

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
FACULDADE DE AGRONOMIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DO SOLO

**RESPOSTA DAS PLANTAS E MODIFICAÇÕES DE PROPRIEDADES DO  
SOLO PELA APLICAÇÃO DE ESCÓRIA BÁSICA DE ACIARIA**

MÁRCIO DO SACRAMENTO WALLY  
(Dissertação)

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
FACULDADE DE AGRONOMIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DO SOLO

**RESPOSTA DAS PLANTAS E MODIFICAÇÕES DE PROPRIEDADES DO  
SOLO PELA APLICAÇÃO DE ESCÓRIA BÁSICA DE ACIARIA**

MÁRCIO DO SACRAMENTO WALLY  
Engenheiro-Agrônomo (UFPEL)

Dissertação apresentada como um dos requisitos  
à obtenção do Grau de Mestre em Ciência do Solo

Porto Alegre (RS) Brasil  
Novembro de 2005

*Dedico à minha querida mãe (in memoriam).*

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus, sempre e acima de tudo.

À Universidade Federal do Rio Grande do Sul, pela oportunidade de estudo, e ao CNPq, pela bolsa concedida.

Ao professor Carlos A. Bissani, pela orientação e apoio na condução dos trabalhos, pela amizade, pelos ensinamentos, pelo exemplo profissional e pelo incentivo na elaboração da dissertação.

Aos professores Marino J. Tedesco, pelo contínuo apoio na condução do trabalho, e Clesio Gianello, pela colaboração nas análises laboratoriais.

Ao professor Danilo D. Castilhos, que acreditou no meu potencial e me colocou em contato com a área da pesquisa.

Ao professor Antônio C. F. Vilela, do departamento de Engenharia de Materiais-UFRGS, pela obtenção e moagem da escória de siderurgia.

Ao Laboratório de Análise de Solos (LAS) da UFRGS, pelo auxílio financeiro.

Aos colegas de turma Marcio H. Lauschner, Leandro Bortolon, Elizandra S. Oliveira, Jonatas B. Alves, Fabiano De Bonna e Antônio Xavier, pela amizade e parceria nas horas difíceis.

Aos funcionários do LAS: Lisandra Colombo, Vitor H. dos Santos, Tiago S. da Silva, Bernadete Barcelos, Thais Ambrosi, Elis R. M. Coelho, Licínio Gomes, e, em especial, ao Daniel Scolmeister, pelo auxílio e colaboração nos trabalhos.

Às acadêmicas do curso de Agronomia Ana Paula Glimm e Viviane Pereira dos Santos, pela colaboração no início do trabalho e nas determinações analíticas, respectivamente.

Em especial aos colegas Maurício S. Quadro, Cláudio H. Kray, Leandro Bortolon por toda a ajuda nos trabalhos e na elaboração desta.

A todos os professores do Departamento de Solos/UFRGS, pelos ensinamentos.

Aos meus pais, Waldino e Olga, por sempre me apoiarem em minhas decisões e pelo incentivo nos estudos.

Aos meus irmãos, Luiz Eduardo, Ana Paula e Raquel, pelo carinho.

Aos meus tios Cláudio e Maria Zilá, por todo o apoio que prestaram durante minha permanência em Porto Alegre.

A todos os amigos que conquistei durante o período de Mestrado.

# RESPOSTA DAS PLANTAS E MODIFICAÇÕES DE PROPRIEDADES DO SOLO PELA APLICAÇÃO DE ESCÓRIA BÁSICA DE ACIARIA<sup>1/</sup>

Autor: Márcio do Sacramento Wally

Orientador: Prof. Carlos Alberto Bissani

## RESUMO

As escórias siderúrgicas, resultantes da fabricação de aços, possuem características químicas que indicam um possível uso na agricultura, como corretivos de acidez do solo e fontes de alguns nutrientes para as plantas. Porém, possuem componentes indesejáveis, como metais pesados, que podem provocar situações de risco ambiental. Com o objetivo de avaliar a eficiência agrônômica e o aporte de metais pesados ao solo pela aplicação de escória básica de aciaria, foi conduzido um estudo em colunas de solo (Argissolo Vermelho distrófico típico – PVd; volume de 10 dm<sup>3</sup>/coluna), mantidas a céu aberto, em delineamento completamente casualizado, com quatro repetições. Os tratamentos aplicados ao solo, com base na dose para elevar o pH a 6,5 pelo método SMP, foram: 1 - Testemunha; 2 - CaCO<sub>3</sub>+MgCO<sub>3</sub> (PRNT 100%) 3 - Trat. 2 + adubação NPK; 4 - Escória (partículas < 0,149 mm e PRNT 60%); 5 - Trat. 4 + NPK; 6 - Escória 2 x dose (1/3 partículas < 0,149 mm e 2/3 partículas 0,149 – 0,5 mm) + NPK; 7 - Trat. 4 + N; 8 - Escória 5 x dose (partículas 0,5 – 2,0 mm) + Trat. 3; 9 - Escória 10 x dose (partículas 2,0 – 15,0 mm) + Trat. 3. Foram feitos três cultivos (aveia – *Avena sativa*/inverno de 2002, aveia/inverno 2003 e milho – *Zea mays*/verão 2004). Após cada cultivo, foi feita a amostragem do solo (12, 18 e 24 meses após aplicação dos tratamentos). Quando em doses equivalentes, a escória proporcionou aumentos dos valores de pH, CTC efetiva e saturação por bases e teores de Ca e Mg do solo semelhantes ao carbonato. À exceção do Mg, estes atributos foram maiores nos tratamentos com maiores doses e diâmetro de partículas, indicando a reatividade também das frações mais grossas da escória. Tanto para o carbonato como para a escória, a produção de matéria seca das plantas aumentou com a adição de NPK, indicando que o resíduo não supre adequadamente os nutrientes P e K, conforme também demonstrado pelas análises das plantas e do solo. Entre os micronutrientes, apenas o Mn teve aumento de disponibilidade, mas tendeu a diminuir com o aumento do pH do solo. Nos tratamentos com escória, os teores dos metais Cd, Cr, Ni e Pb nas plantas não diferiram da testemunha e, em geral, suas quantidades absorvidas não diferiram do tratamento com carbonato e NPK. Dentre os metais avaliados, somente Mn, Cr e Ni nas maiores doses de escória (2, 5 e 10 X) tiveram acúmulo no solo maior que os tratamentos testemunha e com carbonato. Os resultados indicam que a escória utilizada é eficiente na correção da acidez do solo e que, quando aplicada em dose para elevar o pH até 6,5, em solos com características semelhantes ao estudado, não representa risco de acúmulo excessivo de metais pesados.

<sup>1/</sup> Dissertação de Mestrado em Ciência do Solo. Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. (64 p.) Novembro, 2005.

# PLANT RESPONSE AND SOIL PROPERTIES CHANGES BY APLICATION OF STEEL BASIC SLAG<sup>1/</sup>

Author: Márcio do Sacramento Wally

Adviser: Prof. Carlos Alberto Bissani

## SUMMARY

The siderurgic slags, byproducts of steel production, have chemical characteristics that indicate a possible use in agriculture, as liming materials and sources of some plant nutrients. However, they may enclose undesired components, like heavy metals, which may result in situations of environmental hazard. In order to evaluate its agronomic efficiency and the heavy metals accumulation in the soil by the application of steel basic slag, an experiment was carried out in soil columns (Typic Paleudult; 10 dm<sup>3</sup>/column soil volume), under natural rainfall conditions, in a completely randomized design with four replications. Soil treatments based on the liming rate do achieve pH 6,5 by the SMP method were: 1 - Control; 2 - CaCO<sub>3</sub>+MgCO<sub>3</sub> (neutralizing value - NV 100%) 3 - Treat. 2 + NPK fertilizers; 4 - Slag - 1 x rate (particles < 0,149 mm e NV 60%); 5 - Treat. 4 + NPK; 6 – Slag - 2 x rate (1/3 particles < 0,149 mm e 2/3 particles 0,149 – 0,5 mm) + NPK; 7 - Treat. 4 + N fertilizer; 8 – Slag - 5 x rate (particles 0,5 – 2,0 mm) + Treat. 3; 9 – Slag - 10 x rate (particles 2,0 – 15,0 mm) + Treat. 3. Oat plants (*Avena sativa*) in 2002 and 2003 winters and corn plants (*Zea mays*) in 2004 summer were grown on the treated soil, which was sampled after each crop (12, 18 and 24 months after treatments application). At equivalent rates both slag and carbonate increased similarly the values of pH, effective CEC and bases saturation and the Ca and Mg contents in the soil. Except for Mg, these attributes were higher for the treatments with slag at higher rates and larger particle size showing the reactivity of the coarse factions. For both carbonate and slag, plant dry matter yield increased only with NPK fertilization, showing that this residue did not supply P and K, as also observed in plants and soil analysis. Among micronutrients only Mn showed increase in availability, but tended to decreased with soil pH rise. In general, there was no significant difference for plant concentration of the metals Cd, Cr, Ni and Pb among slag and control treatments as well as their plant accumulation among slag and carbonate+NPK treatments. Among the analysed metals, only Mn, Cr and Ni at higher slag rates (2, 5 and 10 x) increased in the soil to values significantly higher than control and carbonate treatments. The results show that the used slag is efficient as liming material and that it is not expected to provide excessive heavy metals accumulation when applied at rates to rise pH value up to 6,5 in soils with similar characteristics to the one in this study.

<sup>1/</sup> M.Sc. Dissertation in Soil Science. Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, Brazil. (64 p.) November, 2005.

## SUMÁRIO

	Página
<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>01</b>
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>03</b>
2.1 Geração e características de escórias.....	03
2.2 Legislação sobre corretivos da acidez.....	05
2.3 Correção do solo com escória de siderurgia.....	07
2.4 Outros benefícios da escória à fertilidade do solo.....	09
2.5 Uso de escórias e sua relação com o ambiente.....	11
<b>3 MATERIAL E MÉTODOS.....</b>	<b>16</b>
3.1 Histórico e caracterização do experimento.....	16
3.2 Caracterização do resíduo.....	16
3.3 Caracterização do solo.....	17
3.4 Tratamentos e delineamento experimental.....	17
3.5 Instalação e condução do experimento.....	19
3.6 Amostragem, preparo das amostras e determinações analíticas.....	20
3.6.1 Solo.....	20
3.6.2 Plantas.....	21
3.7 Análise estatística.....	22
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>23</b>
4.1 Atributos químicos do solo.....	23
4.1.1 Fatores da acidez.....	23



4.1.2. Cálcio e magnésio trocáveis.....	26
4.1.3 CTC e saturação por bases.....	29
4.1.4 Micronutrientes.....	31
4.1.5 Outros nutrientes.....	33
4.1.6 Metais pesados.....	34
4.2 Produção de matéria seca e composição das plantas.....	36
4.2.1 Matéria seca.....	36
4.2.2 Concentração e absorção de nutrientes.....	38
4.2.3 Concentração e absorção de metais pesados.....	45
<b>5 CONCLUSÕES.....</b>	<b>49</b>
<b>6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>50</b>
<b>7 APÊNDICES.....</b>	<b>56</b>
<b>8 VITA.....</b>	<b>64</b>

## RELAÇÃO DE TABELAS

Página

1. Características químicas do resíduo (escória) utilizado no experimento (médias de duas repetições) .....	17
2. Caracterização físico-química do solo utilizado no experimento .....	18
3. Valores de Al trocável e H+Al no solo em três épocas de amostragem (media de quatro repetições) .....	27
4. Valores de CTC efetiva, CTC a pH 7,0 e saturação por bases (V) do solo em três épocas de amostragem (média de quatro repetições).....	30
5. Teores de cobre e de zinco extraíveis e manganês trocável do solo em três épocas de amostragem (média de quatro repetições).....	32
6. Concentrações de metais (em mg kg <sup>-1</sup> ) no solo extraídos pelo método 3050B (USEPA, 1996a) em duas épocas de amostragem (média de quatro repetições).....	35
7. Teores de nitrogênio, fósforo e potássio na parte aérea das plantas em três cultivos sucessivos (média de quatro repetições).....	39
8. Teores de cálcio e magnésio na parte aérea das plantas em três cultivos sucessivos (média de quatro repetições) .....	40
9. Concentrações de metais (micronutrientes, em mg kg <sup>-1</sup> ) na parte aérea das plantas de aveia e milho (média de quatro repetições).....	44
10. Quantidades de metais (micronutrientes) absorvidas na parte aérea das plantas de aveia e milho (média de quatro repetições).....	45
11. Concentrações totais de metais pesados (em mg kg <sup>-1</sup> ) na parte aérea das plantas de aveia e milho (média de quatro repetições).....	46
12. Quantidades de metais pesados absorvidas (em µg vaso <sup>-1</sup> ) na parte aérea das plantas de aveia e milho (média de quatro repetições) .....	47

## RELAÇÃO DE FIGURAS

	Página
1 Valores de pH do solo em três épocas de amostragem (média de quatro repetições). Médias acompanhadas de mesma letra, minúscula entre tratamentos na mesma época e maiúscula entre épocas no mesmo tratamento, não diferem significativamente entre si pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ).....	24
2 Teores de cálcio trocável no solo em três épocas de amostragem (médias de quatro repetições). Dentro de cada época, médias acompanhadas de mesma letra não diferem significativamente entre si pelo teste de Tukey ( $p < 0,005$ ). Para cada tratamento, não foi observada diferença entre as épocas.....	27
3 Teores de magnésio trocável no solo em três épocas de amostragem (médias de quatro repetições). Médias acompanhadas de mesma letra, minúscula entre tratamentos na mesma época e maiúscula entre épocas no mesmo tratamento, não diferem significativamente entre si pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ).....	28
4 Produção de matéria seca das plantas em três cultivos sucessivos (média de quatro repetições). Médias acompanhadas da mesma letra não diferem significativamente entre si pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ), por cultivo.....	37
5 Quantidades de nitrogênio absorvidas por plantas de aveia e milho (parte aérea) relacionadas aos tratamentos de solo (médias de quatro repetições). Médias acompanhadas de mesma letra, não diferem significativamente entre si pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ), por cultivo.....	41
6 Quantidades de fósforo absorvidas por plantas de aveia e milho (parte aérea) relacionadas aos tratamentos de solo (médias de quatro repetições). Médias acompanhadas de mesma letra não diferem significativamente entre si pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ), por cultivo.....	41
7 Quantidades de potássio absorvidas por plantas de aveia e de milho (parte aérea) relacionadas aos tratamentos de solo (médias de quatro repetições). Médias acompanhadas de mesma letra não diferem significativamente entre si pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ) por cultivo.....	42
8 Quantidade de cálcio absorvida por plantas de aveia e milho (parte aérea) relacionadas aos tratamentos de solo (médias de quatro repetições). Dentro de cada cultivo, médias acompanhadas de mesma letra não diferem significativamente entre si pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ), por cultivo.....	42

9 Quantidades de magnésio absorvidas por plantas de aveia e milho (parte aérea) relacionadas aos tratamentos de solo (médias de quatro repetições). Médias acompanhadas de mesma letra não diferem significativamente entre si pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ), por cultivo.....

43

## 1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, tem aumentado a demanda por produtos derivados do ferro e do aço, o que tem impulsionado o crescimento do setor siderúrgico nacional. Porém, a indústria siderúrgica brasileira, embora seja a de maior expressão econômica na América Latina, ainda pode crescer muito, dado que o Brasil possui uma das maiores reservas mundiais de minério de ferro e também pelo fato de o consumo *per capita* de aço bruto ser baixo, situando-se apenas em décimo lugar em nível mundial.

Assim como a maioria dos processos industriais, a siderurgia também é geradora de resíduos. Entre os resíduos oriundos da fabricação do aço estão as escórias de siderurgia, com característica básica. As opções de reutilização, reciclagem ou descarte destes resíduos são muito restritas, o que ocasiona seu acúmulo nos pátios das indústrias. As escórias possuem características químicas adequadas para um possível uso na agricultura, dentre as quais o seu potencial em corrigir o pH do solo e o fornecimento de alguns nutrientes para as plantas. Porém, são pouco utilizadas na agricultura brasileira, diferentemente do que ocorre em alguns países, como Estados Unidos, Japão e China, onde o uso agrícola de escórias é bastante comum. Ademais, são reduzidos os trabalhos publicados na literatura nacional que tratam do uso destes resíduos na agricultura e que avaliaram a resposta das culturas à sua aplicação.

Um dos maiores entraves ao uso de resíduos industriais, dentre eles as escórias de siderurgia, é a presença de contaminantes, que podem representar riscos de poluição ao ambiente e afetar negativamente a saúde humana. Dentre os contaminantes mais comuns em resíduos, encontram-se os metais pesados,

que podem causar prejuízos às plantas e também trazer malefícios à saúde animal e humana.

A utilização no solo é uma das alternativas para descarte de resíduos industriais, devido a sua capacidade de transformar, complexar e inativar componentes destes materiais. No entanto, o descarte inadequado pode causar a contaminação do solo e da água.

Muitos solos cultivados no Brasil são ácidos e de baixa fertilidade, necessitando de correção e altas doses de fertilizantes, o que eleva o custo de produção. Assim, do ponto de vista agrônomo, a utilização no solo de resíduos com características corretivas ou fertilizantes seria uma alternativa viável de disposição final.

Neste contexto, a utilização de escórias de siderurgia em solos agrícolas deve ser estudada, tanto do ponto de vista agrônomo como ambiental. Assim, pode-se ter dois setores primários de produção que poderão se beneficiar da pesquisa. Como consequência desta interação, tem-se ainda mais uma alternativa para a destinação deste resíduo que, devido às suas características químicas e à falta de estudos mais detalhados, tem gerado um grande passivo ambiental para o setor siderúrgico.

Este trabalho se fundamenta nas seguintes hipóteses: a) a escória básica de aciaria pode ser utilizada como corretivo de acidez do solo e sua eficiência depende da dose e do tamanho de partículas (distribuição granulométrica) do material aplicado; b) a aplicação da escória favorece o crescimento e a produção de matéria seca pelas plantas; e, c) a escória aumenta a concentração de nutrientes, bem como de metais pesados no solo e nas plantas, dependendo da quantidade e do tamanho de partículas.

Os objetivos deste trabalho foram, portanto, avaliar a possibilidade de correção da acidez de um argissolo e a liberação de alguns nutrientes e metais pesados, bem como a absorção dos mesmos pelas plantas, mediante a adição de escória básica de aciaria, em diferentes doses e distribuições granulométricas.

## **2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1. Geração e características de escórias**

No Brasil, a atividade siderúrgica foi iniciada no ano de 1812, em Minas Gerais; porém, seu desenvolvimento teve grande impulso no ano de 1946, com a corrida do ferro-gusa, no então único alto-forno da Companhia Siderúrgica Nacional (CSN), instalada em Volta Redonda-RJ (Prado et al., 2001).

Na atividade da siderurgia, a primeira etapa é constituída pela obtenção do ferro bruto e impuro, chamado ferro-gusa, por meio da redução dos minérios de ferro. A escória de siderurgia é o resíduo de alto-forno, compreendendo aproximadamente 65% das escórias geradas no Brasil. Este ferro bruto, com aproximadamente de 90 % de pureza, é o produto siderúrgico básico, podendo ser utilizado na fabricação de diversos tipos de aço e de ferros fundidos (Campus Filho, 1981).

O fluxograma simplificado do processo siderúrgico pode ser observado no Apêndice 1. As matérias primas utilizadas na siderurgia são o minério de ferro, o coque mineral ou carvão vegetal e o calcário. Estes materiais são introduzidos no alto forno e reagem a uma temperatura de 1900°C. Por diferença de densidade, há a separação do ferro, que é mais denso do que a escória, sendo esta retirada por um canal de escoamento e imediatamente resfriada por jatos d'água, cujo processo é denominado "quenching". Este processo deve ocorrer logo após a saída da escória do forno, pois caso não receba água em um curto período de tempo (30 segundos) a escória solidifica-se, causando problemas de armazenamento e posterior utilização. Para a produção de uma tonelada de ferro-

gusa obtém-se 750 kg de escória de alto-forno. Posteriormente, no processamento do ferro-gusa a aço inoxidável, é gerada a escória básica de aciaria.

A produção do aço, a partir do ferro-gusa, consiste basicamente na eliminação, de forma controlada, das impurezas do ferro-gusa, por reações de oxidação (passagem de oxigênio puro ou ar em meio à massa de ferro-gusa em estado líquido a 1600°C); a presença de impurezas no aço compromete o desempenho do produto final. Para cada tonelada de aço bruto produzido na aciaria, obtém-se 200 kg de escória básica, enquanto são produzidos 100 kg de escória por tonelada de aço inoxidável (Zettermann, 2001). Anualmente, no Brasil, a produção de escórias supera 3 milhões de toneladas, além de existir grandes estoques acumulados nos depósitos de siderúrgicas (Prado et al., 2001).

A escória é um produto não-metálico, composto principalmente por silicatos e aluminossilicatos de cálcio e outras bases, que são formadas simultaneamente com o ferro no alto-forno (Guimarães, 1967). Malavolta (1981) descreve, de maneira simplificada, a escória de siderurgia como sendo a combinação da sílica do minério de ferro, que reage com o cálcio do calcário em alto-forno, resultando em silicato de cálcio e impurezas. Em metalurgia, a escória é descrita como uma fase líquida de natureza não metálica, insolúvel e menos densa que o aço, que sobrenada o banho metálico do alto-forno, com ponto de fusão menor do que o aço (Prado et al., 2001).

As escórias de siderurgia apresentam composição química formada por diversos óxidos, principalmente de Ca, Mg, Si, Fe e Mn. Deste modo, a quantidade de óxidos presentes e a sua concentração serão influenciadas pela constituição química da matéria-prima (minério de ferro, carvão e calcário ou cal) utilizada no processo de fabricação do produto siderúrgico, além do tipo de material refratário utilizado nas paredes do forno. A própria variação na composição química do minério de ferro utilizado como matéria-prima pode influenciar a composição química das escórias (Castro et al., 1990).

O principal objetivo do fabricante é a produção de acordo com as especificações de cada tipo de aço. Para tanto, busca o ajuste da composição química, a remoção das impurezas para a escória e a adequação de condições



que evitam o retorno destas impurezas para o banho metálico. Pela variação da composição, temperatura e certas propriedades da escória, também é possível controlar as concentrações de impurezas no metal. Por esta razão, é necessário formar uma escória de composição e espessura adequadas para a obtenção de um aço de alta qualidade (Zettermann, 2001).

A escória de composição desejada é formada pela introdução de uma quantidade calculada de adições (formadores de escória). Quando necessário, é feito um procedimento de remoção da escória, isto é, uma quantidade definida de escória (algumas vezes quase 100%) é removida do forno e uma nova escória de composição e propriedades desejadas é formada. Novas adições então são calculadas para a formação de uma nova escória (Zettermann, 2001).

A composição química das escórias de aço varia tanto entre as corridas como dentro delas e, portanto, de porção a porção da escória solidificada (Göldring & Juckes, 1997). Como resultado, é difícil obter amostras representativas com composição uniforme, a menos que elas sejam tiradas de pilhas de material cuidadosamente moído.

## **2.2. Legislação sobre corretivos de acidez**

Atualmente, a escória de siderurgia é classificada como corretivo da acidez do solo, porém não existe ainda uma legislação específica para este resíduo. Até a publicação da Instrução Normativa nº 4 de 2 de agosto de 2004, era utilizada a legislação aplicada aos calcários, com algumas adaptações (Brasil, 1986). Com o estabelecimento destas novas normas, ficaram estabelecidas as regras gerais de classificação e uso de corretivos da acidez, incluindo-se assim as escórias (Brasil, 2004).

De acordo com a legislação brasileira de corretivos da acidez (Brasil, 2004), a escória de siderurgia deve apresentar valores mínimos de poder de neutralização (PN) e reatividade (RE) para poder ser comercializada. O PN, que representa a capacidade potencial total de bases neutralizantes contidas em um corretivo de acidez, expresso em equivalente de carbonato de cálcio puro (% Eq  $\text{CaCO}_3$ ), para escórias deve ser no mínimo 67% e a soma dos teores de óxidos de

Ca e Mg deve ser superior a 38%, sendo estes valores os mesmos utilizados para os calcários agrícolas.

Quanto à distribuição do tamanho de partículas, o produto, na forma de pó, deve conter, no mínimo, 95% de partículas que passem em peneira de 2 mm (ABNT nº 10) e 50% em peneira de 0,3 mm (ABNT nº 50). Estes valores são usados para cálculo da reatividade (RE), que é o valor que expressa a fração percentual do corretivo que reage com o solo no prazo de 3 meses. Assim, a capacidade dos neutralizantes contidos na escória de siderurgia em reagir com o solo em um período de três meses, pode ser expressa com base no Poder Relativo de Neutralização Total – PRNT ( $PRNT \% = (PN \times RE)/100$  (Tedesco & Gianello, 1989).

Além do PN e da RE, um outro fator, relacionado com a forma de resfriamento da escória (ao ar ou por jatos d'água - “quenching”) no momento de saída do forno, pode afetar sua capacidade de corrigir o solo. Se a escória não receber “quenching”, ocorre maior recristalização dos seus constituintes, o que pode reduzir a solubilidade dos seus compostos quando adicionada ao solo. Portanto, a escória de siderurgia resfriada por “quenching” deve ser preferida para o uso agrícola.

A escória de siderurgia recém formada apresenta-se na forma granulada. Isto ocorre porque nem todo calcário usado no processo de produção do ferro-gusa é dissolvido e parte desta cal livre é hidratada com a umidade do ar, aumentando o volume dos constituintes da escória. Embora esses grânulos sejam facilmente desintegrados, sua moagem é necessária para o aumento da área superficial específica. Entretanto, o custo da moagem da escória pode ser relativamente mais alto, comparado ao do calcário, devido à maior abrasão do equipamento, provocada pela sílica contida na escória. Entretanto, a escória não tem o custo da mineração, podendo, desta forma, apresentar um custo final semelhante ao do calcário.

A exemplo dos calcários agrícolas, a eficiência da escória em reagir no solo é inversamente relacionada ao tamanho das partículas. Camargo (1972), utilizando uma escória na dose de duas vezes o teor de  $Al^{3+}$ , observou

neutralização deste elemento tanto mais rápida quanto menor a granulometria do material. Fortes (1993) estudou duas escórias de siderurgia em diferentes distribuições granulométricas, variando de 0,84 mm até menor que 0,05 mm. Concluiu que os melhores resultados foram observados com a utilização de partículas menores que 0,15 mm, aos 90 dias de incubação. Nota-se, pelos resultados da literatura, a importância da moagem fina da escória no aumento da superfície específica do material para possibilitar melhor reação no solo.

### **2.3. Correção do solo com escória de siderurgia**

A acidez é uma característica geral da maioria dos solos do Brasil e do Rio Grande do Sul. A atividade do íon  $H^+$  na solução do solo é expressa pelo pH. Essa atividade influencia algumas propriedades do solo, como a capacidade de troca de cátions (CTC), a atividade microbiana, a fitotoxicidade de alguns elementos e a disponibilidade de nutrientes.

A acidez favorece a toxidez de alumínio e de manganês e afeta negativamente a disponibilidade de nutrientes para as plantas, reduzindo o rendimento da maioria das culturas de interesse agrícola. Portanto, a correção da acidez do solo é fundamental para atingir o potencial produtivo dos cultivos. A maioria das culturas, principalmente as leguminosas, tem seus rendimentos prejudicados quando o pH do solo é menor do que 6,0. Do mesmo modo, o aumento excessivo do pH, na faixa de 7,5-8,0, é também prejudicial às plantas (Volkweiss, 1989).

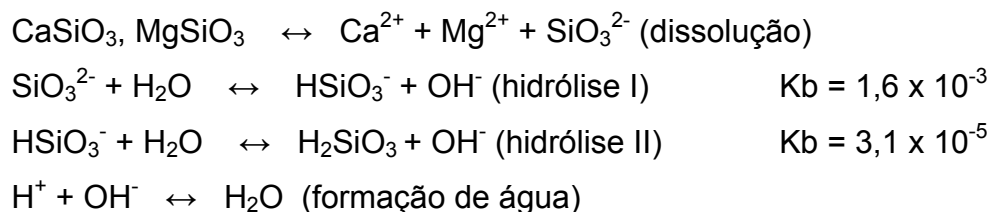
Conforme levantamento realizado em 1985, mais de 90 % das amostras de solos do Rio Grande do Sul apresentavam pH igual ou menor do que 6,0, sendo que em 75 % o pH era igual ou menor do que 5,5 (Tedesco et al., 1985). Drescher et al. (1995), dez anos depois, também em levantamento em solos do Rio Grande do Sul, obteve resultados semelhantes, sendo mais de 70 % das amostras de solos com pH abaixo de 5,5 e mais de 90 % com pH inferior a 6,0, sendo, portanto, solos ácidos a extremamente ácidos, que necessitam de correção para proporcionarem rendimentos adequados para as culturas. Mais recentemente, Rheinheimer et al. (2001), estudando resultados analíticos de aproximadamente

170.000 amostras de solos do mesmo Estado, constataram que apenas 45 % das mesmas apresentavam pH abaixo de 5,5 e 75% abaixo de 6,0, verificando-se assim um incremento na correção dos solos ao longo do tempo. Mesmo assim, ainda há um percentual relativamente alto de solos ácidos a extremamente ácidos.

Alguns trabalhos têm demonstrado o potencial de alguns resíduos industriais na elevação do pH do solo (Castilhos, 1998; Kray, 2001; Segatto, 2001; Prado & Fernandes, 2001; Wally & Castilhos, 2001; Teixeira, 2003). Além desta vantagem, o descarte de resíduos no solo proporciona a reciclagem do material, liberando elementos químicos que podem ser nutrientes minerais necessários ao desenvolvimento das plantas.

A correção da acidez do solo pela escória de siderurgia é feita pela reação no solo dos silicatos de cálcio e de magnésio ( $\text{CaSiO}_3$  e  $\text{MgSiO}_3$ ) (Barber, 1967). O silicato é dissolvido e a seguir é hidrolisado, liberando íons  $\text{OH}^-$  (Prado et al., 2001).

De acordo com Alcarde (1992), a escória de siderurgia apresenta ação neutralizante semelhante ao calcário, pela base  $\text{SiO}_3^{2-}$ , conforme as seguintes reações:



Observa-se que na hidrólise são formadas duas hidroxilas por molécula de silicato, as quais irão reagir com os íons  $\text{H}^+$  do solo, neutralizando assim a acidez.

Dependendo do material utilizado, ao se corrigir a acidez do solo, há também o aporte de nutrientes de plantas ao solo, como Ca e Mg, além de P e S. O aumento do pH do solo provoca a precipitação de formas tóxicas de Al e Mn, podendo também ocorrer a diminuição da disponibilidade de micronutrientes no solo, no caso de elevação excessiva do pH.

A reação da escória de siderurgia no solo é mais lenta do que a do calcário, indicando que o estabelecimento de doses a aplicar com base no valor de poder

de neutralização não é adequado (Fortes, 1993). Prado & Fernandes (2000), em cultivo de cana-de açúcar em vasos, compararam a escória de alto-forno e um calcário calcítico, tendo observado que a escória apresentou reação de correção da acidez mais lenta no solo. Concluíram que a eficiência da escória, baseada no critério do valor do poder de neutralização adotado para o calcário, não foi satisfatória em estimar a necessidade de produto para a correção da acidez. Luz et al. (2002), em estudo de incubação em laboratório, observaram que a escória básica de aciaria finamente moída (<0,149 mm de diâmetro de partículas) pode ser eficiente na correção da acidez dos solos, principalmente se a dose a ser aplicada não for muito elevada. Estes autores aplicaram quatro doses crescentes de escória e concluíram que para a dose de uma vez a necessidade de calcário para atingir pH 6,0, a escória foi eficiente na correção da acidez em solos com diferente poder tampão de acidez.

#### **2.4. Outros benefícios da escória à fertilidade do solo**

A escória pode trazer outros benefícios á fertilidade do solo, não apenas pela influência no aumento do pH, mas por conter em sua constituição química alguns micronutrientes como Mn, Cu, Zn e Fe (Barber, 1967).

Como fontes disponíveis de micronutrientes no Brasil, são utilizados os óxidos silicatados (conhecidos como “fritas”), os sais solúveis e a escória de siderurgia. Louzada (1987) ressalta que a escória apresenta vantagens em relação às fritas por ter liberação mais rápida dos elementos, além do efeito de correção da acidez do solo. Prado et al. (2001) aplicaram a escória de siderurgia em quatro doses: 0; 3,0; 6,1 e 9,3 t ha<sup>-1</sup>, equivalentes a 0; 1,23; 2,52 e 3,80 t ha<sup>-1</sup> de CaCO<sub>3</sub>, incorporada na camada de zero a 20 cm, em pré-plantio de cana-de-açúcar. Foram determinadas as concentrações de Fe, Mn, Cu, Zn e B no solo, extraídos com solução de DTPA 0,005 mol L<sup>-1</sup> pH 7,3, aos 12 e 24 meses após a aplicação. A escória de siderurgia propiciou maior efeito residual na disponibilidade de Fe, Cu e Zn no solo. Deste modo, a aplicação da escória de siderurgia pode corrigir a acidez do solo e, ao mesmo tempo, fornecer nutrientes. Sendo assim, apresentaria vantagem em relação ao calcário, uma vez que esse

produto não apresenta, em sua composição, teores suficientes para ser considerado fonte de micronutrientes (Valadares et al., 1974).

A escória de siderurgia pode também ser fonte de silício no solo, o que pode beneficiar diretamente algumas culturas que absorvem este elemento em grandes quantidades. No entanto, ainda é muito incipiente o conhecimento das razões pelas quais o silício, mesmo não sendo considerado um elemento essencial, beneficia algumas culturas, principalmente as gramíneas (Prado et al., 2001).

Atualmente, vários autores têm estudado a importância do Si para algumas espécies de plantas. A maior absorção de Si beneficia principalmente as plantas consideradas acumuladoras deste elemento em seus tecidos, aumentando a resistência a pragas e doenças e a capacidade fotossintética, além de propiciar maior tolerância à falta de água (Anderson et al., 1987). O efeito desse elemento no crescimento vegetal parece também estar relacionado às relações do mesmo com o P no solo e na planta. (Alcoforado et al., 2003).

No Japão, 25% da área cultivada com arroz é adubada anualmente com silicato de cálcio, nas doses de 0,5 a 1,0 t ha<sup>-1</sup>, embora a quantidade recomendada seja 1,5 a 2,0 t ha<sup>-1</sup> (Korndörfer et al., 1999). Além do aumento da produtividade, alguns trabalhos indicam que ocorre maior resistência das plantas a várias doenças. Queiroz et al. (2003) observaram, em um experimento em vasos, que quanto maior a dose de Si aplicada ao solo, menor foi a severidade de brusone nas folhas e maior a produtividade da cultura do arroz irrigado.

Um efeito secundário da adição de silício ao solo é o aumento da disponibilidade de fósforo. Este incremento pode ser devido a) o ânion silicato no solo pode competir com os íons fosfato pelos mesmos sítios de adsorção, diminuindo a adsorção de P; b) o silício poderia também deslocar o P previamente adsorvido para a solução do solo, sendo este efeito entretanto menos pronunciado (Prado et al., 2001).

Prado & Fernandes (1999) estudaram, em vasos, os efeitos da escória de siderurgia de alto-forno e do calcário no aumento do fósforo disponível, em dois solos ácidos de cerrado (Areia Quartzosa e Latossolo Vermelho-Escuro argiloso),

cultivados com cana-de-açúcar. Foi observado que, na Areia Quartzosa, o P extraído por resina aumentou em 27% com a aplicação de escória em relação ao calcário. No Latossolo Vermelho-Escuro, a escória de siderurgia apresentou efeito semelhante ao calcário no incremento do fósforo disponível, mesmo quando aplicada apenas a metade da dose equivalente a  $\text{CaCO}_3$ . Os mesmos autores (Prado & Fernandes, 2001) em experimento em vasos, determinaram o P disponível em um Latossolo Vermelho-Amarelo, após as aplicações de calcário calcítico e de escória de alto-forno, em doses adequadas para elevar a saturação por bases a 50%, 75% e 100%. Observaram efeito linear da adição da escória de siderurgia no P disponível do solo, em contraste com a ausência de efeito quando foi aplicado calcário. Este fato indica que o efeito positivo da escória de siderurgia na disponibilidade de P deve-se mais à saturação por silicato dos sítios de adsorção de P do que ao efeito do aumento do pH.

## **2.5. Uso de escórias e sua relação com o ambiente**

Em geral, as escórias apresentam em sua constituição alguns elementos que podem restringir seu uso agrícola, principalmente pela presença de metais pesados. A escória de aço inox apresenta elevado teor de óxido de cromo e outros metais pesados em menor quantidade. Atualmente a totalidade das escórias de aço inox produzidas no Estado do Rio Grande do Sul é estocada em depósitos cobertos, devido às restrições de uso estabelecidas pela Fundação Estadual de Proteção Ambiental (FEPAM), principalmente por conter cromo na sua composição (Zettermann, 2001).

A concentração de metais na escória de siderurgia pode variar em função do seu tipo e do processo siderúrgico adotado. Alguns autores alertam para o risco de contaminação do ambiente (Defelipo et al., 1992). Pode-se destacar que, dos metais pesados existentes, os mais perigosos, pela toxicidade e potencial de bioacumulação, são: Cd, Cu, Zn e Pb.

São designados metais pesados aqueles elementos que apresentam densidade maior do que  $5 \text{ g cm}^{-3}$ . Essa classificação compreende grupos de metais, semi-metais e até não metais (selênio). Alguns dos metais pesados mais

tóxicos são o mercúrio (Hg), o chumbo (Pb), o cádmio (Cd), o cobre (Cu), o níquel (Ni) e o cobalto (Co). Os três primeiros são particularmente tóxicos para animais superiores. Os três últimos são denominados fitotóxicos por serem mais tóxicos para as plantas do que para os animais (McBride, 1994). Alguns destes metais são geralmente encontrados nas escórias, tornando-as um material de alta periculosidade se dispostas no ambiente. Esses metais podem também ser acumulados no solo pelo uso contínuo e prolongado de resíduos industriais e urbanos, pela utilização de água de irrigação poluída e pela deposição atmosférica.

Conforme a literatura, existem alguns exemplos de alternativas de uso de escórias, principalmente as de alto-forno, cuja utilização já é de rotina. Em contrapartida, as escórias provenientes da fabricação de aço-inox, foram pouco estudadas, havendo poucas informações disponíveis, talvez devido à limitação que a presença de óxido de cromo impõe ao seu uso agrícola (Zettermann, 2001).

Além do uso agrícola, as escórias de alto-forno estão sendo usadas atualmente para diversos fins, como: nas indústrias de cimento; na pavimentação, como componente do asfalto; na construção civil, misturadas na massa de concreto; nas indústrias de cerâmica, compondo o vidro-cerâmica; e até mesmo nas indústrias de tintas, como pigmentos (Prado et al., 2001). Deve-se considerar que esses setores, com exceção da agricultura, possuem baixo potencial de consumo, seja por restrições técnicas de uso, seja pela falta de pesquisa na área, o que implicaria no crescimento, a cada ano, dos pátios de deposição destes resíduos.

Diante da grande quantidade produzida, muitas vezes estes resíduos são dispostos em locais impróprios, expostos às intempéries, representando perigo de contaminação do ambiente. Estes locais, denominados aterros sanitários, possuem um custo relativamente alto para as indústrias siderúrgicas (Zettermann, 2001).

A não disposição de resíduos de forma adequada e segura, em locais determinados pela legislação, faz com que a empresa produtora fique sujeita a multas referentes a crimes ambientais e, atualmente, a privação do certificado ISO



14001. Além disto, a legislação ambiental brasileira encontra-se fortalecida pela criação da lei de crimes ambientais – lei 9.605/98, de 28 de outubro de 1998, que definiu o crime de poluição (*art. 54 – causar poluição de qualquer natureza em níveis tais que resultem ou possam resultar em danos à saúde humana, ou que provoquem a mortalidade de animais ou a destruição significativa da flora: pena de reclusão, de um a quatro anos, e multa a qualquer pessoa física ou jurídica*).

Assim, têm sido estudadas maneiras de reduzir os impactos ambientais causados por resíduos, através de técnicas que priorizam obedecer às normas da legislação de proteção ambiental brasileira.

Existem duas maneiras para reduzir os impactos ambientais: a) ajuste nos processos de produção da siderúrgica, para evitar ou diminuir a geração de resíduos; e, b) reciclagem dos resíduos gerados, seja no próprio processo produtivo siderúrgico, seja como matéria-prima em outros setores, como a agricultura, por exemplo (Prado & Fernandes, 2001)

A reciclagem em outros setores da indústria é pequena. Na agricultura, este potencial de uso é maior, podendo-se utilizar grande parte das escórias geradas. Esta prática entretanto é pouco utilizada no Brasil. No entanto, o uso agrícola é uma forma aceita em várias partes do mundo, para a destinação final de escórias. Neste setor, o potencial de uso é bastante elevado, devido à sua ação como corretivo da acidez de solo ou como fonte de alguns nutrientes ou silício. A escória de alto-forno pode ser também utilizada na indústria de fertilizantes, como um agente fundente, juntamente com fosfato natural, para a produção de adubos fosfatados, num processo similar ao do termofosfato (Firme et al., 1990).

Os órgãos ambientais geralmente restringem a utilização de resíduos industriais que contêm metais pesados, potencialmente tóxicos. A presença de metais pesados na água ou no solo apresenta efeitos diversos, desde efeitos benéficos (suprimento de micronutrientes), a restritivos ou mesmo tóxicos. Alguns metais são essenciais ao ser humano, como, por exemplo, o cobre, o zinco e o manganês. Outros podem ser tóxicos, como o chumbo, o cádmio, o mercúrio e o cromo. O fato de alguns metais serem benéficos ou potencialmente tóxicos

depende da concentração em que se encontram; por exemplo, cobre, manganês e zinco, são micronutrientes mas em altas concentrações são tóxicos às plantas.

Mesmo para as escórias mais comuns, como a de alto-forno e a de aciaria, a literatura apresenta poucos resultados experimentais que permitam avaliar com segurança a transferência dos metais pesados ao sistema solo-planta.

Alguns fatores podem justificar o menor potencial de impacto dos metais pesados presentes na escória de siderurgia no ambiente. Foi observado que a solubilidade dos metais pesados presentes neste material diminui com o decorrer do tempo de aplicação. Amaral Sobrinho et al. (1997), em estudo de extração sequencial de metais, observaram que após dezoito meses de incubação de um Podzólico Vermelho-Amarelo com resíduos siderúrgicos, a solubilidade destes elementos diminuiu. Esta redução de solubilidade pode ser devida à passagem das formas mais solúveis para as formas retidas em óxidos e residual. Isto pode ser explicado pelo fenômeno de quimiossorção de metais pesados, influenciado pelo aumento do pH (Sposito, 1989).

A legislação brasileira que regulamenta o uso de corretivos da acidez, pela Instrução Normativa nº 4, determina que o registro de escórias de siderurgia para uso na agricultura só será concedido com base em resultados de trabalho de pesquisa ou parecer de instituição de pesquisa oficial que ateste a viabilidade de seu uso agrícola. E ainda, deverá ser apresentada manifestação do órgão ambiental competente sobre a adequação de seu uso na agricultura, sob o ponto de vista ambiental (Brasil, 2004). No caso do Rio Grande do Sul, conforme a FEPAM, o cromo presente nas escórias de aço inox confere periculosidade ao resíduo, que portanto é enquadrado na classe I, conforme especificações técnicas da ABNT.

A Norma NBR 10.000 (ABNT, 1987) classifica os resíduos quanto aos seus riscos potenciais ao meio ambiente e à saúde pública, indicando quais os resíduos que devem ter manuseio e destinação mais rigidamente controlados. A classificação proposta é fundamentada em características dos resíduos reconhecidamente perigosos e de padrões de concentração de poluentes e em

alguns testes e ensaios de apoio. Conforme esta norma, os resíduos são classificados em três classes:

- a) Resíduos Classe I – Perigosos – inclui resíduos sólidos ou misturas de resíduos que podem apresentar riscos à saúde pública, em função de suas características de inflamabilidade, corrosividade, reatividade, patogenicidade e toxicidade;
- b) Resíduos Classe II – Não Inertes – inclui os resíduos sólidos ou misturas de resíduos que não se enquadram na Classe I - Perigosos ou Classe III – Inertes, podendo ter propriedades como combustibilidade, biodegradabilidade ou solubilidade em água. Agrupa a maioria dos resíduos existentes e, principalmente, aqueles que podem ter o solo como destinação final;
- c) Resíduos Classe III – Inertes – inclui os resíduos que, submetidos aos ensaios de solubilização (NBR 10.006) não tenham nenhum de seus compostos solubilizados em concentrações superiores aos padrões definidos (ABNT, 1987).

Esta classificação pode agregar, em uma mesma classe, resíduos com características diferentes, que podem proporcionar diferentes reações dependendo do tratamento e manejo (Teixeira, 2003).

Segundo Mattiazzo-Prezoto & Glória (2000), a classificação de um resíduo em Classe I ou II não inviabiliza o seu uso agrícola, pois os testes para classificação consideram apenas as características de solubilidade em água ou ácido de elementos presentes no resíduo. Entretanto, quando a destinação é o solo, ocorrem reações específicas conforme as propriedades físicas, químicas e biológicas de cada tipo de solo. Por isso, o conhecimento destes aspectos é fundamental para a diminuição dos impactos ambientais pelo adequado manejo dos resíduos (Teixeira, 2000).

## **3 MATERIAL E MÉTODOS**

### **3.1 Histórico e caracterização do experimento**

A avaliação dos efeitos da aplicação dos tratamentos sobre as propriedades do solo e a resposta das plantas foi feita num experimento em vasos, conduzido a céu aberto, em área pertencente ao Departamento de Solos da Faculdade de Agronomia, UFRGS. Este trabalho teve início em maio de 2003, em seqüência a um experimento instalado em abril de 2002. Ao todo, foram feitos três cultivos, dois de inverno (aveia) e um de verão (milho), sendo avaliadas a produção de matéria seca e a composição química da parte aérea das plantas. Em seqüência aos cultivos, foram feitas amostragens de solo para caracterização química e avaliação dos efeitos dos tratamentos.

### **3.2 Caracterização do resíduo**

Foi utilizada no experimento a escória básica de aciaria, proveniente do processo de fabricação de aço inoxidável de uma siderúrgica localizada no Estado do Rio Grande do Sul. O processo que resulta na produção da escória é ilustrado no Apêndice 1. A coleta foi feita por amostragem conforme as normas da NBR 10.007 (Rodrigues et al., 1993), na área de estocagem da escória, totalizando 10 kg. Parte da amostra foi moída e tamisada, em peneiras de 0,149 mm, 0,50 mm, 2,0 mm e 15,0 mm. Foram determinados na escória os teores totais dos principais elementos, no extrato de digestão de amostra finamente moída, pelo método EPA 3052 (USEPA, 1996b), sendo as concentrações dos elementos Ca, Mg, Fe, Mn, Cu, Zn, Cd, Cr, Ni e Pb determinadas por espectroscopia de absorção atômica; P, por espectroscopia de absorção molecular; e, K e Na, por fotometria de chama. A

determinação do valor de neutralização (VN) foi feita por ataque ácido, conforme Tedesco et al. (1995). A caracterização da escória é apresentada na Tabela 1.

Tabela 1. Características químicas do resíduo (escória) utilizado no experimento (médias de duas repetições)

Determinação	Valor <sup>(1)</sup>	Determinação	Valor <sup>(1)</sup>
Fósforo (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ), (mg kg <sup>-1</sup> )	< 0,37	Cádmio (mg kg <sup>-1</sup> )	2,3
Potássio (K <sub>2</sub> O), (mg kg <sup>-1</sup> )	132,5	Chumbo (mg kg <sup>-1</sup> )	6,2
Cálcio (CaO), (g kg <sup>-1</sup> )	320	Cobre (mg kg <sup>-1</sup> )	21,4
Magnésio (MgO), (g kg <sup>-1</sup> )	79	Cromo (g kg <sup>-1</sup> )	4,62
Sódio (mg kg <sup>-1</sup> )	120,7	Manganês (g kg <sup>-1</sup> )	3,41
Valor de neutralização (%)	70	Níquel (mg kg <sup>-1</sup> )	93,8
Ferro (g kg <sup>-1</sup> )	12,1	Zinco (mg kg <sup>-1</sup> )	56,4

<sup>(1)</sup> Os valores expressam as concentrações totais.

### 3.3 Caracterização do solo

Foi utilizado no experimento um solo da unidade de mapeamento São Jerônimo, classificado como Argissolo Vermelho distrófico típico – PVd (Streck et al., 2002), coletado em área de campo nativo, da camada de zero a 20 cm de profundidade, na Estação Experimental Agronômica da UFRGS, localizada no município de Eldorado do Sul, RS. Após a coleta, o solo foi seco ao ar, homogeneizado e tamisado em peneira de 4 mm de diâmetro de orifícios. A caracterização físico-química original do solo é apresentada na Tabela 2.

### 3.4 Tratamentos e delineamento experimental

Os tratamentos (com quatro repetições) estudados foram:

- T 1 – Testemunha (solo na condição original);
- T 2 – Com calcário para atingir pH 6,5 (CaCO<sub>3</sub>+MgCO<sub>3</sub>);
- T 3 – Com calcário para atingir pH 6,5 + adubação NPK (CaCO<sub>3</sub>+MgCO<sub>3</sub> + NPK);
- T 4 – Escória (1), com diâmetro de partículas <0,149 mm, na quantidade de 1 x SMP para atingir pH 6,5 (Escória nível 1);

- T 5 – Escória (1), com diâmetro de partículas  $<0,149$  mm, na quantidade de 1 x SMP para pH 6,5 + NPK (Escória nível 1 + NPK);
- T 6 – Escória (2), com  $\frac{2}{3}$  das partículas de diâmetro entre 0,149 mm e 0,5 mm e  $\frac{1}{3}$  menor que 0,149 mm, na quantidade de 2 x SMP para pH 6,5 + NPK (Escória nível 2 + NPK);
- T 7 – Escória (1), com diâmetro de partículas  $<0,149$ mm, na quantidade de 1 x SMP para atingir pH 6,5 + N (Escória nível 1 + N);
- T 8 – Escória (5), com diâmetro de partículas entre 0,5 mm e 2,0 mm, na quantidade de 5 x SMP para atingir pH 6,5 + calcário para atingir pH 6,5 + NPK (Escória nível 5 + trat. 3);
- T 9 – Escória (10), com diâmetro de partículas entre 2,0 mm e 15,0 mm, na quantidade de 10 x SMP para atingir pH 6,5 + calcário para atingir pH 6,5 + NPK (Escória nível 10 + trat. 3).

Tabela 2. Caracterização físico-química do solo utilizado no experimento

Determinação <sup>(1)</sup>	Valor	Determinação <sup>(1)</sup>	Valor
Argila (g kg <sup>-1</sup> )	300	CTC efetiva (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	3,2
Matéria orgânica (g dm <sup>-3</sup> )	22	CTC pH 7,0 (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	5,9
pH (em H <sub>2</sub> O)	4,8	Saturação por bases (%)	44
Índice SMP <sup>(2)</sup>	6,1	Saturação por alumínio (%)	19
P (Mehlich -1) (mg dm <sup>-3</sup> )	10	S (S-SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ) (mg dm <sup>-3</sup> )	8,1
K (Mehlich -1) (mg dm <sup>-3</sup> )	162	Cu (HCl 0,1 mol L <sup>-1</sup> ) (mg dm <sup>-3</sup> )	0,9
Al (KCl 1 mol L <sup>-1</sup> ) (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	0,6	Zn (HCl 0,1 mol L <sup>-1</sup> ) (mg dm <sup>-3</sup> )	1,4
Ca (KCl 1 mol L <sup>-1</sup> ) (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	1,4	B (água quente) (mg dm <sup>-3</sup> )	0,8
Mg (KCl 1 mol L <sup>-1</sup> ) (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	0,8	Mn (KCl 1 mol L <sup>-1</sup> ) (mg dm <sup>-3</sup> )	8,0
H+Al (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	3,3		

(1) Determinações conforme metodologias descritas por Tedesco et al. (1995).

(2) Necessidade de calcário (PRNT 100%) para atingir pH 6,5 = 4,3 t/ha.

A calagem foi feita com a mistura de CaCO<sub>3</sub> + MgCO<sub>3</sub> (3:1 em peso), com PRNT 100%, para obter o valor de pH 6,5, conforme o índice SMP; no nível 1 de aplicação de escória, foi utilizado o VN de 60%, determinado previamente em

estudo de incubação (Luz et al., 2002), utilizando o material com granulometria < 0,149 mm de diâmetro de partículas (7,2 t/ha).

As adições de P, K e N foram feitas por aplicações de superfosfato triplo, cloreto de potássio e uréia, respectivamente. As quantidades de corretivo, escória e fertilizantes adicionadas foram calculadas utilizando-se como base de cálculo a massa de  $2,4 \times 10^6$  kg de solo seco por hectare, sendo equivalentes às doses apresentadas no Apêndice 2.

O experimento foi conduzido em delineamento em blocos casualizados, com quatro repetições.

### **3.5 Instalação e condução do experimento**

Como unidade experimental foi utilizado um vaso constituído por uma coluna de PVC com 20 cm de diâmetro e 35 cm de altura, com capacidade para  $10 \text{ dm}^3$  de solo, fechada na extremidade inferior com disco de madeira, impermeabilizada com resina epoxi. Sobre este foi colocada uma camada de brita com 5 cm de espessura, coberta com uma tela de polietileno e feito um orifício na parede lateral, a 0,5 cm do fundo, inserindo-se no mesmo um tubo de silicone para possibilitar a drenagem da água percolada.

Os tratamentos foram aplicados ao solo no dia 22/04/02. À exceção da adubação de cobertura, todos os materiais foram quantificados e aplicados individualmente nos respectivos vasos, sendo misturados e homogeneizados com a massa de solo. A partir de então, os vasos foram mantidos em área telada, a céu aberto, sob condição de chuva natural. Durante os cultivos, quando necessário, foi feita irrigação complementar, conforme a demanda hídrica das culturas.

Após o início do experimento, foram conduzidos três cultivos sucessivos com gramíneas, dois no inverno e um no verão. No primeiro, iniciado em 29/04/02, foi cultivada a aveia branca (*Avena sativa*), semeando-se 18 sementes por vaso. A adubação utilizada para este cultivo foi de  $200 \text{ kg ha}^{-1}$  de  $\text{P}_2\text{O}_5$  (superfosfato triplo) na base, misturado ao solo, e  $100 \text{ kg ha}^{-1}$  de N (uréia) em cobertura. Não foi aplicado K neste cultivo, tendo em vista que este elemento encontrava-se em teor alto no solo (Comissão..., 1995) (Tabela 2). A emergência das plantas ocorreu no

dia 04/05/2002. Cinco dias após, foi feito o desbaste para 6 plantas por vaso e, aos 20 dias após a emergência, foi feita a adubação nitrogenada de cobertura (uréia em solução). Aos 65 dias de cultivo, foi colhida a parte aérea das plantas, cortando-as rente ao solo.

O segundo cultivo foi iniciado em 02/08/03, tendo sido plantadas 15 sementes de aveia preta (*Avena strigosa*) por vaso. A adubação utilizada para este cultivo foi de 200 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (superfosfato triplo) e 100 kg ha<sup>-1</sup> de K<sub>2</sub>O (KCl) na base, misturado ao solo, e 100 kg ha<sup>-1</sup> de N (uréia) em cobertura (Comissão..., 1995). A emergência das plantas foi observada no dia 08/08/03. A 14 dias após a emergência foi feito o desbaste, deixando-se oito plantas por vaso. A adubação de cobertura (uréia em solução) foi feita a 25 dias após a emergência. Após 67 dias da emergência, foi cortada a parte aérea das plantas, rente ao solo.

O terceiro cultivo foi iniciado em 13/01/04, tendo sido plantadas oito sementes de milho (*Zea mays*) por vaso. A adubação utilizada para o cultivo do milho foi de 200 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (superfosfato triplo) e 100 kg ha<sup>-1</sup> de K<sub>2</sub>O (KCl) na base, misturado ao solo, e 180 kg ha<sup>-1</sup> de N (uréia) em cobertura, dividida em 2 aplicações (Comissão..., 1995). A emergência das plantas ocorreu em 17/01/04 e o desbaste foi feito dois dias após, deixando-se quatro plantas por vaso, tendo sido aplicado no mesmo dia a metade da adubação nitrogenada de cobertura (uréia em solução). A segunda adubação de cobertura foi feita 12 dias após a primeira. Para o controle de insetos (*Diabrotica speciosa*), foram feitas duas aplicações de inseticida Decis 50SC, aos 5 e aos 15 dias após a emergência. Após 32 dias da emergência, foi cortada a parte aérea das plantas rente ao solo.

### **3.6 Amostragem, preparo das amostras e determinações analíticas**

#### **3.6.1 Solo**

Após cada cultivo, o solo de cada vaso foi amostrado na camada de zero a 20cm, com trado calador, sendo cada amostra composta por 3 subamostras/vaso. Estas amostragens foram feitas a aproximadamente 12, 18 e 24 meses após a aplicação inicial dos tratamentos ao solo. Após cada coleta, as amostras foram homogeneizadas, secas em estufa a 45°C, moídas em moinho de martelos e tamisadas em peneira de 2 mm de diâmetro de orifícios. Nas amostras secas,



foram feitas as seguintes determinações, conforme metodologia descrita por Tedesco et al. (1995): pH em água (relação 1:1), índice SMP; H+Al (acidez potencial, por correlação com o índice SMP); fósforo e potássio disponíveis (Mehlich-1); cálcio, magnésio, alumínio e manganês trocáveis (extrator KCl 1 mol L<sup>-1</sup>); zinco e cobre extraíveis (HCl 0,1 mol L<sup>-1</sup>). Nas amostras coletadas aos 12 e 24 meses, foram também determinados os teores de cobre, zinco, manganês, cádmio, cromo e níquel, pela metodologia proposta pela EPA, método 3050b (USEPA, 1996a). Nos extratos obtidos, as determinações de P e K foram feitas por espectroscopia de absorção molecular (colorimetria) e fotometria de chama, respectivamente; os outros elementos foram determinados por espectroscopia de absorção atômica (chama acetileno-óxido nitroso para Cr e ar-acetileno para os demais). Com os dados obtidos, foram ainda calculados os valores de CTC efetiva, CTC a pH 7,0 e de saturação por bases, conforme Tedesco et al. (1995).

### **3.6.2 Plantas**

A parte aérea das plantas de aveia e de milho foi seca em estufa com circulação forçada de ar, a 65 °C, até peso constante, pesada e moída em moinho de navalhas de aço inoxidável (tipo Wiley), equipado com peneira de 1 mm de diâmetro de abertura de malha. As amostras foram mantidas em potes plásticos fechados até serem analisadas.

Foram determinados nas plantas, os teores totais de nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio e magnésio por digestão ácida com H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> + H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> + mistura de digestão, conforme metodologia descrita por Tedesco et al. (1995). Nos tratamentos 1, 2, 3, 5, e 6, os teores totais de cobre, ferro, cádmio, chumbo, cromo, manganês, níquel e zinco foram determinados por digestão ácida (digestão nítrico-perclórica), conforme metodologia descrita por Tedesco et al. (1995) e adaptada por Scolmeister (1999). Nos extratos, o N foi determinado por destilação; o P por espectroscopia de absorção molecular (colorimetria); o K por fotometria de chama e os outros elementos por espectroscopia de absorção atômica (chama acetileno-óxido nitroso para Cr e ar-acetileno para os demais).

### **3.7 Análise estatística**

Em geral, a análise estatística foi feita independentemente para cada cultivo, seguindo o delineamento de blocos casualizados, com quatro repetições. A análise de variância (teste F) e a comparação de médias de tratamentos pelo Teste de Tukey a 5% de probabilidade foram feitas com a utilização do software Sanest (Zonta & Silveira, 1984). Para dados de algumas determinações de solo, foram comparadas as médias de épocas de amostragem, dentro de cada tratamento, a partir de efeito de interação.

## **4 RESULTADOS E DISCUSSÃO**

A apresentação dos resultados obtidos neste trabalho será dividida em duas partes. Inicialmente, serão apresentados os resultados referentes às alterações de características químicas do solo devidas à adição do resíduo de siderurgia, tais como os atributos relacionados à acidez do solo e os teores de macro e micronutrientes e metais pesados. Posteriormente, serão apresentados os resultados obtidos nos ensaios com plantas referentes à produção de matéria seca e às concentrações e absorção de nutrientes e metais pesados.

### **4.1 Atributos químicos do solo**

#### **4.1.1 Fatores da acidez**

O efeito dos tratamentos sobre as características químicas do solo foi avaliado aos 12, 18 e 24 meses após a aplicação dos materiais.

Os valores de pH nos tratamentos com a aplicação de calcário e/ou escória, determinados nas diferentes etapas, foram maiores do que os determinados no tratamento testemunha (Figura 1), demonstrando a eficiência destes dois corretivos na correção do pH do solo. Em geral, os valores obtidos foram próximos ao pH a ser atingido, ou seja, 6,5 (Apêndice 3).

A aplicação de escória na quantidade equivalente a 1 SMP para pH 6,5, com granulometria fina (tratamentos 4, 5 e 7), proporcionou efeito semelhante ao carbonato na correção do pH. Resultados similares foram obtidos por Prado & Fernandes (2001) para uma escória de siderurgia e um calcário, incorporados no solo em pré-plantio de cana-de-açúcar. O efeito corretivo da escória utilizada reflete as quantidades de CaO e MgO presentes em sua composição (Tabela 1), devidos à adição de calcário no processo da fabricação de aço e ferro-gusa (Campus Filho, 1981). Por outro lado, Fortes (1993)

comparando os efeitos da aplicação de duas escórias de siderurgia de alto-forno da fabricação de ferro-gusa e do calcário, em dois Latossolos Vermelho-Amarelos, de diferentes texturas, observou reação mais lenta das escórias. Este fato pode ser devido à presença de impurezas neste resíduo, tais como alumínio, que reduzem sua solubilidade (Ando et al., 1988). Porém, neste trabalho, as reações da escória e do calcário foram semelhantes, sendo ambos aplicados com base no poder de neutralização.

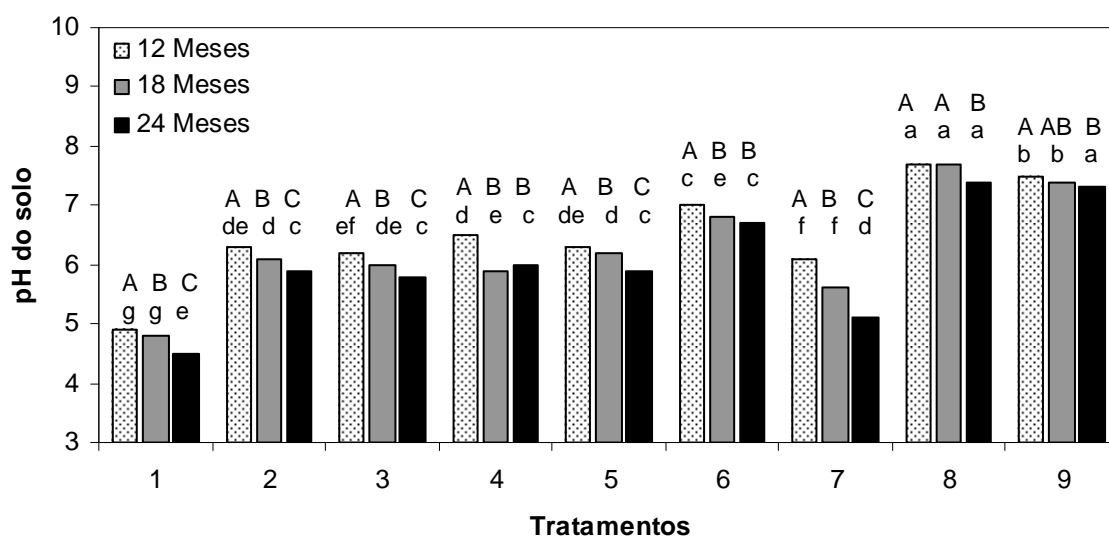


Figura 1. Valores de pH do solo em três épocas de amostragem (média de quatro repetições). Médias acompanhadas de mesma letra, minúscula entre tratamentos na mesma época e maiúscula entre épocas no mesmo tratamento, não diferem significativamente entre si pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ).

A composição granulométrica da escória tem efeito na reatividade. No tratamento 9, a adição do dobro da dose de escória em relação ao tratamento 8 não resultou em aumento do pH. Porém, comparando-se estes dois tratamentos com os demais, observou-se o efeito adicional significativo da escória na elevação do pH. Em ambos, a aplicação de calcário teve o objetivo de elevar o pH a 6,5, mas os valores determinados, já ao final de 12 meses, foram significativamente superiores aos tratamentos com apenas carbonato (2 e 3). Embora tenham sido aplicadas maiores doses, nota-se que as frações granulométricas mais grossas da escória estudada tiveram alguma reatividade no solo no período avaliado, o que normalmente não é observado para partículas de mesmo tamanho de calcários agrícolas (Tedesco & Gianello,

1989). Este efeito foi também observado em outros atributos químicos avaliados, como acidez potencial, teores de Ca e Mg trocáveis e saturação por bases, a serem apresentados adiante.

É amplamente referida na literatura a importância da diminuição do tamanho das partículas de calcários agrícolas no aumento da superfície específica e conseqüente maior reatividade no solo. Em trabalho de campo, Pandolfo & Tedesco (1996) determinaram que as partículas de calcário menores que 0,053 mm (peneira ABNT n°. 270) reagem completamente em menos de um mês e que partículas entre 2,00 e 0,84 mm (peneiras ABNT n°.10 e n°.20, respectivamente) necessitam de prazo maior que 60 meses para completa reação, enquanto as maiores que 2,00 mm praticamente não reagiram no período.

Para as escórias, entretanto, as informações a respeito são mais escassas. Piau (1991), estudando diferentes escórias comparadas ao calcário em duas frações granulométricas (peneiras ABNT 50-60 e 100-140), concluiu que a moagem dos produtos em estudo, com partículas passando em peneira ABNT 50-60, foi suficiente para a correção da acidez do solo aos 90 dias de incorporação. Camargo (1972), utilizando uma escória na dose de duas vezes o teor de  $Al^{3+}$  em dois solos, verificou que a neutralização deste elemento foi tanto mais rápida quanto menor o tamanho de partículas do material. Fortes (1993) estudou duas escórias de siderurgia em diferentes composições granulométricas, variando de 0,84 mm até menor que 0,05 mm. Concluiu que os maiores efeitos foram observados com a aplicação de partículas menores que 0,15 mm, aos 90 dias de incubação.

Pode-se considerar que a maior reatividade de partículas de maior diâmetro da escória, comparativamente ao calcário, pode ser atribuída ao fato de os compostos neutralizantes presentes na escória terem maior solubilidade que o carbonato do calcário. Assim, a determinação da quantidade de escória a ser aplicada deve ser ajustada ao poder de neutralização, à reatividade da mesma e ao poder tampão do solo, para evitar o aumento excessivo do pH.

Em geral, no decorrer do período de avaliação, foi observada significativa diminuição do pH do solo (Figura 1), como por exemplo no tratamento calcário + NPK (tratamento 3). Constatou-se o maior decréscimo no tratamento 7, no qual a escória foi complementada apenas com N e as plantas

tiveram restrição ao crescimento, como será discutido mais adiante. A acidificação do solo é um processo natural favorecido pelo uso de fertilizantes nitrogenados, lixiviação de bases, mineralização da matéria orgânica, etc. (Bissani et al., 2004).

Foi observada diferença significativa entre os tratamentos 5 e 6 quanto à correção do pH do solo nas três épocas de amostragem (Figura 1). Esta diferença deve-se, principalmente, à maior quantidade de escória aplicada no tratamento 6. Observa-se ainda que o material com partículas entre 0,149 mm e 0,5 mm deste tratamento reagiu no solo, porém esta fração de partículas não assegurou maior poder residual ao material, pois houve diminuição do pH do solo com o passar do tempo de aplicação, em ambos os tratamentos.

O teor de  $Al^{3+}$  trocável do solo apresentou relação inversa ao valor do pH (Tabela 3), sendo detectado apenas no tratamento testemunha, nas três épocas avaliadas. Nos tratamentos com adição de carbonato e/ou escória, o  $Al^{3+}$  foi neutralizado, devido à elevação do pH do solo nesses tratamentos em níveis maiores que 5,5. A neutralização do alumínio é devida à precipitação por oxidrilas liberadas dos materiais corretivos (Volkweiss, 1989).

A acidez potencial do solo (H+Al) diminuiu com a adição dos materiais corretivos, quando comparado à testemunha (Tabela 3). A maior redução ocorreu nos tratamentos 8 e 9, os quais apresentaram valores de pH significativamente superiores aos demais. Entre as diferentes épocas não houve efeito significativo dos tratamentos na redução da acidez potencial.

#### **4.1.2 Cálcio e magnésio trocáveis**

Os teores de cálcio trocável aumentaram significativamente em relação à testemunha, devido à aplicação de carbonato e de escória (Figura 2 e Apêndice 3). Em geral, os teores de cálcio nos tratamentos com calcário e escória na dose de 1 SMP (tratamentos 2, 3, 4, 5 e 7) foram semelhantes. Os maiores teores de cálcio foram determinados nos tratamentos 6, 8 e 9, devido às maiores quantidades adicionadas do resíduo. O aporte de cálcio no solo é alto (Apêndice 4) devido à sua grande concentração na escória (Tabela 1). Os teores medidos no solo com a adição de corretivos são considerados altos, conforme a interpretação da SBCS/NRS (2004). Para cada tratamento, não foram observadas diferenças significativas entre as épocas.

Tabela 3. Valores de Al trocável e H+Al no solo em três épocas de amostragem (médias de quatro repetições)

Tratamento	Al trocável			H+Al		
	Época de amostragem (meses)					
	12	18	24	12	18	24
	----- cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> -----					
1 – Testemunha	0,8	0,9	1,0	6,7 a B	7,5 a A	7,5 a A
2 - CaCO <sub>3</sub> +MgCO <sub>3</sub>	0,0	0,0	0,0	2,4 b A	2,3 bc A	2,3 bc A
3 - CaCO <sub>3</sub> +MgCO <sub>3</sub> + NPK	0,0	0,0	0,0	2,3 bc A	2,5 b AB	2,6 b A
4 - Escória nível 1	0,0	0,0	0,0	2,0 cb B	2,4 b A	2,3 bc A
5 - Escória nível 1 + NPK	0,0	0,0	0,0	2,2 cb A	2,3 bc A	2,4 b A
6 - Escória nível 2 + NPK	0,0	0,0	0,0	1,5 cd A	1,6 cd A	1,6 cd A
7 - Escória nível 1 + N	0,0	0,0	0,0	2,3 bc B	3,0 b A	3,1 b A
8 - Escória nível 5 + trat. 3	0,0	0,0	0,0	1,0 d A	1,0 d A	0,9 d A
9 - Escória nível 10 + trat. 3	0,0	0,0	0,0	1,1 d A	1,1 d A	1,1 d A

Médias seguidas de mesma letra, maiúscula nas linhas e minúscula nas colunas, não diferem significativamente entre si pelo teste de Tuckey ( $p < 0,05$ ).

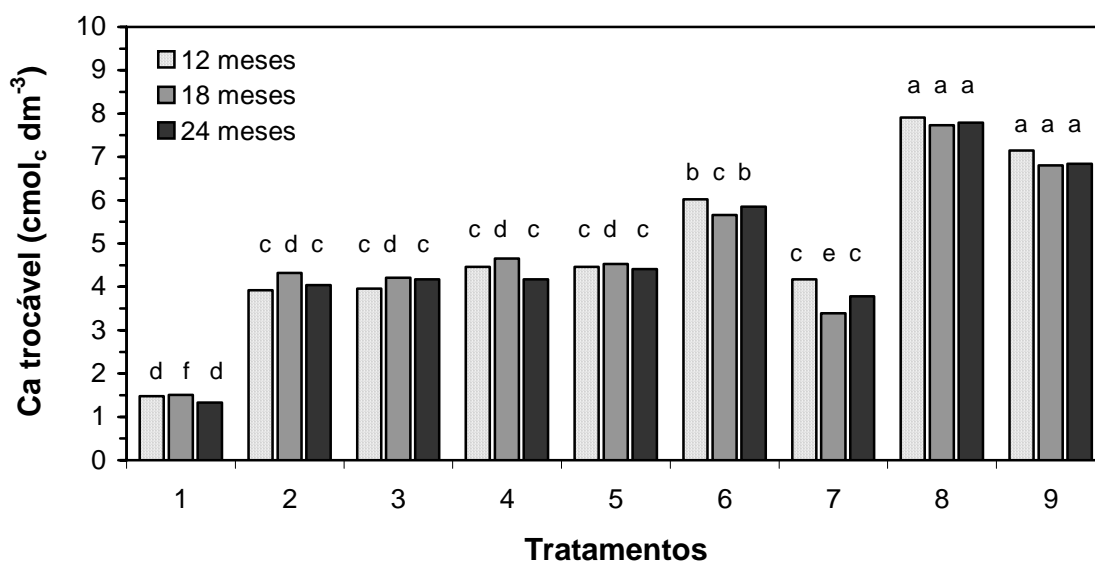


Figura 2. Teores de cálcio trocável no solo em três épocas de amostragem (médias de quatro repetições). Dentro de cada época, médias acompanhadas de mesma letra não diferem significativamente entre si pelo teste de Tukey ( $p < 0,005$ ). Para cada tratamento, não foi observada diferença entre as épocas.

Observa-se nos tratamentos 6, 8 e 9 o aumento significativo do teor de Ca, comparativamente ao tratamento 3, demonstrando que houve reatividade das frações mais grossas. Comparando-se os teores de cálcio nestes três tratamentos, observa-se maior reação no tratamento 8, que apresentou teores significativamente mais altos, mesmo com a metade da dose aplicada no tratamento 9.

À semelhança do cálcio, o teor de magnésio trocável aumentou significativamente em relação à testemunha, pela aplicação de carbonato e de escória (Figura 3 e Apêndice 3). Entretanto, em geral, não foi observado aumento nos teores de Mg com o aumento da dose de escória, provavelmente devido ao menor teor de Mg da mesma (Tabela 1). Os teores no solo nos tratamentos com adição dos corretivos são considerados altos, conforme a interpretação da SBCS/NRS (2004).

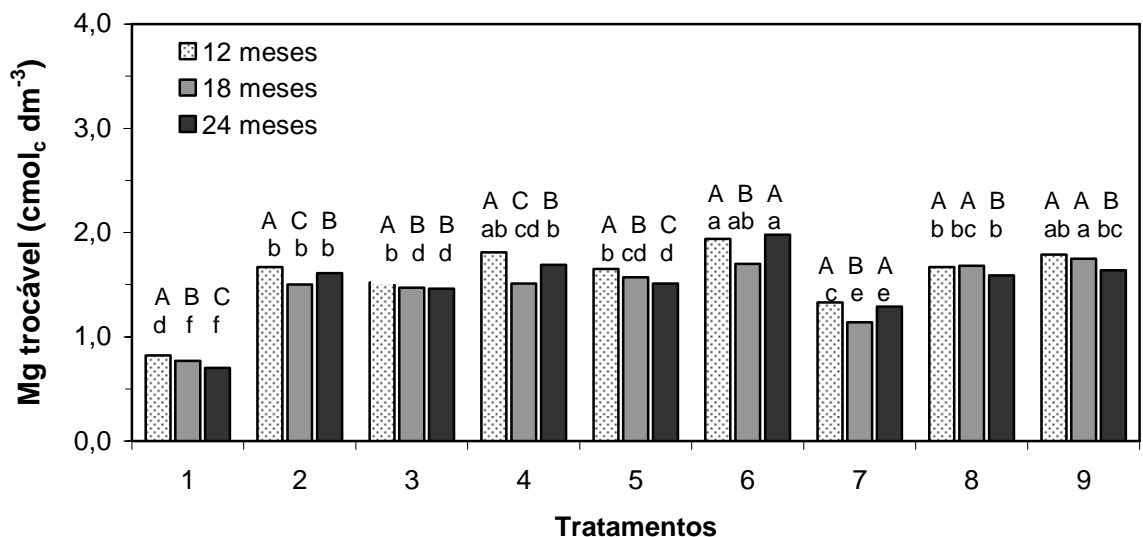


Figura 3. Teores de magnésio trocável no solo em três épocas de amostragem (médias de quatro repetições). Médias acompanhadas de mesma letra, minúscula entre tratamentos na mesma época e maiúscula entre épocas no mesmo tratamento, não diferem significativamente entre si pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ).

Entre épocas, observou-se a diminuição significativa do teor de Mg no solo em alguns tratamentos. Nos tratamentos onde foi adicionado NPK esta redução foi maior. Este fato pode ser devido à absorção deste elemento em grandes quantidades pelas plantas, que apresentaram maior rendimento de matéria seca nestes tratamentos, como será visto adiante. Como ambos os



corretivos adicionaram ao solo quantidades menores de magnésio do que de cálcio, a absorção pelas plantas (Figura 9) provocou redução significativa do teor de Mg no solo com o passar do tempo. Este resultado foi também observado no tratamento testemunha, onde não houve aplicação de nutrientes.

#### **4.1.3 CTC e saturação por bases**

Tanto a aplicação de escória, como de carbonato, aumentaram a CTC efetiva do solo (Tabela 4). O pH do solo afeta diretamente a CTC efetiva, pois esta expressa a retenção de cátions determinada no pH atual do solo. A elevação do pH do solo aumenta a CTC devido à ação das cargas pH-dependentes do solo (Meurer et al., 2004). Nota-se, no presente trabalho, que os maiores valores de CTC efetiva ocorreram nos tratamentos que apresentaram os maiores valores de pH. Isto é devido à maior quantidade de cargas negativas nos solos com pH mais elevado, devido ao seu baixo PCZ (ponto de carga zero). Em geral, os horizontes superficiais dos solos apresentam um PCZ baixo, devido à presença de matéria orgânica, o que indica o predomínio de cargas negativas numa ampla faixa de pH, favorecendo a adsorção de cátions (Meurer et al., 2004). Os tratamentos 8 e 9 apresentaram, devido ao seu pH elevado, valores significativamente maiores de CTC efetiva (Tabela 4).

Entre épocas, não foram observadas grandes diferenças na CTC efetiva do solo. Apenas nos tratamentos 7, 8 e 9, ocorreram reduções significativas, acompanhando os resultados determinados nestes tratamentos para os valores de pH entre épocas (Figura 1). Embora esta redução de pH com o tempo de aplicação tenha ocorrido para a maioria dos tratamentos, somente nos três referidos acima esta redução influenciou a CTC efetiva do solo.

As diferenças observadas nos valores de CTC a pH 7,0 entre os tratamentos foram menores e em alguns tratamentos com adição de corretivos não diferiram significativamente da testemunha. Comparativamente à CTC efetiva, estes resultados eram esperados, considerando-se o valor de pH em que é feita esta determinação, que expressa o potencial de cargas do solo independentemente dos tratamentos. Possivelmente pelo mesmo motivo, também não foram observadas diferenças para esta determinação para cada tratamento entre as três épocas.

Tabela 4. Valores de CTC efetiva, CTC a pH 7,0 e saturação por bases (V) do solo em três épocas de amostragem (médias de quatro repetições)

Tratamento	CTC <sub>efetiva</sub>			CTC <sub>pH 7,0</sub>			V		
	Época de amostragem (meses)								
	12	18	24	12	18	24	12	18	24
	----- cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> -----						----- % -----		
1 – Testemunha	3,4 d A	3,4 e A	3,2 d A	9,3 bcd	10,0 ab	9,7 a	27 e A	25 f B	23 e C
2 - CaCO <sub>3</sub> +MgCO <sub>3</sub>	5,7 c C	6,0 c AB	5,8 c BC	8,1 de	8,3 de	8,1 c	71 d A	72 c A	72 c A
3 - CaCO <sub>3</sub> +MgCO <sub>3</sub> + NPK	5,6 c A	5,8 c A	5,7 c A	7,9 e	8,3 de	8,4 bc	71 d A	70 c A	68 c B
4 - Escória nível 1	6,4 c A	6,3 c A	6,0 c B	8,5 cde	8,7 cde	8,3 c	76 c A	72 c B	72 c B
5 - Escória nível 1 + NPK	6,2 c A	6,2 c A	6,0 c A	8,4 cde	8,5 de	8,4 bc	74 cd A	73 c A	71 c B
6 - Escória nível 2 + NPK	8,1 b A	7,5 b B	7,9 b A	9,6 abc	9,0 bcd	9,5 ab	84 b A	83 b A	84 b A
7 - Escória nível 1 + N	5,6 c A	4,7 d C	5,2 c B	7,9 e	7,7 e	8,3 bc	71 d A	61 e B	63 d B
8 - Escória nível 5 + trat. 3	9,7 a A	9,5 a AB	9,3 a B	10,6 a	10,5 a	10,3 a	91 a A	91 a A	91 a A
9 - Escória nível 10 + trat. 3	9,0 a A	8,7 a AB	8,6 ab B	10,1 ab	9,8 abc	9,7 a	90 a A	89 a A	89 a A

Médias seguidas de mesma letra, maiúscula nas linhas e minúscula nas colunas, não diferem significativamente entre si pelo teste de Tuckey ( $p < 0,05$ ); para a CTC a pH 7,0, as médias de épocas em cada tratamento não diferem entre si.

A saturação por bases foi afetada pela adição do carbonato e/ou de escória (Tabela 4). Os maiores valores foram determinados nos tratamentos que apresentaram maior pH e, ao mesmo tempo, maiores teores de Ca e de Mg. Este é um indicador indireto da condição de acidez, apresentando alta correlação com o pH do solo. Para os solos do RS e de SC, constata-se que, em média, os valores de 65, 80 e 85 % de saturação por bases correspondem aos valores de pH de 5,5, 6,0 e 6,5, respectivamente (SBCS/NRS, 2004). Tais relações podem ser observadas no presente trabalho. Resultados semelhantes foram determinados por Prado & Fernandes (2001), em trabalho onde foi avaliada a resposta da cana-de-açúcar à adição de escória como corretivo da acidez.

#### **4.1.4 Micronutrientes**

Neste item, serão discutidos os resultados analíticos dos elementos cobre e zinco extraíveis e manganês trocável do solo. O cobre e o zinco, quando na forma iônica, são adsorvidos fortemente à superfície da matéria orgânica e dos oxi-hidróxidos de alumínio e de ferro do solo por ligações covalentes. Estes elementos formam complexos de superfície, sendo adsorvidos quimicamente. Os íons  $H^+$  podem deslocá-los da superfície, sendo que a diminuição do pH provoca aumento da sua solubilidade (Volkweiss, 1989; McBride, 1994).

O teor de cobre extraível não foi afetado pela aplicação dos tratamentos na amostragem efetuada 12 meses após a aplicação (Tabela 5). Nas demais épocas, observa-se uma pequena diferença entre os tratamentos, não sendo atribuída às diferenças entre os materiais corretivos utilizados ou às variações de pH do solo. Os valores determinados podem ser considerados altos (SBCS/NRS, 2004), mas que ocorrem freqüentemente em solos não cultivados do Estado do Rio Grande do Sul (DS/UFRGS, 1983).

O teor de manganês trocável no solo depende do pH. Em solos ácidos, a solubilidade das formas oxidadas de manganês aumenta (McBride, 1994). A aplicação de carbonato reduziu o teor inicial de manganês trocável para valores de 2,0 a 4,0  $mg\ dm^{-3}$  após 24 meses (Tabela 5).

Tabela 5 . Teores de cobre e de zinco extraíveis e de manganês trocável do solo em três épocas de amostragem (médias de quatro repetições)

Tratamento	Cu			Mn			Zn		
	Época de amostragem (meses)								
	12	18	24	12	18	24	12	18	24
	----- mg dm <sup>-3</sup> -----								
1 – Testemunha	0,8 a B	1,2 a A	1,1 ab A	11,3 b A	13,0 b A	11,5 b A	1,2 d C	1,7 b AB	1,4 c BC
2 - CaCO <sub>3</sub> +MgCO <sub>3</sub>	0,7 a B	0,9 cd A	1,0 ab A	3,3 cd A	4,0 d A	3,2 d A	1,3 d A	1,6 b A	1,4 c A
3 - CaCO <sub>3</sub> +MgCO <sub>3</sub> + NPK	0,7 a B	0,9 d A	1,0 ab A	3,5 cd A	3,8 d A	3,3 d A	1,3 d C	1,7 b AB	1,4 c BC
4 - Escória nível 1	0,8 a B	1,1 ab A	1,2 a A	11,5 b C	18,3 a A	13,7 b B	1,3 d C	1,7 b AB	1,4 c BC
5 - Escória nível 1 + NPK	0,8 a B	1,0 abc A	1,1 ab A	12,5 b B	12,5 b B	13,9 b A	1,5 cd C	1,9 b AB	1,7 c BC
6 - Escória nível 2 + NPK	0,8 a B	1,2 a A	1,2 a A	6,0 c B	6,0 c AB	5,7 c A	5,9 ab B	2,8 a A	2,3 b B
7 - Escória nível 1 + N	0,9 a B	1,2 a A	1,1 ab A	17,0 a B	20,0 a A	20,5 a A	1,3 d C	1,7 b AB	1,4 c BC
8 - Escória nível 5 + trat. 3	0,7 a B	0,9 cd A	0,9 b A	2,5 d A	2,0 d A	1,5 d A	1,9 bc B	2,8 a A	2,1 b B
9 - Escória nível 10 + trat. 3	0,8 a B	1,0 bcd A	0,9 b A	2,8 d A	2,0 d A	1,6 d A	2,5 a A	2,5 a A	2,8 a A

Médias seguidas de mesma letra, maiúscula nas linhas e minúscula nas colunas, não diferem significativamente entre si pelo teste de Tuckey (p<0,05).

A solubilidade do Mn diminui com o aumento do pH do solo, devido à maior adsorção de  $Mn^{2+}$  nas superfícies de óxidos, formando complexos de esfera-interna, e aumento da estabilidade dos complexos com a matéria orgânica (Meurer et al., 2004), conforme foi verificado nesses tratamentos. Outro fator que pode diminuir a solubilidade do Mn com o aumento do pH é a formação de óxido de manganês insolúvel, por reações de oxi-redução, favorecidas pelo aumento do pH do solo (Volkweiss, 1989). Os maiores teores de manganês trocável foram determinados nos tratamentos com a adição de escória com menor granulometria, nas três épocas de amostragem, mesmo com o aumento do pH do solo. Nos tratamentos 8 e 9, em que foi aplicado material com maior granulometria, os teores de manganês trocável foram semelhantes aos determinados nos tratamentos com calcário, indicando a baixa solubilidade destas frações. Os teores foram intermediários no tratamento 6, com aplicação de mistura de frações granulométricas de escória.

Os teores de Zn extraível do solo não foram afetados pela aplicação do carbonato, nas três épocas de amostragem. O mesmo foi observado nos tratamentos com as menores doses de escória (Tabela 5). Nos tratamentos 6, 8 e 9, com aplicação de maiores quantidades de escória, os teores aumentaram, mas não em proporção às quantidades adicionadas (Apêndice 5).

As maiores quantidades extraídas podem ser também devidas à dissolução parcial do material adicionado pelo extrator ácido ( $HCl\ 0,1\ mol\ L^{-1}$ ).

Os valores determinados podem ser considerados altos (SBCS/NRS, 2004), mas que freqüentemente ocorrem em solos não cultivados do Estado do Rio Grande do Sul (DS/UFRGS, 1983).

#### **4.1.5 Outros nutrientes**

Os teores de fósforo no solo (Apêndice 6) não foram afetados pelas aplicações isoladas de carbonato ou de escória. Somente houve efeito significativo na elevação do teor de fósforo nos tratamentos em que foi adicionado adubo fosfatado. A aplicação e as reaplicações de superfosfato triplo aumentaram significativamente o teor de fósforo no solo, nas três épocas de amostragem, com o passar do tempo. A aplicação da escória não propiciou aumento do teor de P no solo devido, possivelmente, ao seu baixo teor no material (Tabela 1) e conseqüente pequeno aporte ao solo (Apêndice 4). Estes

dados contrariam os resultados observados por Prado & Fernandes (1999), ao estudar o efeito da escória de siderurgia em comparação com o calcário no aumento do teor de fósforo disponível; estes concluíram que para a Areia Quartzosa, a escória foi superior ao calcário em 27% no aumento do P disponível do solo (P extraído por resina).

Os teores de potássio extraível do solo diminuíram em todos os tratamentos e épocas de amostragem em relação à testemunha (Apêndice 6), indicando a elevada absorção pelas plantas. Os teores determinados situam-se nas faixas de baixo a médio (SBCS/NRS, 2004).

#### **4.1.6 Metais pesados**

Os teores de Mn, Cu, Zn, Cd, Cr e Ni no solo foram determinados aos 12 e 24 meses após a aplicação dos tratamentos, utilizando-se o método EPA 3050B (USEPA, 1996a). Os teores obtidos por este método representam a fração ambientalmente ativa, não sendo os teores totais.

De modo geral, houve aumento nos teores de Mn e Cr do solo nos tratamentos que receberam escória, em ambas as épocas, principalmente nos níveis 1 e 2 (Tratamentos 4, 5, 6 e 7), em que foi aplicado material com granulometria mais fina (Tabela 6). Na amostragem efetuada aos 12 meses, foi observado aumento significativo do teor de Ni somente no tratamento com adição do nível 2 de escória. Na segunda época de amostragem, os tratamentos com a aplicação de material de maior granulometria, também apresentaram aumentos significativos. Os teores de Cu e de Zn apresentaram pequeno aumento com a escória, em ambas as épocas de amostragem.

À exceção do Cd, observou-se o aumento significativo dos teores dos demais elementos dos 12 aos 24 meses, principalmente para os tratamentos com as aplicações das maiores doses de escória (8 e 9) (Tabela 6). Este fato, aliado aos maiores teores no tratamento 6, com granulometria mais fina, já aos 12 meses, é um indicativo de que o método utilizado realmente não determina as quantidades totais destes metais no solo.

Os maiores teores determinados na segunda amostragem podem ser devidos também à maior inclusão de partículas de escória na amostra

Tabela 6. Concentrações de metais (em mg kg<sup>-1</sup>) no solo extraídos pelo método 3050b (USEPA, 1996a) em duas épocas de amostragem (médias de quatro repetições)

Tratamento	Mn	Cu	Zn	Cd	Cr	Ni
<b>12 meses</b>						
1 - Testemunha	75 fg A	5,6 c B	25 a A	0,10 a A	18 cde A	1,6 b A
2 - CaCO <sub>3</sub> +MgCO <sub>3</sub>	70 g A	5,6 c B	24 a A	0,10 a A	14 e A	1,3 b A
3 - CaCO <sub>3</sub> +MgCO <sub>3</sub> + NPK	71 g A	6,7 ab B	25 a A	0,10 a A	17 de A	1,9 b A
4 - Escória nível 1	110 d A	6,8 ab B	25 a B	0,15 a A	30 bcd A	1,3 b A
5 - Escória nível 1 + NPK	126 c A	6,4 bc A	26 a A	0,18 a A	30 bc A	2,4 b A
6 - Escória nível 2 + NPK	171 a A	7,5 a A	27 a B	0,15 a A	63 a A	19,8 a A
7 - Escória nível 1 + N	140 b A	6,6 a B	27 a A	0,10 a A	38 b A	4,5 b A
8 - Escória nível 5 + trat. 3	92 e B	6,9 ab B	26 a B	0,10 a A	17 de B	4,0 b B
9 - Escória nível 10 + trat. 3	86 ef B	6,3 bc B	24 a B	0,10 a A	18 cde B	3,7 b B
<b>24 meses</b>						
1 - Testemunha	97 c A	8,3 ab A	27 bc A	0,10 a A	13 b A	1,3 b A
2 - CaCO <sub>3</sub> +MgCO <sub>3</sub>	96 c A	8,3 ab A	28 bc A	0,10 a A	14 b A	1,3 b A
3 - CaCO <sub>3</sub> +MgCO <sub>3</sub> + NPK	93 c A	8,2 ab A	27 bc A	0,10 a A	14 b A	1,3 b A
4 - Escória nível 1	145 bc A	8,7 ab A	29 abc A	0,10 a A	32 b A	1,6 b A
5 - Escória nível 1 + NPK	146 bc A	6,7 b A	28 bc A	0,10 a A	32 b A	4,0 ab A
6 - Escória nível 2 + NPK	191 b A	8,6 ab A	32 a A	0,10 a A	68 ab A	19,3 ab A
7 - Escória nível 1 + N	159 bc A	7,9 ab A	26 c A	0,10 a A	37 b A	6,4 ab A
8 - Escória nível 5 + trat. 3	264 a A	10,2 a A	30 ab A	0,10 a A	114 a A	26,4 a A
9 - Escória nível 10 + trat. 3	184 b A	8,4 ab A	30 ab A	0,10 a A	65 ab A	17,2 ab A

Nas colunas, médias seguidas de mesma letra, minúsculas entre tratamentos na mesma época e maiúsculas entre épocas no mesmo tratamento, não diferem significativamente entre si pelo teste de Tukey (p<0,05).

preparada (por moagem e tamisação), devido à desagregação da estrutura dos minerais com o tempo.

Os teores de Cd no solo não apresentaram variação entre os tratamentos e entre épocas (Tabela 6), devido às pequenas quantidades adicionadas (Anexo 5).

Os teores de Mn no solo aumentaram com a aplicação da escória, nas duas amostragens (Tabela 6).

Foi observado aumento no teor de Ni no solo somente no tratamento com adição do nível 2 de escória, na primeira amostragem. Na segunda amostragem, entretanto foi verificado aumento significativo também nos tratamentos 7 e 8.

Os teores destes metais, mesmo nos tratamentos com adição das doses mais elevadas de escória, podem ser considerados normais em solos não contaminados (Kabata-Pendias & Pendias, 1986). As quantidades adicionadas (Apêndice 5) foram baixas, considerando-se os limites toleráveis de aplicação no solo, aceitos por legislações de diversos países (Apêndice 8).

## **4.2 Produção de matéria seca e composição das plantas**

Nesta parte do trabalho, serão apresentados e discutidos os resultados referentes à influência dos tratamentos na produção de matéria seca das plantas, bem como na concentração e absorção de macro e de micronutrientes e dos metais Cd, Ni e Cr.

### **4.2.1 Matéria seca**

Na Figura 4 é mostrado o rendimento de matéria seca da parte aérea das plantas, nos três cultivos. Pode-se observar um grande aumento no rendimento com a adubação mineral (tratamentos 3, 5, 6, 8 e 9). O efeito da correção do solo, tanto com a aplicação de carbonato como de escória foi pequeno e restrito à primeira cultura (tratamentos 2 e 4). Este efeito pode ter sido devido ao estímulo à mineralização do N da matéria orgânica do solo pelos microorganismos.

Não foi observado aumento significativo no rendimento de matéria seca das plantas com a correção da acidez do solo pela escória e suplementação de N (tratamento 7), devido à baixa quantidade de P adicionado pela mesma.



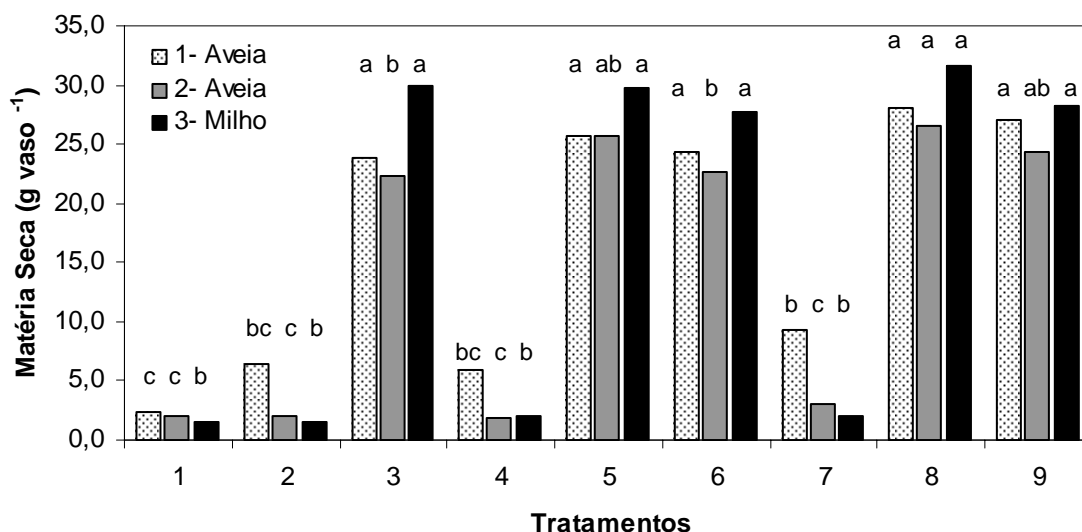


Figura 4. Produção de matéria seca das plantas em três cultivos sucessivos (média de quatro repetições). Médias acompanhadas da mesma letra não diferem significativamente entre si pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ), por cultivo.

A adição de escória com granulometria mais grossa, juntamente com o carbonato (tratamentos 8 e 9) não afetou significativamente o rendimento das plantas.

Resultados semelhantes foram obtidos por Prado & Natale (2004), em estudo sobre a influência da aplicação de escória ferrocromo na produção de matéria seca de mudas de maracujazeiro, em vasos. No entanto, Prado et al. (2002), em experimento comparando a escória de siderurgia de alto-forno com calcário no acúmulo e exportação de nutrientes e produção de cana-de-açúcar, constataram incremento quadrático na produção de cana-de-açúcar com o aumento das doses tanto de calcário como de escória.

Esta discrepância de resultados pode ser devida à grande diversidade de escórias existentes e também à variabilidade das características químicas entre duas corridas de uma mesma escória, conforme explicado por Göldring & Juckes (1997). Assim, podem ser observados diferentes efeitos para a aplicação de diferentes escórias. No entanto, são escassas as referências na literatura, referentes aos efeitos da aplicação de escórias de aciaria na produção de matéria seca das plantas. Prado et al. (2001) indicam a influência indireta destas escórias na produção, mediante o aumento do pH do solo, sendo menos relevante a liberação de nutrientes.

#### 4.2.2 Concentração e absorção de nutrientes

As plantas apresentaram diferenças nos teores de N, P e K da parte aérea entre tratamentos (Tabela 7). As plantas cultivadas nos tratamentos com adubação mineral NPK apresentaram teores significativamente menores do que os demais. As plantas destes tratamentos, entretanto, apresentaram os maiores rendimentos de matéria seca (Figura 4). Este resultado pode ser devido ao efeito de diluição, ou seja, a concentração dos nutrientes é diluída com o maior crescimento das plantas, fato que é amplamente relatado na literatura (Jarrel & Beverly, 1981). Este mesmo efeito foi observado por Prado et al. (2002), num trabalho que objetivou avaliar o efeito da aplicação de doses de escória de siderurgia e calcário na absorção de macronutrientes pela cana-de-açúcar.

Os tratamentos com adubação NPK apresentaram maiores quantidades absorvidas destes nutrientes, quando comparados aos tratamentos sem esta adição (Figuras 5, 6 e 7). Este resultado está diretamente relacionado com a matéria seca acumulada nesses tratamentos (Figura 4). A complementação de N no tratamento 7 não causou aumento no teor, bem como da absorção deste nutriente pelas plantas quando comparado ao tratamento 4.

Foram também observadas diferenças no teor de Ca no tecido das plantas (Tabela 8). Os maiores valores foram observados nos tratamentos com aplicação de calcário e/ou escória, quando comparados à testemunha. Ao contrário do que se observou para os teores de NPK, o efeito de diluição não ocorreu, pois foi compensado pela maior absorção de Ca pelas plantas nestes tratamentos (Figura 8). A acumulação de Ca foi maior nos tratamentos com adição de fertilizantes minerais NPK, devido à maior produção de matéria seca. Constatou-se ainda que no tratamento 8, com escória no nível 5, a absorção de Ca foi significativamente maior de que nos demais tratamentos. Este resultado está de acordo com os teores de Ca determinados no solo para os diferentes tratamentos (Figura 2).

O Mg também apresentou variações semelhantes ao cálcio, com maiores valores nos tratamentos com maior aplicação de escória. Maior acumulação também ocorreu nos tratamentos com maior produção de matéria seca, sendo, entretanto, mais pronunciado no milho. Com o passar do tempo, os cultivos apresentaram teores de Mg significativamente maiores nos

Tabela 7. Teores de nitrogênio, fósforo e potássio na parte aérea das plantas em três cultivos sucessivos (média de quatro repetições)

Tratamentos	N			P			K		
	Cultivos								
	Aveia	Aveia	Milho	Aveia	Aveia	Milho	Aveia	Aveia	Milho
	----- % -----								
1 – Testemunha	1,8 ab	1,9 b	2,2 a	0,04 c	0,10 a	0,10 b	0,8 b	0,8 b	0,7 b
2 - CaCO <sub>3</sub> +MgCO <sub>3</sub>	1,8 ab	2,1 b	2,0 a	0,08 ab	0,10 a	0,10 b	1,7 ab	1,5 ab	1,6 ab
3 - CaCO <sub>3</sub> +MgCO <sub>3</sub> + NPK	0,7 d	1,2 c	1,2 b	0,07 bc	0,13 a	0,16 a	1,5 c	1,5 c	1,5 c
4 - Escória nível 1	2,1 a	3,1 a	2,0 a	0,11 a	0,10 a	0,10 b	1,8 a	1,5 a	1,7 b
5 - Escória nível 1 + NPK	0,7 d	1,1 c	1,1 b	0,08 abc	0,12 a	0,17 a	1,7 c	1,6 c	1,5 c
6 - Escória nível 2 + NPK	0,7 d	1,1 c	1,1 b	0,09 ab	0,12 a	0,16 a	1,9 c	1,7 c	2,0 c
7 - Escória nível 1 + N	1,4 bc	2,9 a	2,3 a	0,07 bc	0,12 a	0,11 b	1,3 b	1,1 a	1,3 a
8 - Escória nível 5 + trat. 3	0,9 cd	1,1 c	1,2 b	0,09 ab	0,12 a	0,18 a	1,7 c	1,7 c	1,6 c
9 - Escória nível 10 + trat. 3	0,9 cd	1,1 c	1,2 b	0,10 ab	0,13 a	0,17 a	1,8 c	1,8 c	1,6 c

Médias seguidas de mesma letra nas colunas, não diferem significativamente entre si pelo teste de Tuckey ( $p < 0,05$ )

Tabela 8. Teores de cálcio e de magnésio na parte aérea das plantas em três cultivos sucessivos (médias de quatro repetições)

Tratamentos	Ca			Mg		
	Cultivo					
	Aveia	Aveia	Milho	Aveia	Aveia	Milho
	----- % -----					
1 – Testemunha	0,19 c	0,19 c	0,11 abc	0,11 e	0,11 c	0,46 c
2 - CaCO <sub>3</sub> +MgCO <sub>3</sub>	0,29 ab	0,32 ab	0,22 a	0,22 a	0,15 b	0,47 b
3 - CaCO <sub>3</sub> +MgCO <sub>3</sub> + NPK	0,25 abc	0,28 bc	0,18 c	0,18 bc	0,17 ab	0,48 b
4 - Escória nível 1	0,23 bc	0,40 a	0,21 ab	0,21 a	0,21 a	0,61 ab
5 - Escória nível 1 + NPK	0,21 c	0,28 bc	0,15 c	0,15 d	0,16 b	0,48 b
6 - Escória nível 2 + NPK	0,20 c	0,32 ab	0,16 bc	0,16 cd	0,18 ab	0,52 ab
7 - Escória nível 1 + N	0,20 c	0,35 ab	0,14 a	0,14 de	0,16 b	0,49 b
8 - Escória nível 5 + trat. 3	0,31 a	0,36 ab	0,20 a	0,20 ab	0,19 ab	0,72 a
9 - Escória nível 10 + trat. 3	0,24 abc	0,34 ab	0,16 abc	0,17 cd	0,20 ab	0,57 ab

Médias seguidas de mesma letra nas colunas, não diferem significativamente entre si pelo teste de Tuckey ( $p < 0,05$ ).

tratamentos com escória, demonstrando o mesmo efeito observado para o Ca quanto à maior absorção nos tratamentos que produziram maior quantidade de matéria seca (Figura 9).

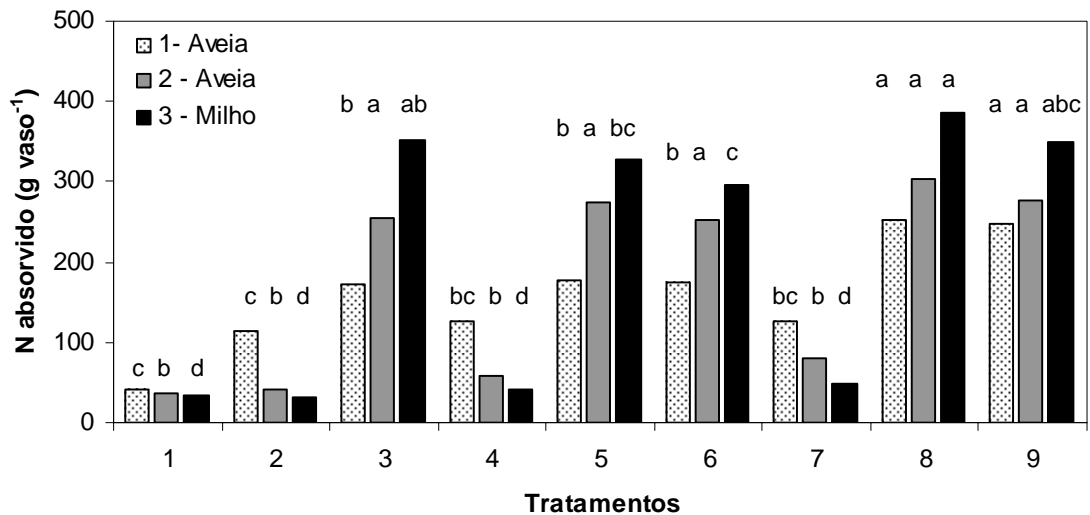


Figura 5. Quantidades de nitrogênio absorvidas por plantas de aveia e milho (parte aérea) relacionadas aos tratamentos de solo (médias de quatro repetições). Médias acompanhadas de mesma letra não diferem significativamente entre si pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ), por cultivo.

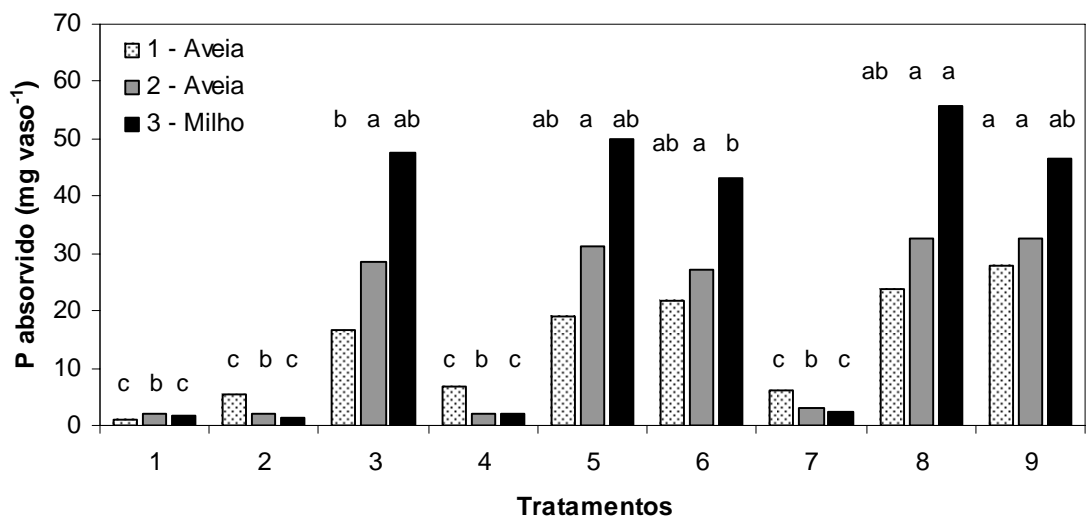


Figura 6. Quantidades de fósforo absorvidas por plantas de aveia e milho (parte aérea) relacionadas aos tratamentos de solo (médias de quatro repetições). Médias acompanhadas de mesma letra não diferem significativamente entre si pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ), por cultivo.

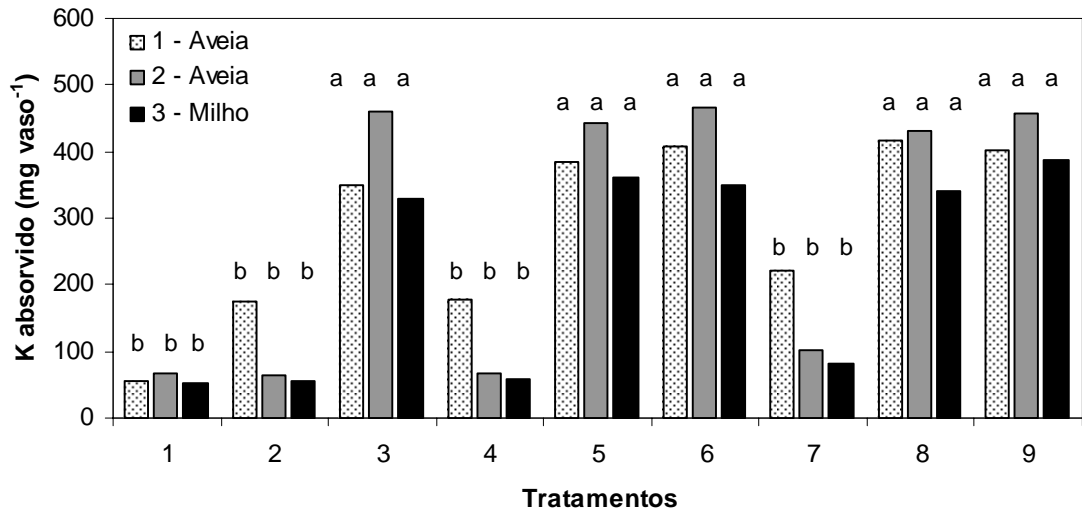


Figura 7. Quantidades de potássio absorvidas por plantas de aveia e milho (parte aérea) relacionadas aos tratamentos de solo (médias de quatro repetições). Médias acompanhadas de mesma letra não diferem significativamente entre si pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ) por cultivo.

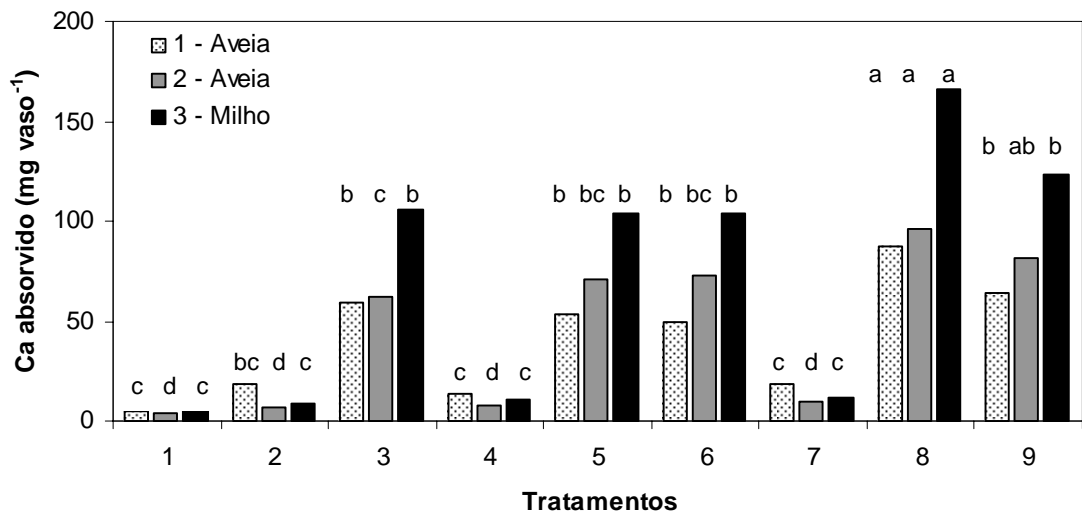


Figura 8. Quantidades de cálcio absorvidas por plantas de aveia e milho (parte aérea) relacionadas aos tratamentos de solo (médias de quatro repetições). Médias acompanhadas de mesma letra não diferem significativamente entre si pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ), por cultivo.

Nos tratamentos 1, 2, 3, 5 e 6, foram determinados os teores totais de Fe, Mn, Cu e Zn na parte aérea das plantas e as quantidades absorvidas destes micronutrientes (Tabelas 9 e 10). Em geral, observa-se que ocorreu diminuição dos teores destes elementos, principalmente Fe e Mn, nos tratamentos com carbonato ou escória complementados com NPK. Embora

estes micronutrientes sejam adicionados pela escória, este fato pode ser devido à redução de sua disponibilidade no solo pelo aumento do pH, conforme discutido no item 4.1.4; além disto, ocorre também o efeito de diluição da concentração destes elementos no tecido pela maior produção de matéria seca devido à adição de fertilizante NPK.

Resultados semelhantes para o efeito de pH foram obtidos por Teixeira (2003), em estudo com resíduo de indústria de celulose. Os teores destes micronutrientes são semelhantes aos normalmente determinados em plantas de aveia e de milho (SBCS/NRS, 2004).

Pode-se também observar que, em geral, os tratamentos com carbonato ou escória, quando acompanhados da aplicação de NPK, mostraram aumento significativo na acumulação de micronutrientes pelas plantas (Tabela 10). Nestes tratamentos, esta maior absorção foi devida ao maior incremento de matéria seca. Resultados semelhantes foram obtidos por Prado et al. (2002) num experimento com mudas de goiabeira cultivadas em solo com aplicação de escória. Com o intuito de comparar a escória com o calcário como fonte de micronutrientes, Valadares et al. (1974) analisaram duas escórias e 16 calcários, determinando teores maiores de micronutrientes nas escórias.

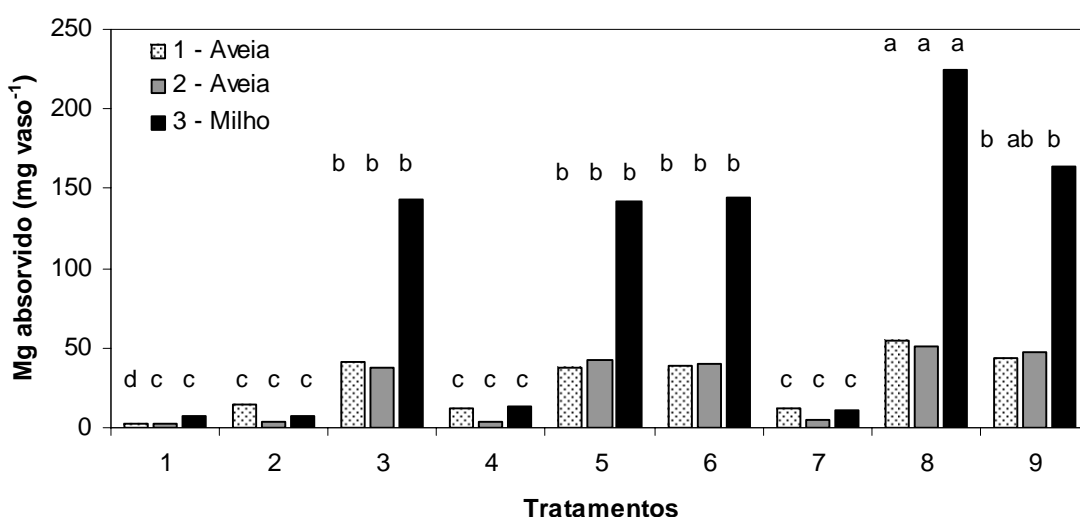


Figura 9. Quantidades de magnésio absorvidas por plantas de aveia e milho (parte aérea) relacionadas aos tratamentos de solo (médias de quatro repetições). Médias acompanhadas de mesma letra não diferem significativamente entre si pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ), por cultivo.

Tabela 9. Concentrações de metais (micronutrientes, em mg kg<sup>-1</sup>) na parte aérea das plantas de aveia e milho (médias de quatro repetições)

Tratamento	Fe	Mn	Cu	Zn
----- Aveia (primeiro cultivo) -----				
1 - Testemunha	132 a	228 a	7,6 a	54 a
2 - CaCO <sub>3</sub> +MgCO <sub>3</sub>	152 a	21 bc	6,6 a	56 a
3 - CaCO <sub>3</sub> +MgCO <sub>3</sub> + NPK	185 a	14 c	2,0 b	42 a
5 - Escória nível 1 + NPK	126 a	33 b	5,8 a	41 a
6 - Escória nível 2 + NPK	191 a	34 b	2,2 b	43 a
----- Aveia (segundo cultivo) -----				
1 - Testemunha	276 ab <sub>c</sub>	238 a	5,2 ab	33 a
2 - CaCO <sub>3</sub> +MgCO <sub>3</sub>	378 a	35 c	5,0 ab	22 ab
3 - CaCO <sub>3</sub> +MgCO <sub>3</sub> + NPK	111 c	38 c	4,1 bc	17 b
5 - Escória nível 1 + NPK	327 ab	88 b	6,7 a	33 a
6 - Escória nível 2 + NPK	169 bc	65 bc	4,2 b	17 a
----- Milho (terceiro cultivo) -----				
1 - Testemunha	913 a	135 a	9,7 a	99 a
2 - CaCO <sub>3</sub> +MgCO <sub>3</sub>	638 ab	35 b	7,9 ab	41 b
3 - CaCO <sub>3</sub> +MgCO <sub>3</sub> + NPK	91 b	30 b	5,4 ab	26 b
5 - Escória nível 1 + NPK	354 ab	46 b	6,5 ab	36 b
6 - Escória nível 2 + NPK	106 b	36 b	3,1 b	26 b

Em cada cultivo, médias seguidas de mesma letra, nas colunas, não diferem significativamente entre si pelo teste de Tukey (p<0,05).

Foram também observadas diferenças significativas que demonstram o efeito do tamanho de partículas da escória. Comparando-se os tratamentos 5 e 6, observa-se que no segundo e terceiro cultivos, há absorção significativamente maior destes nutrientes no tratamento com partículas mais finas (5), indicando maior liberação destes no solo, embora tenha sido aplicada maior quantidade de escória no tratamento 6. Este fato indica a necessidade da continuidade de avaliações de solo e de plantas a longo prazo, incluindo-se também os tratamentos com frações com maior tamanho de partículas (8 e 9).



Tabela 10. Quantidades de metais (micronutrientes) absorvidas na parte aérea das plantas de aveia e milho (médias de quatro repetições)

Tratamento	Fe	Mn	Cu	Zn
	----- mg vaso <sup>-1</sup> -----		----- µg vaso <sup>-1</sup> -----	
	----- Aveia (primeiro cultivo) -----			
1 - Testemunha	0,30 b	0,53 b	17 b	123 b
2 - CaCO <sub>3</sub> +MgCO <sub>3</sub>	0,97 b	0,14 c	42 b	356 b
3 - CaCO <sub>3</sub> +MgCO <sub>3</sub> + NPK	4,39 a	0,32 bc	47 b	1002 a
5 - Escória nível 1 + NPK	3,24 a	0,84 a	150 a	1056 a
6 - Escória nível 2 + NPK	4,65 a	0,83 a	54 b	1058 a
	----- Aveia (segundo cultivo) -----			
1 - Testemunha	0,59 c	0,49 c	10 c	70 cd
2 - CaCO <sub>3</sub> +MgCO <sub>3</sub>	0,74 c	0,07 d	10 c	40 d
3 - CaCO <sub>3</sub> +MgCO <sub>3</sub> + NPK	2,44 bc	0,84 c	90 b	360 b
5 - Escória nível 1 + NPK	8,39 a	2,27 a	172 a	850 a
6 - Escória nível 2 + NPK	3,88 bc	1,47 b	96 b	380 b
	----- Milho (terceiro cultivo) -----			
1 - Testemunha	1,17 b	0,20 c	14 b	151 c
2 - CaCO <sub>3</sub> +MgCO <sub>3</sub>	1,02 b	0,06 c	13 b	66 c
3 - CaCO <sub>3</sub> +MgCO <sub>3</sub> + NPK	2,76 b	0,91 b	169 a	783 ab
5 - Escória nível 1 + NPK	10,22 a	1,36 a	188 a	1081 a
6 - Escória nível 2 + NPK	2,92 b	0,99 b	84 ab	715 ab

Em cada cultivo, médias seguidas de mesma letra, nas colunas, não diferem significativamente entre si pelo teste de Tukey (p<0,05).

#### 4.2.3 Concentração e absorção de metais pesados

Foram avaliadas as concentrações totais de Cd, Cr, Ni e Pb, bem como as quantidades absorvidas destes elementos pelas plantas nos tratamentos 1, 2, 3, 5 e 6. Em geral, não foram observadas diferenças significativas entre os tratamentos avaliados quanto à concentração destes metais pesados na parte aérea das plantas (Tabela 11). A aplicação da escória não provocou, portanto, aumento da concentração destes metais nas plantas, comparativamente ao

tratamento sem a adição da mesma, mesmo quando foi aplicado o dobro da quantidade indicada para elevar o pH a 6,5.

Tabela 11. Concentrações totais de metais pesados (em mg kg<sup>-1</sup>) na parte aérea das plantas de aveia e milho (médias de quatro repetições)

Tratamento	Cd	Cr	Ni	Pb
----- Aveia (primeiro cultivo) -----				
1 - Testemunha	0,49 a	2,8 a	4,4 a	4,0 a
2 - CaCO <sub>3</sub> +MgCO <sub>3</sub>	0,27 a	2,2 a	3,0 a	2,4 a
3 - CaCO <sub>3</sub> +MgCO <sub>3</sub> + NPK	0,31 a	1,7 a	2,7 a	2,4 a
5 - Escória nível 1 + NPK	0,31 a	1,7 a	4,0 a	2,4 a
6 - Escória nível 2 + NPK	0,27 a	2,6 a	4,0 a	2,4 a
----- Aveia (segundo cultivo) -----				
1 - Testemunha	0,37 a	7,7 b	5,8 a	2,5 a
2 - CaCO <sub>3</sub> +MgCO <sub>3</sub>	0,36 a	12,1 a	5,6 a	2,4 a
3 - CaCO <sub>3</sub> +MgCO <sub>3</sub> + NPK	0,31 a	1,7 c	2,7 a	2,4 a
5 - Escória nível 1 + NPK	0,36 a	8,7 ab	4,5 a	2,4 a
6 - Escória nível 2 + NPK	0,81 a	2,2 c	3,8 a	2,4 a
----- Milho (terceiro cultivo)-----				
1 - Testemunha	0,24 a	5,10 a	2,0 ab	2,7 a
2 - CaCO <sub>3</sub> +MgCO <sub>3</sub>	0,32 a	4,83 a	2,9 ab	2,5 a
3 - CaCO <sub>3</sub> +MgCO <sub>3</sub> + NPK	0,27 a	1,73 a	1,5 b	2,4 a
5 - Escória nível 1 + NPK	0,31 a	3,04 a	3,0 a	2,4 a
6 - Escória nível 2 + NPK	0,27 a	1,74 a	1,5 b	2,4 a

Em cada cultivo, médias seguidas de mesma letra, nas colunas, não diferem significativamente entre si pelo teste de Tukey (p<0,05).

As quantidades de metais absorvidos na parte aérea mostraram diferenças significativas entre tratamentos (Tabela 12). De modo geral, para todos os metais estudados, a maior acumulação foi devida ao incremento de matéria seca pelas plantas. As maiores quantidades absorvidas, portanto, foram determinadas nos tratamentos com aplicação de calcário ou escória,

Tabela 12. Quantidades de metais pesados absorvidas (em  $\mu\text{g vaso}^{-1}$ ) na parte aérea das plantas de aveia e milho (médias de quatro repetições)

Tratamento	Cd	Cr	Ni	Pb
----- Aveia (primeiro cultivo) -----				
1 - Testemunha	1,1 b	6,1 b	9,3 b	8,6 A
2 - $\text{CaCO}_3 + \text{MgCO}_3$	1,8 ab	13,8 b	19,2 b	15,7 A
3 - $\text{CaCO}_3 + \text{MgCO}_3 +$ NPK	7,5 a	41,3 a	63,2 ab	58,0 A
5 - Escória nível 1 + NPK	8,0 a	44,8 a	105,3 a	62,9 A
6 - Escória nível 2 + NPK	6,6 ab	63,5 a	96,9 a	59,5 A
----- Aveia (segundo cultivo) -----				
1 - Testemunha	0,8 a	16,3 b	11,7 c	5,3 B
2 - $\text{CaCO}_3 + \text{MgCO}_3$	0,7 a	23,5 b	11,2 c	4,9 B
3 - $\text{CaCO}_3 + \text{MgCO}_3 +$ NPK	7,0 a	38,7 b	59,3 bc	54,4 A
5 - Escória nível 1 + NPK	9,2 a	224,9 a	116,4 a	61,6 A
6 - Escória nível 2 + NPK	18,6 a	49,4 b	85,1 ab	55,3 A
----- Milho (terceiro cultivo) -----				
1 - Testemunha	0,4 b	6,2 b	2,9 c	4,2 B
2 - $\text{CaCO}_3 + \text{MgCO}_3$	0,5 b	7,7 ab	4,6 c	4,0 B
3 - $\text{CaCO}_3 + \text{MgCO}_3 +$ NPK	8,1 a	52,0 a	45,5 b	73,1 A
5 - Escória nível 1 + NPK	9,3 a	86,6 a	90,2 a	72,5 A
6 - Escória nível 2 + NPK	7,5 a	48,0 ab	41,6 b	67,5 A

Em cada cultivo, médias seguidas de mesma letra, nas colunas, não diferem significativamente entre si pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ).

complementados com NPK. No primeiro cultivo, embora a tendência de maior acúmulo nos tratamentos com escória, não foi observada, para todos os elementos, diferença significativa para o tratamento com carbonato+NPK, o mesmo ocorrendo para Cd e Pb no 2º. e 3º. cultivos. Nestes cultivos, o acúmulo de Cr e Ni foram maiores nas plantas do tratamento 5, com adição de escória nível 1 + NPK. Dentre os metais pesados avaliados, estes foram os

aportados ao solo pelo resíduo em maiores quantidades (Apêndice 5). Embora as quantidades destes elementos adicionadas pelo resíduo e determinadas no solo (Tabela 6) fossem menores neste tratamento do que no tratamento 6, o menor diâmetro de partículas pode ter implicado em maior disponibilidade destes elementos no período de avaliação.

Considerando os efeitos dos tratamentos avaliados quanto à absorção destes elementos pelas plantas, a constatação da possível influência do diâmetro de partículas na sua disponibilidade e da ausência de relação entre os teores determinados no solo pelo método EPA 3050B e as quantidades absorvidas indica a necessidade de continuidade da avaliação e aprofundamento do estudo destes fatores por um maior período de tempo, incluindo os tratamentos com partículas de maior diâmetro (8 e 9). Este estudo, incluindo métodos químicos de análise do solo, é importante pelo fato de serem escassas na literatura as informações referentes à biodisponibilidade de metais pesados em solos com a adição de escórias de siderurgia.

## 5 CONCLUSÕES

Nas condições do presente trabalho, os resultados obtidos permitem as seguintes conclusões:

- 1 - a escória básica de aciaria finamente moída (<0,149 mm), aplicada em dose de 17% maior do que a indicada pelo valor de neutralização, apresentou a mesma eficiência do carbonato na correção da acidez do solo, aumentando também os teores de cálcio e magnésio no solo;
- 2 - a fração da escória com maior tamanho de partículas (2,0 a 15,0 mm) apresentou pequena reatividade no solo;
- 3 - a aplicação da escória somente propiciou maior crescimento das plantas quando complementada com P e K, indicando que este resíduo não é uma fonte adequada destes nutrientes;
- 4 - a aplicação da escória contribuiu significativamente para o aumento dos teores de Fe e Mn para as plantas, com pouca relevância para Cu e Zn;
- 5 - os teores de Cr e Ni no solo aumentaram significativamente com a adição de grandes quantidades de escória, sendo pouco afetados os teores de Cu, Zn e Cd;
- 6 - em geral, os teores de metais pesados (Cd, Cr, Ni e Pb) nas plantas não foram afetados pela aplicação da escória em relação ao tratamento com carbonato;
- 7 - serão necessárias avaliações deste resíduo por um maior período de tempo, para quantificar principalmente os efeitos residuais das frações de maior diâmetro de partícula e das maiores doses aplicadas.

## 6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 10.004: **Resíduos sólidos, classificação de resíduos**. Rio de Janeiro, 1987. 63p.
- ALCARDE, J. C. **Corretivos da acidez do solo**: características e interpretações técnicas. São Paulo: ANDA, 1992. 26p. (Boletim Técnico, 6)
- ALCOFORADO, P. A. V. G.; BARBOSA, S. C. S.; COSTA, J. P. V.; BASTOS, A. L.; SILVA, D. A. Adição de silício e fósforo no crescimento do milho cultivado em três solos dos tabuleiros costeiros de Alagoas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 29. Ribeirão Preto. **Anais**. São Paulo, 2003.
- AMARAL SOBRINHO, N. M. B.; VELLOSO, A. C. X.; COSTA, L. M.; OLIVEIRA, C. Solubilidade de metais pesados em solo tratado com resíduo siderúrgico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 21, n.1, p. 9-16, 1997.
- ANDERSON, D. L.; JONES, D. B.; SNYDER, G. H. Response of rice-sugarcane rotation to calcium silicate slag on Everglades Histosols. **Agronomy Journal**. Madison, v.79, p. 531-535, 1987.
- ANDO, J., OWA, N., ASANO, M. Studies on structure, solubility, and agronomic response of industrial slag. Effects of alumina on solubility, and agronomic response of slags. **Japan Journal Soil Science Plant Nutrition**, v.59, p. 27-32, 1988.
- ANDREOLI, C. V.; LARA, A. I.; ILHENFELD, R. G. **Uso e manejo do lodo de esgoto na agricultura**. Rio de Janeiro. PROSAB – Programa de Pesquisa em Saneamento Básico, 1999. 97p.
- BARBER, S. Liming materials and practices. In: PEARSON, R. W.; ADAMS, F. (Eds) **Soil acidity and liming**. Madison, ASA, 1967. p. 125-160. (Agronomy Series, 12)
- BISSANI, C.A.; MEURER, E.J.; BOHNEN, H. Solos ácidos e solos afetados por sais. In: MEURER, E.J. (ed) **Fundamentos de química do solo**. 2 ed. Porto Alegre, Genesis, 2004. p. 181-205.
- BRASIL. Ministério da Agricultura. Secretaria Nacional de Defesa Agropecuária. Portaria nº 03, de 12 de junho de 1986. Diário oficial, Brasília, 16 jun. 1986. Seção I, p.8673.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Secretaria Nacional de Apoio Rural e Cooperativismo. Instrução Normativa nº 4, de 2 de agosto de 2004. Diário Oficial, Brasília, 2004.

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

CAMPUS FILHO, M. P. Processos siderúrgicos. In: **Introdução à metalurgia extrativa e siderurgia.** Campinas: Fundação de Desenvolvimento da Unicamp, 1981, p.122-153.

CASTILHOS, D. D. **Alterações químicas e biológicas devidas à adição de resíduos de curtume e de cromo hexavalente ao solo.** Porto Alegre: UFRGS, 1998. 160f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1998.

CASTRO, L. F. A.; FONSECA, C. H.; SANTOS, D. B.; TAVARES, R. P.; FIGUEIRA, R. M. Influência da composição química do minério de ferro, com grau de redução variável, na formação da escória primária de alto-forno. In: CONGRESSO ANUAL DA ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE METALURGIA, 45. Rio de Janeiro. **Anais.** Rio de Janeiro: ABM, 1990, p81-90.

COMISSÃO DE FERTILIDADE DO SOLO – RS/SC. **Recomendações de adubação e de calagem para os Estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina.** 3 ed. Passo Fundo, EMBRAPA-CNPT/SBCS-NRS, 1995. 22 p.

DEFELIPO, B. V.; NOGUEIRA, A. V.; LOURES, E. G.; ALVAREZ, V. H. V. Eficiência agrônômica de um resíduo da indústria siderúrgica. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.26, n. 1. p. 127-131, 1992.

DRESCHER, M.; BISSANI, C. A.; GIASSON., E.; TEDESCO, M. J.; GIANELLO, C. **Avaliação da fertilidade dos solos do Rio Grande do Sul e necessidades de adubos e corretivos.** Porto Alegre: DS/UFRGS, 1995. (Boletim Técnico n. 7)

DS/UFRGS (Departamento de Solos da Universidade Federal do Rio Grande do Sul). **Fontes de nutrientes para o aumento da produtividade agrícola.** Relatório do projeto FUNDATEC/FINEP 49.81.228.00.00. Volume 2. Departamento de Solos, UFRGS, 1983.

FIRME, D. J.; RIBEIRO, A. C.; COSTA, L. M. da; NOVAIS, R. F. de; BARROS, N. F. de. Enriquecimento e fusão de escória de siderurgia com fosfato natural: I. Caracterização química. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.14. n.2. p.241-245, 1990.

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

GÖLDRING, D. C.; JUCKES, L. M. Petrology and stability of steel slags. **Ironmaking and Steelmaking**, v.24, n.6, p.447-456, 1997.

GUIMARÃES, J. E. P. **Escórias na fertilidade do solo.** São Paulo: Instituto Geográfico e Geológico de São Paulo. Brasil, 1967. 42p.

JARREL, W. M.; BEVERLY, R.B. The dilution effect in plant nutrition studies. **Advances in Agronomy**, v.34, p. 197-224, 1981.

KABATA-PENDIAS, A.; PENDIAS, H. **Trace elements in soils and plants.** 4.ed. Florida: CRC, 1986. 315p.

KORNDÖRFER, G. H.; DATNOFF, L. F.; CORREIA, G. F. Efeito do silicato de cálcio no teor de silício no solo e na produção de grãos de arroz de sequeiro. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.23, n.1. p. 635-641, 1999.

KRAY, C. H. **Efeito da aplicação e da reaplicação de resíduos carbonífero e de curtume no solo e nas plantas.** Porto Alegre: UFRGS, 2001. 91f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

KRAY, C. H. **Resposta das plantas e modificações das propriedades do solo pela aplicação de resíduos urbanos.** Porto Alegre: UFRGS, 2005. 161f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

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

LUZ, P. C.; TEDESCO, M. J.; VILELA, A. C. F. Avaliação de corretivos da acidez de três solos do Rio Grande do Sul. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS, 4. GRAMADO-RS. **Anais.** Gramado-RS, 2002. (resumo)

MALAVOLTA, E. Corretivos cálcicos, magnesianos e calcomagnesianos. In: **Manual de química agrícola: adubos e adubação.** São Paulo: Agronômica Ceres, 1981. Cap. 5, p.232-245.

MATTIAZZO-PREZOTTO, M.E; GLÓRIA, N.A. **LCE-502 – Uso de resíduos na agricultura.** Piracicaba, ESALQ, 2000. 5 p.

McBRIDE, M.B. **Environmental chemistry of soil.** New York: Oxford, 1994. 406p.



- Mc GRATH, S. P.; CHANG, A. C.; PAGE, A. L.; WITIER, R. Land Application of sewage sludge: scientific perspectives of heavy metal loading limits in Europe and the United States. **Environmental Review**, otawa, v.2, p. 108-118, 1994.
- MEURER, E.J.; RHEINHEIMER, D.; BISSANI, C.A. Fenômenos de sorção em solos. In: MEURER, E.J. (ed) **Fundamentos de química do solo**. 2 ed. Porto Alegre, Genesis, 2004. p. 131-179.
- PANDOLFO, C. M.; TEDESCO, M.J. Eficiência relativa de frações granulométricas de calcário na correção da acidez do solo., Florianópolis, v. 31, p. 753-758, 1996. **Pesquisa Agropecuária Catarinense**
- PIAU, W. C. **Efeitos de escórias de siderurgia em atributos químicos de solos e na cultura do milho (*Zea mays* L.)**. Piracicaba: USP, 1995. 124 p. Tese (Doutorado em Energia Nuclear na Agricultura) – Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1995.
- PIAU, W. C. **Variabilidade do uso das escórias como corretivo e fertilizante**. Piracicaba: USP, 1991. 99p. Dissertação (Mestrado em Energia Nuclear na Agricultura) – Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1991.
- PRADO, R. M.; FERNANDES, F. M. Efeito do calcário e da escória de siderurgia na disponibilidade de fósforo em Latossolo Vermelho-Escuro e em Areia Quartzosa. **Revista de Agricultura**, v.74, p.235-44, 1999.
- PRADO, R. M.; FERNANDES, F. M. Efeito da escória de siderurgia e calcário na disponibilidade de fósforo de um Latossolo Vermelho-Amarelo cultivado com cana-de-açúcar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.36, p. 1199-1204, 2001.
- 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 Agricola**, Piracicaba, v.57, p. 739-744, 2000.
- PRADO, R. M.; FERNANDES, F. M.; NATALE, W. **Uso agrícola da escória de siderurgia no Brasil: estudos na cultura da cana-de-açúcar**. Jaboticabal: FUNEP, 2001. 67p.
- PRADO, R. M.; CORRÊA, M. C. M.; CINTRA, A. C. O.; NATALE, W.; SILVA, M. A. C. Liberação de micronutrientes de uma escória aplicada em um Argissolo Vermelho-Amarelo cultivado com mudas de goiabeira (*Psidium guajava* L.) **Revista Brasileira de Fruticultura**, v.24, n.2, p.536-542, 2002.
- PRADO, R. M.; NATALE, W. Eficiência da aplicação de escória de siderurgia ferrocromo no solo, no estado nutricional e na produção de matéria seca de mudas de maracujazeiro. **Revista Brasileira de Fruticultura**, Jaboticabal, v. 26, p. 140-144, 2004.

QUEIROZ, A. A.; SANTOS, G. R.; PEREIRA, H. S.; PEREIRA, L. E.; KORNDÖRFER, G. H.; GAMA, A. J. M. Adubação com silício: influência sobre as principais doenças e produtividade do arroz irrigado por inundação. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 29. Ribeirão Preto. **Anais**. São Paulo, 2003.

RHEINHEIMER, D. S.; GATIBONI, L. C.; KAMINSKI, J.; et al. **Situação da fertilidade dos solos do Rio Grande do Sul**. Santa Maria: Departamento de Solos da UFSM, 2001. 41p (Boletim Técnico, 2).

RODRIGUES, A.L.M.; ANGHINONI, M.C.M.; TEDESCO, M.J. et al. Critérios técnicos para disposição no solo de resíduos sólidos de curtume. In: CONGRESSO DA UNIÃO INTERNACIONAL DOS QUÍMICOS E TÉCNICOS DA INDÚSTRIA DO COURO, 22., 1993, Porto Alegre. **Boletim**. Porto Alegre: FEPAM, 1993. 14p.

SBCS/NRS. Comissão de Química e Fertilidade do Solo – RS/SC. **Recomendações de adubação e calagem para os Estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina**. 10 ed. Porto Alegre: SBCS/Núcleo Regional Sul, 2004. 400p.

SCOLMEISTER, D. **Biodisponibilidade de metais pesados em solos do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre, UFRGS, 1999. 78f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1999.

SEGATTO, M. P. **Efeitos da aplicação de resíduos industriais no solo e nas plantas**. Porto Alegre, UFRGS, 2001. 127f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

SPOSITO, G. **The chemistry of soils**. New York, Oxford university Press, 1989. 234 p.

STRECK, E.V.; KÄMPF, N.; DALMOLIN, R.S.D.; KLAMT, E; NASCIMENTO, P.C. **Solos do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre, Editora da Universidade, 2002. 107 p.

TEDESCO, M. J. & GIANELLO, C. Escolha do corretivo da acidez do solo In: **Corretivos da acidez do solo**: Anais do II Seminário sobre corretivos da acidez do solo. Kaminski, J., Volkweiss, S.J. & Becker, F.C. (Coord.) Santa Maria-RS: Ed. UFSM, 1989. 224 p.

TEDESCO, M. J.; VOLKWEISS, S. J.; GOEPFERT, C. F.; LANZER, E. A. **Acidez e necessidade de calcário dos solos do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre, Depto. de Solos, Fac. Agronomia, UFRGS, 1985. 16p. (Boletim Técnico de Solos nº 3)

TEDESCO, M. J.; GIANELLO, C.; BISSANI, C. A.; BOHNEN, H.; VOLKWEISS, S. J. **Análise de solo, plantas e outros materiais**. 2 ed. Porto Alegre, Depto. de Solos-UFRGS, 1995. 174p. (Boletim Técnico, 5).

TEIXEIRA, J.R. **Utilização de resíduos sólidos alcalinos de indústrias de celulose na correção da acidez do solo**. Porto Alegre: UFRGS, 2003.103f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

USEPA. Method 3050B. Acid digestion of sediments, sludges, and soils. In: **Test methods for evaluating solid waste**. Report SW - 846. USEPA. Revision 2. 1996a. p. 3050-1 – 3050-12. CD-ROM

USEPA. Method 3052. Microwave assisted acid digestion of siliceous and organically based matrices. In: **Test methods for evaluating solid waste**. Report SW - 846. USEPA. Revision 0. 1996b. p. 3052-1 – 3052-20. CD-ROM

VALADARES, J. M. A. S.; BATAGLIA, O. C.; FURLANI, P. R. Estudos de materiais calcários usados como corretivos do solo no Estado de São Paulo. Determinação de Mo, Cu, Zn e Fe. **Bragantia**, Campinas, v.33, p.147-152, 1974.

VOLKWEISS, S.J. Química da acidez do solo. In : **Corretivos da acidez do solo**: Anais do II Seminário sobre corretivos da acidez do solo. Kaminski, J., Volkweiss, S.J. & Becker, F.C. (Coords) Santa Maria-RS: Ed. UFSM, 1989. 224 p. il.

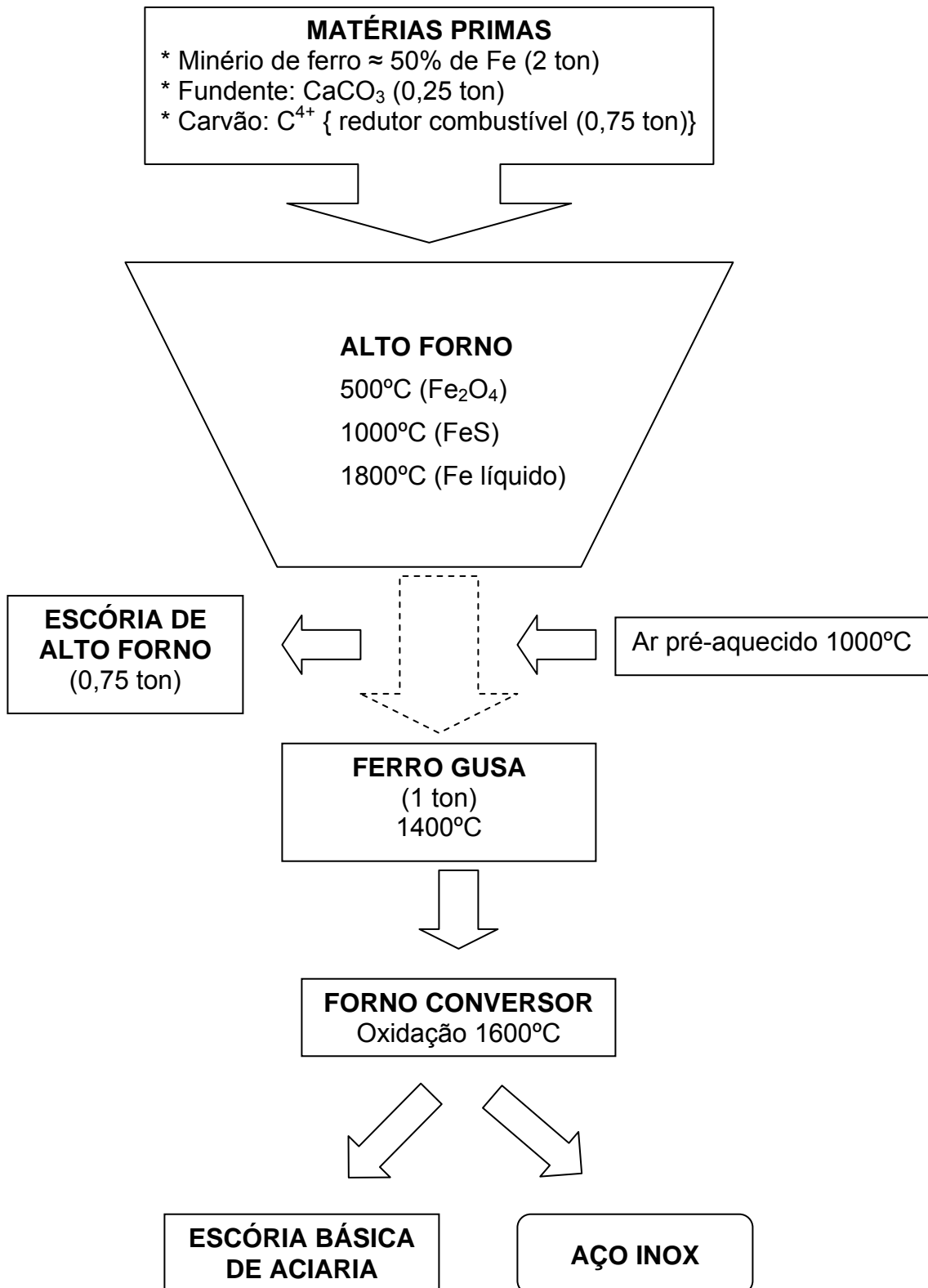
WALLY, M. S.; CASTILHOS, D. D. Alterações químicas e rendimento de sorgo em um Planossolo submetido à aplicação de lodos de curtume. In: Congresso de Iniciação Científica, 10. **Anais**. Pelotas, UFPel, 2001. p. 487.

ZETTERMANN, L. F. **Caracterização da escória de aço inoxidável com vistas a seu reaproveitamento no processo de produção do aço**. Porto Alegre: UFRGS, 2001. 56 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

ZONTA, E.P.; SILVEIRA, J. P. **Sistema de análise estatística para microcomputadores (SANEST)**. Pelotas, Universidade Federal de Pelotas, 1984. 151p.

## 7 APÊNDICES

Apêndice 1. Fluxograma simplificado dos processos siderúrgicos de produção de ferro-gusa, aço e escórias (Prado et al., 2001)



Apêndice 2. Doses de corretivo<sup>(1)</sup> e resíduo de siderurgia (escória) aplicadas nos diferentes tratamentos, no início do experimento

Trat.	CaCO <sub>3</sub> + MgCO <sub>3</sub>	Escória (diâmetros de orifícios de peneiras)			
		< 0,149 mm	0,149-0,5 mm	0,5-2,0 mm	2,0-15,0 mm
----- t ha <sup>-1</sup> -----					
1	-	-	-	-	-
2	4,3	-	-	-	-
3	4,3	-	-	-	-
4	-	7,2	-	-	-
5	-	7,2	-	-	-
6	-	9,6	4,8	-	-
7	-	7,2	-	-	-
8	4,3	-	-	36,0	-
9	4,3	-	-	-	72,0

<sup>(1)</sup> Mistura de CaCO<sub>3</sub> + MgCO<sub>3</sub> (relação 3:1, em peso), em pó, com PRNT = 100%.

Apêndice 3 . Valores de pH em água e de cálcio e magnésio trocáveis no solo em três épocas de amostragem (médias de quatro repetições)

Tratamento	pH em água			Ca			Mg		
				Época de amostragem (meses)					
	12	18	24	12	18	24	12	18	24
	----- cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> -----								
1 - Testemunha	4,9 g A	4,8 g B	4,5 e C	1,5 d	1,5 f	1,3 d	0,8 d	0,8 f	0,7 f
2 - CaCO <sub>3</sub> +MgCO <sub>3</sub>	6,3 de A	6,1 d B	5,9 c C	3,9 c	4,3 d	4,0 c	1,7 b	1,5 b	1,6 b
3 - CaCO <sub>3</sub> +MgCO <sub>3</sub> + NPK	6,2 ef A	6,0 de B	5,8 c C	4,0 c	4,2 d	4,2 c	1,5 b	1,5 d	1,5 d
4 - Escória nível 1	6,5 d A	5,9 e B	6,0 c B	4,5 c	4,7 d	4,2 c	1,8 ab	1,5 cd	1,7 cd
5 - Escória nível 1 + NPK	6,3 de A	6,2 d B	5,9 c C	4,5 c	4,5 d	4,4 c	1,7 b	1,6 cd	1,5 cd
6 - Escória nível 2 + NPK	7,0 c A	6,8 e B	6,7 c B	6,0 b	7,3 c	8,2 b	1,9 a	1,7 ab	2,0 ab
7 - Escória nível 1 + N	6,1 f A	5,6 f B	5,1 d C	4,2 c	3,4 e	3,8 c	1,3 c	1,1 e	1,3 e
8 - Escória nível 5 + trat. 3	7,7 a A	7,7 a A	7,4 a B	7,9 a	7,7 a	7,8 a	1,7 b	1,7 bc	1,6 bc
9 - Escória nível 10 + trat. 3	7,5 b A	7,4 b AB	7,3 a B	7,2 a	6,8 a	6,8 a	1,8 ab	1,8 a	1,6 a

Médias seguidas de mesma letra, maiúscula nas linhas e minúscula nas colunas, não diferem significativamente entre si pelo teste de Tuckey (p<0,05).

Apêndice 4. Aporte total de macronutrientes ao solo pela aplicação das diferentes quantidades de escória nos tratamentos

Nível (trat.)	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	CaO	MgO
	g ha <sup>-1</sup>	kg ha <sup>-1</sup>		
1 - (trat. 4, 5 e 7)	< 2,6	0,954	2.304	569
2 - (trat. 6)	< 5,3	1,908	4.608	1.138
5 - (trat. 8)	< 13,3	4,770	11.520	2.844
10 - (trat. 9)	< 26,6	9,540	23.040	5.688

Apêndice 5. Aporte total de metais pesados ao solo pela aplicação das diferentes quantidades de escória nos tratamentos

Nível (trat)	Mn	Cr	Zn	Cd	Cu	Ni
	kg ha <sup>-1</sup>					
1 - (trat. 4, 5 e 7)	24,6	33,3	0,41	0,017	0,154	0,68
2 - (trat. 6)	49,2	66,6	0,81	0,034	0,205	0,90
5 - (trat. 8)	123,0	166,5	2,03	0,085	0,770	3,38
10 - (trat. 9)	246,0	333,0	4,06	0,170	1,541	6,75



Apêndice 6. Teores de fósforo e potássio disponíveis no solo em três épocas de amostragem (medias de quatro repetições)

Tratamentos	P*			K*		
	Época de amostragem					
	12 meses	18 meses	24 meses	12 meses	18 meses	24 meses
	----- mg dm <sup>-3</sup> -----					
1 - Testemunha	1,5 c A	1,4 d A	1,4 c A	89 c A	78 a B	73 a B
2 - CaCO <sub>3</sub> +MgCO <sub>3</sub>	1,1 c A	1,1 d A	1,2 c A	59 b A	58 b A	51 b A
3 - CaCO <sub>3</sub> +MgCO <sub>3</sub> + NPK	4,8 b C	8,0 c B	19,2 ab A	45 cde A	34 d B	26 d B
4 - Escória nível 1	1,7 bc A	3,1 d A	2,4 c A	57 bc A	49 bc AB	43 bc B
5 - Escória nível 1 + NPK	7,9 b B	9,4 abc B	17,0 b A	42 de A	38 cd A	37 cd A
6 - Escória nível 2 + NPK	8,9 b B	8,8 bc B	20,4 a A	37 e A	34 d A	36 cd A
7 - Escória nível 1 + N	1,3 c B	4,0 d A	3,0 c AB	54 bcd A	51 b A	45 bc A
8 - Escória nível 5 + trat. 3	8,8 b C	12,3 a B	21,9 a A	35 e A	30 d A	36 cd A
9 - Escória nível 10 + trat. 3	14,0 a B	11,6 ab C	20,6 a A	35 e A	35 d A	34 cd A

\* Extrator Mehlich-1

Médias seguidas de mesma letra, minúsculas na coluna e maiúsculas na linha, não diferem significativamente entre si pelo teste de Tuckey (p&lt;0,05).

Apêndice 7. Rendimento de matéria seca da parte aérea das culturas (média de quatro repetições)

Tratamento	Aveia	Aveia	Milho
	1º cultivo	2º cultivo	3º cultivo
	----- g vaso <sup>-1</sup> -----		
1 – Testemunha	2,3 c	2,1 c	1,6 b
2 - CaCO <sub>3</sub> +MgCO <sub>3</sub>	6,4 bc	2,0 c	1,6 b
3 - CaCO <sub>3</sub> +MgCO <sub>3</sub> + NPK	23,8 a	22,3 b	30,0 a
4 - Escória nível 1	6,0 bc	1,9 c	2,0 b
5 - Escória nível 1 + NPK	25,8 a	25,7 ab	29,7 a
6 - Escória nível 2 + NPK	24,4 a	22,7 b	27,7 a
7 - Escória nível 1 + N	9,2 b	3,0 c	2,1 b
8 - Escória nível 5 + trat. 3	28,0 a	26,6 a	31,6 a
9 - Escória nível 10 + trat. 3	27,1 a	24,3 ab	28,3 a

Médias seguidas de mesma letra não diferem significativamente entre si pelo teste de Tuckey ( $p < 0,05$ ).

Apêndice 8. Concentrações máximas ( $\text{mg kg}^{-1}$ ) de metais pesados permitidos em solos com adição de lodo de esgoto, conforme diferentes legislações<sup>(1)</sup>

País/Estado	Ano	Cd	Cu	Cr	Ni	Pb	Zn	Hg
Comunidade Européia	1986	1-3,0	50-140	100-150	30-75	50-300	150-300	1-1,5
França	1988	2,0	100	150	50	100	300	1,0
Alemanha <sup>a</sup>	1992	1,5	60	100	50	100	200	1,0
Itália	1990	3,0	100	150	50	100	300	---
Espanha	---	1,0	50	100	30	50	150	1,0
Reino Unido <sup>b</sup>	1989	3,0	135	400	75	300	300	1,0
Dinamarca	1990	0,5	40	30	15	40	100	0,5
Finlândia	1995	0,5	100	200	60	60	150	0,2
Noruega	---	1,0	50	100	30	50	150	1,0
Suécia	---	0,5	40	30	15	40	100	0,5
Estados Unidos	1996	20,0	750	---	210	150	1400	8,0
Nova Zelândia	1992	3,0	140	600	35	550	280	1,0
Canadá (Ontário)	---	1,6	100	120	32	60	220	0,5
Canadá (Quebec)	---	2,0	---	---	18	50	185	0,5
Brasil (Estado do RS)	1993	2,5	140	500	35	500	280	1,0

<sup>a</sup> Os valores são para pH >6. Para pH 5 a 6 os limites para Cd e Zn são de 1 a 150  $\text{mg kg}^{-1}$ , respectivamente.

<sup>b</sup> Os valores mostrados são para pH 6 a 7. Existem outros valores para pH 5 a 6 e >7.

<sup>(1)</sup> Fontes: Andreoli et al. (1999); McGrath et al. (1994); Rodrigues et al. (1993) para o Estado do Rio Grande do Sul (citados por Kray, 2005).

## **8. VITA**

Márcio do Sacramento Wally, filho de Waldino e Olga Pilar do Sacramento Wally, nasceu em 17 de agosto de 1979 em Pelotas, Rio Grande do Sul. Estudou na Escola Municipal Dr. Berchon, onde concluiu o ensino fundamental, e no Conjunto Agrotécnico Visconde da Graça, onde completou o ensino médio. Em 1998, ingressou na Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel, da Universidade Federal de Pelotas, graduando-se como Engenheiro-Agrônomo em 2002. Em março de 2003, iniciou seus estudos de Mestrado no Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo da Faculdade de Agronomia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Em setembro de 2004, iniciou sua atuação profissional na empresa Adubos Trevo S.A., onde atualmente ocupa o cargo de supervisor regional de vendas.