MS), Ca, Mg, Fe, Mn e Ni nas folhas da cana-de-açúcar cultivada nos LVA de Oratórios-MG e LA de Linhares-ES, tratados com as escórias A e B e o calcário

FV	GL	QM					
		MS Folhas	Ca Folhas	Mg Folhas	Fe Folhas	Mn Folhas	Ni Folhas
Blocos (B)	2	37,02120 <sup>n.s.</sup>	0,01833 <sup>n.s.</sup>	0,00093 <sup>n.s.</sup>	54,88789 <sup>n.s.</sup>	220,73550 <sup>n.s.</sup>	0,00105 <sup>n.s.</sup>
Solos (S)	1	247,51630**	0,97921**	0,01489**	110.353,10000**	12,14439 <sup>n.s.</sup>	82,41977**
Corretivos (C)	2	1.174,82700**	0,08584**	0,13356**	22,53422 <sup>n.s.</sup>	507,06330 <sup>n.s.</sup>	0,00690*
Doses (D)	3	5.995,06600**	1,87738**	0,51208**	273,85960 <sup>n.s.</sup>	261,54240 <sup>n.s.</sup>	0,00739*
D x C	6	182,85790**	0,01447 <sup>n.s.</sup>	0,02615**	110,84460 <sup>n.s.</sup>	111,16000 <sup>n.s.</sup>	0,00258 <sup>n.s.</sup>
D x S	3	186,25810**	0,01755 <sup>n.s.</sup>	0,01083**	124,70200 <sup>n.s.</sup>	15,26590 <sup>n.s.</sup>	0,00739*
C x S	2	24,98475 <sup>n.s.</sup>	0,04463 <sup>n.s.</sup>	0,01447**	0,39666 <sup>n.s.</sup>	323,88760 <sup>n.s.</sup>	0,00690*
D x C x S	6	18,78917 <sup>n.s.</sup>	0,02658 <sup>n.s.</sup>	0,00423**	130,76880 <sup>n.s.</sup>	210,59000 <sup>n.s.</sup>	0,00258 <sup>n.s.</sup>
S/C = Esc. A x D = 0,0 NC	1	103,73380*	0,03872 <sup>n.s.</sup>	0,00234 <sup>n.s.</sup>	9.054,46600**	5,64145 <sup>n.s.</sup>	6,90117**
S/C = Esc. A x D = 0,5 NC	1	114,42420*	0,14196**	0,00214 <sup>n.s.</sup>	8.139,14400**	97,32593 <sup>n.s.</sup>	6,75290**
S/C = Esc. A x D = 1,0 NC	1	0,14230 <sup>n.s.</sup>	0,20400**	0,02112**	8.121,15800**	67,10925 <sup>n.s.</sup>	7,26915**
S/C = Esc. A x D = 1,5 NC	1	185,39280**	0,23562**	0,03497**	11.989,58000**	241,03910 <sup>n.s.</sup>	6,22594**
S/C = Esc. B x D = 0,0 NC	1	98,67438*	0,03845 <sup>n.s.</sup>	0,00228 <sup>n.s.</sup>	8.792,79000**	1,85703 <sup>n.s.</sup>	6,97771**
S/C = Esc. B x D = 0,5 NC	1	67,83169 <sup>n.s.</sup>	0,15846**	0,00072 <sup>n.s.</sup>	8.577,76700**	22,09326 <sup>n.s.</sup>	7,04239**
S/C = Esc. B x D = 1,0 NC	1	50,21671 <sup>n.s.</sup>	0,00605 <sup>n.s.</sup>	0,02074**	11.375,20000**	362,59520 <sup>n.s.</sup>	7,69472**
S/C = Esc. B x D = 1,5 NC	1	5,20423 <sup>n.s.</sup>	0,31830**	0,00984**	8.011,46800**	376,96530 <sup>n.s.</sup>	6,77443**
S/C = Cal. A x D = 0,0 NC	1	110,61350*	0,03894 <sup>n.s.</sup>	0,00226 <sup>n.s.</sup>	8.589,91300**	2,97952 <sup>n.s.</sup>	6,79269**
S/C = Cal. A x D = 0,5 NC	1	170,30420**	0,05091 <sup>n.s.</sup>	0,00030 <sup>n.s.</sup>	8.670,67800**	70,98285 <sup>n.s.</sup>	6,69269**
S/C = Cal. A x D = 1,0 NC	1	9,27031 <sup>n.s.</sup>	0,04758 <sup>n.s.</sup>	0,00214 <sup>n.s.</sup>	6.394,99200**	680,29850 <sup>n.s.</sup>	6,64968**
S/C = Cal. A x D = 1,5 NC	1	53,18707 <sup>n.s.</sup>	0,00161 <sup>n.s.</sup>	0,00285 <sup>n.s.</sup>	13.795,49000**	40,36981 <sup>n.s.</sup>	6,69778**
C/S = 1 e D = 0,0 NC	2	0,10664 <sup>n.s.</sup>	2,5E-07 <sup>n.s.</sup>	4,5E-06 <sup>n.s.</sup>	19,01257 <sup>n.s.</sup>	0,64688 <sup>n.s.</sup>	0,00063 <sup>n.s.</sup>
C/S = 1 e D = 0,5 NC	2	67,35833 <sup>n.s.</sup>	0,01408 <sup>n.s.</sup>	0,00716**	109,73360 <sup>n.s.</sup>	222,97900 <sup>n.s.</sup>	0,00254 <sup>n.s.</sup>
C/S = 1 e D = 1,0 NC	2	448,25620**	0,04679 <sup>n.s.</sup>	0,07433**	299,87840 <sup>n.s.</sup>	62,84717 <sup>n.s.</sup>	0,01932**
C/S = 1 e D = 1,5 NC	2	401,16500**	0,01070 <sup>n.s.</sup>	0,11248**	206,83170 <sup>n.s.</sup>	1,01846 <sup>n.s.</sup>	0,00680*
C/S = 2 e D = 0,0 NC	2	0,06437 <sup>n.s.</sup>	2,4E-07 <sup>n.s.</sup>	6,6E-06 <sup>n.s.</sup>	0,07388 <sup>n.s.</sup>	0,48209 <sup>n.s.</sup>	—
C/S = 2 e D = 0,5 NC	2	117,73730**	0,05152**	0,00452**	82,66786 <sup>n.s.</sup>	144,74080 <sup>n.s.</sup>	—
C/S = 2 e D = 1,0 NC	2	418,17230**	0,04275 <sup>n.s.</sup>	0,01362**	4,54141 <sup>n.s.</sup>	778,92080*	—
C/S = 2 e D = 1,5 NC	2	351,89270**	0,08777**	0,02699**	41,12405 <sup>n.s.</sup>	584,56570 <sup>n.s.</sup>	—
Resíduo	46	16,97675	0,01509	0,00083	101,38660	230,77660	0,00164
CV (%)		3,5479	10,4140	7,1461	5,6724	11,3380	3,7885

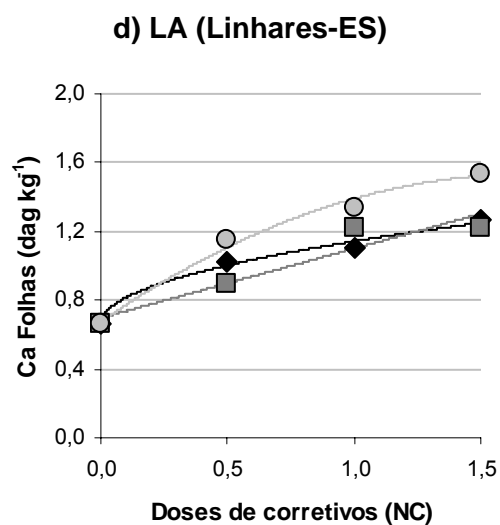
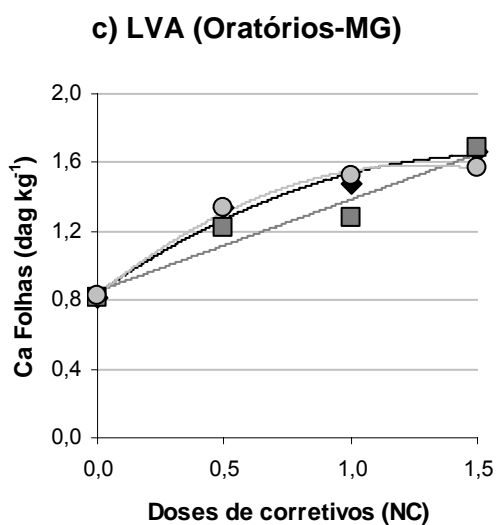
Esc A = escória A; Esc. B = escória B; Cal. A = calcário A; S1 = Latossolo Vermelho-amarelo de Oratórios-MG; S2 = Latossolo Amarelo de Linhares-ES; e NC = necessidade de calagem (CFSEMG, 1999).

<sup>n.s.</sup> coeficientes não-significativos; \*\* e \* coeficientes significativos a 1 e 5 %, respectivamente.



◆  $\hat{Y} = 88,3417 + 30,5521^{***}X$   $R^2 = 0,9900$   
 ■  $\hat{Y} = 90,2257 + 25,4907^{***}X$   $R^2 = 0,9984$   
 ○  $\hat{Y} = 90,4765 + 42,3529^{***}X$   $R^2 = 0,9859$

◆  $\hat{Y} = 99,9108 + 17,2069^{***}X$   $R^2 = 0,9782$   
 ■  $\hat{Y} = 98,7991 + 21,5541^{***}X$   $R^2 = 0,9983$   
 ○  $\hat{Y} = 97,9176 + 57,6238^{***}X - 17,0867^{***}X^2$   $R^2 = 0,9958$



◆  $\hat{Y} = 0,8412 + 1,0200^{***}X - 0,3236^{**}X^2$   $R^2 = 0,9760$   
 ■  $\hat{Y} = 0,8529 + 0,5322^{***}X$   $R^2 = 0,9401$   
 ○  $\hat{Y} = 0,8306 + 1,1906^{***}X - 0,4686^{**}X^2$   $R^2 = 0,9935$

◆  $\hat{Y} = 0,6618 - 0,0054^{***}X + 0,4869^{**}\sqrt{X}$   $R^2 = 0,9633$   
 ■  $\hat{Y} = 0,6966 + 0,4041^{***}X$   $R^2 = 0,9028$   
 ○  $\hat{Y} = 0,6750 + 1,0161^{***}X - 0,3001^{**}X^2$   $R^2 = 0,9877$

◆ Escória A

■ Escória B

○ Calcário

\*\*\* coeficientes significativos a 0,1 % de probabilidade.

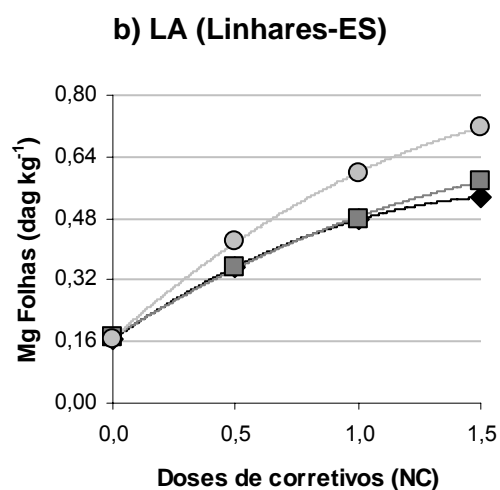
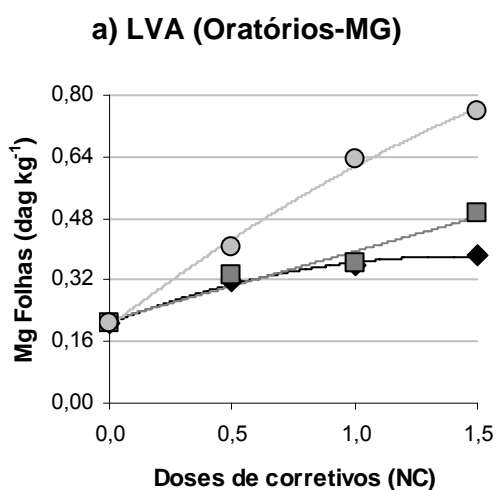
Figura 5.1. Produção de matéria seca (MS) e teores de Ca nas folhas de cana-de-açúcar cultivada nos Latossolos Vermelho-amarelo (LVA) de Oratórios-MG e Amarelo (LA) de Linhares-ES, em resposta às doses dos corretivos.

dose de calcário equivalente a  $3,8 \text{ t ha}^{-1}$  de  $\text{CaCO}_3$ , verificou-se efeito depressivo no perfilhamento, no número de colmos industrializáveis e na produção da cana-de-açúcar, fato não observado com o uso da escória de siderurgia. Segundo Kato e Owa (1996) e Prado et al. (2003), é possível que o maior efeito residual da escória, seja devido ao equilíbrio químico dos silicatos no solo. Com a solubilização da escória, obtém-se um incremento inicial do valor de pH e da concentração de Ca. Esse aumento pressupõe decréscimo na dissolução da escória, uma vez que a solubilidade desse material em solução aquosa diminui com o aumento do pH e da concentração de Ca da solução. Este efeito é menos pronunciado nos carbonatos, possivelmente pela perda parcial dos produtos da reação como  $\text{CO}_2$ , que escapa para a atmosfera.

O efeito residual das escórias não pode ser observado no presente trabalho, obviamente por se tratar de um único ciclo de cultivo da cana-de-açúcar.

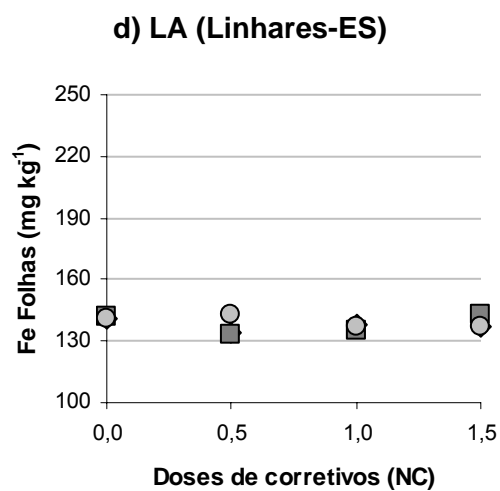
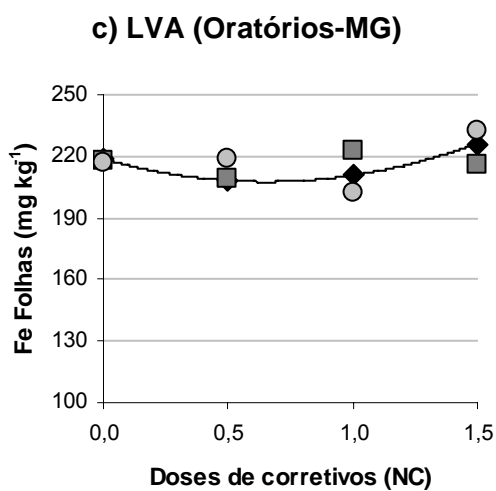
Verificaram-se diferenças significativas nos teores de Ca e Mg nas folhas de cana-de-açúcar entre solos e corretivos, além do aumento dos teores desses nutrientes com o incremento nas doses dos corretivos (Quadro 5.3 e Figura 5.1). Os valores de referência para a interpretação dos resultados de análises de tecidos estão entre  $0,94$  e  $1,15 \text{ dag kg}^{-1}$ , como valor adequado para o Ca e entre  $0,22$  e  $0,45 \text{ dag kg}^{-1}$  para o Mg. Vale ressaltar, que estes valores referem-se a amostragens realizadas entre o quarto e quinto mês de idade da cultura, em que se coleta os 20 cm centrais da folha +3, sem a nervura, sendo a folha +1 a primeira com bainha visível (CFSEMG, 1999). No presente trabalho, coletaram-se todas as folhas, ao final do ciclo da cultura, e o menor teor de Ca estimado, na dose de 1,0 NC, foi de  $1,10 \text{ dag kg}^{-1}$ , para a escória B no LA de Linhares-ES (Figura 5.1).

Os teores de Mg estimados nas folhas de cana-de-açúcar para a dose 1,0 NC no LVA de Oratórios foram de  $0,37 \text{ dag kg}^{-1}$ , para a escória A e  $0,39 \text{ dag kg}^{-1}$ , para a escória B. Para esse mesmo solo, o teor de Mg nas folhas, quando se utilizou o calcário, na mesma dose, foi de  $0,61 \text{ dag kg}^{-1}$ ; portanto, um teor de Mg muito superior àquele oferecido pelas escórias LD (Figura 5.2). Na cana-de-açúcar cultivada no LA de Linhares o teor de Mg estimado nas folhas foi de aproximadamente  $0,48 \text{ dag kg}^{-1}$ , para ambas as escórias, e de aproximadamente  $0,60 \text{ dag kg}^{-1}$  para o calcário (Figura 5.2). De maneira geral, a resposta positiva das plantas a aplicação de corretivos está relacionada com



◆  $\hat{Y} = 0,2078 + 0,2445^{***}X - 0,0863^{*}X^2$   $R^2 = 0,9943$   
 ■  $\hat{Y} = 0,2155 + 0,1787^{***}X$   $R^2 = 0,9535$   
 ○  $\hat{Y} = 0,2001 + 0,4887^{***}X - 0,0743^{*}X^2$   $R^2 = 0,9956$

◆  $\hat{Y} = 0,1658 + 0,4409^{***}X - 0,1296^{***}X^2$   $R^2 = 0,9999$   
 ■  $\hat{Y} = 0,1704 + 0,4028^{***}X - 0,0887^{*}X^2$   $R^2 = 0,9995$   
 ○  $\hat{Y} = 0,1689 + 0,5636^{***}X - 0,1330^{***}X^2$   $R^2 = 0,9998$



◆  $\hat{Y} = \bar{Y} = 218,6330 - 33,8687^{*}X + 25,9741^{*}X^2$   $R^2 = 0,9966$   
 ■  $\hat{Y} = \bar{Y} = 216,3352$   
 ○  $\hat{Y} = \bar{Y} = 217,6802$

◆  $\hat{Y} = \bar{Y} = 137,3742$   
 ■  $\hat{Y} = \bar{Y} = 138,2480$   
 ○  $\hat{Y} = \bar{Y} = 139,4555$

◆ Escória A

■ Escória B

○ Calcário

°, \*, e \*\*\* coeficientes significativos a 10; 5; e 0,1 % de probabilidade, respectivamente.

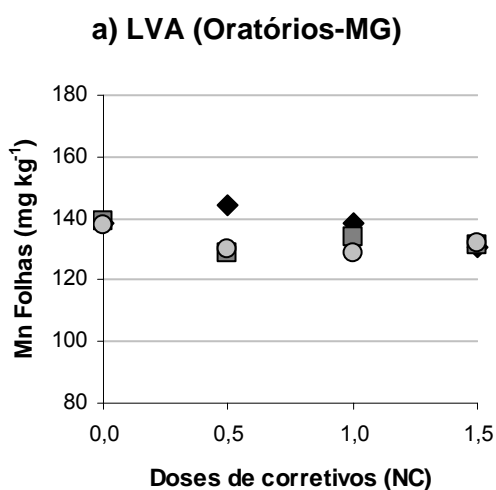
Figura 5.2. Teores de Mg e Fe nas folhas de cana-de-açúcar cultivada nos Latossolos Vermelho-amarelo (LVA) de Oratórios-MG e Amarelo (LA) de Linhares-ES, em resposta às doses dos corretivos.

a neutralização da acidez dos solos e o fornecimento de nutrientes como o Ca e Mg (MALAVOLTA et al., 1989, ORLANDO FILHO et al., 1990), o Ca favorece o crescimento radicular, participa da estrutura e funcionamento de membranas, participa das reações hormonais e da ativação enzimática (via calmodulina). Tanto o Ca quanto o Mg favorecem a absorção e acúmulo de outros nutrientes e o Mg atua na fotossíntese, respiração, armazenameto e transferência de energia, síntese orgânicas, balanço eletrolítico e estabilidade dos ribossomos (MALAVOLTA et al., 1989).

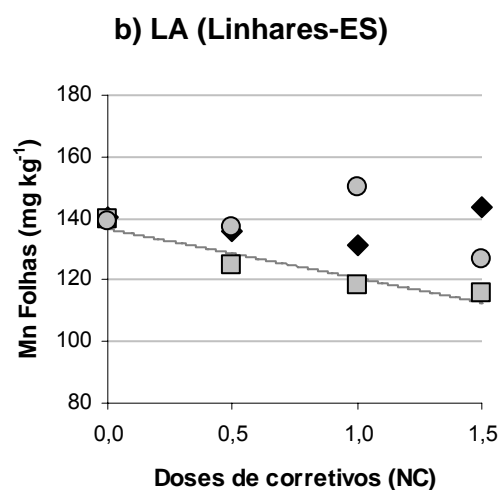
Diferenças significativas para Fe nas folhas de cana-de-açúcar foram observadas para solos, no entanto, não foram observadas para os diferentes corretivos ou doses utilizadas (Quadro 5.3). Os valores de referência (suficiência), para a interpretação dos resultados de análises de tecidos para Fe, em cana-de-açúcar, variam entre 100 e 500 mg kg<sup>-1</sup>, segundo a CFSEMG (1999). Os teores observados para esse elemento na cana-de-açúcar cultivada nos dois Latossolos se encontram dentro dessa faixa (Figura 5.2). Vale novamente lembrar, que a época de coleta e a forma das amostragens utilizadas neste ensaio foram diferentes daquelas preconizadas pela CFSEMG (1999). Não foram verificados sintomas de fitotoxidez ou deficiência de Fe durante o ciclo da cultura.

Não se verificaram diferenças significativas entre solos, corretivos ou doses utilizadas, para o Mn nas folhas de cana-de-açúcar. Os valores de referência (suficiência), para a interpretação dos resultados de análises de tecidos da para Mn em cana-de-açúcar variam entre 50 e 250 mg kg<sup>-1</sup> (CFSEMG, 1999). Os teores observados para esse elemento na cana-de-açúcar cultivada nos dois Latossolos se encontram dentro dessa faixa (Figura 5.3). Sintomas de fitotoxidez ou deficiência desse elemento, também não foram verificados ao longo do ciclo da cultura.

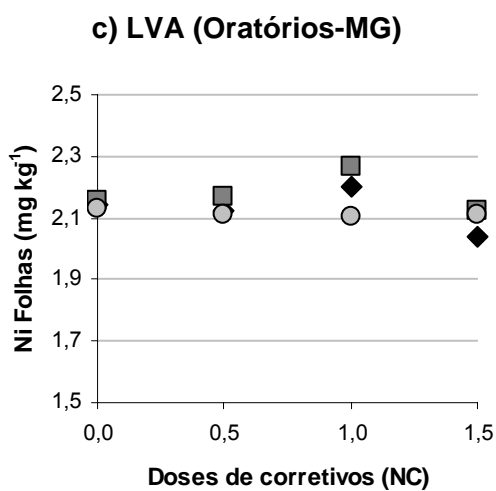
Verificaram-se diferenças significativas nos teores de Ni nas folhas de cana-de-açúcar em função dos solos, corretivos e doses utilizadas (Quadro 5.3). Vale ressaltar, que não foi detectada a presença de Ni nas folhas de canas cultivadas no LA de Linhares-ES. As diferenças entre corretivos são pequenas, mas significativas para as doses de 1,0 e 1,5 NC no LVA de Oratórios. Estas pequenas diferenças, no entanto, não permitiram o ajuste de regressão para os corretivos. Para as escórias não houve efeito das doses sobre a concentração de Ni nas folhas.



◆  $\hat{Y} = \bar{Y} = 137,8056$   
 ■  $\hat{Y} = \bar{Y} = 133,1391$   
 ○  $\hat{Y} = \bar{Y} = 132,2501$



◆  $\hat{Y} = \bar{Y} = 137,7736$   
 ■  $\hat{Y} = 136,5610 - 15,9277 \cdot X$   $R^2 = 0,8831$   
 ○  $\hat{Y} = \bar{Y} = 138,3493$



◆  $\hat{Y} = \bar{Y} = 2,1264$   
 ■  $\hat{Y} = \bar{Y} = 2,1784$   
 ○  $\hat{Y} = \bar{Y} = 2,1147$

◆ Escória A

■ Escória B

○ Calcário

\*\*\* coeficientes significativos a 0,1 % de probabilidade.

Figura 5.3. Teores de Mn e Ni nas folhas de cana-de-açúcar cultivada nos Latossolos Vermelho-amarelo (LVA) de Oratórios-MG e Amarelo (LA) de Linhares-ES, em resposta às doses dos corretivos.

O Ni ocorre normalmente nas plantas na faixa de 0,1 a 1,0 mg kg<sup>-1</sup> de matéria seca (ANDERSON, 1973; MARSCHNER, 1995). Níveis críticos de toxidez para plantas sensíveis ocorrem a partir de 10,0 mg kg<sup>-1</sup> de matéria seca e para plantas tolerantes a partir de 50,0 mg kg<sup>-1</sup> (WELCH, 1981; BOLLARD, 1983; WOOLHOUSE, 1983). Baixas concentrações de Ni no substrato estimulam a germinação e o crescimento de várias espécies cultivadas (MISHRA; KAR, 1974), porém não há consenso a respeito do papel desempenhado pelo Ni nas plantas superiores (MARSCHNER, 1995). Os teores de Ni observados no LVA de Oratórios-MG podem ser considerados normais e estão muito abaixo dos níveis que normalmente provocam fitotoxidez (Figura 5.3).

Não foram detectados Cd e Cr na matéria seca das folhas de cana-de-açúcar, a despeito da presença destes metais pesados nas amostras de escória LD da CST (Quadro 5.2).

### **5.3.2. Produção e contaminação dos colmos de cana-de-açúcar**

Verificaram-se diferenças significativas na produção de matéria seca de colmos da cana-de-açúcar entre solos, corretivos e doses utilizadas neste ensaio (Quadro 5.4). Embora o calcário tenha se destacado na produção de matéria seca de colmos no LVA de Oratórios-MG, em relação às escórias de aciaria LD (Figura 5.4a), as diferenças entre corretivos não foram significativas (Quadro 5.4). Na dose de 1,0 NC a produção estimada de matéria seca de colmos em função da aplicação do calcário, no LVA de Oratórios-MG, superou as escórias A e B em cerca de 7,53 e 7,92 %, respectivamente. Para o LA de Linhares-ES, na mesma dose, a produção estimada de matéria seca de colmos em função da aplicação do calcário superou as escórias A e B em cerca de 6,02 e 5,54 % respectivamente (Figura 5.4b). Não obstante, as diferenças entre corretivos foram significativas apenas no LA de Linhares-ES, na dose de 1,5 NC (Quadro 5.4).

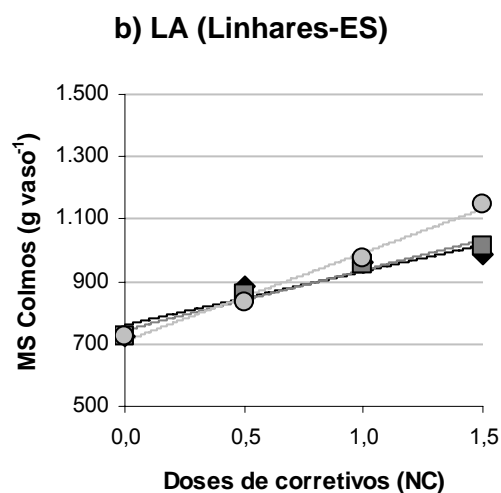
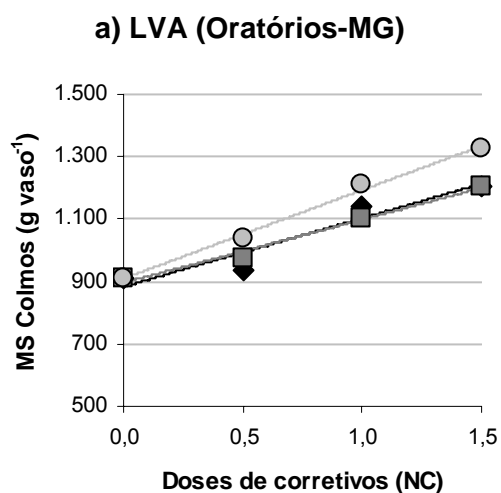
Para os teores de Ca nos colmos, não se verificaram diferenças significativas em função dos solos, corretivos ou doses utilizadas (Quadro 5.4 e Figuras 5.4c e 5.4d).

Quadro 5.4. Análise de variância para matéria seca (MS), Ca, Mg, Fe, Mn e Ni nos colmos da cana-de-açúcar cultivada nos LVA de Oratórios-MG e LA de Linhares-ES, tratados com as escórias A e B e o calcário, após extração dos caldos

FV	GL	QM					
		MS Colmos	Ca Colmos	Mg Colmos	Fe Colmos	Mn Colmos	Ni Colmos
Blocos (B)	2	13.851,69000 <sup>n.s.</sup>	1,45E-03 <sup>n.s.</sup>	3,22E-05 <sup>n.s.</sup>	93,44888 <sup>n.s.</sup>	50,45152 *	0,03565 <sup>n.s.</sup>
Solos (S)	1	538.469,60000 **	6,90E-03 <sup>n.s.</sup>	5,40E-05 <sup>n.s.</sup>	506,43090 **	12,20576 <sup>n.s.</sup>	135,97630 **
Corretivos (C)	2	22.600,60000 *	1,27E-03 <sup>n.s.</sup>	2,36E-04 <sup>n.s.</sup>	1,65640 <sup>n.s.</sup>	14,85612 <sup>n.s.</sup>	0,01681 <sup>n.s.</sup>
Doses (D)	3	383.302,30000 **	2,10E-03 <sup>n.s.</sup>	1,22E-03 **	108,18770 <sup>n.s.</sup>	200,80940 **	0,12350 **
D x C	6	7.278,54900 <sup>n.s.</sup>	2,71E-04 <sup>n.s.</sup>	3,50E-05 <sup>n.s.</sup>	5,99131 <sup>n.s.</sup>	4,24306 <sup>n.s.</sup>	0,00581 <sup>n.s.</sup>
D x S	3	4.966,22100 <sup>n.s.</sup>	3,02E-03 <sup>n.s.</sup>	6,63E-04 <sup>n.s.</sup>	2,78446 <sup>n.s.</sup>	14,34207 <sup>n.s.</sup>	0,12350 **
C x S	2	3.475,46100 <sup>n.s.</sup>	3,57E-05 <sup>n.s.</sup>	4,89E-04 <sup>n.s.</sup>	43,58343 <sup>n.s.</sup>	2,61568 <sup>n.s.</sup>	0,01681 <sup>n.s.</sup>
D x C x S	6	3.124,96000 <sup>n.s.</sup>	1,10E-03 <sup>n.s.</sup>	4,39E-04 <sup>n.s.</sup>	8,89545 <sup>n.s.</sup>	3,13709 <sup>n.s.</sup>	0,00581 <sup>n.s.</sup>
S/C = Esc. A x D = 0,0 NC	1	50.917,30000 **	3,21E-03 <sup>n.s.</sup>	9,53E-05 <sup>n.s.</sup>	23,40878 <sup>n.s.</sup>	0,27751 <sup>n.s.</sup>	13,43077 **
S/C = Esc. A x D = 0,5 NC	1	4.037,60900 <sup>n.s.</sup>	8,27E-04 <sup>n.s.</sup>	7,41E-05 <sup>n.s.</sup>	35,08136 <sup>n.s.</sup>	5,48266 <sup>n.s.</sup>	11,47492 **
S/C = Esc. A x D = 1,0 NC	1	47.228,53000 *	2,14E-05 <sup>n.s.</sup>	4,36E-05 <sup>n.s.</sup>	3,80838 <sup>n.s.</sup>	24,25993 <sup>n.s.</sup>	10,81132 **
S/C = Esc. A x D = 1,5 NC	1	74.201,96000 **	5,39E-04 <sup>n.s.</sup>	3,15E-04 <sup>n.s.</sup>	0,01593 <sup>n.s.</sup>	6,59462 <sup>n.s.</sup>	11,72072 **
S/C = Esc. B x D = 0,0 NC	1	51.028,40000 **	2,91E-03 <sup>n.s.</sup>	1,02E-04 <sup>n.s.</sup>	34,54774 <sup>n.s.</sup>	8,27020 <sup>n.s.</sup>	13,57371 **
S/C = Esc. B x D = 0,5 NC	1	19.498,19000 <sup>n.s.</sup>	5,44E-04 <sup>n.s.</sup>	1,75E-03 *	32,24358 <sup>n.s.</sup>	9,46565 <sup>n.s.</sup>	10,87368 **
S/C = Esc. B x D = 1,0 NC	1	33.532,64000 *	5,54E-04 <sup>n.s.</sup>	2,32E-04 <sup>n.s.</sup>	68,44524 <sup>n.s.</sup>	0,17520 <sup>n.s.</sup>	10,06531 **
S/C = Esc. B x D = 1,5 NC	1	53.334,61000 **	2,25E-03 <sup>n.s.</sup>	2,42E-05 <sup>n.s.</sup>	36,51530 <sup>n.s.</sup>	0,01768 <sup>n.s.</sup>	10,07435 **
S/C = Cal. A x D = 0,0 NC	1	51.025,67000 **	2,98E-03 <sup>n.s.</sup>	2,13E-05 <sup>n.s.</sup>	35,11154 <sup>n.s.</sup>	0,53768 <sup>n.s.</sup>	13,38923 **
S/C = Cal. A x D = 0,5 NC	1	62.992,52000 **	4,23E-03 <sup>n.s.</sup>	1,35E-04 <sup>n.s.</sup>	62,19551 <sup>n.s.</sup>	4,76597 <sup>n.s.</sup>	10,04039 **
S/C = Cal. A x D = 1,0 NC	1	85.094,70000 **	3,32E-03 <sup>n.s.</sup>	2,60E-03 **	174,97670 *	2,47933 <sup>n.s.</sup>	10,65991 **
S/C = Cal. A x D = 1,5 NC	1	46.177,43000 *	1,23E-03 <sup>n.s.</sup>	2,64E-04 <sup>n.s.</sup>	148,97380 <sup>n.s.</sup>	16,95951 <sup>n.s.</sup>	10,30091 **
C/S = 1 e D = 0,0 NC	2	0,01062 <sup>n.s.</sup>	1,61E-06 <sup>n.s.</sup>	7,67E-07 <sup>n.s.</sup>	1,08289 <sup>n.s.</sup>	0,17914 <sup>n.s.</sup>	0,00035 <sup>n.s.</sup>
C/S = 1 e D = 0,5 NC	2	8.510,50000 <sup>n.s.</sup>	2,48E-03 <sup>n.s.</sup>	2,56E-04 <sup>n.s.</sup>	5,36717 <sup>n.s.</sup>	1,38361 <sup>n.s.</sup>	0,02419 <sup>n.s.</sup>
C/S = 1 e D = 1,0 NC	2	9.130,59800 <sup>n.s.</sup>	9,50E-04 <sup>n.s.</sup>	6,93E-04 <sup>n.s.</sup>	22,30312 <sup>n.s.</sup>	4,14750 <sup>n.s.</sup>	0,00747 <sup>n.s.</sup>
C/S = 1 e D = 1,5 NC	2	14.401,31000 <sup>n.s.</sup>	1,07E-04 <sup>n.s.</sup>	1,10E-04 <sup>n.s.</sup>	36,57126 <sup>n.s.</sup>	6,98578 <sup>n.s.</sup>	0,03645 <sup>n.s.</sup>
C/S = 2 e D = 0,0 NC	2	0,00977 <sup>n.s.</sup>	5,86E-07 <sup>n.s.</sup>	1,22E-05 <sup>n.s.</sup>	3,62705 <sup>n.s.</sup>	2,28559 <sup>n.s.</sup>	—
C/S = 2 e D = 0,5 NC	2	1.714,63700 <sup>n.s.</sup>	6,12E-04 <sup>n.s.</sup>	7,33E-04 <sup>n.s.</sup>	0,58905 <sup>n.s.</sup>	2,84863 <sup>n.s.</sup>	—
C/S = 2 e D = 1,0 NC	2	299,23050 <sup>n.s.</sup>	5,94E-04 <sup>n.s.</sup>	3,41E-04 <sup>n.s.</sup>	12,55031 <sup>n.s.</sup>	15,03628 <sup>n.s.</sup>	—
C/S = 2 e D = 1,5 NC	2	23.230,29000 *	6,66E-04 <sup>n.s.</sup>	3,77E-07 <sup>n.s.</sup>	7,80917 <sup>n.s.</sup>	6,74575 <sup>n.s.</sup>	—
Resíduo	46	6.929,57600	1,40E-03	2,62E-04	40,52308	11,21315	0,0193
CV (%)		8,4390	8,2860	3,22E-05	7,3045	10,1700	10,1140

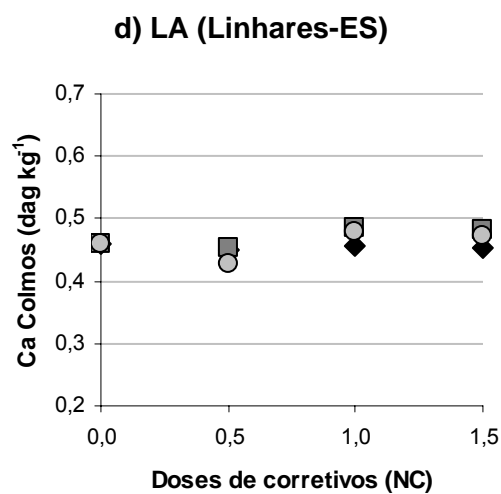
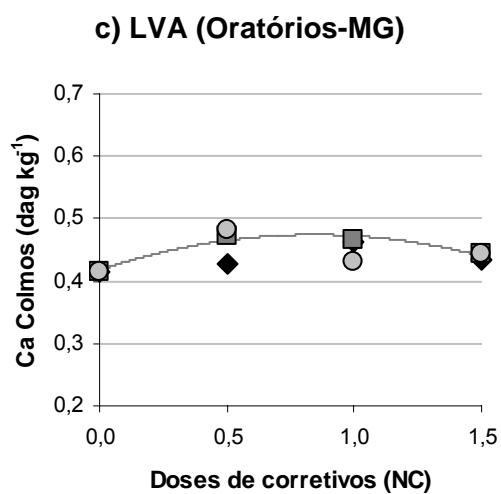
Esc A = escória A; Esc. B = escória B; Cal. A = calcário A; S1 = Latossolo Vermelho-amarelo de Oratórios-MG; S2 = Latossolo Amarelo de Linhares-ES; e NC = necessidade de calagem (CFSEMG, 1999).

<sup>n.s.</sup> coeficientes não-significativos; \*\* e \* coeficientes significativos a 1 e 5 %, respectivamente.



◆  $\hat{Y} = 883,951 + 219,378^{***}X$   $R^2 = 0,9136$   
 ■  $\hat{Y} = 896,117 + 202,501^{***}X$   $R^2 = 0,9836$   
 ○  $\hat{Y} = 909,501 + 283,639^{***}X$   $R^2 = 0,9941$

◆  $\hat{Y} = 760,967 + 171,362^{***}X$   $R^2 = 0,8878$   
 ■  $\hat{Y} = 744,164 + 192,927^{***}X$   $R^2 = 0,9732$   
 ○  $\hat{Y} = 709,698 + 282,377^{***}X$   $R^2 = 0,9889$



◆  $\hat{Y} = \bar{Y} = 0,4342$   
 ■  $\hat{Y} = 0,4181 + 0,1337^{\circ}X - 0,0793^{\circ}X^2$   $R^2 = 0,9297$   
 ○  $\hat{Y} = \bar{Y} = 0,4433$

◆  $\hat{Y} = \bar{Y} = 0,4559$   
 ■  $\hat{Y} = \bar{Y} = 0,4697$   
 ○  $\hat{Y} = \bar{Y} = 0,4601$

◆ Escória A

■ Escória B

○ Calcário

°; e \*\*\* coeficientes significativos a 10; e 0,1 % de probabilidade, respectivamente.

Figura 5.4. Produção de matéria seca (MS) e teores de Ca nos colmos de cana-de-açúcar cultivada nos Latossolos Vermelho-amarelo (LVA) de Oratórios-MG e Amarelo (LA) de Linhares-ES, em resposta às doses dos corretivos.

Para os teores de Mg nos colmos as diferenças significativas ocorreram apenas em função das doses de corretivos utilizadas (Quadro 5.4 e Figuras 5.5a e 5.5b).

Para os teores de Fe na matéria seca dos colmos da cana-de-açúcar as diferenças significativas ocorreram apenas em função dos solos utilizados (Quadros 5.1 e 5.4 e Figuras 5.5c e 5.5d).

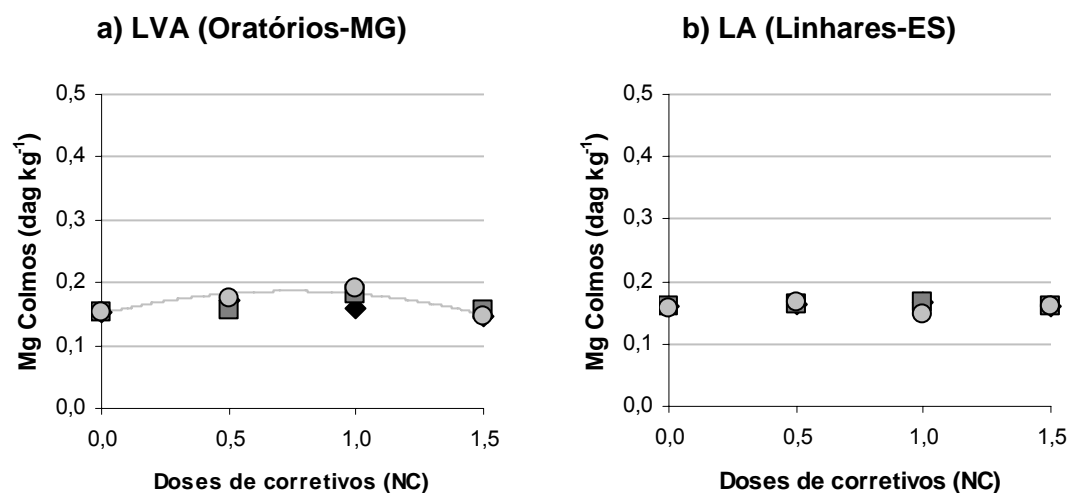
Verificaram-se diferenças significativas para os teores de Mn nos colmos em função das doses utilizadas de corretivos (Quadro 5.4 e Figuras 5.6a e 5.6b).

Não foi detectada a presença de Ni na matéria seca dos colmos da cana cultivada no LA de Linhares-ES. Os teores desse elemento, nos colmos das plantas cultivadas no LVA de Oratórios (Figura 5.6c), encontraram-se dentro da faixa normal para plantas cultivadas, segundo Welch (1981), Bollard (1983) e Woolhouse (1983).

Não foi detectada a presença de Cd e Cr na matéria seca dos colmos de cana-de-açúcar, apesar da presença destes elementos nas amostra de escória LD da CST (Quadro 5.2).

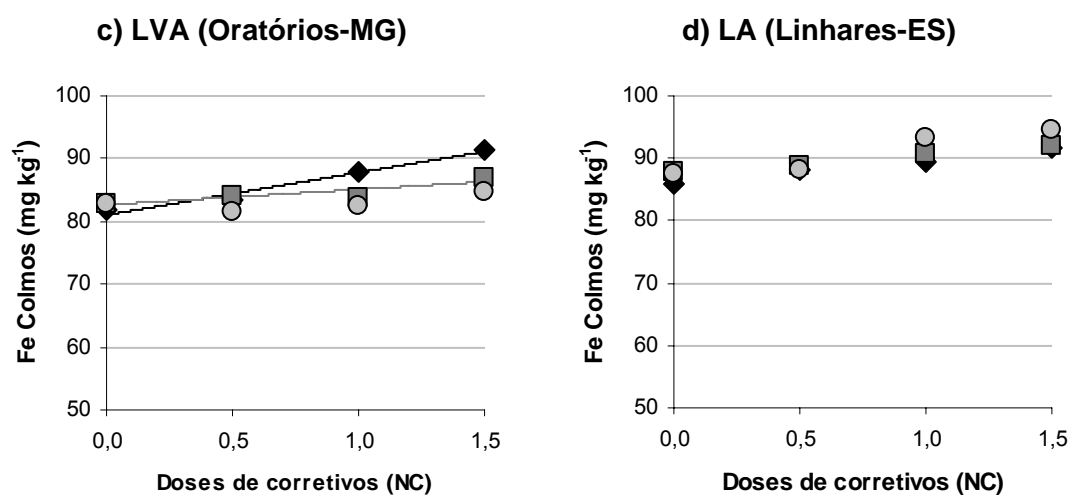
### **5.3.3. Produção e contaminação dos caldos de cana-de-açúcar**

Foram observadas diferenças significativas para a produção dos caldos de cana em função dos solos, corretivos e doses utilizadas neste trabalho (Quadro 5.5 e Figuras 5.7a e 5.7b). As diferenças entre os solos foram significativas apenas para a escória B nas doses de 1,0 e 1,5 NC. Por outro lado, verificaram-se diferenças significativas entre corretivos apenas na dose de 1,5 NC para o LA de Linhares-ES (Quadro 5.5 e Figuras 5.7a e 5.7b). O incremento das doses de corretivos propiciou um aumento na produção dos caldos de cana (Quadro 5.5 e Figuras 5.7a e 5.7b), mostrando o efeito positivo da correção da acidez dos solos na produção dessa cultura. Embora existam relatos que indicam alta tolerância da cana-de-açúcar à acidez dos solos (VARGAS, 1981; AZEVEDO; SARRUGE, 1984), autores como Raji et al. (1996), Orlando Filho (1990) e Prado et al. (2003), consideram importante uma calagem adequada para o estabelecimento de culturas semiperenes, visto que a acidez do solo pode comprometer a produtividade das plantas por muito tempo. Anderson et al. (1987) e Elawad et al (1982) também obtiveram um



◆  $\hat{Y} = \bar{Y} = 0,1571$   
 ■  $\hat{Y} = \bar{Y} = 0,1617$   
 ○  $\hat{Y} = 0,1506 + 0,0969**X - 0,0652**X^2$   $R^2 = 0,8966$

◆  $\hat{Y} = \bar{Y} = 0,1623$   
 ■  $\hat{Y} = \bar{Y} = 0,1571$   
 ○  $\hat{Y} = \bar{Y} = 0,1577$



◆  $\hat{Y} = 81,0601 + 6,7253*X$   $R^2 = 0,9683$   
 ■  $\hat{Y} = 82,6740 + 24,3582*X$   $R^2 = 0,7520$   
 ○  $\hat{Y} = 82,8837$

◆  $\hat{Y} = \bar{Y} = 88,7248$   
 ■  $\hat{Y} = \bar{Y} = 89,7820$   
 ○  $\hat{Y} = \bar{Y} = 90,8946$

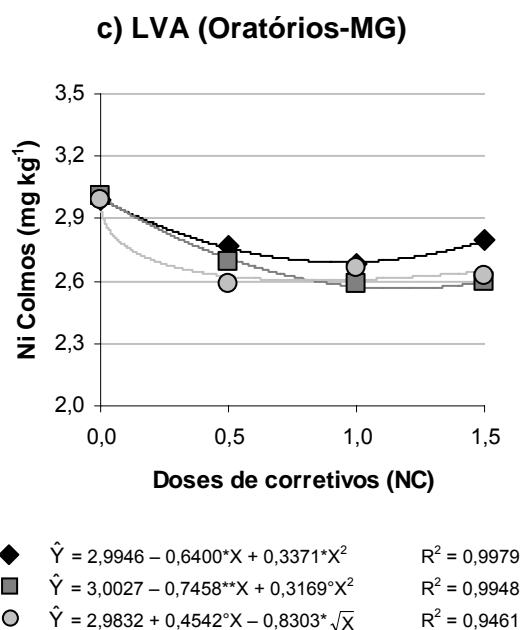
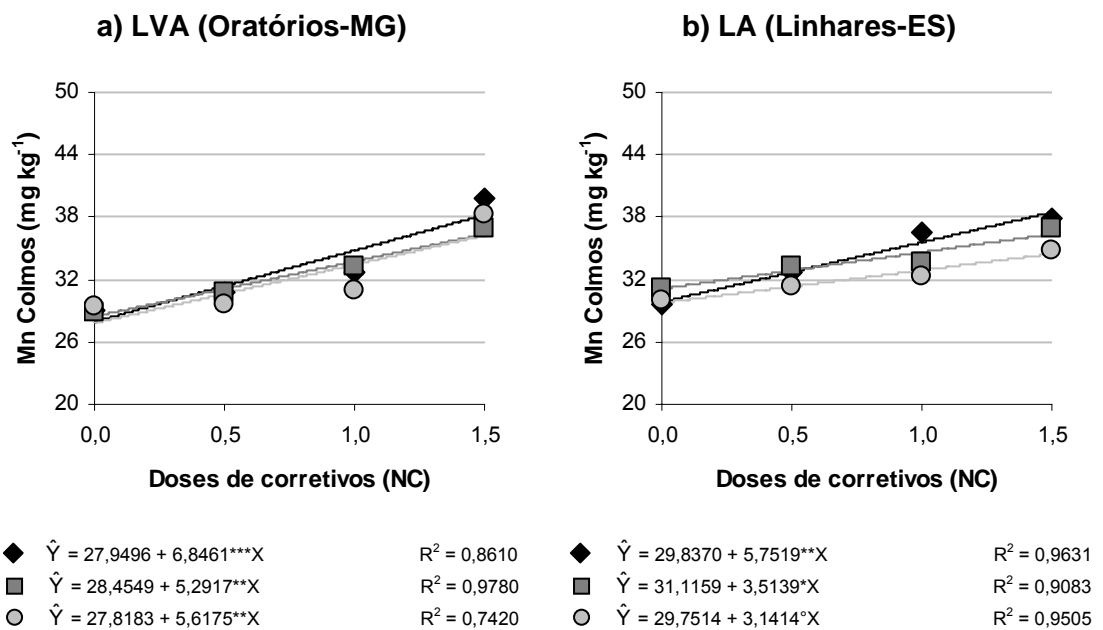
◆ Escória A

■ Escória B

○ Calcário

°, \*, \*\*, e\*\*\* coeficientes significativos a 10; 5; 1; e 0,1 % de probabilidade, respectivamente.

Figura 5.5. Teores de Mg e Fe nos colmos de cana-de-açúcar cultivada nos Latossolos Vermelho-amarelo (LVA) de Oratórios-MG e Amarelo (LA) de Linhares-ES, em resposta às doses dos corretivos.



◆ Escória A

■ Escória B

○ Calcário

\*\*; e \*\*\* coeficientes significativos a 1; e 0,1 % de probabilidade, respectivamente.

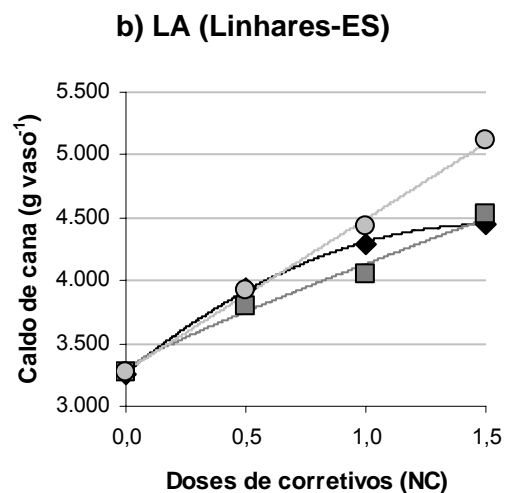
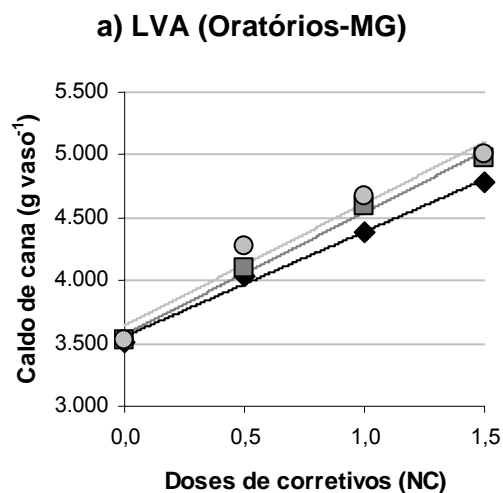
Figura 5.6. Teores de Mn e Ni nos colmos de cana-de-açúcar cultivada nos Latossolos Vermelho-amarelo (LVA) de Oratórios-MG e Amarelo (LA) de Linhares-ES, em resposta às doses dos corretivos.

Quadro 5.5. Análise de variância para produção de caldos de cana, Ca, Mg, Fe, Mn e Ni nos caldos da cana-de-açúcar cultivada nos LVA de Oratórios-MG e LA de Linhares-ES, tratados com as escórias A e B e o calcário

FV	GL	QM					
		Produção de Caldo	Ca Caldo	Mg Caldo	Fe Caldo	Mn Caldo	Ni Caldo
Blocos (B)	2	165.109,900 <sup>n.s.</sup>	6,5993 <sup>n.s.</sup>	5,1641 <sup>n.s.</sup>	5,0215 <sup>n.s.</sup>	0,00253 <sup>n.s.</sup>	0,00010 <sup>n.s.</sup>
Solos (S)	1	1.171.036,000**	1.897,2360**	23,8174 <sup>n.s.</sup>	1.231,1010**	0,22392 <sup>n.s.</sup>	12,81175**
Corretivos (C)	2	278352,200*	292,8875**	612,0772**	0,8741 <sup>n.s.</sup>	0,08412 <sup>n.s.</sup>	0,00130 <sup>n.s.</sup>
Doses (D)	3	6.574.507,000**	2.350,2420**	5.827,1150**	1,2466 <sup>n.s.</sup>	0,11988 <sup>n.s.</sup>	0,00058 <sup>n.s.</sup>
D x C	6	57.047,240 <sup>n.s.</sup>	43,8316**	135,6337**	0,6352 <sup>n.s.</sup>	0,09942 <sup>n.s.</sup>	0,00053 <sup>n.s.</sup>
D x S	3	3.201,997 <sup>n.s.</sup>	220,9096**	315,2714**	2,1984 <sup>n.s.</sup>	0,06244 <sup>n.s.</sup>	0,00058 <sup>n.s.</sup>
C x S	2	78.157,070 <sup>n.s.</sup>	90,6397**	97,8380**	3,0528 <sup>n.s.</sup>	0,07662 <sup>n.s.</sup>	0,00130 <sup>n.s.</sup>
D x C x S	6	51.529,790 <sup>n.s.</sup>	16,3659 <sup>n.s.</sup>	85,8926**	0,4936 <sup>n.s.</sup>	0,04822 <sup>n.s.</sup>	0,00053 <sup>n.s.</sup>
S/C = Esc. A x D = 0,0 NC	1	99.328,160 <sup>n.s.</sup>	3,9079 <sup>n.s.</sup>	116,9210**	127,1233**	0,10895 <sup>n.s.</sup>	1,05628**
S/C = Esc. A x D = 0,5 NC	1	13.227,300 <sup>n.s.</sup>	33,2233 <sup>n.s.</sup>	41,9951 <sup>n.s.</sup>	55,2294**	0,04591 <sup>n.s.</sup>	1,03579**
S/C = Esc. A x D = 1,0 NC	1	13.866,640 <sup>n.s.</sup>	218,0119**	103,3310**	84,1405**	0,15530 <sup>n.s.</sup>	1,13589**
S/C = Esc. A x D = 1,5 NC	1	166.485,400 <sup>n.s.</sup>	420,1446**	296,1136**	75,7841**	0,01728 <sup>n.s.</sup>	1,11226**
S/C = Esc. B x D = 0,0 NC	1	98.703,780 <sup>n.s.</sup>	2,9870 <sup>n.s.</sup>	122,0851**	129,4942**	0,09774 <sup>n.s.</sup>	1,17022**
S/C = Esc. B x D = 0,5 NC	1	139.210,200 <sup>n.s.</sup>	288,7756**	0,9201 <sup>n.s.</sup>	110,7918**	0,23218 <sup>n.s.</sup>	1,03572**
S/C = Esc. B x D = 1,0 NC	1	428.113,100*	835,4529**	31,4927 <sup>n.s.</sup>	108,8952**	0,02129 <sup>n.s.</sup>	1,12225**
S/C = Esc. B x D = 1,5 NC	1	305.522,900*	589,4689**	288,4233**	119,4782**	0,07457 <sup>n.s.</sup>	1,04888**
S/C = Cal. A x D = 0,0 NC	1	88.566,200 <sup>n.s.</sup>	1,5502 <sup>n.s.</sup>	122,2784**	128,4360**	0,04027 <sup>n.s.</sup>	1,05209**
S/C = Cal. A x D = 0,5 NC	1	188.447,900 <sup>n.s.</sup>	48,0815 <sup>n.s.</sup>	306,3451**	99,7337**	0,00059 <sup>n.s.</sup>	1,00992**
S/C = Cal. A x D = 1,0 NC	1	87.837,840 <sup>n.s.</sup>	132,4450**	197,5685**	110,2517**	0,05249 <sup>n.s.</sup>	0,99025**
S/C = Cal. A x D = 1,5 NC	1	16.824,150 <sup>n.s.</sup>	265,3900**	53,1892*	97,4060**	0,00726 <sup>n.s.</sup>	1,04975**
C/S = 1 e D = 0,0 NC	2	36,751 <sup>n.s.</sup>	0,0158 <sup>n.s.</sup>	0,0080 <sup>n.s.</sup>	0,0010 <sup>n.s.</sup>	0,00073 <sup>n.s.</sup>	0,00202 <sup>n.s.</sup>
C/S = 1 e D = 0,5 NC	2	48.280,930 <sup>n.s.</sup>	84,1952**	396,9964**	4,2289 <sup>n.s.</sup>	0,12032 <sup>n.s.</sup>	0,00011 <sup>n.s.</sup>
C/S = 1 e D = 1,0 NC	2	67.779,130 <sup>n.s.</sup>	238,9557**	786,9985**	0,0225 <sup>n.s.</sup>	0,15875 <sup>n.s.</sup>	0,00305 <sup>n.s.</sup>
C/S = 1 e D = 1,5 NC	2	44.243,050 <sup>n.s.</sup>	145,8554**	1,2944 <sup>n.s.</sup>	1,4621 <sup>n.s.</sup>	0,05023 <sup>n.s.</sup>	0,00061 <sup>n.s.</sup>
C/S = 2 e D = 0,0 NC	2	231,152 <sup>n.s.</sup>	0,2500 <sup>n.s.</sup>	0,0546 <sup>n.s.</sup>	0,0023 <sup>n.s.</sup>	0,01338 <sup>n.s.</sup>	—
C/S = 2 e D = 0,5 NC	2	17.958,660 <sup>n.s.</sup>	19,1824 <sup>n.s.</sup>	9,0977 <sup>n.s.</sup>	0,3703 <sup>n.s.</sup>	0,02057 <sup>n.s.</sup>	—
C/S = 2 e D = 1,0 NC	2	108.370,000 <sup>n.s.</sup>	26,3877 <sup>n.s.</sup>	98,2040**	0,9669 <sup>n.s.</sup>	0,10046 <sup>n.s.</sup>	—
C/S = 2 e D = 1,5 NC	2	395.340,700**	49,2775*	81,8403**	0,2594 <sup>n.s.</sup>	0,13922 <sup>n.s.</sup>	—
Resíduo	46	65.178,470	12,6553	12,2357	4,3672	0,09983	0,00087
CV (%)		6,1417	9,8137	6,3642	15,3850	16,3540	6,9723

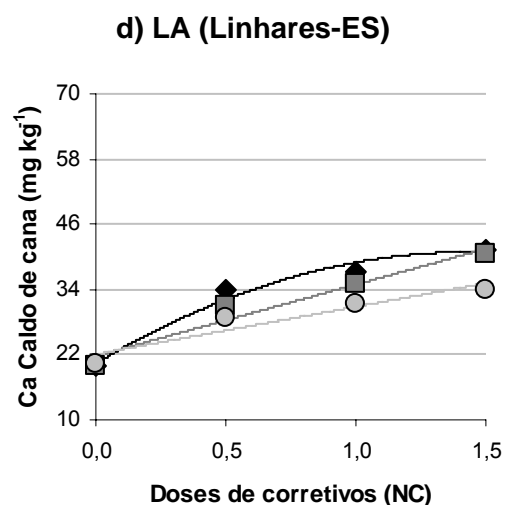
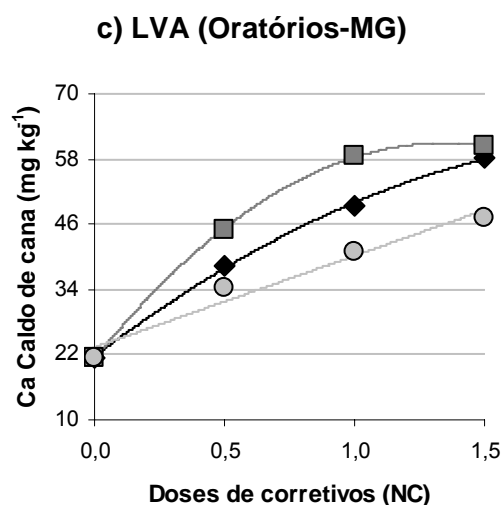
Esc A = escória A; Esc. B = escória B; Cal. A = calcário A; S1 = Latossolo Vermelho-amarelo de Oratórios-MG; S2 = Latossolo Amarelo de Linhares-ES; e NC = necessidade de calagem (CFSEMG, 1999).

<sup>n.s.</sup> coeficientes não-significativos; \*\* e \* coeficientes significativos a 1 e 5 %, respectivamente.



◆  $\hat{Y} = 3556,21 + 832,698^{***}X$   $R^2 = 0,9934$   
 ■  $\hat{Y} = 3571,23 + 971,999^{***}X$   $R^2 = 0,9925$   
 ○  $\hat{Y} = 3641,36 + 974,337^{***}X$   $R^2 = 0,9600$

◆  $\hat{Y} = 3267,60 + 1554,36^{**}X - 511,73^{\circ}X^2$   $R^2 = 0,9985$   
 ■  $\hat{Y} = 3306,65 + 809,205^{***}X$   $R^2 = 0,9841$   
 ○  $\hat{Y} = 3284,11 + 1206,17^{***}X$   $R^2 = 0,9969$



◆  $\hat{Y} = 21,6492 + 36,5977^{***}X - 8,2492^{\circ}X^2$   $R^2 = 0,9988$   
 ■  $\hat{Y} = 21,1808 + 59,2027^{***}X - 22,0465^{***}X^2$   $R^2 = 0,9997$   
 ○  $\hat{Y} = 23,3516 + 16,8344^{***}X$   $R^2 = 0,9643$

◆  $\hat{Y} = 20,3814 + 28,4368^{***}X - 9,8373^{\circ}X^2$   $R^2 = 0,9766$   
 ■  $\hat{Y} = 21,7593 + 13,1404^{***}X$   $R^2 = 0,9471$   
 ○  $\hat{Y} = 22,0959 + 8,7165^{***}X$   $R^2 = 0,9034$

◆ Escória A

■ Escória B

○ Calcário

\*\*; e \*\*\* coeficientes significativos a 1; e 0,1 % de probabilidade, respectivamente.

Figura 5.7. Produção de matéria seca (MS) e teores de Ca no caldo da cana-de-açúcar cultivada nos Latossolos Vermelho-amarelo (LVA) de Oratórios-MG e Amarelo (LA) de Linhares-ES, em resposta às doses dos corretivos.

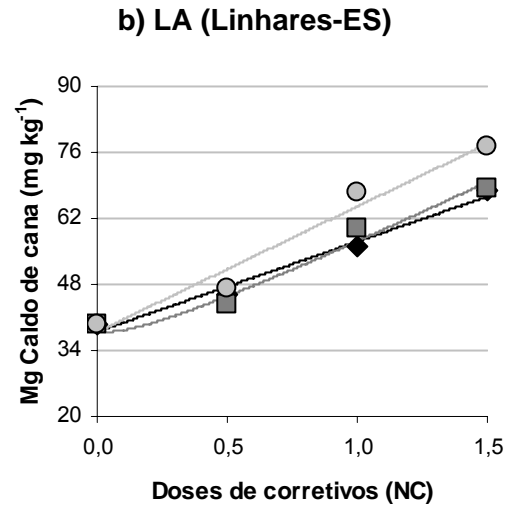
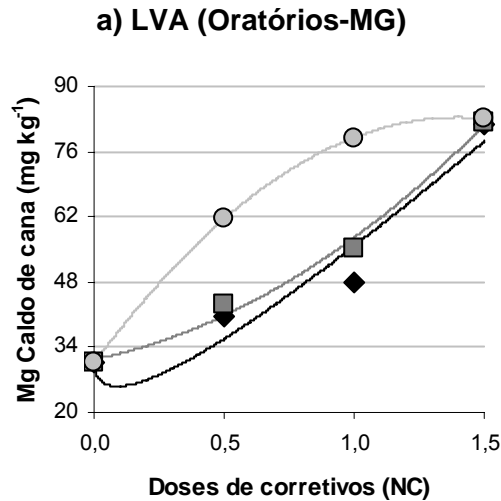
efeito positivo da aplicação da escória de siderurgia na produção de cana-de-açúcar.

Verificaram-se diferenças significativas nos teores de Ca nos caldos de cana em função dos solos, corretivos e doses utilizadas neste trabalho (Quadro 5.5 e Figuras 5.7c e 5.7d). A utilização das escórias no LVA de Oratórios-MG propiciou um maior teor de Ca nos caldos de cana, em relação ao calcário (Quadro 5.5 e Figuras 5.7c e 5.7d). Nesse solo os teores de Ca no caldo para as escórias A e B superaram os tratamentos com calcário em cerca de 19,62 e 31,11 %, respectivamente, para a dose recomendada de 1,0 NC (Figura 5.7c). Nas doses de corretivos correspondentes a 0,5; 1,0 e 1,5 NC, aplicadas no LVA de Oratórios-MG, as escórias propiciaram um maior acúmulo de Ca nos caldos de cana em relação ao calcário (Quadro 5.5 e Figura 5.7c). Estes resultados podem ser atribuídos, pelo menos em parte, aos maiores teores de Ca das duas escórias LD em relação ao calcário utilizado (Quadro 5.2). Para o LA de Linhares as diferenças significativas entre corretivos foram verificadas apenas para a dose de 1,5 NC (Quadro 5.5 e Figura 5.7d).

Diferenças significativas para os teores de Mg nos caldos foram verificadas para os corretivos e doses utilizadas (Quadro 5.5 e Figura 5.8). Para o LVA de Oratórios-MG o calcário superou as escórias A e B quanto a teores de Mg nos caldos de cana, para as doses de 0,5 e 1,0 NC (Quadro 5.5 e Figura 5.8a). Já para o LA de Linhares-ES esta diferença é significativa, em favor do calcário, apenas nas doses de 1,0 e 1,5 NC. Nestes casos, provavelmente os resultados refletem o maior teor de Mg no calcário em relação aos teores desse elemento nas duas escórias LD (Quadro 5.2).

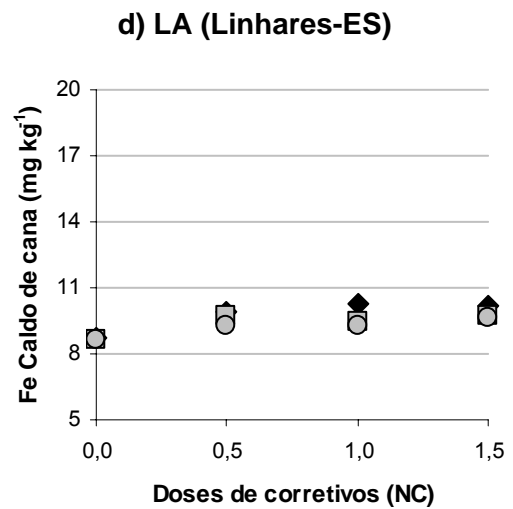
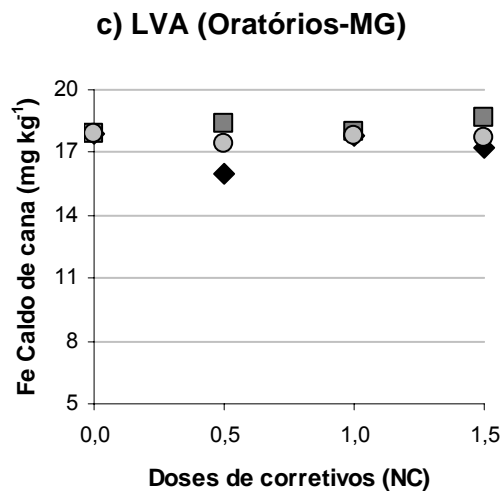
Foram verificadas diferenças significativas nos teores de Fe apenas entre os solos estudados (Quadro 5.5 e Figuras 5.8c e 5.8d). Também não se verificaram diferenças significativas com relação aos teores de Mn nos caldos de cana em função dos tratamentos utilizados neste ensaio (Quadro 5.5 e Figuras 5.9a e 5.9b).

Para o Ni, as diferenças foram significativas apenas entre solos, não foram observados efeitos de corretivos ou doses (Quadro 5.5). A presença de Ni não foi detectada no caldo da cana-de-açúcar cultivada no LA de Linhares. Já os teores de Ni encontrados no caldo da cana-de-açúcar cultivada no LVA de Oratórios-MG (Figura 5.9c), podem ser considerados baixos quando comparados àqueles relatados na literatura para as plantas cultivadas



◆  $\hat{Y} = 31,1453 - 61,5295^{***} - 36,9302^{***}\sqrt{X}$   $R^2 = 0,9347$   
 ■  $\hat{Y} = 31,3950 + 11,4457^{\circ}X + 14,6933^{***}X^2$   $R^2 = 0,9920$   
 ○  $\hat{Y} = 30,5627 + 75,4068^{***}X - 26,9295^{***}X^2$   $R^2 = 0,9998$

◆  $\hat{Y} = 37,9895 + 19,1025^{***}X$   $R^2 = 0,9856$   
 ■  $\hat{Y} = 39,4470 + 31,2456^{***}X - 13,5277^{\circ}\sqrt{X}$   $R^2 = 0,9796$   
 ○  $\hat{Y} = 37,9421 + 26,5852^{***}X$   $R^2 = 0,9707$



◆  $\hat{Y} = \bar{Y} = 17,2394$   
 ■  $\hat{Y} = \bar{Y} = 18,2170$   
 ○  $\hat{Y} = \bar{Y} = 17,6984$

◆  $\hat{Y} = \bar{Y} = 9,7715$   
 ■  $\hat{Y} = \bar{Y} = 9,3843$   
 ○  $\hat{Y} = \bar{Y} = 9,1886$

◆ Escória A

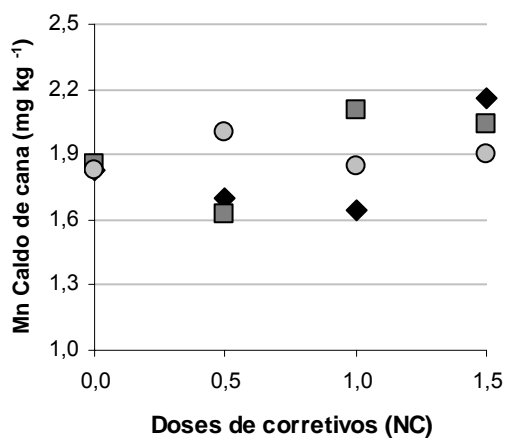
■ Escória B

○ Calcário

°; \*; e \*\*\* coeficientes significativos a 10; 5; e 0,1 % de probabilidade, respectivamente.

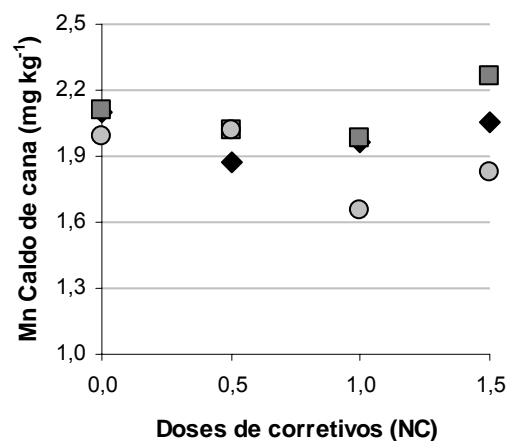
Figura 5.8. Teores de Mg e Fe no caldo da cana-de-açúcar cultivada nos Latossolos Vermelho-amarelo (LVA) de Oratórios-MG e Amarelo (LA) de Linhares-ES, em resposta às doses dos corretivos.

a) LVA (Oratórios-MG)



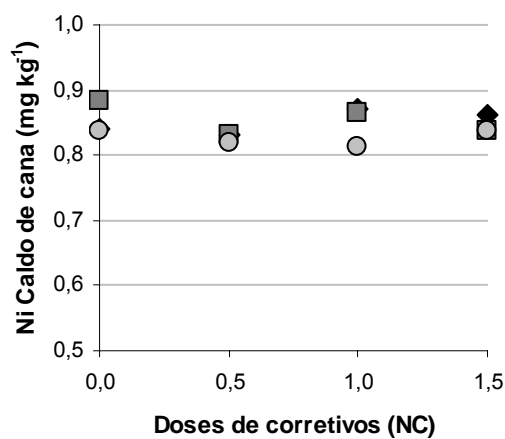
◆  $\hat{Y} = \bar{Y} = 1,8325$   
 ■  $\hat{Y} = \bar{Y} = 1,9038$   
 ○  $\hat{Y} = \bar{Y} = 1,8924$

b) LA (Linhares-ES)



◆  $\hat{Y} = \bar{Y} = 1,9972$   
 ■  $\hat{Y} = \bar{Y} = 1,8741$   
 ○  $\hat{Y} = \bar{Y} = 1,6241$

c) LVA (Oratórios-MG)



◆  $\hat{Y} = \bar{Y} = 0,8504$   
 ■  $\hat{Y} = \bar{Y} = 0,8539$   
 ○  $\hat{Y} = \bar{Y} = 0,8265$

◆ Escória A

■ Escória B

○ Calcário

\*, \*\*, e \*\*\* coeficientes significativos a 5; 1; e 0,1 % de probabilidade, respectivamente.

Figura 5.9. Teores de Mn e Ni no caldo da cana-de-açúcar cultivada nos Latossolos Vermelho-amarelo (LVA) de Oratórios-MG e Amarelo (LA) de Linhares-ES, em resposta às doses dos corretivos.

(WELCH, 1981; BOLLARD, 1983; WOOLHOUSE, 1983). O Cd e o Cr não foram detectados nas amostras de caldos de cana, independente das doses, corretivos ou solos utilizados para o cultivo.

Jeevan Rao e Shantaran (1996) mencionam que a absorção de metais pesados pelas plantas, geralmente ocorre abaixo dos níveis que causam manifestação de sintomas de toxicidade e prejuízos na produção. Por outro lado, Soares et al. (2002), alertam que mesmo os níveis baixos de metais pesados acumulados pelas plantas podem interferir na qualidade dos alimentos e, por consequência trazer malefícios à saúde humana. No presente trabalho, entretanto, os resultados obtidos não sugerem qualquer contaminação dos caldos de cana por metais pesados, em decorrência do uso das escórias.

#### 5.4. Conclusões

- ❖ Todos os corretivos avaliados proporcionaram aumentos tanto na produção de matéria seca de folhas e colmos e nos caldos de cana, quanto nos teores de Ca e Mg nas plantas, com o incremento das doses;
- ❖ O calcário foi mais eficiente que as escórias LD para a produção de matéria seca de folhas e colmos da cana-de-açúcar, além de promover um maior teor de Mg na matéria seca das folhas; e
- ❖ Apesar da presença de Cr, Ni e Cd nas escórias de aciaria LD não foi detectada qualquer contaminação por metais pesados nas folhas, colmos ou caldo das plantas de cana-de-açúcar.

#### 5.5 Referências bibliográficas

ACCIOLY, A.M.A.; FURTINI NETO, A.E.; MUNIZ, J.A.; FAQUIN, V.; GUEDES, G.A.A. Pó de forno elétrico de siderurgia como fonte de micronutrientes e contaminantes para plantas de milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 35, n. 7, p. 1483-1491, 2000.

ALCARDE, J.C. **Corretivos da acidez dos solos: características e interpretações técnicas**. São Paulo, SP: ANDA, 1992. (Boletim Técnico nº 6).

ALCARDE, J.C.; RODELLA, A.A. Qualidade e legislação de fertilizantes e corretivos. In: **Tópicos em ciência do solo**. Vol. III. Viçosa, MG: SBCS. 2003. p. 291-334.

ALVAREZ V. V.H. **Equilíbrio de formas disponíveis de fósforo e enxofre em dois latossolos de Minas Gerais. Viçosa**, Viçosa, MG: UFV, 1974. 134 f. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 1974.

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

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

AMARAL, R.D.; BARROS, N.F.; COSTA, L.M.; FONTES, M.P.F. Efeito de um resíduo da indústria de zinco sobre a química de amostras de solo e plantas de milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, SP, v. 20, n. 3. p. 433-440, 1996.

ANDERSON, A.J.; MEYER, D.R.; MAYER, F.K. Heavy metals toxicities: levels of nickel, cobalt and chromium in the soil and plants associated with visual symptoms and variation in growth of an oat crop. **Australian Journal of Agriculture Research**, v. 24, p. 557-571. 1973.

ANDERSON, D.L.; JONES, D.B.; SNYDER, G.H. Response of a rice-sugarcane rotation to calcium silicate slag on Everglades Histosols. **Agronomy Journal**, v. 79, p. 531-535, 1987.

ANDERSON, D.L.; SNYDER, G.H.; MARTIN, F.G. Multi-year response of sugarcane to calcium silicate slag on Everglades Histosols. **Agronomy Journal**, v. 83, p. 870-874, 1991.

AZEVEDO, D.F.; SARRUGE, J.R. Alumínio na produção de matéria seca em diferentes cultivares de cana-de-açúcar (*Saccharum* spp). **Sacaccharum**, v. 34, p. 17-23, 1984.

BOLLARD, E.G. Involvement of unusual elements in plant growth and nutrition. In: **Enciclopedia of plant physiology, new series** (A. Läuchli and R.L. Bielecki, Eds.). Vol. 15B, p. 695-755. Springer-Verlag, Berlin and New York. 1983.

CABRERA, D.; YOUNG, S.D.; ROWELL, D.L. The toxicity of cadmium to barley plants as affected by complex formation with humic acid. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 105, n. 2, p. 195-204, 1988.

CAMARGO, M.N.; KLAMT, E.; KAUFFMAN, J.H. **Classificação de solos usada em levantamentos pedológicos no Brasil**. Boletim informativo da Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, Campinas, v. 12, n. 1, p. 11-33, 1987.

CAMARGO, O.A.; ALLEONI, L.R.F.; CASAGRANDE, J.C. Reações dos micronutrientes e elementos tóxicos. In: FERREIRA, M.E.; CRUZ, M.C.P. da; RAIJ, B. van; ABREU, C.A. de (Ed.). **Micronutrientes elementos tóxicos na agricultura**. Jaboticabal: CNPq/FAPESP/POTAFOS, p.89-124. 2001.

CASTELO BRANCO, V.T.F. **Caracterização de misturas asfálticas com o uso de escória de aciaria como agregado**. Rio de Janeiro, RJ: COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro. 2004. 135 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 2004.

CFSEMG – Comissão de fertilidade do solo do estado de minas gerais.  
**Recomendação para uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais – 5ª Aproximação**. Viçosa, MG. 359 p.1999.

CORRÊA, M.L.T.; MELLO, J.W.V., SILVA J. Avaliação do Uso Agrícola de Uma Escória de Aciaria como Corretivo da Acidez de Solos. In: 58º CONGRESSO ANUAL DA ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE METALURGIA E MATERIAIS. 2003. Rio de Janeiro. **Anais...** [CDROM]. / Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais – São Paulo, SP: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais. 2003.

COSTA, L.M.; AMARAL SOBRINHO, N.M.B.; DIAS, L.E.; BARROS, N.F. Application of a steel industry residue to an Oxisol including microbial activity. In: **Trace substances in environmental health conference**, 25. s. l., 1991. Proceeding, p. 245-356. 1991.

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

ELAWAD, S.H.; GASCHO, G.J.; STREET, J.J. Response of sugarcane to silicate source and rate. I. Growth and yield. **Agronomy Journal**, v. 74, p. 481-483, 1982.

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

EMBRAPA – EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes**. Organizador: Fábio César da Silva. – Brasília: Embrapa Comunicação para Transferência de Tecnologia, 1999. 370 p.

FERNANDES, A.C. **Cálculos na agroindústria da cana-de-açúcar**. STAB: Piracicaba-SP. 2000. 193 p.

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

HERNÁNDEZ, T.; MORENO, J.I.; COSTA, F. Influence of sewage sludge application on crop yields and heavy metal availability. **Soil Science and Plant Nutrition**, Tokyo, v. 37, p. 201-210, 1991.

HOSSNER, L.R. Dissolution for total elemental analysis. In: **Methods of soil analysis. Part 3. Chemical methods**. Madison: Soil Science Society of America, Inc., p. 49-64. 1996.

JEEVAN RAO, K.; SHANTARAM, M.V. Effect of urban solid wastes on dry matter yield, uptake of micronutrients and heavy metals by maize plants. **Journal of Environmental Biology**, Muzaffarnagar, v. 17, n. 1, p. 25-32, 1996.

KATO, N.; OWA, N. Dissolution of slag in water and calcium chorine solution: effects of solution pH and calcium concentration on solubilities of slags. **Japan Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 67, p. 626-632, 1996.

KER, J.C. Latossolos do Brasil: uma revisão. **Geonomos**, Belo Horizonte, MG. v. 5, n. 1, p. 17-40. 1997.

KHALID, R.A.; SILVA, J.A.; FOX, R.L. Residual effect of calcium silicate in tropical soil. I-Fate of applied silicon during five years cropping. **Soil Science Society American Journal**, v. 42, p. 89-94, 1978.

LÓPEZ, F.A.; FORMOSO, A.; MEDINA, F. Escórias LD. Coprodutos de la indústria siderúrgica – I Parte. Composición, tratamiento y aplicaciones. **Revista de Metalurgia**, v. 25, n. 4, p. 247-254, 1989.

MACHADO, A.T. **Estudo comparativo dos métodos de ensaios para avaliação da expansibilidade das escórias de aciaria**. São Paulo, SP: USP. 2000. 135 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Construção Civil) – Universidade de São Paulo, Escola Politécnica, São Paulo, SP, 2000.

MALAVOLTA, E. VITTI, G.C., OLIVEIRA, S.A. **Avaliação do estado nutricional das plantas. Princípios e aplicações**. Piracicaba, SP: Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato. 1989. 201 p.

MARSCHNER H. **Mineral nutrition of higher plants**. San Diego: Academic Press Inc. 1995. 902 p.

MENGEL, K.; KIRKBY, E.A. **Principles of plant nutrition**. New York, NY: International potash Institute. 1987. 687 p.

MISHRA, D.; KAR, M. Nickel in plant growth and metabolism. **Botanical Review**, v. 40, p. 395-452. 1974.

MOTZ, H.; GEISELER, J. Products of steel slags an opportunity to save natural resources. **West Management**, v. 21, p. 285-293, 2001.

ORLANDO FILHO, J.; SILVA, L.C.F.; MANOEL, L.A. Fontes de calcário aplicadas em área total e sulco de plantio em cana-de-açúcar. **STAB Açúcar, Álcool e Subprodutos**, v. 9, p. 11-16, 1990.

PAVAN, M.A.; BINGHAM, F.T. Toxidez de metais em plantas: II. Caracterização da toxidez do níquel em cafeeiros. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 17, p. 323-328, 1982.

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

POMBO, L.C.A.; KLAMT, E. Adsorção de zinco e cobre de dois solos do Estado do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, SP, v. 10, p. 191-194, 1986.

PRADO, R.M. **Resposta da cana-de-açúcar à aplicação de escória silicatada como corretivo de acidez do solo**. Ilha Solteira, SP: ENESP, 2000, 97p. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) – Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, SP, 2000.

PRADO, R.M.; COUTINHO, E.L.M., ROQUE, C.G.; VILLAR, M.L.P. Avaliação da escória de siderurgia e de calcários como corretivo da acidez de solos no cultivo da alface. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 37, n. 4, p. 539-546, 2002.

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**, Piracicaba, SP, v. 57, n. 4, p. 739-744, 2000.

PRADO, R.M.; FERNANDES, F.M. Resposta da cana-de-açúcar à aplicação da escória de siderurgia como corretivo de acidez do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 25, p. 201-209, 2001.

PRADO, R.M.; FERNANDES, F.M.; NATALE, W. Efeito residual da escória de siderurgia como corretivo de acidez do solo na soqueira de cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 27, n. 2, 2003.

RAIJ, B. van; QUAGGIO, J.A.; CANTARELLA, H.; FURLANI, A.M.C., eds. **Recomendações de adubação e calagem para o estado de São Paulo**. 2. ed. Campinas, Instituto Agronômico de Campinas & Fundação IAC, 1996. 255 p. (Boletim Técnico, 100).

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

SILVA, C.A.; ANDERSON, S.J.; VALE, F.R. Carbono, nitrogênio e enxofre em frações granulométricas de dois latossolos submetidos à calagem e adubação

fosfatada. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 23, n. 3, 1999.

SILVA, J. **Avaliação do potencial agrônômico e de contaminação ambiental decorrente do uso de uma escória de aciaria como corretivo e fertilizante de solos**. Viçosa, MG: UFV, 2003. 134 p. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2003.

SOARES, F.; AMARAL SOBRINHO, N.M.B.; MAZUR, N. Influência de diferentes manejos agrícolas na distribuição de metais pesados no solo e em plantas de tomate. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 26, p. 535-542, 2002.

VARGAS, J.T.D. **Efeito na cultura da cana-de-açúcar da aplicação de calcário como corretivo e adubo em solo de cerrado**. Piracicaba, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 1981. 77 f. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, SP, 1981.

WELCH, R.M. The biological significance of nickel. **Journal of Plant Nutrition**, v. 3, p. 345-356. 1981.

WOOLHOUSE, H.W. Toxicity and tolerance in response of plants to metals. In: **Encyclopedia of plant physiology, new series** (A. Läuchli and R.L. Bielecki, Eds.). Vol. 12C, p. 246-300. Springer-Verlag, Berlin and New York. 1983.

## **6. CONTAMINAÇÃO E MOBILIZAÇÃO DE METAIS PESADOS EM SOLOS TRATADOS COM ESCÓRIA DE ACIARIA LD, DA CST, CULTIVADOS COM CANA-DE-AÇÚCAR, EM CASA-DE-VEGETAÇÃO**

### **6.1. Introdução**

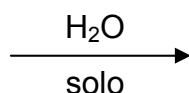
A escória de aciaria é um subproduto resultante da agregação de diversos elementos químicos cuja presença não é desejável no aço. A composição química das escórias é influenciada pela técnica de produção do aço, pelo tipo do aço a ser produzido (MACHADO, 2000) e pela qualidade da matéria-prima utilizada (MOTZ; GEISELER, 2001). Existem três processos principais para o refino do aço: o processo do conversor de oxigênio LD (Linz-Donawitz) ou BOF (Blast Oxygen Furnace), o processo Siemens-Martin OH (Open Hearth) e o processo do forno de arco elétrico – EAF (Electric Arc Furnace). Nesses processos, o oxigênio atua como agente oxidante e o CaO como agente escorificante no fluxo de refino (ARAUJO, 1997). O processo de refino do aço em conversores a oxigênio (processo LD), utilizado pela Cia Siderúrgica de Tubarão (CST), tem por objetivo reduzir os teores de carbono do ferro gusa de 4 % para 0,1 % e de outros elementos como o manganês, enxofre, silício e fósforo, conforme o tipo de aço a ser produzido (GEORGE; SORRENTINO, 1980; ILFA, 1995; ARAUJO, 1997; MACHADO, 2000). As escórias LD são constituídas, portanto, de uma mistura de óxidos e silicatos de Ca e Mg; ferro metálico; e outros elementos químicos como metais pesados, que podem aparecer em teores elevados, dentre eles o cromo, níquel e

chumbo (PAVAN; BINGHAM, 1982; COSTA, et al., 1991; ALCARDE, 1992; LEE; LEE, 1995; FERRAND; EMERY, 1995; ARAUJO, 1997; BORGOS, 1999; ALCARDE; RODELLA, 2003).

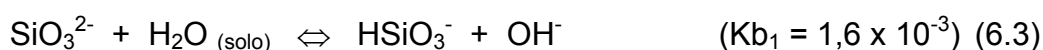
Além de neutralizar a acidez de solos e fornecer alguns nutrientes para as plantas como Ca e Mg (ALCARDE, 1992; ALCARDE; RODELLA, 2003; CORRÊA et al, 2003), as escórias introduzem o Si no solo, posto que tratam-se de silicatos. A retenção do Si no solo, comprovada por Holt e King (1955), ocorre por adsorção específica às superfícies dos óxidos de Fe, à semelhança do P (HINGSTON et al., 1972). Desta forma, P e Si competem entre si pelos mesmos sítios de adsorção, de maneira que o Si pode deslocar (dessorver) o P e vice-versa, da fase sólida para a fase líquida do solo (OBIHARA; RUSSEL, 1972; OLIVEIRA, 1984; LEITE, 1997). Neste sentido, o uso de escórias também pode contribuir para aumentar a disponibilidade de P para as plantas. Em solos altamente intemperizados, como a maioria dos solos brasileiros (CAMARGO et al., 1987; KER, 1997; SILVA et al., 1999), que apresentam elevados teores de oxihidróxidos de Fe e Al e, conseqüentemente, uma adsorção significativa de P (SAMPLE et al, 1980; HIGSTON et al., 1972; HIGSTON et al., 1974; PARFITT, 1978; SANCHEZ; UEHARA, 1980; BAHIA FILHO, 1982; RESENDE, 1983; BARROW, 1985; GOLDBERG; SPOSITO, 1985; SANYAL; DE DATTA, 1991; NOVAIS; SMYTH, 1999) a dessorção desse elemento é, sem sombra de dúvidas, muito interessante, especialmente do ponto de vista econômico, pois o custo do adubo fosfatado é muito elevado quando comparado a outros nutrientes.

A utilização das escórias para correção da acidez de solos pode reduzir, também, o passivo ambiental gerado pelo acúmulo desses resíduos nos pátios das siderúrgicas. No Brasil, cerca de 56 %, aproximadamente 2,24 milhões de toneladas, da escoria de siderurgia gerada é estocada sem destinação imediata (MACHADO, 2000; CASTELO BRANCO, 2004; PRADO et al., 2002). Deve-se ressaltar, ainda, a possibilidade de redução da mineração de calcário para fins agrícolas, com conseqüente redução na degradação ambiental, causada pela atividade mineradora. No Brasil são consumidos, atualmente, cerca de 20 milhões de toneladas de calcário por ano na agricultura (MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, 2002). Assim, pelo menos parte desse calcário pode ser substituído por corretivos alternativos, como a escória de siderurgia.

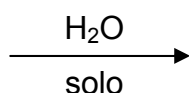
Outra consideração importante quanto à utilização das escórias de siderurgia como corretivo é a possibilidade de redução da emissão de CO<sub>2</sub> para a atmosfera. No caso dos silicatos de Ca e Mg a base química para a correção da acidez é o SiO<sub>3</sub><sup>2-</sup> (Reações 6.1, 6.2 e 6.3) e a ação neutralizante ocorre da seguinte forma (ALCARDE, 1992; ALCARDE; RODELA, 2003):



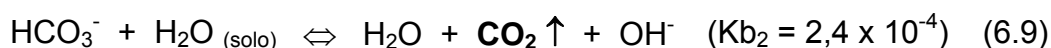
escória



Já nos carbonatos, a base química para a reação de neutralização, ou seja, o componente que proporciona a formação do OH<sup>-</sup>, é o CO<sub>3</sub><sup>2-</sup> (Reações 6.6, 6.7 e 6.8). Neste caso, há a formação de CO<sub>2</sub>, que é, então, liberado para a atmosfera (Reação 6.9) (ALCARDE, 1992; ALCARDE; RODELA, 2003):



Solução do solo



Por outro lado, o teor de metais pesados e outros elementos tóxicos das escórias podem restringir sua utilização na agricultura (PAVAN; BINGHAN, 1982; MENGEL; KIRKBY, 1987; LÓPEZ et al., 1989; COSTA et al., 1991; ACCIOLY et al., 2000). Estes metais, se absorvidos em níveis elevados pelas

plantas, podem causar efeitos deletérios à saúde humana e animal (PAVAN; BINGHAN, 1982; MENGEL; KIRKBY, 1987; COSTA et al., 1991; AMARAL et al., 1996). Na Europa, a partir de 1982, a utilização de escórias, na agricultura, passou a ser controlada em função dos seus elevados teores de CaO e P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, além de metais pesados e outros elementos tóxicos (INDUSTRY AND ENVIRONMENT, 1996; MACHADO, 2000; CASTELO BRANCO, 2004). Vale ressaltar, que a dinâmica dos metais pesados no sistema solo-planta é influenciada, não só pelas características dos solos (POMBO e KLAMT, 1986), mas também pelas espécies vegetais e até mesmo pelos cultivares dentro de uma mesma espécie (CABRERA et al., 1988; HERNÁNDEZ et al., 1991).

Em vista do exposto, acredita-se que há necessidade de um complexo estudo para a disposição dos resíduos siderúrgicos no solo, que deve ser monitorado quanto à presença de metais pesados. Após a disposição dos metais pesados no solo, estes podem atingir as plantas, aquíferos subterrâneos e animais, enfim adentram a cadeia alimentar do homem sendo muito perigosos sob o ponto de vista da saúde pública.

Este trabalho teve como objetivo avaliar o efeito da utilização de uma escória de aciaria LD, da Cia Siderúrgica de Tubarão, na contaminação de solos e águas de drenagem, sob cultivo com cana-de-açúcar em casa-de-vegetação.

Palavras-chave: escória de siderurgia, resíduos industriais, corretivos da acidez de solos, metais pesados, contaminação ambiental, cana-de-açúcar.

## **6.2. Material e métodos**

Foi realizado o cultivo de cana-de-açúcar, variedade RB855536, em vasos com 205 dm<sup>3</sup> de solo. Para tanto, foram utilizadas amostras de Latossolos Vermelho-amarelo e Amarelo coletadas nos municípios de Oratórios-MG e Linhares-ES (Quadro 6.1), respectivamente. Estes solos foram caracterizados físico-quimicamente (EMBRAPA, 1997). Foram, ainda, determinados os seus teores totais de Fe, Mn, Cr, Ni, Cd e Pb, utilizando-se os ácidos fluorídrico, sulfúrico e perclórico conforme descrito por Hossner (1996) (Quadro 6.2); além dos teores disponíveis (MEHLICH, 1984), dos mesmos

metais supra citados (Quadro 6.3). As amostras de solo foram acondicionadas nos vasos respeitando-se a seqüência de horizontes de cada perfil de solo identificados no campo. Na camada superficial destes solos (0 – 20 cm de profundidade) foram aplicadas doses de escórias e calcário para correção da acidez de forma similar ao procedimento utilizado em cultivos de campo.

O experimento foi montado, em casa-de-vegetação, no delineamento em blocos casualizados e esquema fatorial (2 x 3 x 4), em três repetições, perfazendo um total de 72 parcelas, sendo:

- ❖ 2 solos;
- ❖ 3 corretivos (duas amostras de escória na granulometria inferior a 1 mm e uma amostra de calcário) (Quadro 6.4); e
- ❖ 4 níveis de corretivo: 0,0; 0,5; 1,0 (Quadro 6.5) e 1,5 vezes a necessidade de calagem (CFSEMG, 1999).

As parcelas receberam os respectivos tratamentos, além de adubação complementar com P, 300 mg dm<sup>-3</sup> (ALVAREZ V, 1974), e foram mantidas com umidade próxima à capacidade de campo por 15 dias. Após esse período foram plantadas 2 mudas por vaso. Após o plantio foram aplicados em cobertura: 100 mg dm<sup>-3</sup> de N; 150 mg dm<sup>-3</sup> de K; 50 mg dm<sup>-3</sup> de S; 0,81 mg dm<sup>-3</sup> de B; 1,33 mg dm<sup>-3</sup> de Cu; 1,56 mg dm<sup>-3</sup> de Fe; 3,66 mg dm<sup>-3</sup> de Mn; 0,15 mg dm<sup>-3</sup> de Mo; e 4,00 mg dm<sup>-3</sup> de Zn (ALVAREZ V., 1974), divididos em seis aplicações. Decorridos dezessete meses de cultivo as plantas foram colhidas. Retiraram-se amostras de solos nas profundidades de 0-20; 40-60; e 80-100 cm, nas quais determinaram-se os teores totais (HOSSNER, 1996) e disponíveis (MEHLICH, 1984) de Fe, Mn, Cr, Ni, Cd e Pb.

Os resultados obtidos foram submetidos a análises estatísticas, por meio do software Sistema de Análises Estatísticas e Genéticas (SAEG).

Quadro 6.1. Composição físico-química, equivalente de umidade e classe textural dos Latossolos Vermelho-amarelos de Sete Lagoas-MG e João Pinheiro-MG

Característica <sup>‡</sup>	LVA (Oratórios-MG)	LA (Linhares-ES)
pH H <sub>2</sub> O	4,5	5,2
M.O. (dag kg <sup>-1</sup> )	4,13	1,31
P (mg dm <sup>-3</sup> )	2,9	8,3
K (mg dm <sup>-3</sup> )	61	113
Ca <sup>2+</sup> (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	0,92	1,18
Mg <sup>2+</sup> (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	0,02	0,14
Al <sup>3+</sup> (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	1,46	0,61
H + Al (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	6,60	4,20
SB (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	1,10	1,61
(t) (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	2,56	2,22
(T) (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	7,70	5,81
V (%)	14,24	27,70
m (%)	57,12	27,49
P-rem (mg L <sup>-1</sup> )	18,4	38,4
Zn (mg dm <sup>-3</sup> )	8,07	5,02
Fe (mg dm <sup>-3</sup> )	55,2	33,7
Mn (mg dm <sup>-3</sup> )	8,3	5,1
Cu (mg dm <sup>-3</sup> )	6,20	2,03
Areia Grossa (dag kg <sup>-1</sup> )	26	79
Areia Fina (dag kg <sup>-1</sup> )	10	8
Silte (dag kg <sup>-1</sup> )	10	1
Argila (dag kg <sup>-1</sup> )	54	12
Equivalente de umidade (kg kg <sup>-1</sup> )	0,292	0,057
Classe Textural	Argila	Areia-Franca

<sup>‡</sup> Média de três repetições;

pH em água relação 1:25; M.O.: Método Walkley & Black (M.O. = 1,724 x Carbono Orgânico); P, K, Fe, Zn, Mn e Cu: Extrator Mehlich 1; Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup> e Al<sup>3+</sup>: Extrator KCl 1mol L<sup>-1</sup>; H + Al: Extrator Acetato de Cálcio 0,5 mol L<sup>-1</sup> a pH = 7,0; SB: Soma de Bases; CTC (t): Capacidade de Troca Catiônica Efetiva; CTC (T): Capacidade de Troca Catiônica a pH = 7,0; V: Índice de Saturação de Bases; m: Índice de Saturação de Alumínio; e P-rem: Fósforo Remanescente.

Quadro 6.2. Teores totais de Fe, Mn, Cr e Ni nos Latossolos Vermelho-amarelo de Oratórios-MG e Amarelo de Linhares-ES, nas profundidades de 0,20; 40-60; e 80-100 cm

<b>Característica</b> §	<b>Profundidade (cm)</b>	<b>LVA (Oratórios-MG)</b>	<b>LA (Linhares-ES)</b>
Fe (g kg <sup>-1</sup> )	0 – 20	92,33 ± 5,83	11,53 ± 1,47
Mn (mg kg <sup>-1</sup> )		181,82 ± 8,19	49,02 ± 3,21
Cr (mg kg <sup>-1</sup> )		174,72 ± 7,13	8,71 ± 0,55
Ni (mg kg <sup>-1</sup> )		72,01 ± 2,18	n.d. ‡
Cd (mg kg <sup>-1</sup> )		n.d.	n.d.
Fe (g kg <sup>-1</sup> )	40 – 60	94,12 ± 3,14	14,72 ± 0,87
Mn (mg kg <sup>-1</sup> )		158,16 ± 5,02	29,72 ± 1,11
Cr (mg kg <sup>-1</sup> )		172,13 ± 4,17	n.d.
Ni (mg kg <sup>-1</sup> )		74,88 ± 1,91	n.d.
Cd (mg kg <sup>-1</sup> )		n.d.	n.d.
Fe (g kg <sup>-1</sup> )	80 – 100	98,95 ± 4,18	13,02 ± 0,73
Mn (mg kg <sup>-1</sup> )		145,72 ± 5,53	16,87 ± 0,68
Cr (mg kg <sup>-1</sup> )		176,01 ± 4,79	n.d.
Ni (mg kg <sup>-1</sup> )		77,92 ± 1,99	n.d.
Cd (mg kg <sup>-1</sup> )		n.d.	n.d.

§ Média de 3 repetições ± erro-padrão da média; e

‡ Não detectado pela técnica analítica utilizada.

Quadro 6.3. Teores disponíveis de Fe, Mn, Cr e Ni nos Latossolos Vermelho-amarelo de Oratórios-MG e Amarelo de Linhares-ES, nas profundidades de 0,20; 40-60; e 80-100 cm

<b>Característica</b> §	<b>Profundidade (cm)</b>	<b>LVA (Oratórios-MG)</b>	<b>LA (Linhares-ES)</b>
Fe (g kg <sup>-1</sup> )	0 – 20	82,51 ± 2,47	52,11 ± 3,72
Mn (mg kg <sup>-1</sup> )		24,37 ± 0,32	16,72 ± 0,31
Cr (mg kg <sup>-1</sup> )		n.d. ‡	n.d.
Ni (mg kg <sup>-1</sup> )		n.d.	n.d.
Cd (mg kg <sup>-1</sup> )		n.d.	n.d.
Fe (g kg <sup>-1</sup> )	40 – 60	68,14 ± 2,12	52,81 ± 1,07
Mn (mg kg <sup>-1</sup> )		11,02 ± 1,18	3,02 ± 0,23
Cr (mg kg <sup>-1</sup> )		n.d.	n.d.
Ni (mg kg <sup>-1</sup> )		n.d.	n.d.
Cd (mg kg <sup>-1</sup> )		n.d.	n.d.
Fe (g kg <sup>-1</sup> )	80 – 100	52,23 ± 0,97	21,02 ± 0,32
Mn (mg kg <sup>-1</sup> )		7,21 ± 0,45	3,93 ± 0,14
Cr (mg kg <sup>-1</sup> )		n.d.	n.d.
Ni (mg kg <sup>-1</sup> )		n.d.	n.d.
Cd (mg kg <sup>-1</sup> )		n.d.	n.d.

§ Média de 3 repetições ± erro-padrão da média; e

‡ Não detectado pela técnica analítica utilizada.

Quadro 6.4. Análises químicas, PN, ER e cálculo do PRNT de amostras compostas de escórias LD da CST e o calcário utilizados neste ensaio

Característica	Escórias de aciaria LD <sup>§</sup>		Calcário <sup>§</sup>
	A	B	
CaO (dag kg <sup>-1</sup> ) <sup>1/</sup>	45,53 ± 0,79	42,70 ± 0,21	36,84 ± 0,55
MgO (dag kg <sup>-1</sup> ) <sup>1/</sup>	9,80 ± 0,03	8,21 ± 0,05	11,95 ± 0,05
SiO <sub>2</sub> (dag kg <sup>-1</sup> ) <sup>2/</sup>	12,66 ± 0,24	14,69 ± 0,64	---
MnO <sub>2</sub> (dag kg <sup>-1</sup> ) <sup>3/</sup>	5,27 ± 0,12	4,42 ± 0,08	---
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (dag kg <sup>-1</sup> ) <sup>3/</sup>	21,20 ± 0,02	20,19 ± 0,17	---
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> total (dag kg <sup>-1</sup> ) <sup>3/</sup>	1,78 ± 0,16	2,40 ± 0,21	---
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> solúvel em ác. cítrico (dag kg <sup>-1</sup> ) <sup>1/</sup>	n.d. <sup>‡</sup>	n.d.	---
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> Mehlich-1 (mg kg <sup>-1</sup> ) <sup>4/</sup>	52,13 ± 2,32	43,78 ± 1,73	---
Cr (mg kg <sup>-1</sup> ) <sup>3/</sup>	745,12 ± 4,34	574,18 ± 5,69	6,29 ± 0,25
Ni (mg kg <sup>-1</sup> ) <sup>3/</sup>	28,58 ± 0,70	26,14 ± 0,41	7,12 ± 0,12
Zn (mg kg <sup>-1</sup> ) <sup>3/</sup>	70,14 ± 0,83	54,16 ± 0,56	8,14 ± 0,21
Cu (mg kg <sup>-1</sup> ) <sup>3/</sup>	34,05 ± 0,69	30,14 ± 0,90	6,78 ± 0,14
Cd (mg kg <sup>-1</sup> ) <sup>3/</sup>	5,98 ± 0,07	4,98 ± 0,07	1,07 ± 0,21
Pb (mg kg <sup>-1</sup> ) <sup>3/</sup>	n.d.	n.d.	n.d.
PN (%) <sup>1/</sup>	90,48 ± 0,54	89,04 ± 0,71	83,08 ± 0,58
ER (%) <sup>1/</sup>	75,23 ± 0,37	80,61 ± 0,53	99,28 ± 0,28
PRNT (%) <sup>1/</sup>	68,07 ± 0,73	71,78 ± 0,11	82,50 ± 0,75

<sup>§</sup> Média de 3 repetições ± erro-padrão da média;

<sup>1/</sup> EMBRAPA (1999);

<sup>2/</sup> Digestão com água régia e ácido fluorídrico em cadinhos de Teflon<sup>®</sup> fechados (HOSSNER, 1996);

<sup>3/</sup> Digestão com os ácidos fluorídrico, sulfúrico e perclórico (HOSSNER, 1996);

<sup>4/</sup> Extraído por Mehlich-1 (DEFELIPO; RIBEIRO, 1996); e

<sup>‡</sup> Não detectado pela técnica analítica utilizada.

Quadro 6.5. Quantidades de corretivos utilizadas para neutralizar a acidez dos solos, referentes à dose de 1,0 NC nos Latossolos Vermelho-amarelos de Sete Lagoas-MG e João Pinheiro-MG, calculadas segundo as recomendações para a cultura da cana-de-açúcar

Solo	Escória A	Escória B	Calcário
	Média <sup>‡</sup> (t ha <sup>-1</sup> )		
LVA Oratórios-MG	5,87	5,75	4,84
LA Linhares-ES	3,21	3,14	2,65

<sup>‡</sup> Média de três repetições. Quantidades estimadas segundo a CFSEMG (1999).

### **6.3. Resultados e discussão**

#### **6.3.1. Teores totais de metais pesados nos solos**

Foram obtidas diferenças significativas entre solos, corretivos e doses aplicadas para os teores totais de Fe e Mn na camada superficial dos solos (0-20 cm). No entanto, os teores totais de Cr e Ni diferiram significativamente apenas entre solos (Quadro 6.6). Estes resultados indicam que, apesar de conterem Cr e Ni (Quadro 6.4), as escórias não contribuem para a contaminação dos solos com estes metais pesados. Por outro lado, a contribuição das escórias nos teores totais de Mn é significativa e relevante (Quadro 6.6). Há um aumento marcante do Mn com o aumento das doses de escórias, para ambos os solos na camada de 0 20 cm de profundidade (contrastes C2, C3, C6 e C7), o que não se verifica para o calcário (Quadro 6.6). Obviamente, esta contribuição é distinta para cada escória em cada solo, razão pela qual os contrastes C4 e C5 são significativos a 1 e 5 % de probabilidade, respectivamente (Quadros 6.6 e 6.7). A contribuição das escórias para os teores totais de Fe no solo, embora discreta, é significativa apenas para o LVA de Oratórios-MG (contrastes C2 e C6) (Quadros 6.6 e 6.7).

As diferenças entre solos se mantêm significativas para os teores totais de Fe, Mn, Cr e Ni, nas profundidades de 40-60 cm (Quadros 6.8 e 6.9) e de 80-100 cm (Quadros 6.10 e 6.11). No entanto, não há efeito significativo de corretivos ou doses sobre os teores destes metais pesados nas camadas mais profundas dos solos. Isto indica que as diferenças são decorrências naturais dos fatores de formação dos solos, possivelmente com ênfase para o material de origem. Pode-se, ainda, afirmar, com base nestes resultados, que não houve movimentação significativa de metais pesados no perfil, sendo que a contribuição das escórias para os teores de Fe e Mn se limitam à camada superficial dos solos. As diferenças significativas entre corretivos no LVA de Oratórios-MG, para Fe (doses 1,0 e 1,5 NC) e Mn (todas as doses), na profundidade de 40-60 cm (Quadros 6.8 e 6.9), se devem apenas a pequenas diferenças entre as escórias (contraste C4). Portanto, não podem ser consideradas contribuições importantes das escórias em relação ao calcário, posto que o contraste C2 não foi significativo ( $p < 0,05$ ).

Quadro 6.6. Análise de variância para teores totais de Fe, Mn, Cr e Ni nos solos tratados com as escórias e o calcário, na profundidade de 0-20 cm, após o cultivo da cana-de-açúcar

FV	GL	QM			
		Fe	Mn	Cr	Ni
Blocos (B)	2	0,0305 <sup>n.s.</sup>	87,9834 <sup>n.s.</sup>	615,3179*	1.464,2620**
Solos (S)	1	117.931,5000**	388.987,8000**	491.327,9000**	86.046,4800**
Corretivos (C)	2	0,4308*	11.626,8700**	1,8981 <sup>n.s.</sup>	0,9306 <sup>n.s.</sup>
Doses (D)	3	0,5412*	8.606,7180**	2,1276 <sup>n.s.</sup>	9,6861 <sup>n.s.</sup>
D x C	6	0,1184 <sup>n.s.</sup>	2.339,6520**	1,2374 <sup>n.s.</sup>	4,4124 <sup>n.s.</sup>
D x S	3	0,0680 <sup>n.s.</sup>	745,8265**	2,2473 <sup>n.s.</sup>	9,6813 <sup>n.s.</sup>
C x S	2	0,1259 <sup>n.s.</sup>	1.566,4860**	1,1812 <sup>n.s.</sup>	0,9306 <sup>n.s.</sup>
D x C x S	6	0,0275 <sup>n.s.</sup>	294,4571**	0,4013 <sup>n.s.</sup>	4,4124 <sup>n.s.</sup>
S/C = Esc. A x D = 0,0 NC	1	9.794,4470**	26.041,9200**	41.334,3900**	7.499,3040**
S/C = Esc. A x D = 0,5 NC	1	9.834,4990**	37.200,2800**	41.280,3000**	6.938,1000**
S/C = Esc. A x D = 1,0 NC	1	9.842,2440**	39.998,0100**	40.460,4300**	7.561,8040**
S/C = Esc. A x D = 1,5 NC	1	9.874,3200**	57.406,4100**	41.721,8100**	6.993,7190**
S/C = Esc. B x D = 0,0 NC	1	9.796,4140**	26.662,6700**	40.960,3400**	7.681,5120**
S/C = Esc. B x D = 0,5 NC	1	9.822,3300**	30.404,1800**	40.883,3000**	7.468,8660**
S/C = Esc. B x D = 1,0 NC	1	9.878,7920**	36.892,2300**	40.676,6000**	6.726,4910**
S/C = Esc. B x D = 1,5 NC	1	9.933,2790**	40.189,2400**	40.797,4700**	6.877,2810**
S/C = Calc. x D = 0,0 NC	1	9.794,7100**	25.859,1500**	41.016,2700**	7.533,5410**
S/C = Calc. x D = 0,5 NC	1	9.791,9340**	24.092,4000**	41.080,8300**	7.360,5890**
S/C = Calc. x D = 1,0 NC	1	9.778,8700**	26.985,3600**	40.133,8100**	6.505,8060**
S/C = Calc. x D = 1,5 NC	1	9.790,2650**	24.393,1300**	40.993,9100**	6.956,8720**
C/S1 e D = 0,0 NC	2	0,0000 <sup>n.s.</sup>	1,6244 <sup>n.s.</sup>	0,5730 <sup>n.s.</sup>	0,6173 <sup>n.s.</sup>
C/S1 e D = 0,5 NC	2	0,0320 <sup>n.s.</sup>	1.310,9650**	1,9471 <sup>n.s.</sup>	5,4729 <sup>n.s.</sup>
C/S1 e D = 1,0 NC	2	0,2143 <sup>n.s.</sup>	4.001,0080**	2,1394 <sup>n.s.</sup>	21,9896 <sup>n.s.</sup>
C/S1 e D = 1,5 NC	2	0,6103*	11.810,0000**	2,1031 <sup>n.s.</sup>	0,2554 <sup>n.s.</sup>
C/S2 e D = 0,0 NC	2	0,0001 <sup>n.s.</sup>	0,4891 <sup>n.s.</sup>	0,0081 <sup>n.s.</sup>	—
C/S2 e D = 0,5 NC	2	0,0006 <sup>n.s.</sup>	94,2037 <sup>n.s.</sup>	0,5721 <sup>n.s.</sup>	—
C/S2 e D = 1,0 NC	2	0,0361 <sup>n.s.</sup>	1.352,3010**	0,3999 <sup>n.s.</sup>	—
C/S2 e D = 1,5 NC	2	0,1009 <sup>n.s.</sup>	2.525,0970**	0,2546 <sup>n.s.</sup>	—
Resíduo	46	0,1215	66,3476	144,4241	104,8411
CV (%)		0,212	5,883	13,147	29,619
C1	1	117.931,5000**	388.387,8000**	491.327,8000**	86.046,4700**
C2	1	0,9809**	19.022,2100**	3,1651 <sup>n.s.</sup>	3,1824 <sup>n.s.</sup>
C3	1	0,0986 <sup>n.s.</sup>	4.282,4340**	0,3488 <sup>n.s.</sup>	—
C4	1	0,0011 <sup>n.s.</sup>	2.682,9730**	2,6019 <sup>n.s.</sup>	0,5398 <sup>n.s.</sup>
C5	1	0,0328 <sup>n.s.</sup>	399,1137*	0,0428 <sup>n.s.</sup>	—
C6	1	0,8478*	11.802,1200**	0,0346 <sup>n.s.</sup>	43,5754 <sup>n.s.</sup>
C7	1	0,2075 <sup>n.s.</sup>	3.260,7800**	1,6891 <sup>n.s.</sup>	0,0000 <sup>n.s.</sup>

Esc A = escória A; Esc. B = escória B; Calc. = calcário; S1 = Latossolo Vermelho-amarelo de Sete Lagoas-MG; e S2 = Latossolo Vermelho-amarelo de João Pinheiro-MG; e NC = necessidade de calagem (CFSEMG, 1999).

C1 = m S1 vs m S2; C2 = S1/ 2m Calc. vs m Esc.A + m Esc. B; C3 = S2/ 2m Calc. vs m Esc.A + m Esc. B; C4 = S1/ m Esc.A vs m Esc. B; C5 = S2/ m Esc.A vs m Esc. B; C6 = S1/ 3 m D 0,0 vs m D 0,5 + m D 1,0 + m D 1,5; e C7 = S2/ 3 m D 0,0 vs m D 0,5 + m D 1,0 + m D 1,5.

<sup>n.s.</sup> coeficientes não-significativos; \*\* e \* coeficientes significativos a 1 e 5 %, respectivamente.

Em síntese, os resultados obtidos para os teores totais, não revelam qualquer contaminação preocupante por metais pesados tóxicos ou nocivos ao meio ambiente, restringindo-se a contribuições de Fe e Mn pelas escórias na camada superficial dos solos. Estes resultados revelam um panorama favorável e seguro, do ponto de vista ambiental, para o uso das escórias como corretivos da acidez dos solos, até aproximadamente 18 meses após sua aplicação. Não obstante, há que se considerar a possibilidade de acúmulo destes metais nos

Quadro 6.7. Teores totais de Fe, Mn, Cr e Ni nos solos tratados com as escórias e o calcário, na profundidade de 0-20 cm, após o cultivo da cana-de-açúcar

Solo	Corretivo	Dose (NC)	Fe	Mn	Cr	Ni	
			..... g kg <sup>-1</sup> § .....	..... mg kg <sup>-1</sup> § .....	..... mg kg <sup>-1</sup> § .....	..... mg kg <sup>-1</sup> § .....	
1	Esc. A	0,0	92,30 ± 4,1E-03	180,58 ± 1,24	174,45 ± 10,72	70,71 ± 13,78	
		0,5	92,56 ± 9,7E-02	218,60 ± 2,50	175,52 ± 12,89	68,01 ± 12,51	
		1,0	92,80 ± 6,6E-02	253,52 ± 0,08	172,99 ± 12,10	71,00 ± 13,75	
		1,5	93,03 ± 5,5E-02	302,46 ± 6,71	175,26 ± 14,58	68,28 ± 7,30	
	Esc. B	0,0	92,30 ± 8,2E-03	181,35 ± 1,76	173,61 ± 8,95	71,56 ± 11,95	
		0,5	92,49 ± 8,5E-03	199,91 ± 11,82	173,98 ± 4,49	70,56 ± 10,06	
		1,0	92,79 ± 9,4E-03	234,72 ± 9,06	174,12 ± 12,10	66,97 ± 9,81	
		1,5	93,17 ± 2,6E-02	254,59 ± 13,66	173,88 ± 0,77	67,71 ± 2,85	
	Calc. A	0,0	92,30 ± 1,1E-02	179,88 ± 2,28	173,82 ± 10,92	70,87 ± 7,98	
		0,5	92,35 ± 5,6E-02	176,87 ± 2,73	174,36 ± 15,04	70,05 ± 15,84	
		1,0	92,33 ± 3,6E-02	183,00 ± 4,18	172,46 ± 8,42	65,86 ± 2,94	
		1,5	92,33 ± 3,7E-02	178,07 ± 0,87	173,75 ± 2,79	68,10 ± 5,44	
	2	Esc. A	0,0	11,49 ± 1,0E-01	48,81 ± 0,38	8,45 ± 0,17	n.d. †
			0,5	11,59 ± 2,3E-01	61,12 ± 1,29	9,63 ± 0,32	n.d.
			1,0	11,80 ± 1,3E-02	90,23 ± 1,13	8,75 ± 0,32	n.d.
			1,5	11,90 ± 3,6E-02	106,83 ± 0,83	8,48 ± 0,29	n.d.
Esc. B		0,0	11,48 ± 6,2E-02	48,03 ± 0,30	8,37 ± 0,21	n.d.	
		0,5	11,57 ± 4,2E-02	57,54 ± 3,73	8,89 ± 0,22	n.d.	
		1,0	11,64 ± 4,8E-02	77,89 ± 2,42	9,44 ± 0,28	n.d.	
		1,5	11,79 ± 6,1E-02	90,90 ± 3,13	8,96 ± 0,54	n.d.	
Calc. A		0,0	11,49 ± 7,9E-02	48,58 ± 0,10	8,46 ± 0,28	n.d.	
		0,5	11,56 ± 2,4E-02	50,13 ± 1,99	8,86 ± 0,36	n.d.	
		1,0	11,59 ± 1,9E-02	48,87 ± 0,83	8,89 ± 0,14	n.d.	
		1,5	11,54 ± 1,7E-02	50,55 ± 2,15	8,43 ± 0,23	n.d.	

§ Média de 3 repetições ± erro-padrão da média; e

† Não detectado pela técnica analítica utilizada.

solos pelo uso continuado das escórias, por longo prazo, em um mesmo local. Neste sentido, pode-se estimar qual seria a contribuição teórica das escórias com relação a estes metais nos solos. Para tanto, basta calcular os teores destes metais adicionados aos solos a partir das doses recomendadas (1,0 NC) das escórias (Quadro 6.5) e dos teores de Fe, Mn, Cr, Ni e Cd nas mesmas (Quadro 6.4). Estas estimativas revelam contribuições relativamente pequenas das escórias para os teores destes metais nos solos (Quadro 6.12).

Tendo em vista esta contribuição teórica das escórias e partindo-se da hipótese de acúmulo destes metais nos solos, pode-se calcular o número máximo de aplicações das escórias em um mesmo solo para se atingir limites de referência, considerados seguros, ou limítrofes, do ponto de vista ambiental. Para tanto, serão considerados os valores orientadores para contaminação por metais pesados estabelecidos pela CETESB (2001) para solos de São Paulo (Quadro 6.13), posto que estes ainda não foram determinados para os estados

Quadro 6.8. Análise de variância para teores totais de Fe, Mn, Cr e Ni nos solos tratados com as escórias e o calcário, na profundidade de 40-60 cm, após o cultivo da cana-de-açúcar

FV	GL	QM			
		Fe	Mn	Cr	Ni
Blocos (B)	2	26,6657 <sup>n.s.</sup>	14,2063*	202,5390 <sup>n.s.</sup>	501,40280 <sup>n.s.</sup>
Solos (S)	1	116.764,5000**	293.010,4000**	551.420,8000**	94.028,98000**
Corretivos (C)	2	0,2550 <sup>n.s.</sup>	10,1556 <sup>n.s.</sup>	1,5860 <sup>n.s.</sup>	10,17047 <sup>n.s.</sup>
Doses (D)	3	0,3634 <sup>n.s.</sup>	9,4845 <sup>n.s.</sup>	1,6529 <sup>n.s.</sup>	0,44922 <sup>n.s.</sup>
D x C	6	0,1863 <sup>n.s.</sup>	7,5372 <sup>n.s.</sup>	1,1581 <sup>n.s.</sup>	0,76049 <sup>n.s.</sup>
D x S	3	0,3054 <sup>n.s.</sup>	6,2309 <sup>n.s.</sup>	1,6529 <sup>n.s.</sup>	0,44922 <sup>n.s.</sup>
C x S	2	0,1286 <sup>n.s.</sup>	6,6656 <sup>n.s.</sup>	1,5860 <sup>n.s.</sup>	10,17047 <sup>n.s.</sup>
D x C x S	6	0,2458 <sup>n.s.</sup>	6,0422 <sup>n.s.</sup>	1,1581 <sup>n.s.</sup>	0,76049 <sup>n.s.</sup>
S/C = Esc. A x D = 0,0 NC	1	9.616,2540**	24.242,6500**	46.511,1200**	7.676,80200**
S/C = Esc. A x D = 0,5 NC	1	9.682,9600**	22.923,4100**	46.410,9000**	7.717,03500**
S/C = Esc. A x D = 1,0 NC	1	9.749,9560**	24.056,5000**	46.117,8700**	7.590,98800**
S/C = Esc. A x D = 1,5 NC	1	9.749,9510**	25.203,8400**	45.644,5800**	7.270,28800**
S/C = Esc. B x D = 0,0 NC	1	9.721,5120**	24.746,2600**	46.421,7700**	7.723,85000**
S/C = Esc. B x D = 0,5 NC	1	9.647,0100**	23.762,3900**	44.981,1800**	7.777,18000**
S/C = Esc. B x D = 1,0 NC	1	9.996,6960**	25.867,4500**	45.297,9300**	7.830,80200**
S/C = Esc. B x D = 1,5 NC	1	9.713,0260**	25.140,0100**	45.907,5900**	7.959,00400**
S/C = Calc. x D = 0,0 NC	1	9.672,1010**	24.261,2500**	—	—
S/C = Calc. x D = 0,5 NC	1	9.742,9800**	24.688,8400**	—	—
S/C = Calc. x D = 1,0 NC	1	9.682,7530**	24.395,0300**	—	—
S/C = Calc. x D = 1,5 NC	1	9.791,9190**	23.791,0700**	—	—
C/S1 e D = 0,0 NC	2	0,1058 <sup>n.s.</sup>	1,5734 <sup>n.s.</sup>	0,1856 <sup>n.s.</sup>	5,04206 <sup>n.s.</sup>
C/S1 e D = 0,5 NC	2	0,0751 <sup>n.s.</sup>	13,3730*	7,8299 <sup>n.s.</sup>	3,85987 <sup>n.s.</sup>
C/S1 e D = 1,0 NC	2	1,3629*	20,9696*	1,9031 <sup>n.s.</sup>	5,18430 <sup>n.s.</sup>
C/S1 e D = 1,5 NC	2	0,0655*	20,1955*	0,2021 <sup>n.s.</sup>	10,81760 <sup>n.s.</sup>
C/S2 e D = 0,0 NC	2	0,0161 <sup>n.s.</sup>	0,0105 <sup>n.s.</sup>	—	—
C/S2 e D = 0,5 NC	2	0,0186 <sup>n.s.</sup>	0,1848 <sup>n.s.</sup>	—	—
C/S2 e D = 1,0 NC	2	0,0219 <sup>n.s.</sup>	0,4591 <sup>n.s.</sup>	—	—
C/S2 e D = 1,5 NC	2	0,0059 <sup>n.s.</sup>	0,7936 <sup>n.s.</sup>	—	—
Resíduo	46	5,1282	4,0710	73,3607	40,69185
CV (%)		4,219	2,207	9,787	17,65200
C1	1	116.764,4000**	293.010,3000**	551.421,4000**	94.028,890**
C2	1	0,0003 <sup>n.s.</sup>	8,6782 <sup>n.s.</sup>	0,4529 <sup>n.s.</sup>	31,913 <sup>n.s.</sup>
C3	1	0,0155 <sup>n.s.</sup>	2,1088 <sup>n.s.</sup>	—	—
C4	1	0,7290*	22,8281*	5,8913 <sup>n.s.</sup>	8,769 <sup>n.s.</sup>
C5	1	0,0226 <sup>n.s.</sup>	0,0272 <sup>n.s.</sup>	—	—
C6	1	1,2826 <sup>n.s.</sup>	1,1353 <sup>n.s.</sup>	8,5173 <sup>n.s.</sup>	0,168 <sup>n.s.</sup>
C7	1	0,0699 <sup>n.s.</sup>	1,1091 <sup>n.s.</sup>	—	—

Esc A = escória A; Esc. B = escória B; Calc. = calcário; S1 = Latossolo Vermelho-amarelo de Sete Lagoas-MG; e S2 = Latossolo Vermelho-amarelo de João Pinheiro-MG; e NC = necessidade de calagem (CFSEMG, 1999).

C1 = m S1 vs m S2; C2 = S1/ 2m Calc. vs m Esc.A + m Esc. B; C3 = S2/ 2m Calc. vs m Esc.A + m Esc. B; C4 = S1/ m Esc. A vs m Esc. B; C5 = S2/ m Esc. A vs m Esc. B; C6 = S1/ 3 m D 0,0 vs m D 0,5 + m D 1,0 + m D 1,5; e C7 = S2/ 3 m D 0,0 vs m D 0,5 + m D 1,0 + m D 1,5.

<sup>n.s.</sup> coeficientes não-significativos; \*\* e \* coeficientes significativos a 1 e 5 %, respectivamente.

de Minas Gerais e Espírito Santo. A título de comparação também serão considerados os limites de acumulação de metais pesados nos solos para uso de lodos de Estações de Tratamento de Efluentes (ETE's) estabelecidos pela USEPA (1993) (Quadro 6.14).

De acordo com estas estimativas, verifica-se que serão necessárias 28 aplicações da escória A e 36 aplicações da escória B para se atingir o valor de referência para Cd estabelecido pela CETESB (2001) para o solo LVA de

Quadro 6.9. Teores totais de Fe, Mn, Cr e Ni nos solos tratados com as escórias e o calcário, na profundidade de 40-60 cm, após o cultivo da cana-de-açúcar

Solo	Corretivo	Dose (NC)	Fe	Mn	Cr	Ni
			g kg <sup>-1</sup> §	mg kg <sup>-1</sup> §	mg kg <sup>-1</sup> §	mg kg <sup>-1</sup> §
1	Esc. A	0,0	93,40 ± 1,29	154,53 ± 3,37	176,09 ± 10,98	71,54 ± 3,02
		0,5	93,78 ± 2,26	151,37 ± 0,69	175,90 ± 7,58	71,73 ± 8,47
		1,0	93,84 ± 2,01	154,61 ± 1,29	175,34 ± 10,56	71,14 ± 5,14
		1,5	94,06 ± 0,55	157,87 ± 2,70	174,44 ± 6,34	69,62 ± 7,72
	Esc. B	0,0	93,76 ± 1,79	155,75 ± 1,96	175,92 ± 10,79	71,76 ± 2,76
		0,5	93,78 ± 2,43	153,57 ± 1,21	173,17 ± 3,22	72,01 ± 10,30
		1,0	94,95 ± 2,33	159,29 ± 1,01	173,78 ± 1,22	72,25 ± 6,37
		1,5	94,00 ± 1,26	157,58 ± 1,42	174,94 ± 3,12	72,84 ± 6,98
	Calc. A	0,0	93,70 ± 1,50	154,47 ± 0,59	175,60 ± 10,45	73,89 ± 2,51
		0,5	94,06 ± 0,52	155,59 ± 1,17	176,03 ± 4,01	73,82 ± 2,67
		1,0	93,74 ± 0,59	154,82 ± 1,63	174,31 ± 6,01	73,76 ± 4,04
		1,5	94,28 ± 3,77	153,24 ± 1,55	174,81 ± 1,01	72,97 ± 8,91
2	Esc. A	0,0	13,34 ± 0,63	27,40 ± 0,05	n.d. ‡	n.d.
		0,5	13,44 ± 0,59	27,75 ± 0,02	n.d.	n.d.
		1,0	13,22 ± 0,20	27,97 ± 0,01	n.d.	n.d.
		1,5	13,44 ± 0,25	28,25 ± 0,17	n.d.	n.d.
	Esc. B	0,0	13,25 ± 0,63	27,31 ± 0,01	n.d.	n.d.
		0,5	13,59 ± 0,83	27,70 ± 0,11	n.d.	n.d.
		1,0	13,32 ± 0,62	27,97 ± 0,02	n.d.	n.d.
		1,5	13,53 ± 0,21	28,12 ± 0,02	n.d.	n.d.
	Calc. A	0,0	13,40 ± 0,58	27,29 ± 0,01	n.d.	n.d.
		0,5	13,46 ± 1,00	27,30 ± 0,03	n.d.	n.d.
		1,0	13,39 ± 0,27	27,29 ± 0,02	n.d.	n.d.
		1,5	13,48 ± 0,33	27,30 ± 0,04	n.d.	n.d.

§ Média de 3 repetições ± erro-padrão da média; e

‡ Não detectado pela técnica analítica utilizada.

Oratórios-MG (Quadro 6.15) e, respectivamente, 50 e 62 aplicações para o solo LA de Linhares-ES, posto que não foi detectada a presença deste elemento originalmente nos solos estudados. Este resultado pressupõe a possibilidade de uso das escórias por 84 anos para a escória A e 108 anos para escória B para se atingir o limite de qualidade para um solo considerado limpo (CETESB, 2001), considerando-se aplicações trianuais no LVA de Oratórios-MG. Para o LA de Linhares-ES estes tempos seriam de 150 e 182 anos, respectivamente. Para se atingir o valor de alerta para Cd, seriam necessárias 167 aplicações da escória A e 214 aplicações da escória B, respectivamente 501 e 642 anos de uso no LVA de Oratórios-MG ou 300 e 375 aplicações no LA de Linhares-ES, para os solos atingirem o limiar da contaminação, com reaplicações a cada três anos. Estes solos serão considerados contaminados por Cd com risco potencial de efeito deletério sobre a saúde humana, exigindo a adoção de medidas emergenciais visando a minimização das vias de exposição, após 555

Quadro 6.10. Análise de variância para teores totais de Fe, Mn, Cr e Ni nos solos tratados com as escórias e o calcário, na profundidade de 80-100 cm, após o cultivo da cana-de-açúcar

FV	GL	QM			
		Fe	Mn	Cr	Ni
Blocos (B)	2	254,8712**	6,50606 <sup>n.s.</sup>	253,0618**	446,4662**
Solos (S)	1	125.813,8000**	268.944,7000**	590.422,4000**	117.416,9000**
Corretivos (C)	2	0,3447 <sup>n.s.</sup>	4,6607 <sup>n.s.</sup>	0,6322 <sup>n.s.</sup>	2,5846 <sup>n.s.</sup>
Doses (D)	3	1,5483 <sup>n.s.</sup>	25,5079 <sup>n.s.</sup>	1,5544 <sup>n.s.</sup>	2,0258 <sup>n.s.</sup>
D x C	6	1,0277 <sup>n.s.</sup>	6,8178 <sup>n.s.</sup>	0,4405 <sup>n.s.</sup>	0,9965 <sup>n.s.</sup>
D x S	3	1,0007 <sup>n.s.</sup>	35,7535 <sup>n.s.</sup>	1,5544 <sup>n.s.</sup>	2,0258 <sup>n.s.</sup>
C x S	2	0,3686 <sup>n.s.</sup>	9,8499 <sup>n.s.</sup>	0,6322 <sup>n.s.</sup>	2,5846 <sup>n.s.</sup>
D x C x S	6	0,5195 <sup>n.s.</sup>	6,5270 <sup>n.s.</sup>	0,4405 <sup>n.s.</sup>	0,9965 <sup>n.s.</sup>
S/C = Esc. A x D = 0,0 NC	1	10.524,3500**	22.862,3200**	49.292,5300**	9.901,5050**
S/C = Esc. A x D = 0,5 NC	1	10.219,9900**	20.655,2800**	49.581,8800**	9.344,6360**
S/C = Esc. A x D = 1,0 NC	1	10.339,1300**	21.662,1700**	49.127,4400**	9.724,2810**
S/C = Esc. A x D = 1,5 NC	1	10.731,3100**	23.271,8000**	49.557,7800**	9.626,4640**
S/C = Esc. B x D = 0,0 NC	1	10.498,4600**	23.247,8800**	49.342,0200**	9.965,8590**
S/C = Esc. B x D = 0,5 NC	1	10.631,2900**	21.130,5000**	49.552,6800**	9.387,0410**
S/C = Esc. B x D = 1,0 NC	1	10.436,9100**	21.108,6700**	48.996,5000**	9.932,6740**
S/C = Esc. B x D = 1,5 NC	1	10.659,0700**	23.303,7700**	48.816,5400**	9.709,8520**
S/C = Calc. x D = 0,0 NC	1	10.591,8300**	23.191,6100**	49.554,6800**	9.895,4880**
S/C = Calc. x D = 0,5 NC	1	10.225,3600**	21.311,2200**	49.442,2800**	9.925,3720**
S/C = Calc. x D = 1,0 NC	1	10.485,5600**	24.081,8200**	48.343,0800**	9.807,5450**
S/C = Calc. x D = 1,5 NC	1	10.477,4400**	23.283,8100**	48.823,6500**	10.213,4400**
C/S1 e D = 0,0 NC	2	0,1312 <sup>n.s.</sup>	0,7969 <sup>n.s.</sup>	0,1962 <sup>n.s.</sup>	0,0766 <sup>n.s.</sup>
C/S1 e D = 0,5 NC	2	1,5306 <sup>n.s.</sup>	1,3143 <sup>n.s.</sup>	0,0548 <sup>n.s.</sup>	5,4350 <sup>n.s.</sup>
C/S1 e D = 1,0 NC	2	1,6483 <sup>n.s.</sup>	49,5431 <sup>n.s.</sup>	1,8121 <sup>n.s.</sup>	0,5596 <sup>n.s.</sup>
C/S1 e D = 1,5 NC	2	0,2693 <sup>n.s.</sup>	1,0392 <sup>n.s.</sup>	1,8440 <sup>n.s.</sup>	5,0767 <sup>n.s.</sup>
C/S2 e D = 0,0 NC	2	0,0010 <sup>n.s.</sup>	0,0133 <sup>n.s.</sup>	—	—
C/S2 e D = 0,5 NC	2	0,3588 <sup>n.s.</sup>	0,6449 <sup>n.s.</sup>	—	—
C/S2 e D = 1,0 NC	2	1,2715 <sup>n.s.</sup>	0,2694 <sup>n.s.</sup>	—	—
C/S2 e D = 1,5 NC	2	0,1442 <sup>n.s.</sup>	0,9240 <sup>n.s.</sup>	—	—
Resíduo	46	26,0490	35,1780	37,4385	83,8307
CV (%)		9,156	7,466	6,757	22,673
C1	1	125.813,8000**	268.944,8000**	590.423,0000**	117.417,0000**
C2	1	0,0099 <sup>n.s.</sup>	27,9228 <sup>n.s.</sup>	1,6062 <sup>n.s.</sup>	9,3212 <sup>n.s.</sup>
C3	1	0,6001 <sup>n.s.</sup>	0,9360 <sup>n.s.</sup>	—	—
C4	1	0,0127 <sup>n.s.</sup>	0,0557 <sup>n.s.</sup>	0,9224 <sup>n.s.</sup>	1,0171 <sup>n.s.</sup>
C5	1	0,8040 <sup>n.s.</sup>	0,1068 <sup>n.s.</sup>	—	—
C6	1	0,3686 <sup>n.s.</sup>	27,1225 <sup>n.s.</sup>	1,5342 <sup>n.s.</sup>	3,7646 <sup>n.s.</sup>
C7	1	0,0178 <sup>n.s.</sup>	1,5482 <sup>n.s.</sup>	—	—

Esc A = escória A; Esc. B = escória B; Calc. = calcário; S1 = Latossolo Vermelho-amarelo de Sete Lagoas-MG; e S2 = Latossolo Vermelho-amarelo de João Pinheiro-MG; e NC = necessidade de calagem (CFSEMG, 1999).

C1 = m S1 vs m S2; C2 = S1/ 2m Calc. vs m Esc.A + m Esc. B; C3 = S2/ 2m Calc. vs m Esc.A + m Esc. B; C4 = S1/ m Esc. A vs m Esc. B; C5 = S2/ m Esc. A vs m Esc. B; C6 = S1/ 3 m D 0,0 vs m D 0,5 + m D 1,0 + m D 1,5; e C7 = S2/ 3 m D 0,0 vs m D 0,5 + m D 1,0 + m D 1,5.

<sup>n.s.</sup> coeficientes não-significativos; \*\* e \* coeficientes significativos a 1 e 5 %, respectivamente.

aplicações da escória A e 714 aplicações da escória B, respectivamente 1.665 e 2.142 anos de uso no LVA de Oratórios-MG ou 1.000 e 1.250 aplicações no LA de Linhares-ES para atingir o valor de intervenção adotado pela CETESB (2001). Por outro lado, para se atingir as concentrações máximas de Cd adotadas pela USEPA (1993) para uso de lodos, serão necessárias 1.083 e 1.393 aplicações das escórias A e B, no LVA de Oratórios-MG ou 1.950 e 2.437 aplicações, no LA de Linhares-ES, respectivamente.

Quadro 6.11. Teores totais de Fe, Mn, Cr e Ni nos solos tratados com as escórias e o calcário, na profundidade de 80-100 cm, após o cultivo da cana-de-açúcar

Solo	Corretivo	Dose (NC)	Fe	Mn	Cr	Ni
			..... g kg <sup>-1</sup> §	..... mg kg <sup>-1</sup> §	..... mg kg <sup>-1</sup> §	..... mg kg <sup>-1</sup> §
1	Esc. A	0,0	97,67 ± 4,09	141,48 ± 2,79	181,28 ± 6,74	81,25 ± 2,95
		0,5	96,70 ± 4,44	136,45 ± 2,94	181,81 ± 8,84	78,93 ± 10,21
		1,0	97,33 ± 3,30	138,92 ± 4,34	180,97 ± 2,60	80,52 ± 7,94
		1,5	98,35 ± 3,81	142,70 ± 1,85	181,77 ± 2,68	80,11 ± 8,83
	Esc. B	0,0	97,55 ± 3,63	142,47 ± 2,88	181,37 ± 7,30	81,51 ± 2,28
		0,5	97,67 ± 9,19	136,87 ± 6,38	181,76 ± 5,93	79,11 ± 18,11
		1,0	96,82 ± 4,57	137,08 ± 6,25	180,73 ± 4,49	81,37 ± 5,42
		1,5	98,19 ± 6,16	143,52 ± 6,12	180,40 ± 2,34	80,46 ± 10,85
	Calc. A	0,0	97,95 ± 3,64	142,24 ± 1,62	181,76 ± 7,10	81,22 ± 2,23
		0,5	96,27 ± 2,67	137,74 ± 8,67	181,55 ± 7,07	81,34 ± 5,65
		1,0	98,28 ± 0,64	144,86 ± 2,25	179,52 ± 3,82	80,86 ± 4,39
		1,5	97,77 ± 0,88	142,38 ± 4,79	180,41 ± 2,21	82,52 ± 1,05
2	Esc. A	0,0	13,90 ± 0,30	18,03 ± 0,10	n.d. †	n.d.
		0,5	14,16 ± 0,29	19,10 ± 0,62	n.d.	n.d.
		1,0	14,31 ± 0,47	18,75 ± 0,50	n.d.	n.d.
		1,5	13,77 ± 2,79	18,14 ± 0,19	n.d.	n.d.
	Esc. B	0,0	13,89 ± 0,16	17,97 ± 0,07	n.d.	n.d.
		0,5	13,48 ± 0,39	18,18 ± 0,28	n.d.	n.d.
		1,0	13,41 ± 5,01	18,45 ± 0,55	n.d.	n.d.
		1,5	13,89 ± 0,50	18,88 ± 0,50	n.d.	n.d.
	Calc. A	0,0	13,92 ± 0,24	17,89 ± 0,04	n.d.	n.d.
		0,5	13,71 ± 0,23	18,55 ± 0,70	n.d.	n.d.
		1,0	14,68 ± 0,40	18,15 ± 0,11	n.d.	n.d.
		1,5	14,19 ± 3,31	17,79 ± 0,12	n.d.	n.d.

§ Média de 3 repetições ± erro-padrão da média; e

† Não detectado pela técnica analítica utilizada.

Quadro 6.12. Estimativa dos teores de metais pesados adicionados aos solos, pelas escórias na dose recomendada de 1,0 NC

Elemento	LVA Oratórios-MG		LA Linhares-ES	
	Escória A	Escória B	Escória A	Escória B
	..... Média † (mg kg <sup>-1</sup> ) .....			
Cd	0,018	0,014	0,010	0,008
Cr	2,187	1,651	1,196	0,901
Fe	435,202	406,008	237,989	221,715
Mn	96,855	80,299	52,965	43,850
Ni	0,084	0,075	0,046	0,041

† Média de três repetições.

Quadro 6.13. Valores orientadores para contaminação de solos por metais pesados no estado de São Paulo

Elemento	Valores Orientadores		
	Referência	Alerta	Intervenção
		mg kg <sup>-1</sup>	
Cd	< 0,5	3	10
Cr	40	75	300
Fe	—	—	—
Mn	—	—	—
Ni	13	30	50

Fonte: adaptado de CETESB (2001).

Quadro 6.14. Concentrações máximas admissíveis de poluentes no lodo e nos solos que receberam lodo, nos EUA

Elemento	Conc. máxima no lodo	Conc. média	Limites de	
			acumulação no solo	aplicação anual no solo
			mg kg <sup>-1</sup> §	
Cd	85	39	19,5	0,95
Cr	3.000	1.200	1.500	75,00
Fe	—	—	—	—
Mn	—	—	—	—
Ni	420	420	210	10,50

§ Em mg do poluente por kg de lodo (em bases secas); e  
Fonte: USEPA (1993).

Quadro 6.15. Estimativas do número máximo de aplicações, com base na contribuição teórica das escórias e nos valores orientadores e limites de acumulação para contaminação dos solos

Solo	Elemento	Valores Orientadores <sup>§</sup>						Limite de acumulação <sup>‡</sup>	
		Referência		Alerta		Intervenção		Esc. A	Esc. B
		Esc. A <sup>1/</sup>	Esc. B <sup>2/</sup>	Esc. A	Esc. B	Esc. A	Esc. B		
1	Cd	28	36	167	214	555	714	1.083	1.393
	Cr	n.d. <sup>3/</sup>	n.d.	n.d.	n.d.	57	76	608	803
	Ni	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	1.643	1.840
2	Cd	50	62	300	375	1.000	1.250	1.950	2.437
	Cr	26	34	55	73	242	323	1.242	1.657
	Ni	283	317	652	732	1.087	1.219	4.565	5.122

Solo 1 = LVA de Oratórios-MG e Solo 2 = LA de Linhares-ES.

§ CETESB (2001);

‡ USEPA (1993);

<sup>1/</sup> Escória A;

<sup>2/</sup> Escória B; e

<sup>3/</sup> Não estimados, posto que os teores originais no solo já eram superior ao valor em questão.

Para o Ni, os teores originais do LVA de Oratórios-MG, já ultrapassam os valores de referência, alerta e intervenção adotados pela CETESB (2001). Portanto, de acordo com estes critérios este solo já estaria naturalmente contaminado. Isto, no entanto, é questionável posto que este solo é proveniente de região pouco industrializada e vem sendo utilizado para a produção agrícola, sem qualquer relato de efeito deletério ao meio ambiente ou à saúde humana e animal. Neste caso, só é possível projetar o uso das escórias, em longo prazo, para atingir o limite de acumulação adotado pela USEPA (1993). De acordo com este critério, as escórias poderiam ser utilizadas por 4.944 e 5.520 anos, respectivamente, 1.648 e 1.840 aplicações trianuais para as escórias A e B. Para o LA de Linhares-ES, cujos teores originais de Ni estão abaixo do limite de detecção (Quadro 6.2), pode-se projetar no mínimo 283 e 317 aplicações das escórias A e B, respectivamente, para se atingir o valor de referência da CETESB. De acordo com o critério adotado pela USEPA para uso de lodos no solo, seriam admissíveis no máximo 4.565 e 5.122 aplicações das escórias A e B, respectivamente (Quadro 6.15).

O cenário mais restritivo para uso das escórias decorre das estimativas feitas com base nos teores de Cr, já que este é o metal pesado em maiores concentrações, entre aqueles considerados mais tóxicos, tanto nos solos (Quadro 6.2) quanto nas escórias (Quadro 6.4). Neste caso, para o LVA de Oratórios-MG, cujos teores originais já ultrapassam os valores de referência e alerta, seriam necessárias 57 aplicações da escória A ou 76 aplicações da escória B para se atingir o valor de Intervenção da CETESB. Para o LA de Linhares-ES seriam admissíveis, no mínimo, 26 aplicações da escória A e 34 aplicações da escória B, pelo critério do valor de referência da CETESB e, no máximo, 1.242 e 1.657 aplicações das escórias A e B, respectivamente, adotando o critério mais permissivo da USEPA (1993) (Quadro 6.15).

Diante destas estimativas e dos critérios adotados, pode-se considerar que o uso das escórias é seguro, do ponto de vista ambiental, para prazos de até décadas com dezenas de aplicações trianuais, para os solos considerados, tendo em vista o Cr que é o elemento mais limitante dentre os considerados neste trabalho. Tais estimativas, entretanto, devem ser revistas para cada situação particular, posto que dependem dos teores de metais pesados originalmente presentes nos solos. Neste sentido, sugere-se o monitoramento

dos solos em estudos de longa duração, particularmente quanto aos teores de Cr e Ni.

### **6.3.2. Teores disponíveis de metais pesados nos solos**

De modo geral, não houve efeito significativo dos corretivos ou doses aplicadas sobre os teores de Fe disponível na camada superficial dos solos, apenas com diferenças marcantes entre solos (Quadros 6.16 e 6.17). Por outro lado, o Mn disponível é influenciado significativamente por tipos e doses dos corretivos (Quadro 6.16), sendo que as escórias contribuem para aumentar o Mn disponível em ambos os solos, mas principalmente no LVA de Oratórios-MG (Quadro 6.17).

As diferenças significativas entre solos se mantêm, para Fe e Mn, mas os efeitos das escórias sobre o Mn disponível desaparecem para maiores profundidades (Quadros 6.18, 6.19, 6.20 e 6.21). Estes resultados corroboram as idéias já discutidas para os teores totais, revelando que não houve translocação importante de metais no perfil dos solos. Os demais metais pesados, não foram detectados nos solos em formas disponíveis por Mehlich-3.

Os resultados para teores disponíveis reafirmam um panorama seguro, do ponto vista ambiental, para uso das escórias no curto prazo, quanto a contaminação por metais pesados. Não obstante o aumento de Mn disponível na camada superficial dos solos poderá causar problemas futuros. Se por um lado, as plantas podem se beneficiar da presença do Mn nas escórias em solos que apresentem deficiências deste micronutriente, por outro lado o uso continuado das escórias pode provocar acúmulo de Mn a níveis tóxicos para as plantas em solos já naturalmente ricos neste elemento. Neste sentido, valem as mesmas recomendações, já feitas anteriormente, de monitoramento do Mn nos solos corrigidos com escórias por longo prazo. O aparecimento de sintomas de toxidez de Mn nas plantas cultivadas deve ser tomado como sinal de alerta para considerar a possibilidade de suspender, pelo menos temporariamente, o uso das escórias nestas áreas.

Quadro 6.16. Análise de variância para teores disponíveis de Fe, Mn, Cr e Ni nos solos tratados com as escórias e o calcário, na profundidade de 0-20 cm, após o cultivo da cana-de-açúcar

FV	GL	Fe	Mn
Blocos (B)	2	8,94022 <sup>n.s.</sup>	0,58654 <sup>n.s.</sup>
Solos (S)	1	14.259,62000**	1.382,49500**
Corretivos (C)	2	6,26691 <sup>n.s.</sup>	19,62105**
Doses (D)	3	0,40566 <sup>n.s.</sup>	17,76589*
D x C	6	4,70033 <sup>n.s.</sup>	2,59968 <sup>n.s.</sup>
D x S	3	14,48057 <sup>n.s.</sup>	1,00530 <sup>n.s.</sup>
C x S	2	18,92368 <sup>n.s.</sup>	2,73770 <sup>n.s.</sup>
D x C x S	6	22,68832 <sup>n.s.</sup>	0,46526 <sup>n.s.</sup>
S/C = Esc. A x D = 0,0 NC	1	1.310,66600**	113,45710**
S/C = Esc. A x D = 0,5 NC	1	1.128,32500**	109,32550**
S/C = Esc. A x D = 1,0 NC	1	1.236,65300**	126,60980**
S/C = Esc. A x D = 1,5 NC	1	771,57920**	173,67020**
S/C = Esc. B x D = 0,0 NC	1	1.156,62300**	116,44850**
S/C = Esc. B x D = 0,5 NC	1	1.045,51000**	111,98740**
S/C = Esc. B x D = 1,0 NC	1	650,51650**	130,94900**
S/C = Esc. B x D = 1,5 NC	1	1.274,36000**	126,26860**
S/C = Calc. x D = 0,0 NC	1	1.402,83500**	103,46400**
S/C = Calc. x D = 0,5 NC	1	1.135,33700**	91,19396**
S/C = Calc. x D = 1,0 NC	1	1.705,01600**	85,50189**
S/C = Calc. x D = 1,5 NC	1	1.259,61900**	104,90210**
C/S1 e D = 0,0 NC	2	3,20363 <sup>n.s.</sup>	0,21259 <sup>n.s.</sup>
C/S1 e D = 0,5 NC	2	5,41943 <sup>n.s.</sup>	3,07880 <sup>n.s.</sup>
C/S1 e D = 1,0 NC	2	20,26909 <sup>n.s.</sup>	10,35018 <sup>n.s.</sup>
C/S1 e D = 1,5 NC	2	6,69550 <sup>n.s.</sup>	10,15755 <sup>n.s.</sup>
C/S2 e D = 0,0 NC	2	0,32875 <sup>n.s.</sup>	0,00281 <sup>n.s.</sup>
C/S2 e D = 0,5 NC	2	8,50130 <sup>n.s.</sup>	1,36429 <sup>n.s.</sup>
C/S2 e D = 1,0 NC	2	48,24704 <sup>n.s.</sup>	2,26378 <sup>n.s.</sup>
C/S2 e D = 1,5 NC	2	14,69185 <sup>n.s.</sup>	4,12357 <sup>n.s.</sup>
Resíduo	46	34,24149	3,49709
CV (%)		8,83400	9,02730
C1	1	14.259,610**	1.382,495**
C2	1	4,255 <sup>n.s.</sup>	33,318**
C3	1	44,043 <sup>n.s.</sup>	6,488 <sup>n.s.</sup>
C4	1	1,171 <sup>n.s.</sup>	1,326 <sup>n.s.</sup>
C5	1	0,912 <sup>n.s.</sup>	3,586 <sup>n.s.</sup>
C6	1	17,059 <sup>n.s.</sup>	15,256*
C7	1	25,115 <sup>n.s.</sup>	11,246*

Esc A = escória A; Esc. B = escória B; Calc. = calcário; S1 = Latossolo Vermelho-amarelo de Sete Lagoas-MG; e S2 = Latossolo Vermelho-amarelo de João Pinheiro-MG; e NC = necessidade de calagem.

C1 = m S1 vs m S2; C2 = S1/ 2m Calc. vs m Esc.A + m Esc. B; C3 = S2/ 2m Calc. vs m Esc.A + m Esc. B; C4 = S1/ m Esc.A vs m Esc. B; C5 = S2/ m Esc.A vs m Esc. B; C6 = S1/ 3 m D 0,0 vs m D 0,5 + m D 1,0 + m D 1,5; e C7 = S2/ 3 m D 0,0 vs m D 0,5 + m D 1,0 + m D 1,5.

<sup>n.s.</sup> coeficientes não-significativos; \*\* e \* coeficientes significativos a 1 e 5 %, respectivamente.

Quadro 6.17. Teores disponíveis de Fe e Mn nos solos tratados com as escórias e calcário, na profundidade de 0-20, após o cultivo da cana-de-açúcar

Solo	Corretivo	Dose (NC)	Fe		Mn	
			mg dm <sup>-3</sup> §			
1	Esc. A	0,0	80,64 ± 2,81	24,03 ± 1,03		
		0,5	80,73 ± 3,57	24,26 ± 2,86		
		1,0	79,82 ± 1,91	26,06 ± 1,12		
		1,5	78,20 ± 1,58	27,83 ± 0,74		
	Esc. B	0,0	82,65 ± 1,78	24,20 ± 1,02		
		0,5	80,21 ± 3,13	25,54 ± 1,21		
		1,0	77,69 ± 2,21	26,60 ± 1,54		
		1,5	80,62 ± 2,43	27,72 ± 0,10		
	Calc. A	0,0	81,22 ± 2,50	23,68 ± 0,99		
		0,5	78,18 ± 6,76	23,54 ± 1,35		
		1,0	82,86 ± 3,67	23,14 ± 1,13		
		1,5	80,93 ± 7,58	24,59 ± 1,05		
2	Esc. A	0,0	51,08 ± 1,30	15,33 ± 0,22		
		0,5	53,30 ± 4,77	15,72 ± 0,67		
		1,0	51,11 ± 1,98	16,87 ± 1,43		
		1,5	55,52 ± 2,68	17,07 ± 0,35		
	Esc. B	0,0	50,44 ± 0,87	15,39 ± 0,22		
		0,5	53,81 ± 3,23	16,90 ± 1,52		
		1,0	56,86 ± 2,81	17,25 ± 0,62		
		1,5	51,47 ± 2,43	18,54 ± 0,34		
	Calc. A	0,0	50,64 ± 0,56	15,37 ± 0,11		
		0,5	50,67 ± 4,00	15,74 ± 0,53		
		1,0	49,15 ± 3,30	15,59 ± 0,14		
		1,5	51,95 ± 2,08	16,22 ± 0,24		

§ Média de 3 repetições ± erro-padrão da média.

Quadro 6.18. Análise de variância para teores disponíveis de Fe, Mn, Cr e Ni nos solos tratados com as escórias e o calcário, na profundidade de 40-60 cm, após o cultivo da cana-de-açúcar

FV	GL	QM	QM
		Fe	Mn
Blocos(B)	2	97,91792 <sup>n.s.</sup>	2,40774 <sup>n.s.</sup>
Solos (S)	1	3.022,64400**	632,25250**
Corretivos (C)	2	1,12047 <sup>n.s.</sup>	0,48348 <sup>n.s.</sup>
Doses (D)	3	4,46125 <sup>n.s.</sup>	1,71844 <sup>n.s.</sup>
D x C	6	2,56823 <sup>n.s.</sup>	0,31888 <sup>n.s.</sup>
D x S	3	15,91266 <sup>n.s.</sup>	1,57859 <sup>n.s.</sup>
C x S	2	0,22962 <sup>n.s.</sup>	0,24744 <sup>n.s.</sup>
D x C x S	6	6,19952 <sup>n.s.</sup>	0,31824 <sup>n.s.</sup>
S/C = Esc. A x D = 0,0 NC	1	307,63880*	45,53482**
S/C = Esc. A x D = 0,5 NC	1	281,42650*	54,09544**
S/C = Esc. A x D = 1,0 NC	1	164,76460 <sup>n.s.</sup>	55,42485**
S/C = Esc. A x D = 1,5 NC	1	300,92970*	42,10138**
S/C = Esc. B x D = 0,0 NC	1	301,76370*	45,40181**
S/C = Esc. B x D = 0,5 NC	1	372,34330**	67,92735**
S/C = Esc. B x D = 1,0 NC	1	139,95100 <sup>n.s.</sup>	74,35345**
S/C = Esc. B x D = 1,5 NC	1	198,72060*	41,25785**
S/C = Calc. x D = 0,0 NC	1	334,77560**	45,75515**
S/C = Calc. x D = 0,5 NC	1	161,56270 <sup>n.s.</sup>	74,12016**
S/C = Calc. x D = 1,0 NC	1	167,54340 <sup>n.s.</sup>	47,94226**
S/C = Calc. x D = 1,5 NC	1	376,61930**	45,47801**
C/S1 e D = 0,0 NC	2	0,46403 <sup>n.s.</sup>	0,02860 <sup>n.s.</sup>
C/S1 e D = 0,5 NC	2	11,79383 <sup>n.s.</sup>	0,74562 <sup>n.s.</sup>
C/S1 e D = 1,0 NC	2	0,36115 <sup>n.s.</sup>	1,70943 <sup>n.s.</sup>
C/S1 e D = 1,5 NC	2	11,63221 <sup>n.s.</sup>	0,08555 <sup>n.s.</sup>
C/S2 e D = 0,0 NC	2	0,02199 <sup>n.s.</sup>	0,03143 <sup>n.s.</sup>
C/S2 e D = 0,5 NC	2	1,70424 <sup>n.s.</sup>	0,02052 <sup>n.s.</sup>
C/S2 e D = 1,0 NC	2	0,07309 <sup>n.s.</sup>	0,01437 <sup>n.s.</sup>
C/S2 e D = 1,5 NC	2	1,60281 <sup>n.s.</sup>	0,00676 <sup>n.s.</sup>
Resíduo	46	45,07034	2,38096
CV (%)		11,86100	24,53000
C1	1	3.022,646**	632,252**
C2	1	0,758 <sup>n.s.</sup>	0,005 <sup>n.s.</sup>
C3	1	0,959 <sup>n.s.</sup>	0,006 <sup>n.s.</sup>
C4	1	0,001 <sup>n.s.</sup>	1,413 <sup>n.s.</sup>
C5	1	0,982 <sup>n.s.</sup>	0,038 <sup>n.s.</sup>
C6	1	1,914 <sup>n.s.</sup>	0,778 <sup>n.s.</sup>
C7	1	15,145 <sup>n.s.</sup>	0,309 <sup>n.s.</sup>

Esc A = escória A; Esc. B = escória B; Calc. = calcário; S1 = Latossolo Vermelho-amarelo de Sete Lagoas-MG; e S2 = Latossolo Vermelho-amarelo de João Pinheiro-MG; e NC = necessidade de calagem.

C1 = m S1 vs m S2; C2 = S1/ 2m Calc. vs m Esc.A + m Esc. B; C3 = S2/ 2m Calc. vs m Esc.A + m Esc. B; C4 = S1/ m Esc. A vs m Esc. B; C5 = S2/ m Esc. A vs m Esc. B; C6 = S1/ 3 m D 0,0 vs m D 0,5 + m D 1,0 + m D 1,5; e C7 = S2/ 3 m D 0,0 vs m D 0,5 + m D 1,0 + m D 1,5.

<sup>n.s.</sup> coeficientes não-significativos; \*\*, e \* coeficientes significativos a 1 e 5 %, respectivamente.

Quadro 6.19. Teores disponíveis de Fe e Mn nos solos tratados com as escórias e o calcário, na profundidade de 40-60 cm, após o cultivo da cana-de-açúcar

Solo	Corretivo	Dose (NC)	Fe		Mn	
			mg dm <sup>-3</sup> §			
1	Esc. A	0,0	63,23 ± 1,58	8,90 ± 0,81		
		0,5	64,10 ± 1,16	9,33 ± 0,40		
		1,0	61,68 ± 6,70	9,31 ± 0,46		
		1,5	62,86 ± 1,89	8,54 ± 0,41		
	Esc. B	0,0	63,27 ± 1,59	9,10 ± 1,09		
		0,5	65,89 ± 4,85	10,12 ± 1,89		
		1,0	61,13 ± 2,06	10,41 ± 1,58		
		1,5	61,65 ± 0,16	8,40 ± 0,21		
	Calc. A	0,0	63,93 ± 0,54	9,00 ± 1,08		
		0,5	61,93 ± 1,88	10,25 ± 1,17		
		1,0	61,77 ± 3,24	8,96 ± 2,79		
		1,5	65,50 ± 0,24	8,73 ± 0,20		
2	Esc. A	0,0	48,91 ± 7,74	3,39 ± 0,17		
		0,5	50,40 ± 6,03	3,32 ± 0,10		
		1,0	51,20 ± 2,40	3,23 ± 0,08		
		1,5	48,70 ± 5,49	3,24 ± 0,13		
	Esc. B	0,0	49,08 ± 7,75	3,60 ± 0,12		
		0,5	50,14 ± 2,70	3,39 ± 0,17		
		1,0	51,47 ± 0,69	3,37 ± 0,16		
		1,5	50,14 ± 1,20	3,15 ± 0,08		
	Calc. A	0,0	48,99 ± 7,80	3,47 ± 0,25		
		0,5	51,55 ± 1,34	3,22 ± 0,09		
		1,0	51,20 ± 4,13	3,31 ± 0,10		
		1,5	49,65 ± 0,46	3,23 ± 0,02		

§ Média de 3 repetições ± erro-padrão da média.

Quadro 6.20. Análise de variância para teores disponíveis de Fe, Mn, Cr e Ni nos solos tratados com as escórias e o calcário, na profundidade de 80-100 cm, após o cultivo da cana-de-açúcar

FV	GL	Fe	Mn
Blocos(B)	2	21,16523 <sup>n.s.</sup>	0,13873 <sup>n.s.</sup>
Solos (S)	1	14.925,60000**	457,71640**
Corretivos (C)	2	1,82647 <sup>n.s.</sup>	0,02751 <sup>n.s.</sup>
Doses (D)	3	7,51970 <sup>n.s.</sup>	0,15091*
D x C	6	1,38575 <sup>n.s.</sup>	0,14822*
D x S	3	4,39188 <sup>n.s.</sup>	0,08735 <sup>n.s.</sup>
C x S	2	24,19100 <sup>n.s.</sup>	0,05256 <sup>n.s.</sup>
D x C x S	6	4,36547 <sup>n.s.</sup>	0,07491 <sup>n.s.</sup>
S/C = Esc. A x D = 0,0 NC	1	1.314,62600**	38,15405 <sup>n.s.</sup>
S/C = Esc. A x D = 0,5 NC	1	1.479,50000**	48,25053**
S/C = Esc. A x D = 1,0 NC	1	1.362,64300**	37,38778**
S/C = Esc. A x D = 1,5 NC	1	1.605,32800**	35,88025**
S/C = Esc. B x D = 0,0 NC	1	1.300,45000**	34,52169**
S/C = Esc. B x D = 0,5 NC	1	1.024,53000**	38,45663**
S/C = Esc. B x D = 1,0 NC	1	937,71780**	35,65024**
S/C = Esc. B x D = 1,5 NC	1	1.129,01400**	40,03135**
S/C = Calc. x D = 0,0 NC	1	1.312,06500**	36,51224**
S/C = Calc. x D = 0,5 NC	1	995,26460**	37,44901**
S/C = Calc. x D = 1,0 NC	1	1.285,77400**	38,90476**
S/C = Calc. x D = 1,5 NC	1	1.266,44400**	37,33455**
C/S1 e D = 0,0 NC	2	0,29654 <sup>n.s.</sup>	0,00180 <sup>n.s.</sup>
C/S1 e D = 0,5 NC	2	9,82577 <sup>n.s.</sup>	0,29657**
C/S1 e D = 1,0 NC	2	7,17130 <sup>n.s.</sup>	0,08182 <sup>n.s.</sup>
C/S1 e D = 1,5 NC	2	9,96995 <sup>n.s.</sup>	0,10382 <sup>n.s.</sup>
C/S2 e D = 0,0 NC	2	0,16411 <sup>n.s.</sup>	0,03186 <sup>n.s.</sup>
C/S2 e D = 0,5 NC	2	5,66942 <sup>n.s.</sup>	0,13962 <sup>n.s.</sup>
C/S2 e D = 1,0 NC	2	4,37853 <sup>n.s.</sup>	0,08700 <sup>n.s.</sup>
C/S2 e D = 1,5 NC	2	5,79550 <sup>n.s.</sup>	0,00695 <sup>n.s.</sup>
Resíduo	46	25,89172	0,04726
CV (%)		12,48000	3,66610
C1	1	14.925,600**	457,716**
C2	1	0,002 <sup>n.s.</sup>	0,003 <sup>n.s.</sup>
C3	1	2,425 <sup>n.s.</sup>	0,012 <sup>n.s.</sup>
C4	1	35,688 <sup>n.s.</sup>	0,142 <sup>n.s.</sup>
C5	1	13,919 <sup>n.s.</sup>	0,002 <sup>n.s.</sup>
C6	1	0,954 <sup>n.s.</sup>	0,065 <sup>n.s.</sup>
C7	1	2,578 <sup>n.s.</sup>	0,440 <sup>n.s.</sup>

Esc A = escória A; Esc. B = escória B; Calc. = calcário; S1 = Latossolo Vermelho-amarelo de Sete Lagoas-MG; e S2 = Latossolo Vermelho-amarelo de João Pinheiro-MG; e NC = necessidade de corretivos.

C1 = m S1 vs m S2; C2 = S1/ 2m Calc. vs m Esc.A + m Esc. B; C3 = S2/ 2m Calc. vs m Esc.A + m Esc. B; C4 = S1/ m Esc. A vs m Esc. B; C5 = S2/ m Esc. A vs m Esc. B; C6 = S1/ 3 m D 0,0 vs m D 0,5 + m D 1,0 + m D 1,5; e C7 = S2/ 3 m D 0,0 vs m D 0,5 + m D 1,0 + m D 1,5.

<sup>n.s.</sup> coeficientes não-significativos; \*\* e \* coeficientes significativos a 1 e 5 %, respectivamente.

Quadro 6.21. Teores disponíveis de Fe e Mn nos solos tratados com as escórias e calcário, na profundidade de 80-100 cm, extraídos por Mehlich-3, após o cultivo da cana-de-açúcar

Solo	Corretivo	Dose (NC)	Fe		Mn	
			mg dm <sup>-3</sup> §			
1	Esc. A	0,0	55,75 ± 3,69	8,54 ± 0,07		
		0,5	57,43 ± 5,20	8,81 ± 0,09		
		1,0	55,07 ± 3,96	8,54 ± 0,09		
		1,5	57,33 ± 1,54	8,25 ± 0,08		
	Esc. B	0,0	55,13 ± 2,84	8,50 ± 0,04		
		0,5	54,65 ± 0,47	8,18 ± 0,05		
		1,0	52,24 ± 3,25	8,22 ± 0,09		
		1,5	53,81 ± 3,42	8,62 ± 0,15		
	Calc. A	0,0	55,48 ± 3,57	8,54 ± 0,17		
		0,5	54,03 ± 0,83	8,50 ± 0,20		
		1,0	54,72 ± 5,38	8,30 ± 0,05		
		1,5	56,41 ± 2,64	8,41 ± 0,17		
2	Esc. A	0,0	26,15 ± 3,68	3,49 ± 0,22		
		0,5	26,02 ± 1,18	3,14 ± 0,04		
		1,0	24,93 ± 0,68	3,55 ± 0,22		
		1,5	24,61 ± 0,81	3,36 ± 0,17		
	Esc. B	0,0	25,68 ± 3,77	3,70 ± 0,11		
		0,5	28,51 ± 1,70	3,12 ± 0,07		
		1,0	27,23 ± 2,51	3,35 ± 0,07		
		1,5	26,38 ± 2,83	3,45 ± 0,19		
	Calc. A	0,0	25,90 ± 3,72	3,61 ± 0,18		
		0,5	28,27 ± 0,85	3,50 ± 0,14		
		1,0	25,44 ± 1,88	3,21 ± 0,05		
		1,5	27,36 ± 1,18	3,42 ± 0,10		

§ Média de 3 repetições ± erro-padrão da média.

### 6.3.3. Contaminação das águas de lixiviação por metais pesados

O movimento dos metais pesados no solo tem sido alvo de numerosas pesquisas (BIDDAPPA et al., 1982; KHAN; FRANKLAND, 1983; WILLIAMS et al., 1985; WELCH; LUND, 1989; ALLOWAY, 1990; AMARAL SOBRINHO, 1993; AMARAL SOBRINHO et al., 1998). Tais estudos têm demonstrado que o Pb, o Cr e o Cu apresentam baixa mobilidade, acumulando-se na superfície dos solos contaminados, enquanto o Zn, o Mn, o Ni e, principalmente, o Cd são relativamente mais móveis, apresentando maior risco de contaminação das águas subterrâneas (SHEPPARD; THIBAUT, 1992). A mobilidade dos metais pesados no solo é influenciada por vários fatores, como o potencial iônico (razão entre a unidade de valência e o raio iônico), o pH, o potencial de oxiredução do ambiente e, principalmente a especificidade dos sítios de adsorção (BRUGGENWERT; KAMPHORST, 1979, MATOS et al. 1996).

A retenção dos metais pesados no solo pode se dar de diferentes formas. Os argilominerais possuem sítios negativos de adsorção onde os metais são adsorvidos por forças eletrostáticas. Além disso, os metais podem ser complexados com compostos orgânicos, adsorvidos ou oclusos em carbonatos ou óxidos de Fe, Al e Mn (BAES; SHARP, 1983; AMACHER et al., 1986; KING, 1988; MATOS et al. 1996). O pH, conforme já mencionado, possui, também, forte influência na adsorção de metais pesados, já que, em conjunto com condições oxiredutoras do meio, determina o equilíbrio entre as formas mais móveis, de mais baixas valências, e as formas menos móveis, de mais altas valências. Em geral, o pH deve exceder a 6,5 para minimizar a mobilidade e toxicidade de tais elementos (ELLIS; KNEZEK, 1977; ELLIS et al, 1983).

Verificou-se, neste trabalho, uma elevação do pH em função das doses de corretivos, mas ao longo do tempo houve tendência de queda. Não obstante, o pH dos solos tratados com corretivos manteve-se sempre acima dos valores observados para os tratamentos sem corretivos (Figuras 6.1 e 6.2). Estes valores de pH elevados, certamente exerceram influência na mobilidade dos metais pesados presentes nos solos.

Dentre os metais presentes nas escórias (Quadro 6.4), o Mn foi o único detectado nas águas de percolação (Quadro 6.22, Figuras 6.3, 6.4 e 6.5). Segundo MALAVOLTA (1980) e RAIJ (1991), a disponibilidade de Mn é reduzida cem vezes com o aumento de uma unidade de pH.

Os teores de Mn nas soluções lixiviadas foram influenciados apenas pelo tipo de solo, não se verificando efeitos significativos dos corretivos ou doses na mobilização deste metal (Quadro 6.22).

Os teores de Mn ao longo de 510 dias de ensaio, apresentaram tendência de queda para todos os tratamentos (Figuras 6.3 e 6.4). O limite máximo de Mn nas águas classe II<sup>§</sup> estabelecido pelo CONAMA (2005) é de 0,1 mg L<sup>-1</sup>. Verificou-se na primeira lixiviação no LVA de Oratórios-MG que o teor de Mn percolado pelo solo sem corretivos foi superior a todos os demais

---

§ Águas destinadas ao abastecimento para consumo humano, após tratamento convencional; à proteção das comunidades aquáticas; à recreação de contato primário, tais como: natação, esqui aquático e mergulho, conforme Resolução CONAMA nº 274, de 2000; à irrigação de hortaliças, plantas frutíferas, parques, jardins, campos de esporte e lazer, com os quais o público possa vir a ter contato direto; e à aquicultura e a atividade de pesca (CONAMA, 2005).

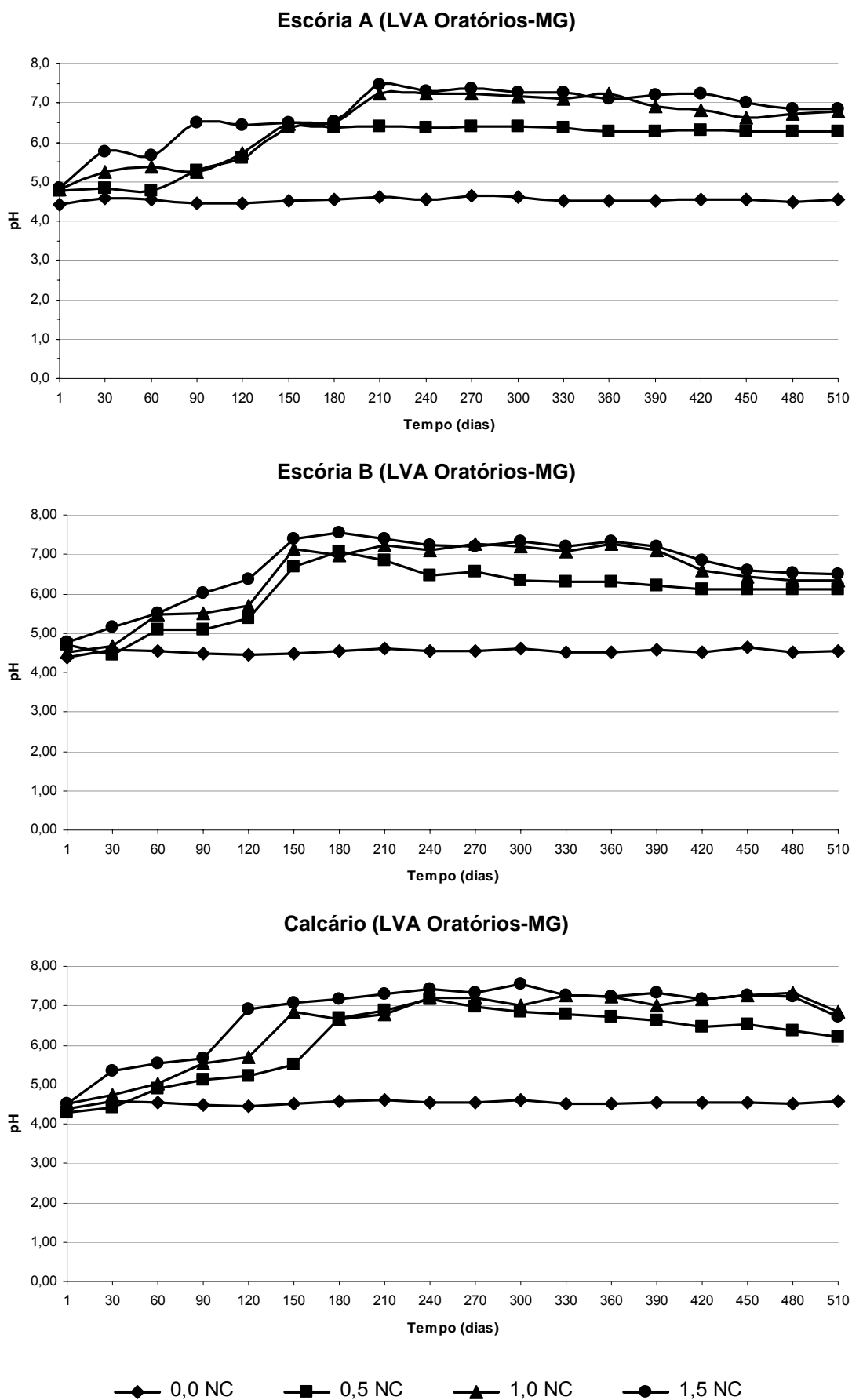


Figura 6.1. Valores de pH nos lixiviados coletados na base dos vasos em que se cultivou cana-de-açúcar ao longo de 510 dias no Latossolo Vermelho-amarelo de Oratórios-MG, tratado com as escórias A e B e o calcário.

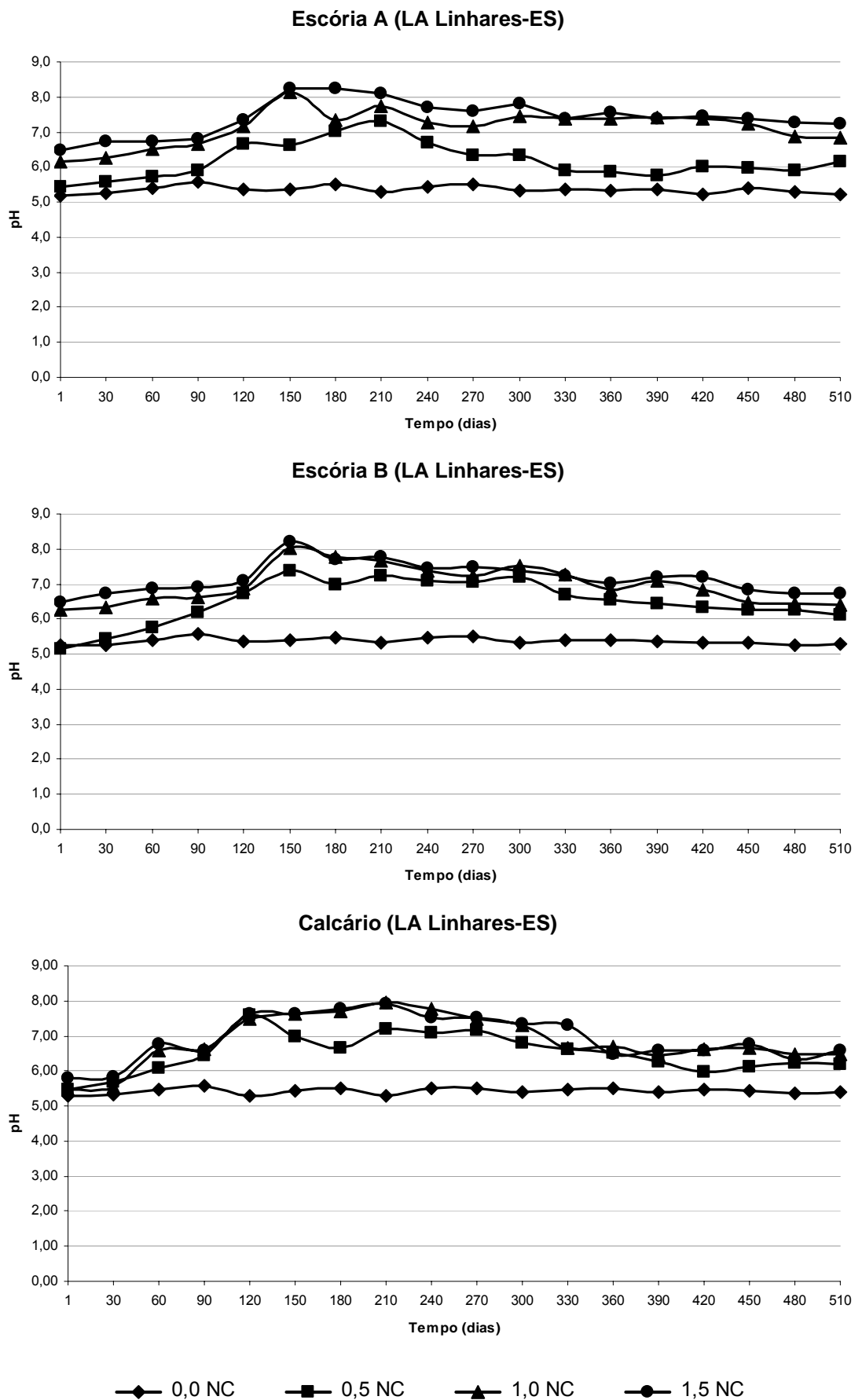


Figura 6.2. Valores de pH nos lixiviados coletados na base dos vasos em que se cultivou cana-de-açúcar ao longo de 510 dias no Latossolo Vermelho-amarelo de Linhares-ES, tratado com as escórias A e B e o calcário.

Quadro 6.22. Análise de variância para os teores médios de Mn nos extratos lixiviados dos solos tratados com as escórias A e B e o calcário após 510 dias de experimentação

FV	GL	QM Mn
Blocos (B)	2	0,00034 <sup>n.s.</sup>
Solos (S)	1	0,18799 **
Corretivos (C)	2	0,00884 <sup>n.s.</sup>
Doses (D)	3	0,00494 <sup>n.s.</sup>
D x C	6	0,00411 <sup>n.s.</sup>
D x S	3	0,02108 **
C x S	2	0,00095 <sup>n.s.</sup>
D x C x S	6	0,00237 <sup>n.s.</sup>
Resíduo	46	0,00348
CV (%)		16,929

<sup>n.s.</sup> e \*\* coeficientes não-significativos e significativos a 1 %, respectivamente.

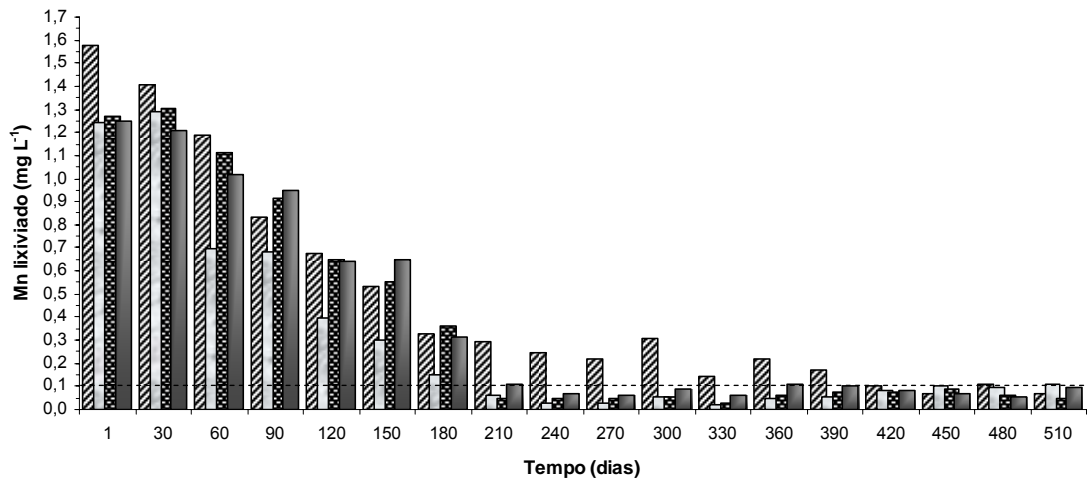
tratamentos, possivelmente em função do menor pH deste solo (Figuras 6.1 e 6.3). Decorridos cerca de 210 dias de ensaio, para este solo, verificou-se que os teores de Mn nas águas de percolação se encontravam abaixo do limite estabelecido pelo CONAMA (2005), para algumas doses de corretivos (Figura 6.3). Vale ressaltar, que os teores de Mn nos lixiviados não foram significativos para corretivos e doses (Quadro 6.22), desta forma, há de se concluir que o Mn presente nos lixiviados é oriundo de contribuições do próprio solo e do Mn aplicado na forma de solução nutritiva no cultivo da cana-de-açúcar. No LA de Linhares-ES, a contribuição do Mn presente no solo para as águas de drenagem, apresentou, de modo geral menor amplitude de variação que o LVA de Oratórios-MG (Figuras 6.3 e 6.4), não apresentando uma tendência bem definida em função do tipo de corretivo utilizado. Para o LA de Linhares-ES, os teores de Mn verificados nas águas de percolação raramente encontraram-se abaixo do limite preconizado pelo CONAMA (2005). As contribuições do Mn para as águas de drenagem neste caso também podem ser atribuídas principalmente ao Mn do solo e, ou proveniente de adubações suplementares. Não obstante, pode-se perceber uma pequena contribuição das escórias, em especial da escória B. Este efeito é mais visível, quando se considera o teor médio de Mn após todas as lixiviações (Figura 6.5). A equação de regressão ajustada para o Mn médio lixiviado em função das doses de corretivo, apresenta coeficiente linear positivo para a escória B (Figura 6.5b). Para os demais corretivos não há ajuste significativo no LA de Linhares-ES.

No LVA de Oratórios-MG, pode-se perceber efeito linear negativo das doses de calcário sobre o Mn médio nos lixiviados. Também há uma tendência

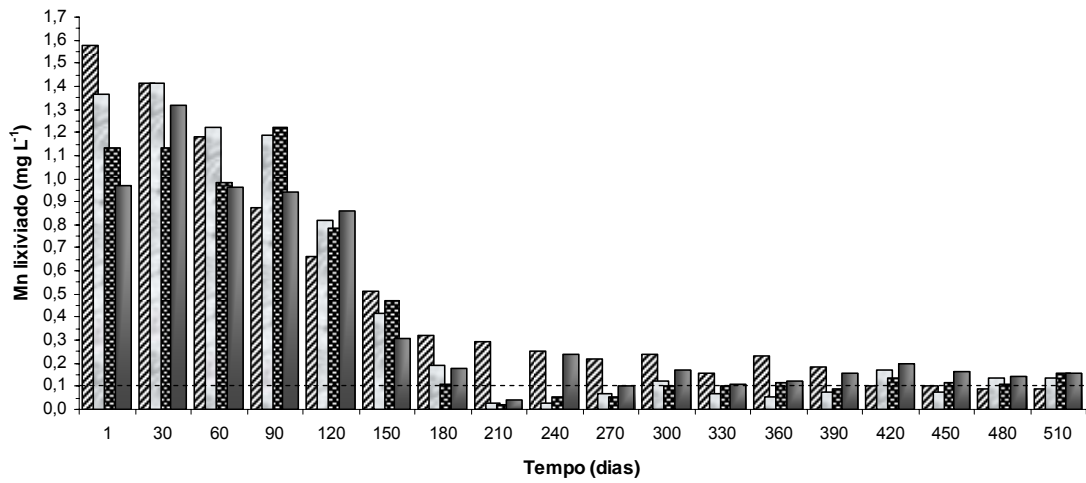
de decréscimo com as doses da escória B, porém não significativo. Já para a escória A, ajusta-se uma tendência inicial de decréscimo para o Mn médio com o aumento das doses, seguida de aumento do Mn para doses mais altas, segundo um modelo raiz quadrada. A tendência de decréscimo inicial pode ser interpretada como consequência do aumento de pH; mas a contribuição da escória se faz sentir a doses mais altas. Como consequência, suspeita-se que a contribuição das escórias possa vir a ser significativa, no longo prazo, com aplicações sucessivas em uma mesma área. Neste sentido, sugere-se cautela para usos de longo prazo, principalmente em solos arenosos com lençol freático próximo à superfície, com relação ao Mn presente nestes resíduos.

Conforme já mencionado, não se detectou a contaminação das águas de percolação por Fe, Cr, Ni e Cd, presentes nas escórias LD da CST.

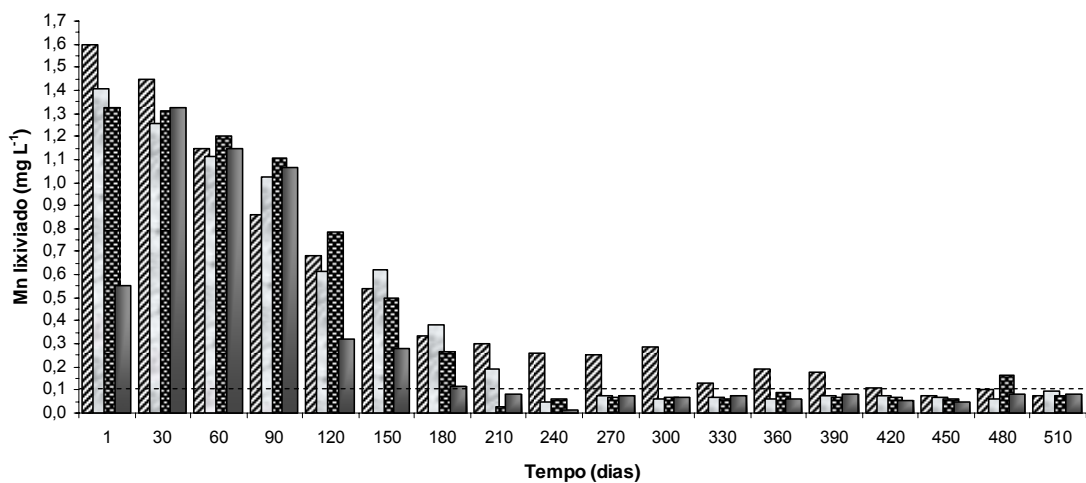
### Escória A (LVA Oratórios-MG)



### Escória B (LVA Oratórios-MG)



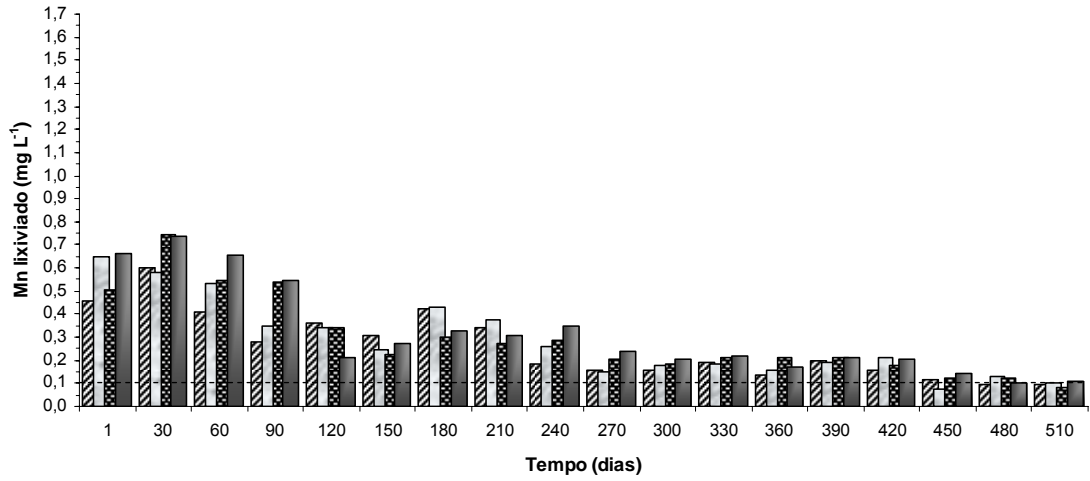
### Calcário (LVA Oratórios-MG)



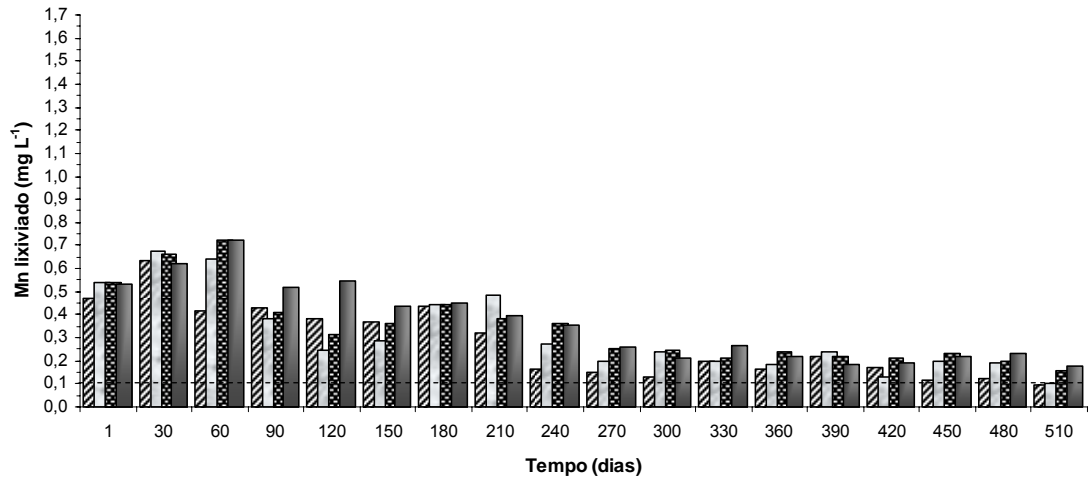
▨ 0,0 NC   □ 0,5 NC   ▩ 1,0 NC   ■ 1,5 NC   --- [Mn] máxima nas águas classe II

Figura 6.3. Teores de Mn nos lixiviados coletados na base dos vasos em que se cultivou cana-de-açúcar ao longo de 510 dias no Latossolo Vermelho-amarelo de Oratórios-MG, tratado com as escórias A e B e o calcário.

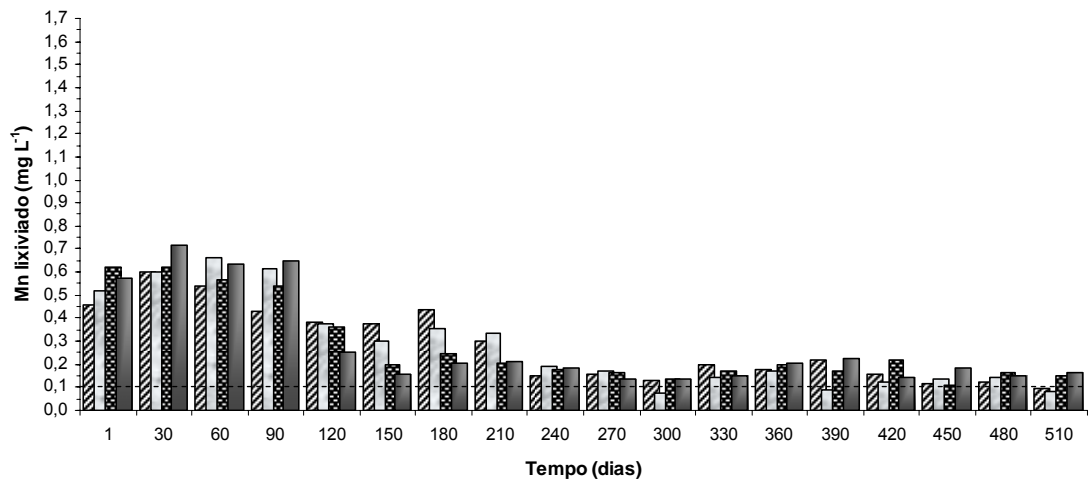
### Escória A (LA Linhares-ES)



### Escória B (LA Linhares-ES)



### Calcário (LA Linhares-ES)



▨ 0,0 NC    □ 0,5 NC    ▩ 1,0 NC    ■ 1,5 NC    - - - [Mn] máxima nas águas classe II

Figura 6.4. Teores de Mn nos lixiviados coletados na base dos vasos em que se cultivou cana-de-açúcar ao longo de 510 dias no Latossolo Amarelo de Linhares-ES, tratado com as escórias A e B e o calcário.

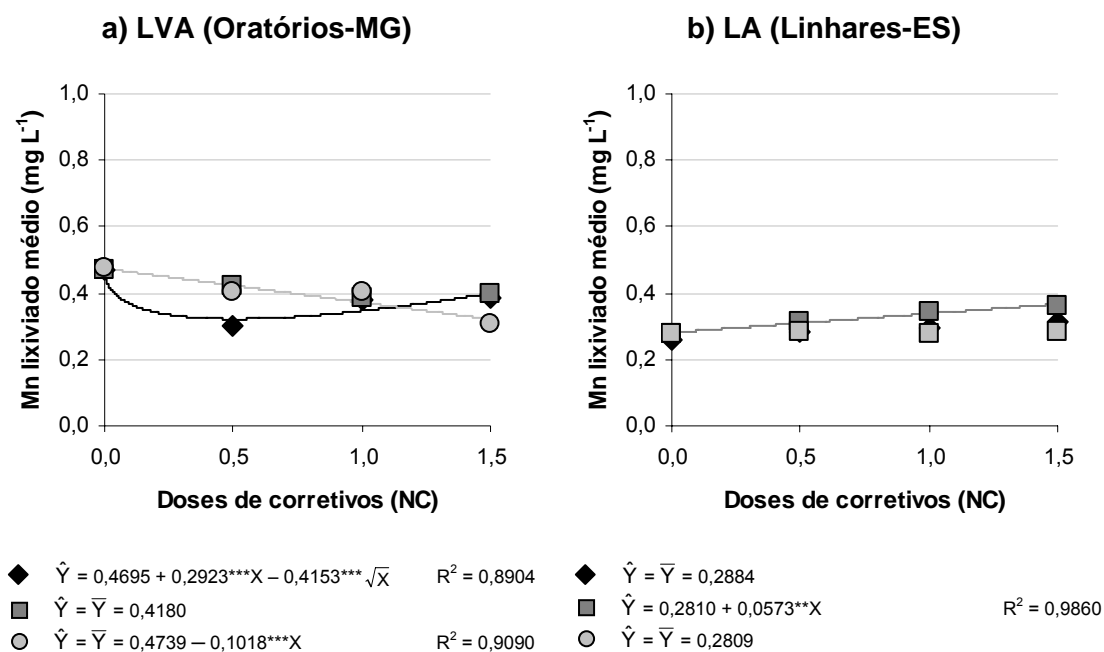


Figura 6.5. Teores médios de Mn nas soluções lixiviadas dos Latossolos Vermelho-amarelo (LVA) de Oratórios-MG e Amarelo (LA) de Linhares-ES, cultivados com cana-de-açúcar, tratados com doses crescentes das escórias A e B e o calcário.

#### 6.4. Conclusões

- ❖ Não houve contribuição significativa das escórias nos teores totais de Cr, Ni e Cd nos solos cultivados com cana-de-açúcar, apesar da presença destes metais pesados em ambas as amostras de escórias LD. Por outro lado, os teores de Fe aumentaram discretamente no LVA de Oratórios-MG e a contribuição das escórias LD nos teores de Mn foi significativa e relevante na camada superficial de ambos os solos;
- ❖ Não se verificou contribuição significativa dos corretivos nos teores de metais pesados nas camadas mais profundas dos solos cultivados com cana-de-açúcar, sugerindo que não houve translocação destes metais no perfil do solo em decorrência do uso das escórias;
- ❖ Não se verificou contaminação significativa dos solos, exceto para Mn na camada superficial, pelo uso das escórias LD em curto prazo. Projeções para longo prazo sugerem que o uso das escórias é relativamente seguro, do ponto de vista ambiental, por décadas, sendo que o número máximo de reaplicações em uma mesma área depende das características do solo;

- ❖ De modo geral, as escórias LD não contribuíram para o aumento dos teores disponíveis de metais pesados nos solos, exceto Mn na camada superficial;
- ❖ Não se verificou contaminação significativa das águas de drenagem por metais pesados nos solos tratados com calcário ou escórias LD e cultivados com cana-de-açúcar. Apenas Mn foi detectado nas águas de drenagem, em teores consideráveis, mas que diminuem com o tempo e, de modo geral, não mostram efeitos significativos consistentes dos corretivos aplicados.
- ❖ Pequenas tendências de diminuição na mobilidade de Mn podem ser observadas com o aumento do pH, decorrência do aumento das doses de calcário. Por outro lado, tendências de aumento do Mn lixiviado foram detectadas nos solos tratados com doses mais elevadas de escórias. Isto sugere a possibilidade de contribuições significativas, a longo prazo, pelo uso continuado das escórias LD em uma mesma área, principalmente para solos arenosos.

## 6.5. Referências bibliográficas

ACCIOLY, A.M.A.; FURTINI NETO, A.E.; MUNIZ, J.A.; FAQUIN, V.; GUEDES, G.A.A. Pó de forno elétrico de siderurgia como fonte de micronutrientes e contaminantes para plantas de milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 35, n. 7, p. 1483-1491, 2000.

ALCARDE, J.C. **Corretivos da acidez dos solos: características e interpretações técnicas**. São Paulo, SP: ANDA, 1992. (Boletim Técnico nº 6).

ALCARDE, J.C.; RODELLA, A.A. Qualidade e legislação de fertilizantes e corretivos. In: **Tópicos em ciência do solo**. Vol. III. Viçosa, MG: SBCS. 2003. p. 291-334.

ALLOWAY, B.J. The origins of heavy metals in soils. In: ALLOWAY, B.J. ED. **Heavy metals in soils**. New York, NY: John Wiley, 1990. p. 29-39.

ALVAREZ V. V.H. **Equilíbrio de formas disponíveis de fósforo e enxofre em dois latossolos de Minas Gerais**. Viçosa, Viçosa, MG: UFV, 1974. 134 p. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 1974.

AMACHER, M.C.; KOTUBY-AMACHER, J. SELIM, H.M.; ISKANDAR, I.K. Retention and release of metals by soils – avaluation of several models. **Geoderma**, Amsterdam, v. 38, p. 131-154, 1986.

AMARAL SOBRINHO, N.M.B., do. **Interação dos metais pesados de resíduos siderúrgicos com um solo podzólico vermelho-amarelo**. Viçosa,

Universidade Federal de Viçosa, 1993. 163 p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 1993.

AMARAL SOBRINHO, N.M.B.; VELLOSO, A.C.X. COSTA, L.M.; OLIVEIRA, C. Mobilidade de metais pesados em solo tratado com resíduo siderúrgico ácido. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 22, n. 2, p. 345-353, 1998.

AMARAL, R.D.; BARROS, N.F.; COSTA, L.M.; FONTES, M.P.F. Efeito de um resíduo da indústria de zinco sobre a química de amostras de solo e plantas de milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, SP, v. 20, n. 3. p. 433-440, 1996.

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

BAES, C.F.; SHARP, R.D. A proposal for estimation of soil leaching constants for use in assessment models. **Journal of Environmental Quality**, v. 12, n.1, p. 17-28, 1983.

BAHIA FILHO, A.F.C. **Índices de disponibilidade de fósforo em Latossolos do planalto central com diferentes características texturais e mineralógicas**. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 1982. 1979 f. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 1982.

BARROW, N.J. Reactions of anions and cations with variable-charge soils. **Advances in Agronomy**, v. 38, p. 183-230, 1985.

BIDDAPPA, C.C.; CHINO, M; KUMAZAWA, K. Migration of heavy metals in two Japanese soils. **Plant and Soil**, v. 66, p. 299-316, 1982.

BORGOS, E.C. Pyrometallurgical treatment of boiler slags for the production of construction materials and refining fluxes. In: **Japan-Brazil symposium dust processing-energy-environment in metallurgical industries**, 1. Proceeding. São Paulo. 1999.

BRUGGENWERT, M.G.M.; KAMPHORST, A. Survey of experimental information on cation exchange in soil systems. In: BOLT, G.H., Ed. **Soil Chemistry, B: physico-chemical models**. Amsterdam: Elsevier Science, 1979. p. 141-203.

CABRERA, D.; YOUNG, S.D.; ROWELL, D.L. The toxicity of cadmium to barley plants as affected by complex formation with humic acid. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 105, n. 2, p. 195-204, 1988.

CAMARGO, M.N.; KLAMT, E.; KAUFFMAN, J.H. **Classificação de solos usada em levantamentos pedológicos no Brasil**. Boletim informativo da Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, Campinas, v. 12, n. 1, p. 11-33, 1987.

CASTELO BRANCO, V.T.F. **Caracterização de misturas asfálticas com o uso de escória de aciaria como agregado**. Rio de Janeiro, RJ: COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro. 2004. 135 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 2004.

CETESB – **Relatório de estabelecimento de valores orientadores para solos e águas subterrâneas no estado de São Paulo**. Dorothy C. P. Casarini [et al.]. São Paulo, SP: CETESB, 2001. 73 p.

CFSEMG – Comissão de fertilidade do solo do estado de Minas Gerais. **Recomendação para uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais – 5ª Aproximação**. Viçosa, MG. 359 p.1999.

CONAMA – Conselho nacional do Meio Ambiente. Ministério do Meio Ambiente. **Resolução CONAMA nº 357, de 17 de março de 2005**. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res05/res35705.pdf>>. Acesso em 28 de set. de 2005.

CORRÊA, M.L.T.; MELLO, J.W.V., SILVA J. Avaliação do Uso Agrícola de Uma Escória de Aciaria como Corretivo da Acidez de Solos. In: 58º CONGRESSO ANUAL DA ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE METALURGIA E MATERIAIS. 2003. Rio de Janeiro. **Anais...** [CDROM]. / Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais – São Paulo, SP: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais. 2003.

COSTA, L.M.; AMARAL SOBRINHO, N.M.B.; DIAS, L.E.; BARROS, N.F. Application of a steel industry residue to an Oxisol including microbial activity. In: **Trace substances in environmental health conference**, 25. s. I., 1991. Proceeding, p. 245-356. 1991.

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

ELLIS, B.G.; KNEZEK, B.D. Adsorptions, reactions of micronutrients in soils. In: DINAUER, R.C., Ed. **Micronutrients in agriculture**, Madson, ASA/SSSA, 1977. 566 p.

ELLIS, B.G.; KNEZEK, B.D.; JACOBS, L.W. The movement of micronutrients in soil. In: NELSON, D.W.; ELRICK, D.E; TANGI, K.K., EDS. Chemical mobility and reactivity in soil system. Madson, **Soil Science Society of America**, 1983. p. 109-122. (SSSA Special Publication, 11).

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

EMBRAPA – EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA.  
**Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes.** Organizador:  
Fábio César da Silva. – Brasília: Embrapa Comunicação para Transferência de  
Tecnologia, 1999. 370 p.

FERRAND, B.; EMERY, J. Recent improvements in quality of steel slag  
aggregate. **Transportation Research Record**, v. 1486. p. 137-141, 1995.

GEORGE, C.M.; SORRENTINO, F.P. Valorization of basis oxygen steel slag.  
In: **International congress on the chemistry of cement**, 7, Paris.  
Proceedings, p. 39-44. 1980.

GOLBERG, S. SPOSITO, G. On the mechanism of specific phosphate  
adsorption by hydroxylated mineral surfaces: a review. **Communications in  
Soil Sciene and Plant Analysis**, v. 16, p. 801-821, 1985.

HERNÁNDEZ, T.; MORENO, J.I.; COSTA, F. Influence of sewage sludge  
application on crop yields and heavy metal availability. **Soil Science and Plant  
Nutrition**, Tokyo, n. 37, p. 201-210, 1991.

HIGSTON, F.J.; POSNER, A.M.; QUIRK, J.P. Anion adsorption by goethite and  
gibbsite. I. The role of the proton in determining adsorption envelopes. **Journal  
of Soil Science**, v. 23, p. 177-191, 1972.

HIGSTON, F.J.; POSNER, A.M.; QUIRK, J.P. Anion adsorption by goethite and  
gibbsite. II. Desorption of anions from hydrous oxide surface. **Journal of Soil  
Science**, v. 25, p. 16-26, 1974.

HOLT, P.F.; KING, D.T. The Chemistry of silica surfaces. **Journal of  
Chemistry Society**, v. 4, p. 773-779, 1955.

HOSSNER, L.R. Dissolution for total elemental analysis. In: **Methods of soil  
analysis. Part 3. Chemical methods.** Madison: Soil Science Society of  
America, Inc., p.49-64. 1996.

ILFA – Instituto Latino Americano del Fierro y el Acero. **Reciclaje de escorias  
de aceria. Manual II.** 1995. 395 p.

INDUSTRY AND ENVIRONMENT. Contruction and the environment: facts and  
figures. **UNEP IE**, v. 19, n. 2, April-June, p. 4-9. 1996.

KER, J.C. Latossolos do Brasil: uma revisão. **Geonomos**, Belo Horizonte, MG.  
v. 5, n. 1, p. 17-40. 1997.

KHAN, D.H.; FRANKLAND, B. Effects of cadmium and lead on radish plants  
With particular reference to movement of metals throught soil profile and plant.  
**Plant and Soil**, v. 70, p. 335-345, 1983.

- KING, L.D. Retention of metals by several soils of the southeastern United States. **Journal of Environmental Quality**, Madison, v. 17, n. 2, p. 239-246, 1988.
- LEE, F.T.; LEE, C.H. Study on the reduction behavior of FeO in EAF slag. **Steel Times International**. v. 1, p. 20-25, Jan., 1995.
- LEITE, P.C. **Interação silício-fósforo em Latossolo Roxo cultivado com sorgo em casa de vegetação**. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 1997. 87 f. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 1997.
- LÓPEZ, F.A.; FORMOSO, A.; MEDINA, F. Escórias LD. Coproductos de la indústria siderúrgica – I Parte. Composición, tratamiento y aplicaciones. **Revista de Metalurgia**, v. 25, n. 4, p. 247-254, 1989.
- MACHADO, A.T. **Estudo comparativo dos métodos de ensaios para avaliação da expansibilidade das escórias de aciaria**. São Paulo, SP: USP. 2000. 135 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Construção Civil) – Universidade de São Paulo, Escola Politécnica, São Paulo, SP, 2000.
- MALAVOLTA, E. **Elementos de nutrição mineral de plantas**. São Paulo, SP: Agronômica Ceres, 1980. 253 p.
- MATOS, A.T.; FONTES, M.P.F. JORDÃO, C.P. COSTA, L.M. Mobilidade e formas de retenção de metais pesados em Latossolo Vermelho-amarelo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, SP, v. 20, n. 3, p. 379-386, 1996.
- MEHLICH, A. Mehlich 3 soil test extractant: a modification of Mehlich 2 extractant. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 15, p. 1409-1416, 1984.
- MENGEL, K.; KIRKBY, E.A. **Principles of plant nutrition**. New York, NY: International potash Institute, 1987. 687 p.
- MINISTÉRIO DA AGRICULTURA. **Calcário – produção e consumo aparente – Brasil – 1992 a 2001**. 2002.  
Disponível em: <<http://www.agricultura.gov.br/portal>>. Acesso em: 2 jun. 2004.
- MOTZ, H.; GEISELER, J. Products of steel slags an opportunity to save natural resources. **West Management**, v. 21, p. 285-293, 2001.
- NOVAIS, R.F.; SMYTH, T.J. **Fósforo em solo e planta em condições tropicais**. Viçosa, MG: UFV, DPS, 1999. 399 p.
- OBIHARA, C. H.; RUSSEL, E. W. Specific adsorption of the silicate and phosphate by soils. **Journal of Soil Science**, v. 23, p. 105-117, 1972.

OLIVEIRA, M.G.A. **Determinação, adsorção e deslocamento recíprocos de silício e fósforo em Latossolos do Triângulo Mineiro**. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 1984. 68p. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 1984.

PARFITT, R.L. Anion adsorption by soils and soil materials. **Advances in Agronomy**, v. 30, p. 1-50, 1978.

PAVAN, M.A.; BINGHAM, F.T. Toxidez de metais em plantas: II. Caracterização da toxidez do níquel em cafeeiros. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 17, p. 323-328, 1982.

POMBO, L.C.A.; KLAMT, E. Adsorção de zinco e cobre de dois solos do Estado do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, SP, v. 10, p. 191-194, 1986.

PRADO, R.M.; COUTINHO, E.L.M., ROQUE, C.G.; VILLAR, M.L.P. Avaliação da escória de siderurgia e de calcários como corretivo da acidez de solos no cultivo da alface. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 37, n. 4, p. 539-546, 2002.

RAIJ, B. van. **Fertilidade do solo e adubação**. Piracicaba, SP: Potafos/Agronômica Ceres, 1991. 343 p.

RESENDE, J.M.A. **Comparação de índices de sorção de fósforo no solo**. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 1983. 79 f. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 1983.

SAMPLE, E.C.; SOPER, R.J.; RACZ, G.J. Reactions of phosphates fertilizers in soils. In: KHASAWNEH, F.E.; SAMPLE, E.C.; KAMPRATH, E.J., eds. **The role of phosphorus in agriculture**. Madison, American Society of Agronomy, 1980. p. 263-310.

SANCHEZ, P.A.; UEHARA, G. Management considerations for acid soils with high phosphorus fixation capacity. In: KHASAWNEH, F.E.; SAMPLE, E.C.; KAMPRATH, E.J., eds. **The role of phosphorus in agriculture**. Madison, American Society of Agronomy, 1980. p. 471-514.

SANYAL, S.K., De DATTA, S.K. Chemistry of phosphorus transformation in soil. **Advances in Soil Science**, v. 16, p. 1-120, 1991.

SHEPPARD, M.J.; THIBAUT, D.H. Desorption and extraction of selected Heavy Metal from soil. **Soil Science Society American Journal**, New York, NY, n. 56: p 415-423. 1992.

SILVA, C.A.; ANDERSON, S.J.; VALE, F.R. Carbono, nitrogênio e enxofre em frações granulométricas de dois latossolos submetidos à calagem e adubação fosfatada. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 23, n. 3, 1999.

USEPA – United States Environmental Protection Agency. **Standards for the use or disposal of sewage sludge**. Fed. Regist., v. 58, p. 9284-9415. 1993.

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

WILLIAMS, D.E.; VLAMIS, J.; PUKITE, A.H.; COREY, J.E. Metal movement in sludge treated soils after six years of sludge addition: 2. Nickel, Cobalt, Iron, Manganese, Chromium, and Mercury. **Soil Science**, v. 140, p. 120-125, 1985.

## 7. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES GERAIS

O trabalho teve por objetivo avaliar a eficiência técnica e riscos de contaminação do uso da escória de aciaria LD, da Companhia Siderúrgica de Tubarão, como corretivo da acidez de solos. Para tanto, foram avaliadas características químicas e físicas de amostras de escória, as quais também foram classificadas quanto ao risco ambiental para disposição nos solos, segundo normas da ABNT.

Foram realizados cultivos de soja e cana-de-açúcar em solos ácidos corrigidos com diferentes doses de escórias. Foram avaliadas as produções e concentrações de nutrientes e metais pesados nas partes aéreas das plantas. Determinaram-se também os teores totais e disponíveis destes elementos nos solos. Durante a condução do experimento com cana-de-açúcar, estes elementos também foram determinados periodicamente na água de irrigação percolada dos solos.

O uso da escória de aciaria LD da Cia. Siderúrgica de Tubarão como corretivo da acidez dos solos mostrou-se tecnicamente viável contribuindo para a diminuição do Al trocável nos solos e como fonte de Ca e Mg para as plantas. Não obstante, sua eficiência foi ligeiramente inferior à do calcário comercial, em curto prazo. O efeito residual da escória não foi avaliado, mas supõe-se que, em longo prazo, esta menor eficiência possa ser compensada por um maior efeito residual, o que conduziria a uma menor frequência de reaplicações das escórias em relação aos calcários. Esta hipótese, contudo, necessita de comprovação pela avaliação dos efeitos residuais em estudos de longo prazo.

O uso da escória mostrou-se ambientalmente seguro, não revelando contaminação expressiva dos solos, águas de drenagem e plantas em curto a médio prazo.

Projeções para longo prazo sugerem que a escória pode ser reaplicada várias vezes, por décadas, com relativa segurança quanto a problemas ambientais, a depender das características do solo. Não obstante, alguns critérios e sugestões devem ser observados para usos prolongados:

- ❖ As reaplicações podem ser feitas com segurança ambiental em solos ácidos, profundos, de textura mais argilosa, com baixos teores originais de Cr e Mn e com lençol freático relativamente profundo;
- ❖ As reaplicações devem ser criteriosamente avaliadas, do ponto de vista ambiental, em solos arenosos com lençol freático muito próximo à superfície. Também se recomenda cautela para solos com maiores teores de Cr ou Mn independentemente da textura. Nestes casos considera-se imprescindível o acompanhamento de um técnico habilitado para avaliar a evolução dos teores de Cr e Mn nos solos ao longo do tempo; e
- ❖ Recomenda-se, em qualquer caso, o controle de qualidade quanto a teores de metais pesados das escórias, especialmente Cr, Mn e Ni, que não devem exceder aos referidos neste trabalho. Considera-se também imprescindível o acompanhamento de técnicos responsáveis pelos empreendimentos agrícolas a utilizarem a escória. Sugere-se, ainda, a adoção dos níveis de alerta e de intervenção da CETESB, respectivamente de 75 e 300 ppm de Cr, e o aparecimento de sintomas de toxidez de Mn nas plantas como indicadores para suspender as reaplicações da escória em um mesmo solo.