

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO E DO DESPORTO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
Escola de Engenharia  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais- PPGEM

APROVEITAMENTO DE CINZA DE CARVÃO MINERAL NA AGRICULTURA

Jorge Luiz Martins

Tese para obtenção do título de doutor  
em Engenharia.

Porto Alegre  
2001

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO E DO DESPORTO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
Escola de Engenharia  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais- PPGEM

APROVEITAMENTO DE CINZA DE CARVÃO MINERAL NA AGRICULTURA

Jorge Luiz Martins  
Engº Agrônomo, Mestre em Agronomia

Trabalho realizado dentro do programa de Pós-graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais – PPGEM, como parte dos requisitos para a obtenção do título de doutor em Engenharia.

Área de concentração: Metalurgia Extrativa

Porto Alegre  
2001

Esta Tese foi julgada adequada para obtenção do título de Doutor em Engenharia, área de concentração Metalurgia Extrativa e aprovada em sua forma final, pelo Orientador e pela banca Examinadora do Curso de Pós-Graduação.

Orientador: Prof. Dr. André Jablonski

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Ledemar Carlos Vahl – UFPEL  
Curso de Pós-Graduação em Agronomia – Deptº de Solos – FAEM

Prof. Drª. Ruth Néia Teixeira Lessa – UFPEL  
Departamento de Química Analítica e Inorgânica – IQG

Prof. Dr. Evaldo Rodrigues Soares – URCAMP  
Núcleo de Estudos e Pesquisas Ambientais e Energia – NEPAE

Prof. Dr. Vladimir Levit – Professor Visitante UFPEL  
Instituto de Física de Metais – Academia de Ciências da Rússia – Moscou

Prof. Dr. Jair Carlos Koppe  
Coordenador do PPGEM

Dedico esta tese a minha família e em  
memória de minha mãe Lídia

## AGRADECIMENTOS

Ao Prof. André Jablonski,  
pelo estímulo e pela orientação;  
ao Prof. Ledemar Carlos Vahl,  
pelo apoio e orientação;  
ao Prof. Avelino da Rosa Oliveira,  
pela amizade e disponibilidade em todos momentos solicitados;  
ao Prof. Élio Paulo Zonta,  
pelas análises estatísticas dos dados;  
ao Prof. Rui José Costa da Silveira,  
pelo auxílio na coleta e classificação dos solos utilizados;  
à Pesquisadora Nely Brancão,  
pelas avaliações fitopatológicas dos experimentos;  
à CAPES - PICDT,  
pela bolsa concedida;  
à acadêmica Mariana Coutinho,  
pela colaboração;  
aos colegas do departamento,  
pelo apoio para a realização deste trabalho;  
aos colegas do LAGEAMB,  
pela estrutura colocada à disposição;  
à CRM, URCAMP, CIENTEC e CGTEE  
pelo acesso à matéria-prima empregada neste estudo;  
à EMBRAPA pela utilização da casa de vegetação .

## SUMÁRIO

|  | Página |
|--|--------|
| LISTA DE TABELAS .....   | viii   |
| LISTA DE FIGURAS .....   | ix     |
| RESUMO .....   | xii    |
| ABSTRAT .....  | xiii   |
| <br>   |        |
| 1. INTRODUÇÃO .....  | 1      |
| <br>   |        |
| 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....   | 3      |
| 2.1 Carvão mineral e a produção de cinzas .....                        | 3      |
| 2.2 Efeito das cinzas sobre as propriedades físicas do solo.....       | 10     |
| 2.3 Efeito das cinzas sobre as propriedades químicas do solo.....      | 13     |
| 2.4 Efeito das cinzas sobre os microrganismos.....                     | 21     |
| 2.5 Efeito das cinzas sobre as plantas.....                            | 24     |
| 2.6 Usos ambientais atuais das cinzas .....                            | 29     |
| <br>   |        |
| 3. MATERIAL E MÉTODOS.....   | 35     |
| 3.1 Solos utilizados.....  | 35     |
| 3.2 Cinzas utilizadas.....   | 36     |
| 3.2.1 Cinza UTPM 1.....  | 36     |
| 3.2.2 Cinza UTPM 2.....  | 36     |
| 3.2.3 Cinza URCAMP.....  | 36     |
| 3.2.4 Cinza CIENTEC.....   | 37     |
| 3.3 Experimento em casa de vegetação com cinza UTPM 1.....             | 39     |
| 3.4 Experimento em laboratório.....                                    | 40     |
| 3.4.1 Cinza UTPM 2 – Solo Alto das Canas.....                          | 40     |
| 3.4.2 Cinza URCAMP – Solo Alto das Canas.....                          | 41     |
| 3.4.3 Cinza CIENTEC – Solo Alto das Canas.....                         | 41     |
| 3.4.4 Cinza CIENTEC – Solo malha IV.....                               | 42     |
| 3.4.5 Cinza UTPM 2 – Solo malha IV.....                                | 43     |
| 3.5 Experimento em casa de vegetação com cinza CIENTEC.....            | 43     |
| 3.6 Experimento em casa de vegetação com cinza UTPM 2.....             | 44     |
| 3.7 Experimento em casa de vegetação com Antracnose.....               | 45     |
| <br>   |        |
| 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....   | 46     |
| 4.1 Experimento em casa de vegetação com cinza UTPM 1.....             | 46     |
| 4.2 Experimento em laboratório com cinza UTPM 2, URCAMP e CIENTEC..... | 49     |
| 4.2.1 Solo Alto das Canas – cinza UTPM 2 e URCAMP.....                 | 49     |
| 4.2.2 Solo malha IV – cinza UTPM 2 e CIENTEC.....                      | 51     |
| 4.2.3 Solo Alto das Canas – cinza CIENTEC.....                         | 53     |
| 4.3 Experimento em casa de vegetação com cinza UTPM 2 e CIENTEC.....   | 57     |
| 4.3.1 – Nitrogênio.....  | 63     |
| 4.3.2 – Fósforo.....   | 66     |
| 4.3.3 – Potássio.....  | 68     |
| 4.3.4 – Cálcio.....  | 69     |
| 4.3.5 – Magnésio.....  | 71     |
| 4.3.6 – Enxofre.....   | 72     |
| 4.3.7 – Boro.....  | 74     |
| 4.3.8 – Cobre e Zinco.....   | 75     |
| 4.3.9 – Manganês.....  | 76     |

|   |    |
|---|----|
| 4.3.10 – Ferro - Alumínio - Sódio .....         | 78 |
| 4.3.11 – Níquel - Chumbo - Cromo - Cádmio ..... | 80 |
| 4.4 - Experimento em casa de vegetação .....    | 83 |
| 5. CONCLUSÕES .....                             | 85 |
| 6. SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS .....       | 87 |
| 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....             | 88 |
| 8. APÊNDICES .....                              | 99 |

## LISTA DE TABELAS

Página

|  |    |
|--|----|
| Tabela 1 - Quantidades de cinza de carvão mineral geradas, retiradas e reaproveitadas pela UTPM e custo de transporte.....   | 33 |
| Tabela 2 - Caracterização do solo Alto das Canas e Malha IV.....   | 35 |
| Tabela 3 - Caracterização das cinzas UTPM 1, UTPM 2, URCAMP e CIENTEC.....   | 37 |
| Tabela 4 - Caracterização do carvão Candiota CE 3300.....  | 38 |
| Tabela 5 - Análise granulométrica do carvão Candiota CE 3300.....  | 38 |
| Tabela 6 - Caracterização do calcário Pinheiro Machado II.....   | 38 |
| Tabela 7 - Análise granulométrica do calcário Pinheiro Machado II.....   | 39 |
| Tabela 8 - Esquema dos experimentos conduzido em laboratório com cinza UTPM 2, URCAMP e CIENTEC.....   | 43 |
| Tabela 9 - Valores de pH do solo Podzólico Vermelho Amarelo, após cultivo de feijão em vasos, influenciado pela aplicação de doses de cinza UTPM 1 ( % v v <sup>-1</sup> ) de carvão mineral. Médias de três repetições. * .....                     | 47 |
| Tabela 10 - Teores de macro e micronutrientes, sódio e alumínio do solo Podzólico Vermelho Amarelo, e sua mistura com doses de cinza volante de carvão mineral UTPM 1, após cultivo de feijão em vasos sem adubo. Médias de três repetições. * ..... | 47 |
| Tabela 11 - Teores de macronutrientes da parte aérea de feijão cultivado em vasos com solo Podzólico Vermelho Amarelo, influenciado pela aplicação de doses de cinza UTPM 1 sem e com adubação. Médias de três repetições. * .....                   | 48 |

## LISTA DE FIGURAS

|  | Página |
|--|--------|
| Figura 1 - Produção de matéria seca de feijão ( g vaso <sup>-1</sup> ), cultivado em vasos num solo Podzólico Vermelho Amarelo, influenciado pela aplicação de doses ( v v <sup>-1</sup> ) de cinza de carvão mineral UTPM 1 e adubação mineral. Média de três repetições.....   | 46     |
| Figura 2 - Efeito das doses ( t ha <sup>-1</sup> ) de calcário e de cinza volante de carvão mineral produzida na UTPM 2 e na URCAMP sobre o pH do solo Alto das Canas. Média de 21, 42, 63 e 90 dias de incubação. ....  | 49     |
| Figura 3 - Efeito das doses ( t ha <sup>-1</sup> ) de CaCO <sub>3</sub> e cinza volante de carvão mineral produzido na URCAMP sobre o pH do solo Alto das Canas. Médias de 21, 42, 63 e 90 dias de incubação. ....   | 50     |
| Figura 4 - Quantidade de cinza volante de carvão mineral produzida na URCAMP que poderá substituir as doses de calcário necessárias para elevar o pH do solo Alto das Canas a 6,0. ....  | 51     |
| Figura 5 - Efeito das doses ( t ha <sup>-1</sup> ) de cinza UTPM 2 sobre o pH em água e em CaCl <sub>2</sub> 0,01M do solo Malha IV. Média de 21, 42, 70 e 112 dias de incubação.....  | 52     |
| Figura 6 - Efeito das doses ( t ha <sup>-1</sup> ) de cinza CIENTEC sobre o pH em água e em CaCl <sub>2</sub> 0,01M do solo Malha IV. Média de 21, 42, 70 e 112 dias de incubação.....   | 53     |
| Figura 7 - Efeito das doses ( t ha <sup>-1</sup> ) de cinza CIENTEC sobre o pH em água e em CaCl <sub>2</sub> 0,01M do solo Alto das Canas. Média de 21, 42, 70 e 112 dias de incubação. ....  | 53     |
| Figura 8 - Efeito das doses ( t ha <sup>-1</sup> ) de CaCO <sub>3</sub> e cinza CIENTEC sobre o pH em água e em CaCl <sub>2</sub> 0,01M dos solos Alto das Canas e Malha IV. Média de 21, 42, 70 e 112 dias de incubação.....  | 54     |
| Figura 9 - Efeito das doses ( t ha <sup>-1</sup> ) de cinza CIENTEC sobre o pH em água e em CaCl <sub>2</sub> 0,01 M do solo Alto das Canas. Média de 21, 42 e 63 dias de incubação. ....  | 55     |
| Figura 10 - Efeito das doses ( t ha <sup>-1</sup> ) de CaCO <sub>3</sub> e cinza CIENTEC sobre o pH em água e em CaCl <sub>2</sub> 0,01M do solo Alto das Canas. Média de 21, 42 e 63 dias de incubação. ....  | 55     |
| Figura 11 - Quantidade de cinza CIENTEC que poderá substituir as doses de calcário necessárias para elevar o pH em água e em CaCl <sub>2</sub> 0,01M do solo Alto das Canas a 6,0. ....  | 56     |
| Figura 12 - Produção de matéria seca de feijão ( g vaso <sup>-1</sup> ), cultivado em vasos num solo Podzólico Vermelho Amarelo, influenciado pela aplicação de doses ( t ha <sup>-1</sup> ) de cinza de carvão mineral coletada da CIENTEC ( resultante de processo de dessulfuração ) e da UTPM 2, adubação mineral e calagem. Média de três repetições.....   | 57     |
| Figura 13 - Efeito da aplicação de doses equivalentes a 0 ( A = testemunha ), 20 t ha <sup>-1</sup> ( B = cinza CIENTEC ) e 40 t ha <sup>-1</sup> ( C = cinza UTPM 2 ) sobre as plantas de feijão cultivadas em solo Podzólico Vermelho Amarelo, em função dos seguintes tratamentos: A solo, solo + calcário, solo + adubo, solo + adubo + calcário; B e C cinza, cinza + calcário, cinza + adubo, cinza + adubo + calcário ..... | 58     |

|   |    |
|---|----|
| Figura 14 - Efeito da aplicação de doses crescentes de cinza CIENTEC equivalentes a 0, 20, 40 e 80 t ha <sup>-1</sup> ( A ) sobre as plantas de feijão cultivadas em solo Podzólico Vermelho Amarelo, da adubação ( B ) e da adubação + calagem ( C ).....  | 59 |
| Figura 15 - Efeito da aplicação de doses crescentes de cinza UTPM 2 equivalentes a 0, 40, 80 e 160 t ha <sup>-1</sup> ( A ) sobre as plantas de feijão cultivadas em solo Podzólico Vermelho Amarelo, da adubação ( B ) e da adubação + calagem ( C ).....  | 60 |
| Figura 16 - Medidas de pH em água e em CaCl <sub>2</sub> 0,01M do solo Podzólico Vermelho Amarelo, influenciado pela aplicação de doses ( t ha <sup>-1</sup> ) de cinza de carvão mineral coletada da CIENTEC ( resultante de processo de dessulfuração ) e da UTPM 2, adubação mineral e calagem. Média de três repetições. .... | 61 |
| Figura 17 - Efeito da aplicação de dose equivalente a 40 t ha <sup>-1</sup> de cinza CIENTEC sobre as plantas de feijão cultivadas em solo Podzólico Vermelho Amarelo, com os seguintes tratamentos: A apenas cinza, B cinza + calcário, C cinza + adubo, D cinza + adubo + calcário. ....  | 64 |
| Figura 18 – Quantidade total de nitrogênio extraída ( mg vaso <sup>-1</sup> ) pelas plantas de feijão cultivadas em vasos num solo Podzólico Vermelho Amarelo, influenciado pela aplicação de doses ( t ha <sup>-1</sup> ) de cinza de carvão mineral, adubação e calagem. Média de três repetições.....                          | 65 |
| Figura 19 - Efeito da aplicação de dose equivalente a 40 t ha <sup>-1</sup> de cinza UTPM 2 sobre as plantas de feijão cultivadas em solo Podzólico Vermelho Amarelo, com os seguintes tratamentos: A apenas cinza, B cinza + calcário, C cinza + adubo, D cinza + adubo + calcário .....   | 66 |
| Figura 20 – Quantidade total de fósforo extraída ( mg vaso <sup>-1</sup> ) pelas plantas de feijão cultivadas em vasos num solo Podzólico Vermelho Amarelo, influenciado pela aplicação de doses ( t ha <sup>-1</sup> ) de cinza de carvão mineral, adubação e calagem. Média de três repetições.....                             | 67 |
| Figura 21 – Quantidade total de potássio extraída ( mg vaso <sup>-1</sup> ) pelas plantas de feijão cultivadas em vasos num solo Podzólico Vermelho Amarelo, influenciado pela aplicação de doses ( t ha <sup>-1</sup> ) de cinza de carvão mineral, adubação e calagem. Média de três repetições.....                            | 68 |
| Figura 22 – Quantidade total de cálcio extraída ( mg vaso <sup>-1</sup> ) pelas plantas de feijão cultivadas em vasos num solo Podzólico Vermelho Amarelo, influenciado pela aplicação de doses ( t ha <sup>-1</sup> ) de cinza de carvão mineral, adubação e calagem. Média de três repetições.....                              | 70 |
| Figura 23 – Quantidade total de magnésio extraída ( mg vaso <sup>-1</sup> ) pelas plantas de feijão cultivadas em vasos num solo Podzólico Vermelho Amarelo, influenciado pela aplicação de doses ( t ha <sup>-1</sup> ) de cinza de carvão mineral, adubação e calagem. Média de três repetições.....                            | 72 |
| Figura 24 – Quantidade total de enxofre extraída ( mg vaso <sup>-1</sup> ) pelas plantas de feijão cultivadas em vasos num solo Podzólico Vermelho Amarelo, influenciado pela aplicação de doses ( t ha <sup>-1</sup> ) de cinza de carvão mineral, adubação e calagem. Média de três repetições.....                             | 73 |

|  |    |
|--|----|
| Figura 25 – Quantidade total de boro extraída ( mg vaso <sup>-1</sup> ) pelas plantas de feijão cultivadas em vasos num solo Podzólico Vermelho Amarelo, influenciado pela aplicação de doses ( t ha <sup>-1</sup> ) de cinza de carvão mineral, adubação e calagem. Média de três repetições.....     | 74 |
| Figura 26 – Quantidade total de cobre extraída ( mg vaso <sup>-1</sup> ) pelas plantas de feijão cultivadas em vasos num solo Podzólico Vermelho Amarelo, influenciado pela aplicação de doses ( t ha <sup>-1</sup> ) de cinza de carvão mineral, adubação e calagem. Média de três repetições.....    | 75 |
| Figura 27 – Quantidade total de zinco extraída ( mg vaso <sup>-1</sup> ) pelas plantas de feijão cultivadas em vasos num solo Podzólico Vermelho Amarelo, influenciado pela aplicação de doses ( t ha <sup>-1</sup> ) de cinza de carvão mineral, adubação e calagem. Média de três repetições.....    | 76 |
| Figura 28 – Quantidade total de manganês extraída ( mg vaso <sup>-1</sup> ) pelas plantas de feijão cultivadas em vasos num solo Podzólico Vermelho Amarelo, influenciado pela aplicação de doses ( t ha <sup>-1</sup> ) de cinza de carvão mineral, adubação e calagem. Média de três repetições..... | 77 |
| Figura 29 – Quantidade total de ferro extraída ( mg vaso <sup>-1</sup> ) pelas plantas de feijão cultivadas em vasos num solo Podzólico Vermelho Amarelo, influenciado pela aplicação de doses ( t ha <sup>-1</sup> ) de cinza de carvão mineral, adubação e calagem. Média de três repetições.....    | 78 |
| Figura 30 – Quantidade total de alumínio extraída ( mg vaso <sup>-1</sup> ) pelas plantas de feijão cultivadas em vasos num solo Podzólico Vermelho Amarelo, influenciado pela aplicação de doses ( t ha <sup>-1</sup> ) de cinza de carvão mineral, adubação e calagem. Média de três repetições..... | 79 |
| Figura 31 – Quantidade total de sódio extraída ( mg vaso <sup>-1</sup> ) pelas plantas de feijão cultivadas em vasos num solo Podzólico Vermelho Amarelo, influenciado pela aplicação de doses ( t ha <sup>-1</sup> ) de cinza de carvão mineral, adubação e calagem. Média de três repetições.....    | 79 |
| Figura 32 – Quantidade total de níquel extraída ( mg vaso <sup>-1</sup> ) pelas plantas de feijão cultivadas em vasos num solo Podzólico Vermelho Amarelo, influenciado pela aplicação de doses ( t ha <sup>-1</sup> ) de cinza de carvão mineral, adubação e calagem. Média de três repetições.....   | 80 |
| Figura 33 – Quantidade total de chumbo extraída ( mg vaso <sup>-1</sup> ) pelas plantas de feijão cultivadas em vasos num solo Podzólico Vermelho Amarelo, influenciado pela aplicação de doses ( t ha <sup>-1</sup> ) de cinza de carvão mineral, adubação e calagem. Média de três repetições.....   | 81 |
| Figura 34 – Quantidade total de cromo extraída ( mg vaso <sup>-1</sup> ) pelas plantas de feijão cultivadas em vasos num solo Podzólico Vermelho Amarelo, influenciado pela aplicação de doses ( t ha <sup>-1</sup> ) de cinza de carvão mineral, adubação e calagem. Média de três repetições.....    | 81 |
| Figura 35 – Infecção de antracnose em plantas de feijão cultivadas em solo Podzólico Vermelho Amarelo que recebeu dose equivalente a 40 t ha <sup>-1</sup> de cinza UTPM 2 .....   | 83 |

# APROVEITAMENTO DE CINZA DE CARVÃO MINERAL NA AGRICULTURA\*

Autor: Jorge Luiz Martins  
Orientador: Prof. Dr. André Jablonski  
Co - orientador: Prof. Dr. Ledemar Carlos Vahl

## RESUMO

A grande quantidade de cinza gerada pela queima de carvão mineral e a necessidade de redução de emissões sulfurosas advindas dessa queima, fazem com que se busquem alternativas para diminuir essas emissões, assim como para a utilização racional dessa cinza. Com o objetivo de avaliar a viabilidade de utilizar cinzas sulfatada e não sulfatada como fertilizante e corretivo da acidez do solo, foram conduzidos experimentos em laboratório e em casa de vegetação, com um solo Podzólico Vermelho Amarelo e solo regenerado de mina de carvão, usando como planta teste feijão - *Phaseolus vulgaris* L. . A cinza não sulfatada e não intemperizada produzida pela UTPM, quando aplicada ao solo, não corrigiu sua acidez, mas aumentou a resistência do feijão à antracnose e, quando aplicada com adubação, aumentou o rendimento da cultura. As cinzas sulfatadas resultantes de processo de dessulfuração produzidas em plantas pilotos da URCAMP e da CIENTEC foram eficientes para a correção da acidez do solo, tendo uma equivalência em carbonato de cálcio de 3,75 % e 16,8 %, respectivamente. A cinza CIENTEC aplicada ao solo ( 20, 40 e 80 t ha<sup>-1</sup> ) aumentou a absorção de S, Mg, Ca e N, diminuiu a de Ni, Mn, Cu e Zn e não influenciou a absorção de B pelas plantas, enquanto a cinza UTPM não intemperizada ( 40, 80 e 160 t ha<sup>-1</sup> ) aumentou a absorção de B e S e diminuiu a de Mn, sendo que a absorção de Cd, Cr e Pb não foi afetada pelas doses dessas cinzas.

---

\* Tese de Doutorado em Metalurgia Extrativa. Escola de Engenharia. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre (141p.) Maio, 2001.

## AGRICULTURAL UTILIZATION OF MINERAL COAL ASH\*

Author: Jorge Luiz Martins  
Advisers: Prof. Dr. André Jablonski  
Prof. Dr. Ledemar Carlos Vahl

### ABSTRACT

The great quantity of ash generated by the burning of mineral coal and the necessity of reducing sulfurous emissions resulting from such burning demand alternative ways to reduce emissions as well as a rational utilization of the ash. With the objective of evaluating the feasibility of using sulfurous and non-sulfurous ashes as fertilizer and amendment on acid soils, greenhouse and laboratory experiments were conducted with a Podzolic Red Yellow – Paleudult – soil and coal mine rehabilitated soil, having beans ( *Phaseolus vulgaris* L. ) as test culture. The unweathered non-sulfurous ash produced by UTPM, when applied to soil did not correct the acidity but increased the beans' resistance to anthracnose, and increase culture yield when used with fertilization. The sulfurous ashes resulting from the desulfurization process in the pilot plants of URCAMP and CIENTEC were effective on the amendment of soil acidity, with an equivalence in calcium carbonate of 3,75% and 16,8% respectively. CIENTEC ash applied to soil (20, 40 and 80 t ha<sup>-1</sup>) increased S, Mg, Ca and N uptake, decreased Ni, Mn, Cu and Zn uptake, and did not influence B uptake by plants. UTPM unweathered ash (40, 80 and 160 t ha<sup>-1</sup>) increased B and S uptake, decreased Mn uptake, and the uptake of Cd, Cr and Pb by plants was not affected by the rates of this ash.

---

\* Doctoral dissertation in Extrativist Metallurgy. Escola de Engenharia. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre (RS) - Brazil. 141p. May, 2001.

## 1. INTRODUÇÃO

A necessidade cada vez maior de geração de energia no Brasil faz com que se busquem mais alternativas energéticas, estando entre elas o carvão mineral, principalmente nos estados do sul do país, visto que nesta região concentra-se a totalidade das reservas de carvão do Brasil. Como os carvões brasileiros, em particular os carvões gaúchos, apresentam um alto teor de cinza e de enxofre, o seu consumo em termelétricas provoca a formação de grandes quantidades de cinzas e gases contendo elevados teores de SO<sub>x</sub>, surgindo então a necessidade de emprego de tecnologias limpas por ocasião da sua combustão.

Há, ainda, uma enorme necessidade de diminuição da emissão de poluentes para a atmosfera, tanto de particulados, como de gases tóxicos, principalmente SO<sub>x</sub> e NO<sub>x</sub>. Por esse motivo, as plantas de combustão de carvão, atendendo às atuais exigências governamentais e das agências de controle de poluição, estão buscando alternativas para diminuir estas emissões, principalmente com a utilização do calcário para redução do SO<sub>x</sub>. Desta forma, o calcário aplicado durante a combustão ou em lavadores, irá produzir uma cinza alcalina com altos teores de cálcio, magnésio e enxofre.

A partir do ano 2000, as emissões sulfurosas deveriam ter que se enquadrar aos limites impostos pelas normas do CONAMA aplicadas pela FEPAM – RS, o que, obrigatoriamente, restringiria as emissões sulfuradas, que apresentavam um patamar de 4.500 g milhão<sup>-1</sup> de kcal e seriam reduzidos para 2.000 g, sendo que esta redução obrigaria, entre outros métodos, a utilização de calcário pelas termelétricas e outras plantas consumidoras de carvão. O destino final desse resíduo é o objetivo deste trabalho, considerando as questões ambientais e ao mesmo tempo as questões econômicas. As cinzas provenientes dos processos de combustão de carvão, material outrora considerado inconveniente, estão sendo vistas como fonte de renda possuindo uma infinidade de aplicações.

Como no processo de dessulfuração dos gases da combustão do carvão resulta uma cinza alcalina, a mesma poderá ser usada no solo visando elevar seu pH, bem como melhorar as propriedades físicas e químicas dos mesmos para a agricultura. As cinzas agem como corretivo do pH do solo, aumentam sua capacidade de retenção de água, são fontes de macro e micronutrientes, sendo observado, também, o aumento na produção de biomassa das plantas.

A maioria dos solos brasileiros é ácido, sendo comum solos classificados como muito ácidos por possuírem pH entre 4,0 e 5,5. A maioria das plantas cultivadas se desenvolve melhor em solos levemente ácidos a neutros, isto é, solos com pH entre 6,0 e 7,0. Nesta faixa de pH não ocorre toxidez de alumínio e manganês para as plantas, a disponibilidade dos nutrientes minerais (principalmente fósforo) é mais equilibrada e a atividade dos microrganismos do solo é maior (Volkweiss et al., 1992). Portanto, espera-se que a aplicação de cinzas alcalinas ao solo venha a melhorar o rendimento das culturas por elevar seu pH, entre outros fatores.

Sabe-se também que o teor de enxofre (S) total nos solos brasileiros é relativamente baixo quando comparado ao de outros países, e que algumas culturas têm exigência de enxofre maior que as de fósforo (P), por exemplo, arroz, cana-de-açúcar, algodoeiro, feijoeiro, cebola, hortaliças, gramíneas forrageiras, etc. Por esses dois motivos, a resposta à adição de enxofre ao solo tem sido verificada experimentalmente (Malavolta, 1982; Malavolta, 1984; Mattos et al., 1986). Apesar da quantidade pequena de sulfato de cálcio encontrado nas cinzas quando comparado com as necessidades de enxofre requerida pelas plantas, poderá até esperar-se uma resposta das culturas quando da aplicação de cinzas em solos muito deficientes deste elemento. No entanto, a resposta mais significativa que se espera da utilização da cinza está relacionada com a capacidade de elevar o pH do solo.

Também em minas a céu aberto, como é o caso da maioria das minas gaúchas, é visível uma grande degradação dos solos nas áreas de mineração, havendo necessidade de fixá-los (recuperá-los) principalmente com espécies vegetais, podendo ser a cinza também, neste caso, uma alternativa viável.

Como o estudo da utilização da cinza proveniente da combustão do carvão mineral na agricultura é muito recente, mesmo em países do primeiro mundo, e devido ao inexpressivo número de trabalhos nesta área no Brasil, este trabalho teve um caráter pioneiro.

Considerando que o processo de dessulfuração dos gases da combustão é necessário, e que as cinzas geradas quando da captura do enxofre pelo óxido de cálcio têm características bem particulares, faz-se necessário um estudo mais apurado de suas aplicações. No presente trabalho foram estudadas aplicações pertinentes à agricultura tendo em vista o sucesso de pesquisas desenvolvidas em vários países com cinzas de plantas de geração de energia decorrente da combustão de carvão. Esse trabalho teve por objetivo estudar os efeitos das cinzas sulfatadas (geradas em plantas pilotos) e não sulfatadas (gerada em planta industrial) sobre as culturas agrícolas e propriedades do solo, visando corrigir a acidez do mesmo e melhorar o rendimento agrícola.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Carvão mineral e a produção de cinzas

Há várias instituições estudando aplicação para cinzas provenientes da queima de carvão mineral, entre as quais a Ahlstorm Development Air Corporation ( Nova York, EUA ), Air Products and Chemical ( Califórnia, EUA ) e o CIEMAT na Espanha. O carvão é uma rocha sedimentar composta de matéria orgânica e inorgânica. Na gênese da sua formação, o primeiro estágio é o da turfa, que a partir de processos de carbonificação, evolui até a formação do carvão propriamente dito. À medida que aumenta o grau de carbonificação tem-se, respectivamente, linhito, sub-betuminoso, betuminoso, semi-antracito e antracito.

Dentre as reservas de carvão do Brasil ( ~ 32 bilhões de toneladas ), a mais importante é a jazida de Candiota, situada na Borda Sul da Bacia do Paraná, por possuir cerca de 12 bilhões de toneladas, contribuindo com 37,9 % no total das reservas nacionais, e sendo também o maior jazimento do gênero da América latina ( Brasil, 1996 ). O carvão da jazida de Candiota é classificado como betuminoso Alto Volátil C, segundo normas da ASTM.

As minas de carvão em atividade no Rio Grande do Sul são a Recreio, Butiá-Leste, Leão e Candiota, sendo esta última explorada pela Companhia Riograndense de Mineração ( CRM ) e, devido ao potencial do jazimento a ser explorado, ao baixo rank de seu carvão e ao tipo de extração ( a céu aberto, com baixo custo por tonelada ), o carvão de Candiota mostra-se muito adequado para o uso em termelétricas. Por esta razão o abastecimento da Usina Termelétrica Presidente Médici ( UTPM ), situada muito próxima à mina, é feito com este carvão ( Flores, 1990 ).

O carvão pode ser utilizado em diversos fins, tais como: fabricação do coque; indústria carboquímica e petroquímica, farmacêutica, de celulose, de cimento, geração de energia, entre outros, sendo que no RS basicamente é utilizado neste último propósito.

Entretanto, sabe-se que as etapas de extração e beneficiamento do carvão, bem como a sua combustão, são acompanhados de grande risco ambiental em decorrência da grande quantidade de cinza produzida, emissão de efluentes sólidos, líquidos e gasosos, gases ácidos e particulados finos produzidos, entre outros ( Zanella, 1988 ).

A extração do carvão em minas a céu aberto, além da destruição do ecossistema pela retirada do solo da cobertura superficial, pode levar a uma acidificação do sistema hídrico regional, principalmente em decorrência dos rejeitos piríticos do carvão. Já na extração em minas subterrâneas de profundidade, a topografia do local é pouco afetada e os danos ao ambiente são menores e mais fáceis de resolver. Entretanto, o carvão assim minerado é de maior custo específico.

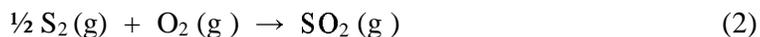
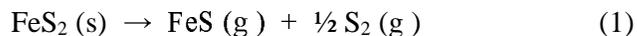
Segundo o processo de queima do carvão, as cinzas geradas podem ser divididas em três tipos, a saber :

- a- Escórias - são originadas durante a combustão de carvão granulado em grelhas móveis. São geralmente retiradas pelo fundo da fornalha, após serem apagadas em água. Apresentam granulometria grosseira e blocos sinterizados, contendo teores significativos ( 5 a 20 % ) de carbono / material orgânico incombusto.
- b- Cinzas de fundo ( botton ash ) - são cinzas mais pesadas e de granulometria média, que caem para o fundo das fornalhas de queima de carvão pulverizado ou de leito fluidizado, podendo ser retiradas secas ou através de um fluxo de água. Geralmente contêm teores de carbono/material orgânico não queimado de 1 a 5 %.
- c- Cinzas volantes ( fly ash ) - são as cinzas leves constituídas de partículas muito finas, todas abaixo de 0,15mm e com altos teores de frações menores que 0,05mm. Este é o resíduo da combustão do carvão que entra no fluxo do gás da chaminé, podendo ser coletado nos precipitadores eletrostáticos ou em filtros mecânicos, ou ainda, serem exaladas para a atmosfera exterior.

Além destes tipos de cinza, a combustão do carvão com calcário poderá produzir outros tipos de cinza / resíduos assim chamados: resíduo da dessulfuração do gás da chaminé ( FGD ); resíduo de combustores de leito fluidizado ( FBC ) do tipo atmosférico ( AFBC ), pressurizado ( PFBC ) ou circulante ( CFBC ) ou ainda, resíduo de combustores de carvão pulverizado.

Os resíduos FGD são produzidos passando-se os gases por um meio aquoso alcalino, resultando uma combinação de cinza volante, sais de Ca-S (sulfito e/ou sulfato de cálcio) e carbonato de cálcio, sendo que o tamanho das partículas variam normalmente entre 5 a 50  $\mu\text{m}$  ( Adriano et al.,1980 ). Na combustão em leito fluidizado, como no pulverizado, o calcário e o carvão são queimados concomitantemente, podendo ser injetados separadamente ( combustão pulverizada ) ou ser misturados antes de entrarem nos combustores ( leito fluidizado ), gerando em ambos os casos cinzas secas - subproduto seco da dessulfuração ( Stehouwer et al.,1995a; Brown et al.,1997; Elrashidi et al., 1999 ).

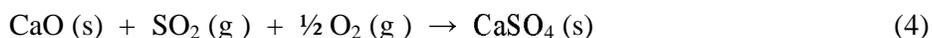
A forma predominante de enxofre no carvão é a pirita (  $\text{FeS}_2$  ), que durante o processo de combustão do carvão é parcialmente oxidada a dióxido de enxofre, conforme a reação :



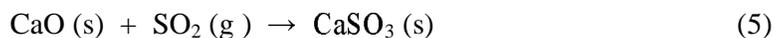
Quando se queima junto com o carvão o calcário ( sistema AFBC ), a uma temperatura de aproximadamente  $850^\circ \text{C}$ , o calcário é decomposto segundo a reação abaixo :



Então, no momento que ambos são queimados dentro do reator, entre outras, ocorre a seguinte reação :



Também outros mecanismos podem estar envolvidos, tais como :



Como durante a dessulfuração nem todo  $\text{CaO}$  reage com o enxofre devido, entre outros fatores, a quantidade utilizada de  $\text{CaCO}_3$ , devemos esperar encontrar na cinza resultante do processo de dessulfuração pela adição de  $\text{CaCO}_3$ , entre outros materiais :  $\text{CaCO}_3$  não decomposto,  $\text{CaSO}_4$  ( reação 4 ),  $\text{CaO}$  ( reação 3 ),  $\text{CaSO}_3$  ( reação 5 ) ( Elrashidi et al., 1999; Stuczynski et al., 1998a ; Stuczynski et al., 1998b ).

No sistema pressurizado ( PFBC ), o sorbente ( calcário calcítico –  $\text{CaCO}_3$  ou calcário dolomítico –  $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$  ) é misturado com o carvão e introduzido juntos, nos queimadores sob pressão, a uma temperatura um pouco abaixo de  $870^\circ \text{C}$  ( Stehouwer et al., 1995b ). Nesse sistema a pressão parcial de  $\text{CO}_2$  favorece as condições de equilíbrio, tanto da calcinação, quanto da recarbonatação, resultando num baixo índice de  $\text{CaO}$  e alto de  $\text{CaCO}_3$ .

Ao contrário, no sistema AFBC, tem-se um alto índice de CaO e um baixo índice de CaCO<sub>3</sub> ( Brown et al., 1997 ). Em ambos os casos, durante a combustão, o enxofre do carvão reage com o calcário formando o CaSO<sub>4</sub>. O resíduo gerado desse processo, além da cinza e do sulfato de cálcio, também contém algum carvão não queimado, algum calcário não reagido, bem como óxidos de cálcio, magnésio, alumínio e ferro ( Elrashidi et al., 1999 ).

As técnicas mais empregadas para a captura desses resíduos sólidos normalmente são: precipitadores eletrostáticos, filtros de manga, lavadores úmidos e coletadores mecânicos. No mundo todo, para o descarte das cinzas existem, basicamente, dois métodos para a deposição: as lagoas de sedimentação e os aterros. As lagoas são depósitos que recebem as cinzas misturadas com água, onde as partículas de cinza vão sedimentando-se, e a água efluente, após passar por várias lagoas ou tanques de sedimentação, é tanto descartada para córregos receptores como volta para as plantas de geração para serem reutilizadas. A cinza pode sair também seca nos locais de sua geração e servir de aterro. Em ambos os casos, o uso de revestimento está se tornando muito comum, devido às preocupações com a contaminação das águas subterrâneas e superficiais, aumentando, no entanto, os custos para estes depósitos.

Os resíduos sólidos originados da combustão do carvão, ou seja, cinzas volantes e de fundo, são considerados geralmente como um rejeito inútil. Os carvões do RS, como apresentam um teor médio de cinzas muito elevado ( em média 51 % ), produzem uma quantidade de rejeitos muito grande ( Centro de Informações sobre o carvão, 1980 ).

Sabe-se que a forma de acumulação destas cinzas se dá por uma decisão puramente econômica, sem considerar as relações com o ambiente, sendo essas dispostas de forma indiscriminada dentro do perímetro urbano e nas zonas rurais. Uma parte das cinzas produzidas que não é comercializada, é depositada nas cavas de mineração, servindo aos propósitos de aterro e de ajuste da topografia. Entretanto, os montes de cinza que se acumulam na mina sofrem a ação de agentes climáticos , que causam a dispersão do material no ambiente.

Entre os vários usos para as cinzas volantes, podemos citar: produção de cimento pozolânico; obtenção de agregados leves para o concreto; estabilização de solos visando à construção de estradas; fabricação de concreto celular; produção de materiais construtivos à base de cinza-cal ( tipo tijolos e blocos ); utilização na agricultura, entre outros ( Rissato & Souza, 1985 ). No entanto, uma pequena fração ( ~ 30 % ) das cinzas volantes, atualmente produzidas, é aproveitada na indústria cimenteira. Em outros países, o espectro de utilização é muito mais abrangente, constituindo-se em excelentes materiais de construção.

Para a utilização das cinzas de carvão na agricultura, é necessário caracterizá-las principalmente nos aspectos físicos e químicos. As características químicas, físicas e mineralógicas das cinzas dependem de uma variedade de fatores, incluindo o tipo e composição do carvão, as condições de combustão e a eficiência e os tipos de aparelhos de controle de emissão (Adriano et al., 1980). Conseqüentemente, é difícil generalizar sobre a composição das cinzas ou ainda o comportamento dessas no ambiente. Entretanto, certas características são mais ou menos uniformes para a maioria das cinzas ( Carlson & Adriano, 1993 ).

As cinzas volantes são compostas predominantemente de partículas pequenas, vitrificadas, ocas ( cenosferas ), com tamanho da partícula variando de 0,01 a 100  $\mu\text{m}$  e peso específico de 2,1 a 2,6. É um material heterogêneo, constituído tanto de fases amorfas como cristalinas. É geralmente considerado um alumino-silicato com Al, Si, Fe, Ca, K e Na como elementos predominantes. Comparada com o carvão que a originou, essa cinza contém todos os elementos presentes no mesmo, e ainda, é substancialmente enriquecida com elementos traços ( Carlson & Adriano, 1993 ).

Durante a combustão do carvão os elementos que possuem afinidade geoquímica com matéria orgânica e sulfetos são geralmente volatilizados, dependendo essa volatilidade da concentração geoquímica dos elementos, da tecnologia de combustão ( temperatura, tempo de residência, forma de geração de cinza, tipo de queimador, etc. ). No entanto, durante o resfriamento dos gases da combustão, muitos elementos podem ser condensados sobre a superfície das partículas de cinza, devido à alta energia e à grande área superficial destas partículas ( Querol et al., 1995 ).

Estudos têm demonstrado que muitos elementos traços na cinza são concentrados nas partículas menores em tamanho. Entre os elementos geralmente enriquecidos nas cinzas encontram-se As, B, Ca, Mo, S, Se e Sr. Comparadas com os solos, as cinzas têm baixo nível de nitrogênio devido à volatilização durante o processo de combustão, mas são relativamente ricas na maioria dos outros nutrientes necessários para as plantas. No entanto, a elevada necessidade de nutrientes pelas plantas e os altos custos de transporte são fatores limitantes do emprego da cinza na agricultura ( Adriano et al., 1978 e 1980; Page et al., 1979; El-Mogazi et al., 1988 ).

A concentração de íons metálicos presentes nas cinzas, obtidos por extração total, nem sempre se correlacionam com a obtida em testes de lixiviação, como mostra trabalho de Egemen & Yurteri ( 1994 ). Eles observaram que a solubilidade dos elementos era fortemente influenciada pelos valores de pH que se situavam entre 8,7 e 9,3.

Também Eary et al. ( 1990 ) destacam o pH como fator principal no controle de solubilidade de diversos resíduos. Lixiviados com níveis de pH variando de 3,3 a 12,3 já foram reportados ( Theis et al.,1978; Cherkauer, 1980; Kopsick & Angino,1981; Sakata,1987; Mattigod et al.,1990 ). Entretanto o pH do lixiviado pode ser rapidamente moderado quando ele entra em contato , tanto com as camadas inferiores do solo, quanto com a água subterrânea não contaminada ( Sakata, 1987 ).

Por esta razão os estudos de colunas em laboratório ( testes de lixiviação ) nem sempre correspondem à realidade do campo, pois podem superestimar os efeitos. Theis & Wirth ( 1977 ) sugeriram que o pH inicial dos extratos de água de cinzas volantes podem estar relacionados à taxa de ferro solúvel extraído com oxalato de cálcio ( extraível a pH 3,0 ). Baseado em estudos de 10 amostras de cinza volante, eles observaram que as cinzas volantes com taxas de ferro / cálcio maior que 3, produziam extratos ácidos, enquanto as taxas menores que 3, geraram extratos alcalinos.

Goepfert et al. ( 1980 ) realizando um experimento em solo Podzólico Vermelho Amarelo onde foi aplicada dose de 50, 100, 200 e 300 t ha<sup>-1</sup> de cinza de carvão da UTPM, concluíram que devido à baixa solubilidade dos nutrientes contidos nas cinzas, o material não aumentou, a médio prazo, a disponibilidade de nutrientes para as plantas, nem alterou significativamente as propriedades químicas daquele solo. No entanto, foi observado um aumento de 73 % nos valores de retenção de umidade daquele solo arenoso, fator este, segundo os autores, responsável pelo aumento sensível no rendimento de bulbos de cebola - *Allium cepa* L. cultivados naquele solo.

Machado et al.( 1983 ), em um experimento realizado com arroz irrigado - *Oryza sativa* L. que objetivava avaliar a influência de vários resíduos na produtividade do mesmo, concluíram que a cinza de carvão da UTPM, quando aplicada com uma adubação mineral adequada, foi o segundo melhor tratamento no aumento do rendimento da cultura quando cultivada no solo Pelotas ( Planossolo ) do que os demais tratamentos. A aplicação equivalente a 50 t ha<sup>-1</sup> da cinza com adubação N P K produziu, na primeira safra ( 1980 / 81 ), ~ 10 % a mais de grãos do que o tratamento com apenas adubação de N P K, e ~ 14 % a mais do que a testemunha. Na segunda safra ( 1981 / 82 ), o rendimento de grãos neste mesmo tratamento foi ~ 29 % superior à testemunha e ~16 % superior à adubação N P K, embora, praticamente em todos os tratamentos, os rendimentos da segunda safra fossem menores do que na primeira.

Dando seqüência a este experimento, foram observados nas três safras subseqüentes que o tratamento com a cinza mais adubação N P K, em relação à testemunha, foi nas safras 1982 / 83, 1983 / 84 e 1984 / 85, respectivamente, 4 % inferior, 26 % superior e 18 % superior. Já em relação ao tratamento que recebeu apenas adubação, o resultado foi 5% superior ( 1982 / 83 ), 15 % superior ( 1983 / 84 ) e 13 % superior ( 1984 / 85 ). Após cinco anos de cultivo de arroz onde foi adicionado inicialmente 50 t ha<sup>-1</sup> de cinza e, a cada ano, apenas adubação básica N P K, observa-se que com a adição da cinza não houve diferença significativa no pH, Al, Ca e Mg trocáveis, P e K disponíveis e matéria orgânica do solo em relação à testemunha ( Machado et al.,1985 a e b ).

Em outro experimento com arroz irrigado, essa mesma cinza ( UTPM pH 10,1) foi aplicada a um solo arenoso ácido ( Planossolo pH 5,5 ), nas doses equivalentes a 25, 50 e 75 t ha<sup>-1</sup> com adubação completa NPK e com adubação PK. Não foram observadas diferenças significativas no pH, nem nos teores de Al<sup>3+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup> trocáveis, P e K disponíveis do solo, com as doses de cinza. Entretanto, a aplicação de doses superiores a 25 t ha<sup>-1</sup> provocou distúrbios fisiológicos nas plantas, reduzindo o rendimento ( Machado et al., 1984 )

O pH da cinza pode variar grandemente, dependendo do conteúdo de enxofre do carvão, ou seja, carvões com altos teores de enxofre produzirão cinzas ácidas e os que possuem baixos teores , cinzas alcalinas. Já as cinzas oriundas de processo de dessulfuração com calcário, são geralmente alcalinas, com pH podendo alcançar valores superiores a 12. Quando essa cinza é aplicada ao solo, esses altos valores de pH podem causar deficiência em nutrientes essenciais, tais como P, Cu, Fe, Mg e Zn, e causar acumulação de elementos traços não essenciais, tais como As, Se e V, cuja solubilidade são pH dependentes ( Page, et al., 1979; Adriano, et al., 1980 ).

As cinzas não intemperizadas, ou seja, aquelas que recém saíram dos queimadores, possuem uma alta concentração de sais solúveis, no entanto, este nível de sais solúveis vai diminuindo à medida que a cinza vai sofrendo a ação do tempo.

Comparado com as concentrações de fósforo presentes nos solos, geralmente esse elemento encontra-se em mais altas concentrações nas cinzas, mas não está numa forma rapidamente disponível para as plantas, provavelmente devido às interações com alumínio e ferro da cinza e, no caso de cinza altamente alcalina, com o cálcio.

Os benefícios potenciais da adição de cinza ao solo incluem a melhoria da textura; melhoria da capacidade de retenção de água, principalmente para solo arenoso; aumento do pH de solos ácidos e aumento da concentração de macro e micronutrientes.

Entretanto, o potencial para efeitos adversos também existe e nesses podemos citar altas concentrações de sais solúveis de boro ( potencialmente tóxicas ), redução na disponibilidade de nitrogênio e fósforo, cimentação e compactação do solo. Como resultado, uma grande quantidade de pesquisa foi conduzida no mundo para determinar as condições sob as quais a adição de cinza pode ser utilizada para maximizar os efeitos desejáveis no solo, enquanto se minimiza os indesejáveis ( Carlson & Adriano, 1993 ).

## 2.2 Efeito das cinzas sobre as propriedades físicas do solo

A adição de cinza ao solo tende a melhorar sua textura, assim como reduzir a densidade e aumentar a aeração, como mostra o trabalho de Chang et al. ( 1977 ) com cinco solos da Califórnia. Nesse trabalho, quatro dos solos estudados tiveram diminuição significativa da densidade com a adição de cinza. Essa adição melhora também a capacidade de retenção de água do solo, particularmente em solos arenosos, como demonstrado por Goepfert et al. ( 1980 ).

Aitken et al. ( 1984 ), analisando 13 cinzas volantes provenientes da queima do carvão de plantas de geração de energia australianas, concluíram que suas capacidades de retenção de água eram altas e variavam de 27 a 105 % , com 11 das cinzas tendo valores maiores que 40 %. Essa maior capacidade de retenção de água tinha uma correlação linear positiva (  $r = 0,68$  ) com a percentagem de carbono orgânico do lixiviado.

Esses autores, em outro estudo, reportaram que, com a adição de 10 % de duas cinzas volantes australianas à areia, houve aumento na capacidade de retenção de água de 0,9 a 4,4 % ( fator 4,9 ) e de 0,9 a 8,3 % ( fator 9,2 ). Eles atribuíram também, que o aumento no rendimento de feijão - *Phaseolus vulgaris* L. e capim de Rhodes - *Chlorys gayana* Kunth, ocorreu devido ao aumento na capacidade de retenção de água com misturas de 30% ou mais de cinza volante lixiviada ao solo franco arenoso ( Aitken & Bell, 1985 ). Eles estudaram ainda, em casa de vegetação, a fitotoxicidade de B proveniente da adição de cinza volante não intemperizada ao solo, notando que a adição de 30 % ou mais (  $p < p^{-1}$  ) da cinza reduziu significativamente em 42 % o rendimento de feijão. Capim de Rhodes teve seu rendimento decrescido significativamente ( 49 % ) somente nos níveis de 70 % ou mais de adição de cinza. A redução no rendimento estava associada à toxidez de B.

Fail ( 1987 ), num experimento de campo, adicionou quantidade equivalente a  $70 \text{ t ha}^{-1}$  de cinza volante alcalina ( pH 11 ) a um rejeito ácido de mineração do Alabama. A média de crescimento de biomassa, no segundo ano, foi 30 vezes maior para capim de Rhodes, 20 vezes para festuca - *Festuca arundinacea* Schreb. e 5 vezes para lespedeza - *Lespedeza cuneata*, não sendo observados efeitos adversos nas plantas. O aumento no rendimento foi atribuído ao efeito da cinza volante na melhora da capacidade de retenção de água e da textura do rejeito, embora estes parâmetros não tenham sido quantificados no estudo.

Salter & Williams ( 1967 ) trabalhando em laboratório com cinco solos, relataram que os maiores incrementos na capacidade de retenção de água ocorreu quando a cinza foi adicionada aos solos de textura grosseira. No experimento de campo com solo franco arenoso grosseiro, com taxas correspondentes a 0; 112; 224 e  $448 \text{ t ha}^{-1}$  de cinza, eles observaram que as maiores adições de cinza aumentaram significativamente a capacidade de retenção de água, existindo um pequeno mas não significativo aumento com as menores taxas de aplicação.

Estes autores, aplicando a campo duas cinzas volantes a taxas correspondentes a 0, 125, 251, 502 e  $753 \text{ t ha}^{-1}$  a dois solos, um arenoso e outro franco-arenoso, observaram que, com aplicações maiores ou iguais a  $251 \text{ t ha}^{-1}$  a capacidade de retenção de água dos solos era maior do que a testemunha, sendo que na taxa equivalente a  $753 \text{ t ha}^{-1}$  o aumento foi de 93%. Mesmo tendo ocorrido aumento na capacidade de retenção de água, não houve uma melhora no rendimento de cenoura - *Daucus carota* L, alface - *Lactuca sativa* ( sic ), rabanete - *Raphanus sativus* L. e beterraba - *Beta vulgaris* L. indicando, provavelmente, que a disponibilidade de água não era o fator limitante do crescimento dessas culturas neste experimento ( Salter et al., 1971 ).

Não está claro se o aumento na capacidade de retenção de água pelo solo, devido à adição de cinza, resulta num aumento na mesma proporção na água disponível para as plantas. Trabalho de Chang et al. ( 1977 ) mostra que, embora a adição de cinza a cinco solos da Califórnia tenha aumentado a capacidade de retenção de água nos mesmos, a água foi mantida tão fortemente adsorvida pelos solos que se tornou indisponível para a planta. Também é importante salientar que só haverá uma resposta no rendimento das culturas com a aplicação de cinza, em decorrência do aumento na disponibilidade de água no solo, quando este fator for o restritivo ao rendimento das culturas, como ocorre em períodos de secas prolongadas.

Devido a algumas cinzas exibirem altas propriedades pozolânicas, as mesmas, quando aplicadas em grande quantidade aos solos, podem limitar a infiltração de água e a penetração da raiz. Furr et al. ( 1978a ) reportaram que a adição de cinza volante ácida ( pH 5,0 ) a um solo franco arenoso fino, a uma taxa correspondente a  $112 \text{ t ha}^{-1}$ , teve um efeito cimentante pronunciado que, segundo os autores, foi devido ao baixo conteúdo de matéria orgânica do solo ( 2 % ).

Weeldreyer & Fine ( 1981 ) notaram efeitos pozolânicos quando uma cinza volante de Dakota do Norte foi adicionada à areia lavada, tendo os autores atribuído parte do decréscimo no rendimento de cevada - *Hordeum vulgare* L. com adição crescente de cinza a este efeito pozolânico, bem como pela toxidez de B às plantas. Nesse experimento, a cinza foi usada para remover o fósforo presente na água de esgoto e gerar cinza rica em fósforo. O fósforo assim presente nesta cinza estava disponível para as plantas, o que não acontecia na cinza não tratada.

Um experimento de campo com cinza volante alcalina intemperizada ( pH 7,8 ), mostrou que a aplicação da mesma, em taxas variando de 18 a  $288 \text{ t ha}^{-1}$ , não diminuía o rendimento de grãos de milho - *Zea mays* L. nos dois solos estudados em nenhuma das safras ( 1971 / 72 ). O rendimento de grãos em um dos solos na segunda safra ( 1972 ), foi aumentando em 19,5 e 25,6 %, onde taxas cumulativas de 216 e  $288 \text{ t ha}^{-1}$  de cinza foram aplicadas respectivamente, o que foi em parte atribuído ao aumento da umidade do solo ( Plank et al., 1975 ).

Chang et al.( 1977 ) mostraram que uma cinza volante alcalina ( pH 12,5 ) reduziu a condutividade hidráulica do solo quando adicionada a solos ácidos com taxas maiores que 10 % e em solos alcalinos a taxas maiores que 20 % do volume. Eles levantaram a hipótese que a reação pozolânica da cinza volante aumentou as partículas do solo, afetando o fluxo de água.

No estudo de revisão feito por El-Mogazi et al.( 1988 ), eles citam que misturas com mais de 50 % de cinza volante ao solo diminui a densidade, aumenta a capacidade de retenção de água, diminui a condutividade hidráulica e diminui o módulo de ruptura do solo.

### 2.3 Efeito das cinzas sobre as propriedades químicas do solo

Muitos estudos têm indicado que as cinzas podem ser usadas como uma fonte de nutrientes essenciais para as plantas, incluindo B, Ca, Cu, K, Mg, Mo, S e Zn. As respostas para K, Mg, Cu e Zn, no entanto, são ainda um tanto inconsistentes. As cinzas podem também aumentar as concentrações de elementos traços essenciais para animais, particularmente Se, em tecidos de plantas que crescem em solos corrigidos com estas cinzas. Entretanto, deve-se tomar cuidado ao usar cinza como uma fonte de nutrientes, uma vez que a aplicação em excesso poderá resultar em níveis fitotóxicos de B ( Adriano et al., 1978 ) e níveis suficientemente elevados nos tecidos das plantas de outros elementos, incluindo As, Mo e Se, o que representaria um risco potencial ao consumo animal desses tecidos.

De acordo com o tipo de carvão, a cinza varia grandemente em pH e na composição elementar. Várias pesquisas, em todo mundo, têm mostrado o efeito da aplicação de cinzas da combustão do carvão no pH do solo e de rejeitos de minas. De 13 cinzas volantes australianas analisadas, 12 eram fortemente alcalinas com pH variando de 8,0 a 12,8 ( Aitken et al., 1984 ).

Terman et al.( 1978 ) obtiveram com cinza fina de carvão de leito fluidizado aplicada durante cinco semanas a um solo ácido americano ( pH 5,2 ), uma eficiência na elevação do pH de 47 % quando comparado ao calcário. Já a cinza mais grossa, resultante do mesmo processo de dessulfuração, foi 44 % tão efetiva quanto ao calcário na elevação do pH do rejeito ácido de mina após 10 meses de incubação. Neste trabalho, os autores concluem também que taxas moderadas de aplicação desta cinza são satisfatórias como fonte de enxofre para as colheitas.

Cinza volante alcalina ( pH 12,3 ), coletada de uma planta de força da Flórida, aplicada a taxa de 5 e 10 %, foi tão efetiva quanto 0,3 % de  $\text{CaCO}_3$  para elevar o pH de três solos arenosos ácidos da Flórida. A aplicação das duas taxas de cinza elevou significativamente o Ca trocável dos três solos estudados, sendo que na taxa de 10 % a elevação foi similar à aplicação de 0,3 % de  $\text{CaCO}_3$ . Magnésio trocável do solo também aumentou com as taxas de cinza. Potássio não mostrou diferença.

Fósforo extraível dos solos foi aumentado pela adição de carbonato ou de cinza, no entanto sua concentração no tecido das plantas de milho foi diminuída para os mesmos tratamentos. A extração de Cu, Mn, Zn e Fe dos solos também foi aumentada com a adição de cinza volante em todos os solos. O rendimento de matéria seca de milho foi aumentado para um dos solos quando ele recebeu  $\text{CaCO}_3$  ou cinza volante mas, nos outros dois solos, não houve diferença ( Moliner & Street,1982 ).

A quantidade de cinza necessária para elevar o pH do solo a níveis ideais para o crescimento da planta ( pH 6,0 a 6,5 ) varia com a composição da cinza e as propriedades do solo. Geralmente, taxas menores de aplicação são requeridas para cinzas não intemperizada do que para cinzas intemperizada para se alcançar o mesmo pH em um dado solo. Além disso, os efeitos no pH do solo são mais pronunciados e têm maior duração em solos ácidos e com baixo poder tampão. A quantidade de cinza a aplicar em solos com mais alto poder tampão terá que ser maior do que em um solo com baixo poder tampão para se alcançar um mesmo valor de pH. Assim, deve-se esperar que solos com baixa C.T.C., baixo teor de matéria orgânica, baixos teores de argilo-minerais e óxidos hidróxidos de alumínio e ferro necessitem quantidades menores de cinza alcalina para atingirem um pH ideal para as culturas, do que solos que possuem estes constituintes em maiores teores.

Após aplicação de cinza volante alcalina ( pH 12,4 ) no solo a taxa de 8 %  $\text{p p}^{-1}$ , Page et al.( 1979 ) observaram que o pH do solo alcalino foi elevado de 8,0 para cerca de 10,8 , enquanto do solo ácido mudara de 5,4 para cerca de 9,9. O solo alcalino tinha um maior poder tampão, sendo este fator responsável pela menor mudança no pH. O pH alto persistiu até o fim dos 12 meses de colheita da alfafa - *Medicago sativa* L., principalmente no solo ácido, mostrando com isso o poder residual da cinza volante como corretivo da acidez do solo. Neste trabalho foi também observado que a adição da cinza volante aos solos ácidos, além de aumentar o pH, tendeu também em aumentar a salinidade, a concentração de Ca, Mg, Na, S e B solúveis e decrescer a concentração de P solúvel em água destes solos. Os autores ressaltam que, o mais notável e significativo efeito na composição química do solo resultante da adição de cinza volante, foi o aumento no conteúdo de S do solo. O enxofre presente na cinza volante parecia estar predominantemente na forma de sulfato (  $\text{SO}_4$  ). Quando adicionada ao solo, a cinza volante aumentou o conteúdo de S- $\text{SO}_4$  em proporção à quantidade adicionada. Na taxa de adição de 8 % , onde a absorção pelas plantas de alfafa do S foi negligenciável comparado com as quantidades adicionadas, a cinza volante produziu concentração de S- $\text{SO}_4$  no solo de cerca de 300  $\text{mg g}^{-1}$ , o que era previsto, já que a cinza volante utilizada continha 0,4 % de S- $\text{SO}_4$ .

Estudos com a cinza volante coletada da estação de geração de Mojave, em Nevada, revelaram que ela era fortemente alcalina e continha cálcio prontamente disponível. Assim, Phung et al. ( 1978 ), trabalhando com esta cinza volante não intemperizada, observaram que a mesma era equivalente a 20 % de carbonato de cálcio na redução da acidez do solo e no suprimento das necessidades de Ca. A cinza volante de Mojave é composta principalmente de Si, Al, Fe, Ca. Comparada a corretivos agrícolas de pH, a cinza volante contém consideravelmente menos Ca e Mg , mas substancialmente mais Si, Na, Al, Fe e S. A adição de cinza volante ou carbonato de cálcio aumentou o pH do solo argilo siltoso estudado. Não houve diferença no tempo para o equilíbrio do pH entre os dois materiais corretivos. Mudanças no pH do solo, após o período de incubação, não foram significativas. O tratamento com 2 % de cinza volante mostrou uma capacidade de neutralização aproximadamente igual à de 0,4 % de carbonato de cálcio. Após 120 dias, uma taxa de aplicação de 5 % ( 115 t ha<sup>-1</sup> ) de cinza volante ou 1 % de carbonato de cálcio aumentou o pH do solo de 4,1 para 6,3. Tratamento do solo com carbonato ou cinza volante resultou em concentração decrescida de Al e Mn trocáveis e acrescida de Cu, Zn e Mn extraídos por DTPA. Os dados sugerem que cinza volante aplicada à taxa de 5 a 10 % ao solo estudado não causaria dano por sal mas poderia causar toxidez de B nas plantas e induzir a deficiência de P ( Phung et al. 1978 ).

Elsewi et al.( 1978 ), trabalhando com a cinza volante alcalina ( pH 12,8 ) de Nevada, que continha 0,4 % de enxofre extraído com acetato de amônio, demonstraram que a mesma aplicada a um solo ácido à taxa de 1 a 2 % p p<sup>-1</sup>, corrigia a deficiência de enxofre do solo, bem como aumentava o rendimento de alfafa e grama das Bermudas - *Cynodon dactylon* Pers.. Neste trabalho, foi demonstrado ainda, que a disponibilidade de enxofre derivado desta cinza é equivalente ao enxofre do gesso, sendo que ambos, quando aplicados ao solo à taxa de 25, 50 e 100 mg S kg<sup>-1</sup> de solo, melhoraram a produção e o conteúdo de enxofre em trevo branco - *Trifolium repens* L. e nabo - *Brassica rapa* L.. Essa mesma cinza aplicada a taxas que variavam de 0 a 8 % em dois solos, um com pH 7,9 e outro com pH 5,0 , aumentaram a absorção de Mo, B, Ca, Na e Se pelas plantas de cevada e pela planta nativa do deserto do Colorado - *Encelia farinosa* A.Gray. A disponibilidade para as plantas de P, Zn, Fe e Mn, decresceu com a adição da cinza. Segundo os autores, a adição de 5% dessa cinza produziu na forragem níveis de Mo potencialmente tóxicos para o gado ( Elsewi et al., 1980 ). Em outro experimento, Elsewi et al.(1981 ) observaram que a taxa de 8 % de aplicação dessa cinza aos solos, produziu níveis tóxicos de B para plantas de alfafa, trevo branco e grama das Bermudas, sendo que a acumulação do elemento, pelas plantas, era independente do pH do solo.

Furr et al. ( 1977 ) analisaram 45 elementos em 23 cinzas volantes provenientes da queima de carvão de 21 estados americanos. O pH das cinzas variava de 4,2 a 11,8 , sendo que somente 7 tinham pH ácido ( variando de 4,2 a 5,9 ). Esses autores, em outro trabalho, reportaram que, de todos os elementos encontrados na cinza volante, As, B, Mg e Se foram os que tiveram uma maior concentração no tecido das plantas crescidas em experimento de campo num solo com textura areia franca corrigido com quantidade de cinza volante ácida ( pH 5,0 ) equivalente a 112 t ha<sup>-1</sup>. As plantas utilizadas foram feijão, repolho - *Brassica oleracea* L., cenoura, milho, painço - *Echinochloa crusgalli* L., cebola, batata - *Solanum tuberosum* L., capim Sudão - *Sorghum sudanense* Piper, sorgo - *Sorghum vulgare* Pers. e tomate - *Lycopersicum esculentum* Mill.Gard.. Segundo estes autores, um efeito cimentante pronunciado resultou da adição de cinza volante ao solo neste experimento, provavelmente devido ao baixo conteúdo de matéria orgânica do solo ( 2% ) ( Furr et al., 1978 ).

Dando seqüência a este experimento, Gutenmann et al. ( 1979 ) relatam que, após cinco cortes sucessivos das forragens ( alfafa, cornichão - *Lotus corniculatus* L., bromus - *Bromus* ( sic ), datilo - *Dactylis glomerata* L. e phleum - *Phleum pratense* L.), houve um aumento mais consistente na concentração de B no tecido das plantas crescidas no tratamento com a cinza, principalmente nas leguminosas, enquanto o Se aumentou principalmente nas gramíneas. O molibdênio também mostrou um aumento consistente em todos os cortes de todas as plantas, enquanto o As aumentou principalmente no primeiro corte de cada cultivo. Segundo os autores, o rendimento de cada cultura, com ou sem aplicação de cinza, pareceu ser comparável.

Furr et al. ( 1979 ) aplicaram cinza volante ácida ( pH 4,5 ) à taxa correspondente a 224 t ha<sup>-1</sup> em dois solos de Nova York, um com pH 6,9 e outro com pH 5,5. Concluíram que a variação na absorção dos elementos foi influenciada pelo pH do solo. A cinza aumentou a absorção pelas plantas de B, Cu, Co, Fe, Mg, Mn, Mo, Se e Zn.

Zaifnejad et al.( 1998 ), trabalhando com cinza de fundo da dessulfuração seca ( cinza FBC ), que possuía pH 12,4 e equivalência em carbonato de cálcio ( Eq. CaCO<sub>3</sub> ) de 55 %, concluíram que a mesma foi efetiva no aumento do pH e na redução nos níveis de toxidez de Al e Mn de um solo ácido, tanto em estudo em casa de vegetação quanto de campo. Os autores também concluíram que, tanto a chuva no experimento de campo, quanto a lixiviação no experimento em casa de vegetação, diminuíram a concentração de B no tecido de milho.

A diminuição do P solúvel do solo foi observada com adições de cinza FBC ( pH 12,1 ), FGD ( pH 8,3 ) e cinza volante de carvão pulverizado ( pH 10,5 ) a oito solos da Pensilvânia. A aplicação da cinza FBC, a taxas de 0, 5, 10 e 20 g kg<sup>-1</sup> de solo, elevou o pH dos oito solos testados; já a cinza FGD, nas mesmas taxas, reduziu o pH de todos os solos. Com a aplicação nos oito solos da taxa de 10g de cinza kg<sup>-1</sup>, a redução no P extraído pelo extrator Mehlich 3 foi de 13 e 8 %, e extraídos em água, de 71 e 48 %, para a cinza FBC e FGD respectivamente ( Stout et al., 1998 ).

As cinzas geralmente contêm concentrações suficientes de micronutrientes essenciais para o crescimento das plantas, embora a deficiência de Mn possa ser um problema. Carlson & Adriano ( 1991 ) compararam o crescimento de plântano - *Platanus occidentalis* L. e liquidambar - *Liquidambar styraciflua* L. em dois depósitos de cinza abandonados ( lagoas de sedimentação ), um ácido ( pH 5,6 ) e outro alcalino ( pH 8,3 ) na Carolina do Sul. Quando comparado à testemunha, plântano cresceu melhor na lagoa alcalina, enquanto liquidambar, na lagoa ácida. Eles concluíram que a capacidade maior de retenção de água da cinza em comparação ao solo arenoso da testemunha era provavelmente o responsável pela melhora do crescimento. Na lagoa ácida, a concentração de B, Cu, Fe, Ni, Se e Zn no tecido de ambas as árvores era significativamente maior do que a testemunha. Entretanto, as concentrações de alguns desses elementos ( B, Cu, Zn ) foram reduzidas em árvores que cresceram na lagoa alcalina, mostrando redução na solubilidade destes elementos nesta condição de pH. As concentrações de Mn em ambas as árvores foram muito menores do que a testemunha nas duas lagoas, provavelmente devido à baixa concentração desse elemento em ambas as lagoas.

Estudos de lixiviação a campo, mostraram que em altas taxas de aplicação de cinza volante ao solo ( ~ 667 t ha<sup>-1</sup> ), os macronutrientes dominantes no lixiviado foram Ca e S, enquanto os únicos micronutrientes detectados foram Cu, Mn e Zn, sendo o Ni o único elemento traço detectado. Pico de concentração desses elementos foi detectado após aproximadamente 50 cm de chuva ou irrigação, e decresceu até as concentrações iniciais ou menores, no final do estudo. Segundo os autores, esses dados sugerem que a incorporação de cinza volante ao solo irá intemperizá-la com o tempo, permitindo a lixiviação natural dos elementos, e com isso, minimizando os efeitos adversos dos mesmos. Os dados sugerem também, que a aplicação de altas taxas de cinza volante a solos de textura grosseira, pode beneficiar a colheita pelo incremento na capacidade de retenção de água, sendo assim, uma alternativa para o descarte das cinzas ( Gangloff et al., 1997 ).

Em estudos de coluna de lixiviação em laboratório, Ghodrati et al. ( 1995 ) caracterizaram o lixiviado de um solo areia franca corrigido com seis taxas de cinza volante ( 0; 5; 10; 20; 30 e 40 % p p<sup>-1</sup> ). Eles encontraram que os picos de concentração iniciais de Cd, Cu, Ni, Pb e Zn eram menores do que 1,0; 11,0; 16,0; 1,0 e 12,0 mg L<sup>-1</sup> , respectivamente, mas reduziram-se a menos de 0,1 mg L<sup>-1</sup> , depois de haverem sido coletados 25 cm do lixiviado. Neste mesmo estudo, a condutividade elétrica ( CE ) e as concentrações de B foram reduzidas, respectivamente, para ~ 3 mmho cm<sup>-1</sup> e ~ 5 mg L<sup>-1</sup> depois de ter sido aplicado 35 mg L<sup>-1</sup> de água. Esses estudos sugerem que a incorporação de cinza volante num solo arenoso, no qual possa se realizar um lixiviamento subsequente, resultaria numa remoção dos elementos potencialmente fitotóxicos da zona da raiz das plantas. Os autores também concluem que as concentrações de elementos traços nos lixiviados, enquanto inicialmente elevadas, declinaram rapidamente, não devendo ameaçar a água superficial e subterrânea, dada a capacidade de adsorção natural de muitos solos.

A cinza da dessulfuração em leito fluidizado pressurizado ( cinza PFBC ), sendo rica em CaSO<sub>4</sub>, pode ser usada para correção de solos salinos sódicos. Uma vez que o CaSO<sub>4</sub> é muito solúvel, o Ca<sup>2+</sup> pode remover o Na<sup>+</sup> dos sítios de troca, diminuindo os problemas de dispersão causados pelas condições sódicas, promovendo com isso a floculação dos materiais argilosos. Devido à lixiviação dos íons Ca<sup>2+</sup> haverá aumento no pH do solo em maior profundidade no perfil, resultando em precipitação do Al e Fe, normalmente presentes em maior profundidade ( Brown et al, 1997 ).

O crescimento de plantas indicadoras ( *Eragrostis curvula* Ness e *Serícia lespedeza* ), sobre resíduos da dessulfuração úmida de gás da chaminé ( FGD ), foi pobre devido à presença de altos níveis de sais solúveis. A lixiviação dos materiais e uma correta adubação N P K, proporcionando um equilíbrio adequado de nutrientes, foi importante para obter um melhor crescimento de plantas sobre estes resíduos ( Shahandeh & Sumner, 1993 ).

A cinza FGD é rica em CaSO<sub>3</sub>, o qual, logo que aplicado aos solos ácidos, decompõe-se em SO<sub>2</sub> e, no decorrer do tempo, vai se oxidando e se transformando em CaSO<sub>4</sub> ( Ritchey et al., 1995 ). As cinzas da dessulfuração que possuíam maior teor de CaSO<sub>4</sub>, quando comparadas com as que possuíam maior teor de CaSO<sub>3</sub>, ao serem aplicadas ao solo foram mais benéficas ao crescimento de forragens em casa de vegetação ( Clark et al., 1997 ).

Essas cinzas resultantes da dessulfuração, tanto a seco ( cinza FBC ) como a úmido ( cinza FGD ), mostraram-se benéficas ao crescimento de trigo - *Triticum aestivum* L. em casa de vegetação quando foram adicionadas a um solo ácido - pH 4,7 ( Zaifnejad et al., 1996a ), tendo a cinza FBC uma maior equivalência em carbonato de cálcio ( Eq.  $\text{CaCO}_3$  55% ), ela comportou-se melhor como corretivo da acidez do solo ( Zaifnejad et al., 1996b ). Eles também observaram um melhor comportamento destas cinzas em corrigir acidez das camadas mais profundas do solo.

Stout et al. ( 1979 ) compararam a cinza resultante de processo de dessulfuração a seco ( FBC ) com o hidróxido de cálcio para elevar o pH do solo franco siltoso. Os dois materiais foram aplicados ao solo para elevar o pH a 5,0; 5,5; 6,0 e 6,5, sendo a cinza aplicada à taxa equivalente a 3,82; 8,63; 12,9 e 19,9  $\text{t ha}^{-1}$  ( Eq.  $\text{CaCO}_3$  de 51 % ). Comparado ao  $\text{Ca(OH)}_2$ , a aplicação da cinza aumentou a concentração de Mg e S nas quatro plantas testadas ( trevo vermelho - *Trifolium pratense* L., festuca, fagopírum - *Fagopyrum sagittatum* Gilib.( sic ) e aveia - *Avena sativa* L. ). Em decorrência da elevação do pH do solo com a aplicação dos 2 produtos, a concentração de Zn decresceu nas 4 plantas testadas.

Stehouwer et al. ( 1995b ), em coluna em casa de vegetação, estudaram o efeito de duas cinzas resultantes da dessulfuração a seco: cinzas AFBC ( pH 12,5 ), cinza PFBC ( pH 10,5 ); e de resíduo de esgoto sobre a solubilidade mobilidade de elementos traços em três rejeitos ácidos de mineração. Ambas as cinzas revelaram-se efetivas na elevação do pH dos materiais do rejeito, sendo a cinza AFBC mais efetiva. O pH do lixiviado, a condutividade elétrica, o carbono orgânico, cálcio, magnésio e enxofre dissolvidos, tenderam a aumentar com os níveis crescentes de correção com as cinzas. Neste trabalho, segundo os autores, as correções dos rejeitos de minas com 120  $\text{g kg}^{-1}$ , ou menos, das cinzas produziram uma concentração de elementos traços de preocupação ambiental, no lixiviado, menores do que os padrões de potabilidade de água.

O efeito da adição de cinza sobre as propriedades químicas do solo depende, em parte, se a cinza aplicada é recém saída da unidade geradora ( cinza não intemperizada ) ou se a mesma já sofreu a ação do tempo ( cinza intemperizada ). A alcalinidade e a salinidade são geralmente os dois principais efeitos imediatos da aplicação de cinza sobre as propriedades do solo, especialmente quando se usa cinza não intemperizada.

Uma das formas de diminuir a salinidade das cinzas não intemperizadas é a lixiviação e a carbonatação, o que permite que uma quantidade muito maior de cinza possa ser aplicada ao solo sem prejudicar o crescimento das plantas ( Adriano et al.,1982; Shahandeh & Sumner, 1993 ). No estudo de Adriano et al.( 1982 ), uma cinza não intemperizada alcalina ( pH 12,4 ) foi misturada com um solo ácido ( pH 4,8 ) e com um outro neutro ( pH 7,1 ) a uma taxa de 0; 2,5 e 5 % p p<sup>-1</sup>. Essa cinza também foi intemperizada no laboratório, sendo usado além dela resíduo de esgoto. A aplicação das doses de cinza fez diminuir a absorção de Cd proveniente do resíduo de esgoto pelas plantas de sorgo devido ao aumento do pH do solo. Foi observado prejuízo às plantas por sal quando crescidas na cinza não intemperizada. A intemperização, induzida pela carbonatação, não somente manteve a capacidade tamponante do pH da cinza, como também, reduziu os efeitos nocivos da salinidade. Grande aumento no pH do solo causado pela adição da cinza, juntamente com grande redução na absorção de Cd pelas plantas, indica que a utilização conjunta do resíduo de esgoto e da cinza alcalina pode melhorar os solos agrícolas.

Duas cinzas volantes alcalinas ( pH 10,2 e 8,4 ) foram aplicadas em diferentes concentrações ( variando de 3,2 a 200 t ha<sup>-1</sup> ) em 2 solos com texturas diferentes ( um franco arenoso e outro arenoso ), para estudar suas influências na absorção de B por plantas de milho. Apesar do pH elevado das cinzas, as mesmas possuíam baixa equivalência em carbonato de cálcio ( Eq. CaCO<sub>3</sub> 4,4 e 1,2 % ) resultando que, somente no mais alto nível de aplicação ( equivalente a 200 t ha<sup>-1</sup> ) a primeira cinza conseguiu elevar significativamente o pH ( de 6,89 para 7,45 ) do solo argiloso que possuía maior poder tampão. O pH do solo foi o fator de maior influência na liberação de B da cinza volante. O aumento na aplicação da cinza resultou em maior concentração de B no tecido de milho e causou marcáveis reduções no crescimento em ambos os solos. Com as mesmas taxas de aplicação de cinza volante, o conteúdo de B no tecido do milho foi maior quando o mesmo foi crescido no solo arenoso do que no solo argiloso ( Kukier et al.,1994 ).

Walker & Dowdy ( 1980 ) aplicaram cinza da dessulfuração de depurador de gás ( cinza FGD ) em 2 solos, um areia grossa ( pH 4,8 ) e um franco siltoso ( pH 5,7 ) a taxas correspondentes a 0; 12,5; 25; 50; 100 e 200 t ha<sup>-1</sup> . O rendimento de matéria seca da cevada e centeio - *Secale cereale* L. decresceu com aplicação de 25 t ha<sup>-1</sup> ou mais de cinza aos solos, o que foi atribuído a altas concentrações de B nos tecidos. Foi observado ainda, ao elevar a taxa de cinza, aumento na concentração de Se e diminuição na de Mn e Zn. Com aplicação correspondente a 200 t ha<sup>-1</sup> o pH aumentou de 4,8 para 7,2 e de 5,7 para 7,6 em ambos os solos.

A solubilidade do B depende tanto das propriedades da cinza volante, quanto das condições ambientais. Condições alcalinas diminuem a solubilidade do B na cinza, enquanto reações neutras e ácidas promovem a sua liberação. A adsorção máxima de B ocorre entre pH 8 a 10. Óxidos e hidróxidos de Fe, Mn e Al, assim como argilo-minerais, têm importante papel na adsorção do elemento pelo solo ( Kukier et al.,1994 ).

## **2.4 Efeito das cinzas sobre os microrganismos**

A aplicação de cinza volante ao solo geralmente resulta num decréscimo na atividade e número de microrganismos. No entanto, poucos estudos têm sido conduzidos que avaliem satisfatoriamente o efeito da adição de cinza volante sobre a população e atividades microbianas.

Pichtel & Hayes ( 1990 ), em um estudo usando cinza alcalina ( pH 12,2 ) à taxa de 0, 5, 10 e 20 % ( p p<sup>-1</sup> ) e resíduo de esgoto compostado à taxa de 0 e 5 %, descreveram uma redução na respiração microbiana após 28 dias com a aplicação de cinza ao solo franco siltoso à taxa de 10 a 20 %. Estes autores observaram também que os microrganismos parecem se adaptar às condições tóxicas produzidas pela adição de cinza, com um gradual aumento na respiração depois de um decréscimo inicial. Neste mesmo estudo foi observada também uma redução na população microbiana. Os autores relataram que a contagem total de bactérias, fungos e actinomicetos decresceram com o aumento das taxas de cinzas aplicadas, com significativa redução do total das populações microbianas nos dois níveis mais elevados de taxas de aplicação. Eles atribuíram esta redução ao pH alcalino dos solos corrigidos. Também é possível que um efeito de diluição, devido à quantidade decrescida de solo com o aumento da correção com cinza, possa explicar a diminuição na população microbiana observada com o aumento nas taxas de correção com cinza. A adição do resíduo de esgoto melhorou a respiração e aumentou o número de microrganismos em todos os tratamentos de cinzas exceto no nível 20 %.

Pichtel ( 1990 ) analisou o efeito sobre a respiração microbiana da adição de cinza ácida ( pH 3,5 ) e alcalina ( pH 12,2 ) em um solo franco arenoso ( pH 6,4 ) e franco siltoso ( pH 6,7 ). A adição de 20 % p p<sup>-1</sup> de cinza alcalina inibiu completamente a respiração no solo franco arenoso e reduziu em 97 % no solo franco siltoso, sendo que a mesma taxa de cinza ácida reduziu respectivamente em 28 e 33 % a respiração nestes dois solos.

A aplicação de 5 % de resíduo de esgoto nas misturas cinza-solo melhorou a respiração em ambos os solos, exceto para a taxa de 20 % de cinza alcalina. O autor atribui a diferença de resposta das duas cinzas aos efeitos das mesmas no pH do solo. A adição da cinza alcalina em taxas elevadas aumentou o pH do solo para valores acima de 9, enquanto a adição da cinza ácida nas mesmas taxas geralmente teve pouco ou nenhum efeito sobre o pH do solo, o qual permanecia para ambos os solos abaixo de 7. Segundo o autor, a condutividade elétrica do solo, as concentrações de B, Mo, Al trocável e ânions solúveis, certamente não estava associado com o decréscimo na respiração.

Cinza volante com pH igual a 8,4 foi aplicada à taxa equivalente à 505 t ha<sup>-1</sup> a um solo areia franca que possuía pH igual a 5,0 em um experimento de campo, no qual foram semeados, sozinhos ou consorciados, milho, trigo e festuca. Após 20 meses, a adição da cinza elevou o pH do solo para 6,2, dobrou o potencial de nitrificação e aumentou em 200 vezes o número de microrganismos denitrificantes, não mostrando grandes diferenças na população microbiana. Segundo os autores, a inexistência de efeitos danosos aos microrganismos com a aplicação da cinza no experimento ocorreu possivelmente devido à redução na solubilidade dos sais e na concentração de elementos traço da cinza com o tempo, a sua moderada alcalinidade e a resposta positiva das colheitas com a correção com a cinza volante ( Schutter & Fuhrmann, 1999 ).

Aplicação de cinza da dessulfuração de leito fluidizado, volante ( pH 12,0 ) e de fundo ( pH 11,9 ), variando a taxas de 0 a 80 g kg<sup>-1</sup>, a dois solos, um ácido ( pH 5,4 ) e outro praticamente neutro ( pH 6,9 ), causaram consideráveis degradações no N orgânico do solo, principalmente a cinza de fundo. A cinza volante, mesmo quando aplicada na maior taxa, mobilizou pouco ou quase nada do C orgânico, no entanto, a cinza de fundo com taxa maior ou igual a 20 g kg<sup>-1</sup> de solo causou grande perda e mobilização desse carbono. As perdas, tanto do N orgânico quanto de C orgânico do solo pela adição de cinza, estavam relacionadas à elevação do pH do mesmo ( Stuczynski et al., 1998 a e b ).

Adicionando cinza volante alcalina ( pH 12,8 ) a dois solos de Hong Kong, um arenoso ( pH 7,3 ) e outro franco arenoso ( pH 6,7 ) a taxas de 0, 3, 6, e 12 % p p<sup>-1</sup>, Wong & Wong ( 1986 ) observaram que a respiração microbiana no solo arenoso era inibida significativamente para todas as taxas de adição de cinza, enquanto no solo franco arenoso isto ocorria apenas nas taxas mais elevadas, devido provavelmente ao maior conteúdo de matéria orgânica deste solo.

Cervelli et al. (1986) reportaram que a adição de uma cinza volante alcalina pH 12,3 a um solo franco argiloso (pH 6,8) a taxas de 1, 2, 5 e 10 % p p<sup>-1</sup> não afetou a mineralização do nitrogênio. A concentração de N nítrico diminuiu e de N amoniacal aumentou com adição de 5 e 10 % de cinza volante. O potencial de denitrificação aumentou depois da adição de 2 e 5 % de cinza, voltando ao seu valor normal depois da adição de 10 % da mesma. Devido ao grande aumento do pH do solo nas taxas maiores de adição de cinza (pH 9,6 e 10,7 respectivamente para taxas de 5 e 10 %), esses resultados parecem ser mais uma consequência dos valores de pH do que da presença de metais pesados na cinza volante.

Esses mesmos autores trabalharam com duas cinzas volantes provenientes da queima de carvão Polonês (pH 10,9) e de carvão Sul Africano (pH 12,5). As cinzas foram aplicadas a dois solos; Histosol (pH 5,0 e 24,1 % de matéria orgânica) e Fluvisol (pH 6,1 e 0,8 % de matéria orgânica), a taxas de 2; 5 e 10 % p p<sup>-1</sup>. Eles observaram que as mesmas, quando aplicadas ao solo Fluvisol, reduziram a mineralização do nitrogênio. No entanto, quando aplicadas ao solo Histosol, a cinza do carvão polonês não teve qualquer efeito sobre a mineralização, enquanto a cinza do carvão sul africano aumentou a mineralização quando aplicada nas taxas mais elevadas (5 e 10 %). A adição de ambas as cinzas geralmente aumentou a nitrificação em ambos os solos (Cervelli et al., 1987).

Segundo Carlson & Adriano (1993), embora seja difícil generalizar partindo da precariedade de dados reportados na literatura, parece que a correção do solo com cinza volante, pode reduzir tanto a população quanto a atividade microbiana. Isto pode ser devido às mudanças no pH do solo, salinidade ou ainda concentração de elementos potencialmente tóxicos. Também pode ser um resultado do conteúdo reduzido de carbono e nitrogênio dos solos corrigidos por cinza.

Uma vez que a cinza volante não contém virtualmente nenhum carbono ou nitrogênio, a adição de cinza reduzirá as concentrações gerais de carbono e nitrogênio nos solos corrigidos, sendo este efeito mais pronunciado para o nitrogênio. Desta forma, a adição de matéria orgânica junto com a cinza pode ajudar a melhoria da atividade microbiana dos solos.

A cinza, quando não exposta à ação do tempo, é essencialmente estéril quando depositada. O desenvolvimento de uma comunidade microbiana vigorosa pode aumentar a adequação da cinza como um substrato para o crescimento de plantas. À medida que a cinza vai sendo exposta à ação do tempo e pela adição de matéria orgânica, ocorre um aumento no número e na diversidade da população microbiana (Klubek, et al., 1992).

Geralmente plantas que são fixadoras de N ou que são tolerantes a níveis altos de B e de salinidade são as que têm obtido maiores sucessos na revegetação de depósitos de cinza. Entre essas, podemos citar: *Brassica* spp., Chenopodiaceae, Fabaceae, Poaceae ( Scanlon & Duggan, 1979 ).

## 2.5 Efeito das cinzas sobre as plantas

Como mostra o trabalho de Stout et al. ( 1997 ), cinza de combustão de leito fluidizado produzida pela companhia Air Products and Chemical de Stockton na Califórnia, por possuir um alto teor de sulfato de cálcio ( 20% ) e óxido de cálcio ( 14 % ), quando aplicada a solos naturalmente ácidos do leste do vale de São Joaquim, USA, elevaram seus pH para níveis situados entre 6,5 e 7,0. Mais de 27 mil toneladas dessa cinza, entre os anos de 1991 e 1994, foram aplicadas em 16 diferentes locais agrícolas, cobrindo mais de 5250 ha de solos deste vale, sendo esta aplicação, segundo os autores, um sucesso tanto do ponto de vista ambiental como agrônômico.

A fitotoxicidade de B é provavelmente o problema potencialmente maior associado ao uso de cinza volante não intemperizada como corretivo do solo ( Carlson e Adriano, 1993 ). Um grande número de estudos indicam que a adição de cinza volante fresca ( recém saídas dos queimadores ) particularmente com elevadas taxas de aplicação, podem produzir toxidade por B nas plantas crescidas nos solos que recebem tais cinzas.

Um estudo em casa de vegetação de Mbagwu ( 1983 ) mostrou que a adição de níveis mais altos ( 5 % p p<sup>-1</sup> ) de cinza volante não intemperizada ( pH 7,6 ) em dois solos, um franco fino ( pH 7,3 ) e um franco cascalhento ácido ( pH 4,3 ) calcariado e não calcariado, não afetou o rendimento de milho, alfafa, cornichão e feijão. Neste mesmo estudo, a adição de 2,5 a 5,0 % de cinza produziu uma concentração de Se nas forragens ótima para o gado. No estudo de campo com outro solo franco fino com pH 7,2 , a adição de cinza volante proveniente da mesma fonte que a usada em casa de vegetação, porém com pH igual a 4,0 , nas doses de 0; 11,2 ; 22,4 e 112 t ha<sup>-1</sup> não alterou significativamente o rendimento de milho e feijão, no entanto, na dose mais elevada, a acumulação de Se pelas plantas foi, em média, de 0,10 ppm, sendo considerada abaixo do nível ótimo.

Martens et al.( 1970 ) estudaram cinzas volantes provenientes de quinze usinas americanas de energia que queimam carvão, sendo nove cinzas testadas em casa de vegetação numa mistura com 2,1 kg de solo franco argiloso. As taxas de aplicação de oito cinzas foram equivalentes a 4,85 e 14,56 t ha<sup>-1</sup>, e uma cinza equivalente a 10,11 e 30,32 t ha<sup>-1</sup>, sendo que somente esta última cinza teve elevação significativa do pH do solo ( de 5,9 para 6,5 e 7,2 respectivamente com as duas doses de cinza ). Neste estudo, o rendimento de milho foi maior em todos os tratamentos com cinza e com KCl como fonte de potássio, do que a testemunha. No entanto, a deficiência de K do solo para as plantas não pode ser suprida completamente pela adição das doses de cinza. A análise do tecido do milho indicou toxidez de B para a última cinza, sendo este o fator que limitou o rendimento deste tratamento.

Trabalho de Mulford & Martens ( 1971 ), em casa de vegetação com solo argiloso, mostrou que rendimento e dados de absorção de B indicaram aproximadamente igual disponibilidade do elemento para alfafa, tanto das três cinzas volantes como do extrato HCl 1N das cinzas quanto do Bórax. A aplicação de mais altas taxas ( 16,6 e 33,3 t ha<sup>-1</sup> ) da cinza com maior poder de neutralização decresceu o rendimento de alfafa. O decréscimo no rendimento foi atribuído à deficiência de Zn na cultura induzida pelo aumento do pH do solo resultante da aplicação da cinza. A absorção de B pela alfafa foi maior nos tratamentos onde a cinza aumentou o pH do solo do que na testemunha. Neste trabalho ainda, os autores observaram que o efeito da aplicação da cinza no pH do solo correspondeu ao poder de neutralização das amostras de cinza determinado no laboratório.

Trabalhando com o mesmo solo e com duas das cinzas testadas no experimento anterior, Plank & Martens ( 1974 ), em um experimento de campo com aplicação de duas taxas da cinza ácida ( 7,33 e 14,66 t ha<sup>-1</sup> ) observaram que as cinzas aumentaram o rendimento de alfafa, durante o período de três anos do experimento, em decorrência da diminuição da deficiência de B do solo. Os autores concluíram que o B presente nas cinzas volantes estava prontamente disponível para as plantas, decrescendo a disponibilidade ao longo do tempo.

Martens ( 1971 ), trabalhando com duas cinzas alcalinas, observou que as mesmas não supriram as deficiências de P e Zn dos solos para as plantas de milho, mas supriam as necessidades de B para a alfafa. No entanto, a cinza ácida utilizada corrigiu a deficiência de Zn devido ao decréscimo do pH do solo e pelo suprimento de Zn solúvel. A aplicação de 58,3 mg de Zn proveniente da cinza alcalina não corrigiu a deficiência de Zn para o milho, pois o pH do solo resultante da aplicação da cinza ( dose equivalente a 157,2 t ha<sup>-1</sup> ) aumentou de 6,2 para 7,7. A baixa disponibilidade de Zn para as plantas seria esperada neste relativamente alto nível de pH do solo.

Esta mesma cinza aplicada ao solo franco siltoso na dose equivalente a 120,3 t ha<sup>-1</sup> aumentou seu pH de 5,6 para 7,9.

A aplicação de cinza volante ácida que continha 114,5 ppm de Zn à taxa de 2,6 e 5,2 % ao solo franco siltoso, praticamente dobrou o rendimento de matéria seca de milho como resultado do incremento na disponibilidade do elemento às plantas. Este mesmo solo, ao receber doses de cinza volante alcalina à taxas que variavam de 0,8 a 13 %, teve uma redução na disponibilidade do elemento. Esta redução refletiu na menor absorção do mesmo pelas plantas de milho com as doses crescentes das cinzas em decorrência da elevação do pH do solo, o que levou a um menor rendimento da cultura ( Schnappinger et al.,1975 ).

Adriano et al ( 1978 ) aplicaram a um solo franco arenoso ácido, cinza fina ( pH 6,5 ) a uma taxa de 5, 10 e 20 %, e cinza grossa ( pH 6,2 ) à taxa de 10 %, não verificando variação significativa no rendimento de matéria seca de milho e feijão com a aplicação das cinzas. A cinza aumentou a absorção pelas plantas de Ca, Mg e S, no entanto, a toxidez de B e a deficiência de P foram os fatores limitantes no rendimento da matéria seca.

Doran & Martens ( 1972 ), utilizando duas cinzas básicas do leste dos USA em um solo franco siltoso ácido, observaram que o aumento das taxas de aplicação das cinzas aumentava a disponibilidade de Mo para alfafa e aumentava marcadamente o rendimento da cultura devido ao aumento no pH do solo. Níveis de Mo alcançados pela alfafa nas mais altas taxas de aplicação seriam potencialmente tóxicas para o gado.

Furr et al.( 1976 ) determinaram a concentração de quarenta e dois elementos em feijão, repolho, cenoura , painço, cebola, batata e tomate, cultivados em vasos em solo franco arenoso ( pH 5,5 ) misturado com 10 % p p<sup>-1</sup> de cinza volante ácida ( pH 4,5 ), sendo que destes, trinta e dois estavam mais concentrados na cinza do que no solo. A absorção de Se pelas culturas foi proporcional à taxa de aplicação de cinza. O efeito da aplicação de 5 e 10 % de cinza no rendimento das culturas nos dois anos foi variável.

Cinza volante alcalina ( pH 10,8 ) foi aplicada à taxa de 0; 2 e 5 % em três solos italianos ( Histosol – pH 5,0 ; Fluvisol – pH 6,1 e Regosol – pH 7,5 ), não tendo sido observados efeitos negativos da adição dessa cinza no crescimento das plantas de trigo. Tal adição de cinza geralmente decresceu a concentração de metais pesados nas plantas de trigo. A acumulação total dependeu largamente das características do solo. A variação no pH do solo, induzida pelo tratamento com cinza volante, poderia ser considerada o mais importante parâmetro que influenciou a absorção dos metais pesados.

O grande aumento no pH do solo Fluvisol ( de 6,1 para 8,3 ) corrigido com 5 % de cinza reduziu as concentrações e a absorção total de metais ( Cu, Zn, Cr e Ni ) no trigo. Entretanto, a absorção total desses metais pelas plantas de trigo crescidas nos outros solos que receberam a mesma taxa de cinza, foi aumentada em função desses elementos presentes na cinza e da pouca variação no pH ( 0,4 unidades ). A adição de 5% de cinza aumentou significativamente o rendimento de trigo nos três solos, sendo que no Regosol, praticamente dobrou (tanto da raiz quanto da parte aérea). Chumbo e Cd analisados no tecido vegetal tiveram valores abaixo do limite de detecção do aparelho ( Petruzzelli et al.,1987 ).

A adição de cinza canadense volante alcalina ( pH 12,5 ) não intemperizada, a um solo franco argiloso pH 6,8 em concentrações que variavam de 0 a 100% v v<sup>-1</sup>, em casa de vegetação e a campo, mostrou que a emergência das plantas de cevada foi retardada quando taxas > 6,25% de cinza foi adicionada ao solo. Com essas mesmas taxas de aplicação de cinza, os sintomas de toxidez por B foram evidentes, ao mesmo tempo em que esse elemento acumulado na silagem foi acima do considerado normal para as plantas em geral. Foi também concluído pelos autores que não houve redução no rendimento a campo a não ser com adição > 50%. A adição de até 25% de cinza aumentou favoravelmente as concentrações de Se no grão, na palha e na silagem. A adição de taxas crescentes de cinza aumentou as concentrações de Mo, a ponto de alterar a relação Cu / Mo, o que poderia tornar-se uma preocupação para a dieta de ruminantes ( Salé et al., 1996 ).

Três cinzas ( leito fixo, leito fluidizado e leito de arraste ), resultantes de diferentes processos de gaseificação de carvão, tiveram influência distinta no pH dos dois solos estudados e na composição do tecido de azevém - *Lolium multiflorum* Lam.. As cinzas foram aplicadas a taxas correspondentes a 0, 200, 1000 e 1800 t ha<sup>-1</sup>, sendo que na taxa mais elevada de aplicação da cinza do leito fixo o pH dos solos foi elevado de 4,4 ( Ultisol ) e 5,0 ( Typic Fragiudult ) para 7,7. Esta mesma dosagem da cinza de leito de arraste reduziu o pH para 3,3 em ambos os solos, e a cinza de leito fluidizado reduziu do Ultisol e Fragiudult para 4,1 e 4,5 respectivamente. A aplicação das doses mais elevadas da cinza do leito de arraste geralmente aumentou as concentrações de Al, B, Cd, Mo, Ni e Zn no tecido de azevém. Normalmente a adubação e a calagem aplicadas junto com esta cinza aumentou o rendimento de azevém reduzindo a concentração destes elementos no tecido da planta. O principal fator que influenciou a absorção dos elementos traços ( Cd, Ni e Zn ) pelo azevém foi o pH do solo menor do que 4, resultante da oxidação das formas reduzidas do enxofre contido nas cinzas. A concentração desses elementos aumentou exponencialmente nos valores de pH menores que 4,5 ( Francis et al.,1985 ).

Trabalhos têm demonstrado que o uso de cinzas volantes na recuperação dos locais de mineração tem também obtido sucesso, pois, além de elevar o pH destes locais, também aumentam a capacidade de retenção de água dos refugos do carvão, visto que de maneira geral estes refugos possuem baixa capacidade de retenção de água, assim como os solos de textura grosseira ( Stewart & Daniels,1995; Bhumbla et al., 1995 ). A adição de cinza volante alcalina aumenta o pH do refugo ácido do carvão, permitindo assim que plantas se estabeleçam sobre os mesmos.

A adição de cinza ao solo também pode afetar a composição química das plantas. As mudanças na composição química dos solos e das plantas resultam tanto da alteração do pH do solo, quanto da solubilidade dos elementos, bem como do enriquecimento do solo com sais solúveis e elementos traços presentes na cinza.

No estudo de Adriano et al. ( 1982 ), em que a lama de esgoto e a cinza volante foram misturadas e aplicadas juntas para corrigirem o solo, o efeito alcalinizante da cinza volante reduziu significativamente a absorção de cádmio ( proveniente da lama de esgoto ) por plantas de sorgo. Os resultados deste estudo sugerem que o efeito alcalinizante da adição de cinza pode ser utilizado para reduzir a acumulação pelas plantas de elementos potencialmente tóxicos que tenham disponibilidade dependente do pH.

Feijão e capim de Rhodes foram crescidos em experimentos, em casa de vegetação, para examinar o potencial de fitotoxicidade de B de cinzas volantes Australianas ( Aitken & Bell, 1985 ). Em cada experimento, as cinzas usadas eram não lixiviadas, lixiviadas e, ajustadas a pH 6,5 e lixiviadas. O rendimento e níveis de B nas plantas crescidas nas misturas de cinco cinzas volantes ( 5 e 10 % p p<sup>-1</sup> ) com “areia lavada com ácido” foi medido e, com exceção de uma cinza, as diferenças nos rendimentos pelos tipos de cinzas como pelos tratamentos foram atribuídos a diferenças no grau de toxidez de B. Num experimento subsequente, cinza volante foi misturada ( 0, 15, 30, 70 e 100 % p p<sup>-1</sup> ) com solo arenoso, e o rendimento e composição mineral de plantas crescidas nestas misturas foi determinado. A incorporação de grandes quantidades de cinza volante não lixiviada resultou num pobre crescimento das plantas devido principalmente à toxidez do B.

Em ambos experimentos, a lixiviação da cinza reduziu o potencial de toxidez do B, ao passo que o ajuste do pH a 6,5 e subsequente lixiviação da cinza volante resultou em plantas com níveis normais de B. Segundo os autores, existiu uma marcante diferença nos níveis de B no tecido e na extensão dos sintomas de toxidez entre as duas espécies. Capim de Rhodes pareceu ser capaz de tolerar mais altos conteúdos de B no estágio médio de crescimento, absorvendo menos do elemento do que o feijão.

Os resultados indicam que fitotoxidez de B seria o maior problema no estabelecimento de vegetação em lagoas de cinza e na utilização agrônômica de cinzas não intemperizadas na Austrália ( Aitken & Bell, 1985 ).

## 2.6 Usos ambientais atuais das cinzas

O grande desafio da utilização das cinzas de carvão mineral nos solos agrícolas está particularmente associado à salinidade e alcalinidade desses materiais. Por outro lado, a adição de resíduo de esgoto compostado aos solos agrícolas tem como fatores limitantes a tendência acidificante e a concentração de metais pesados do mesmo. A acidificação decorre da liberação de prótons  $H^+$  resultantes da decomposição da matéria orgânica e da mineralização do nitrogênio orgânico.

Quando aplicados juntos, estes materiais tendem a se completarem, já que as cinzas são pobres em matéria orgânica, nitrogênio e fósforo, sendo o resíduo de esgoto normalmente rico nestes materiais. Com a hidrólise dos óxidos de cálcio e magnésio existentes na cinza, bem como do carbonato, haverá um aumento dos íons  $OH^-$  que irá neutralizar os  $H^+$  provenientes do resíduo de esgoto. ( Adriano et al., 1982 ).

As pesquisas que versam sobre a correção da acidez e a revegetação dos locais de mineração mostram que a inclusão de camada de solo ( Taylor & Schuman, 1988; Pichtel et al., 1994; Tedesco et al., 1999 ) e matéria orgânica, tal como resíduo compostado de esgoto ( Sutton & Dick, 1987; Sims et al., 1993; Stehouwer et al., 1995 b ), resíduos vegetais e animais ( Mulhern, et al., 1989; Rensburg et al., 1998; Schumann & Sumner, 1999 ) misturados aos refugos, tendem a produzir resultados superiores nestes propósitos. A razão disso é que a mistura de tais subprodutos é, em si, um corretivo de solo superior a cada um dos componentes sozinhos.

O uso das fontes de matéria orgânica resolve a deficiência de macronutrientes da cinza, enquanto a cinza pode agir como um agente agregante para os resíduos orgânicos, pode reduzir substancialmente seu odor, como contrabalançar os problemas da acidez decorrentes da sua aplicação continuada no solo. No entanto, a solubilidade de elementos traços pode ocorrer com a mistura desses resíduos.

Jackson et al. ( 1999 ), em estudo de campo, misturaram duas cinzas volantes alcalinas ( pH 11,9 e 12,2 ) com resíduos de esgoto ( proporção 2:1 ) e com cama de aviário ( proporção 4:1 ), aplicando as misturas ao solo franco arenoso a taxas correspondentes a 120 e 100 t ha<sup>-1</sup>, respectivamente. Os autores concluíram que a solubilidade inicial dos elementos traços geralmente era muito maior nesses tratamentos do que nos tratamentos cinza / resíduo de esgoto. As concentrações na solução do solo de C, P, As, Se, Mo, Cu e Cr foram aumentadas nas parcelas que receberam a mistura cinza / cama de aviário.

Schumann & Sumner ( 1999 ), em estudo de casa de vegetação, usando vinte e quatro diferentes cinzas volantes que eram aplicadas misturadas com resíduo de esgoto e cama de aviário na mesma proporção do trabalho anterior, concluíram que a contribuição das cinzas volantes para a nutrição do milho foi mínima, principalmente em decorrência da deficiência de P e K. Foi observada ainda uma deficiência de P e Mg pela aplicação das cinzas ( a taxa de aplicação da cinza era correspondente a 80 t ha<sup>-1</sup> ) devido à precipitação do P e ao excesso do Ca<sup>+2</sup>. Segundo os autores, 50 % das cinzas utilizadas produziram toxidez visível por B nas plantas de milho. Dos resíduos orgânicos, apenas cama de aviário proporcionou um rendimento de milho igual ao tratamento com adubação.

A cinza do carvão também pode ser usada para estabilizar solos de propriedade de confinamento de gado de corte ou também leitarias. Estudos de lixiviação conduzidos por Elrashidi et al. ( 1999 ) com cinza volante resultante da dessulfuração ( cinza FBC pH 10,5 ) mostrou que a aplicação da mesma junto com cama de leitaria decrescia a concentração de P, N, K, Ca, Al, Si, Fe, Mn, Cu, Zn, Pb, Cd, Co, Cr, Ni, As e Se no lixiviado, sendo esse decréscimo variável de 5,6 a 100 %. Por outro lado, esta mistura aumentou em 235, 47,3 e 36,5 % a concentração de B, S e Mg no lixiviado, respectivamente.

Duas cinzas resultantes da dessulfuração dos gases da combustão do carvão, uma em leito fluidizado atmosférico ( cinza AFBC pH 12,5 ) e outra em leito fluidizado pressurizado ( cinza PFBC pH 10,5 ), juntamente com resíduo de esgoto, foram aplicadas em três rejeitos ácidos de mineração em experimento em casa de vegetação. As taxas de aplicação da cinza variaram de 0 a 240 g kg<sup>-1</sup> e a do resíduo foi de 60 g kg<sup>-1</sup>. Taxas de aplicações crescentes de ambas as cinzas até 120 g kg<sup>-1</sup> aumentaram o rendimento de festuca, mas na taxa maior ( 240 g kg<sup>-1</sup> ) houve elevação no pH e cimentação, diminuindo o rendimento e o volume de raízes. Normalmente, a combinação das cinzas com o resíduo de esgoto melhorou o crescimento da festuca. Com o aumento das taxas de cinza houve elevação da concentração no tecido da festuca de Ca, Mg, S e principalmente B, sendo que houve diminuição na maioria dos elementos traço ( Stehouwer et al., 1995a ).

As cinzas volantes PFBC foram efetivas como corretivo para resíduos ácidos de minas e resíduos sódicos. Em comparação com o  $\text{CaCO}_3$ , as cinzas volantes reagiram com os resíduos ácidos mais lentamente e o pH final do material tratado ficou levemente inferior (  $\sim 7$  contra  $\sim 8$  ). Além disso, a condutividade elétrica dos resíduos tratados com cinzas volantes ficou  $\sim 1 \text{ mS cm}^{-1}$  mais alto do que o associado com os materiais tratados com o carbonato de cálcio. O estudo em casa de vegetação demonstrou que a correção de resíduos com cinza volante resultou numa produtividade da planta - *Alopecurus pratensis* L. maior do que para os resíduos tratados com carbonato de cálcio. Estes resultados possivelmente devem-se a efeitos nutricionais e de pH, embora a melhora na penetração da raiz foi também sem dúvida um fator importante. A aplicação das cinzas volantes em solos sódicos resultou numa melhora da condutividade hidráulica dos materiais tratados. As cinzas PFBC mostraram-se adequadas como corretivos do solo para solos ácidos e sódicos e para materiais residuais ( Brown et al.,1997 ).

Num experimento de campo conduzido sobre um depósito de resíduos carboníferos em Butiá-RS, Tedesco et al.( 1999 ) concluíram que o baixo pH do material parecia ser o principal problema para estabelecimento e crescimento de plantas no local. Eles observaram que, quando havia uma camada de cinza entre a camada de solo e o resíduo do carvão, as plantas demonstraram um melhor crescimento. A adição de uma camada de 10 cm de solo, em cima de 20 cm de cinza, pareceu ser adequada para o crescimento das plantas, no entanto, o crescimento foi inibido quando a cinza foi misturada com o solo, provavelmente devido ao baixo pH da mistura (  $\sim 2,6$  ).

Taylor & Schuman ( 1988 ) estudaram os efeitos relativos de calcário, cinza volante e camada de solo como corretivo para um rejeito ácido de mina ( pH 2,7 ). Duas safras de cevada foram cultivadas para avaliar os efeitos dos tratamentos na biomassa das plantas ( raiz e parte aérea ). Todos os níveis de calcário e cinza volante aumentaram significativamente o pH do rejeito e a biomassa das plantas ( tanto da raiz quanto da parte aérea ). A colocação da camada de solo sobre o rejeito também aumentou, de maneira geral, a biomassa das plantas. O crescimento da raiz no rejeito não tratado foi limitado apenas à profundidade da camada de solo adicionada. Entretanto, quando o rejeito foi corrigido, tanto com a cinza quanto com o calcário, o crescimento da raiz penetrou além da camada de solo adicionada. A cinza volante e o calcário não causaram toxidez às plantas, exceto por B. Segundo os autores, embora os sintomas visuais de toxidez por B e os níveis elevados do elemento nas plantas fossem evidentes, não houve nenhuma redução na biomassa das mesmas.

Stewart et al.(1997), em estudo de coluna de lixiviação, concluíram que a aplicação de cinza volante alcalina ( 20 e 33 % p p<sup>-1</sup> ) em rejeitos de minas de carvão manteve os valores de pH do lixiviado perto de 8,0 , tendo os lixiviados níveis muito baixos de metais, parecendo ser esta uma opção eficiente para a deposição, tanto de cinza alcalina como de rejeitos de minas, e também , podendo com o tempo, a deposição conjunta minimizar a drenagem ácida das minas.

Por essa razão, a cinza volante tem sido usada com sucesso na recuperação dos solos de depósitos abandonados de rejeitos de minas de carvão, devido à melhora nas propriedades físicas e químicas destes locais. Entretanto, o tamanho fino das partículas da cinza volante pode tornar esses locais mais suscetíveis a deslizamentos, transporte e outros processos erosivos, diferentemente do que ocorre nos solos naturais.

O alto conteúdo de partículas tamanho silte da cinza volante pode tornar os locais que recebem estas cinzas mais suscetíveis à formação de crosta superficial, resultando numa redução da infiltração de água, aumentando o escoamento superficial e causando também mais erosão ( Gorman et al., 2000 ). Esses autores observaram, num experimento em dois locais de refugio de minas com diferentes declividades ( 10 e 20 % ), que os valores de erosão foram cinco vezes maiores no solo de minas tratado com cinza volante, do que no local não tratado. A cobertura do solo com maravalha reduziu pela metade a perda por erosão causada pela cinza, assim como o aumento da cobertura vegetal resultou também numa redução da mesma. Neste experimento, juntamente com a cinza volante, foi aplicada serragem numa mistura 4:1 ( cinza-serragem ), sendo aplicada numa dosagem equivalente a 1000 t ha<sup>-1</sup> de mistura. A serragem foi incorporada como uma fonte de matéria orgânica para melhorar as propriedades físicas do local, as quais estão relacionadas à erodibilidade, ou seja, taxa de infiltração de água e estabilidade dos agregados.

Acumulação de elementos traços por plantas crescidas em locais que receberam cinzas é uma constante preocupação devido à contaminação da cadeia alimentar. Assim, trabalhos foram desenvolvidos, como o de Furr et al.(1975), que analisaram trinta e cinco elementos em cinza volante, no tecido de trevo amarelo - *Melilotus officinalis* Lam. crescido em lagoa de sedimentação de cinza que tinha um pH igual a 4,5 , e no tecido de cobaias que eram alimentadas por 90 dias com uma dieta que continha 45 % de trevo crescido neste local. Vários elementos, incluindo Se e Rb, mostraram ser mais elevados nos tecidos do trevo crescido na cinza e nas cobaias alimentadas com o trevo do que nas testemunhas.

Desde 1976, o Serviço de Pesquisa Agrícola ( ARS ) do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos ( USDA ), com o apoio do Departamento de Energia deste país ( USDE ), está envolvido no desenvolvimento da utilização agrícola dos subprodutos da combustão do carvão de leito fluidizado. No entanto, apenas em 1988 foi publicado pelo USDA / ARS um manual para aplicação em solos agrícolas dos resíduos de combustão de leito fluidizado ( Stout et al., 1997 ). Isto mostra que as pesquisas são recentes e há necessidade de estudar o comportamento destas cinzas nos solos do RS.

O uso benéfico das cinzas, certamente, trará uma economia para as unidades geradoras das mesmas, como mostra um trabalho desenvolvido pela Ahlstorm Development Ash Corporation Watertown, em Nova York. Esta companhia tinha um custo de descarte de cinza de 55,65 dólares por tonelada em 1990, reduzindo-o para 18,47 dólares a tonelada em 1995. No ano de 1993, ela espalhou em torno de 13.400 t de cinzas, e no ano seguinte ( 1994 ), a quantia cresceu para 28.320 t, o que representou acima de 71 % do total produzido pela mesma. Os fazendeiros que utilizavam esta cinza tiveram uma economia de 300 mil dólares na compra de corretivos da acidez do solo nos primeiros dois anos que começaram a utilizá-la, tendo também um aumento da produtividade de suas fazendas ( Stout et al., 1997).

No Brasil, os gastos que a Usina Termelétrica Presidente Médici ( UTPM ) teve nos últimos três anos com a retirada das cinzas geradas em sua planta de força, bem como a quantidade de cinza volante consumida pelas indústrias cimenteiras, localizadas na região de Candiota, estão sumarizados na tabela 1.

Tabela 1 - Quantidades de cinza de carvão mineral geradas, retiradas e reaproveitadas pela UTPM e custo de transporte.

| Ano     | Cinzas                          |           |                | Custo                       | Reaproveitamento |
|---------|---------------------------------|-----------|----------------|-----------------------------|------------------|
|         | Geradas                         | Retiradas | Reaproveitadas |                             |                  |
|         | ----- t mês <sup>-1</sup> ----- |           |                | -- R\$ mês <sup>-1</sup> -- | ----- % -----    |
| 1998    | 651.847                         | 519.716   | 132.131        | 723.918,16                  | 20,27            |
| 1999    | 1.106.285                       | 787.307   | 318.978        | 1.350.294,20                | 28,83            |
| 2000/1  | 761.184                         | 384.943   | 376.241        | 1.003.548,90                | 29,43            |
| 2000/2* | 959.521                         | 644.410   | 315.111        | 1.475.700,50                | 32,84            |
| Média   | 1.159.612                       | 778.792   | 380.820        | 1.157.820,59                | 29,76            |

\*Os dados do 2º semestre de 2000 são uma projeção. Fonte CGTEE - Comunicação pessoal

Analisando a tabela 1, depreende-se que a quantidade de cinza reaproveitável está crescendo, no entanto, ainda é pequena ( 30% ) em relação ao total produzido . A média do custo de descarte, nesses três últimos anos, foi de 2,00 reais por tonelada, o que, comparado com o custo por tonelada da planta de Nova York, é bem inferior. No entanto, é importante ressaltar que a quantidade de cinza produzida na UTPM por tonelada de carvão queimado é bem maior do que a produzida nas plantas de força americanas, pois o carvão aqui utilizado possui um teor de cinzas muito alto ( ~ 50 % ) comparado aos teores de cinzas de 23 plantas americanas que variaram de 4 - 26 % ( Furr et al.,1977 ). Então por kWh de energia produzidos, os custos com a retirada da cinza provavelmente tendem a se equivalerem.

As poucas pesquisas visando ao aproveitamento dessa cinza, afora as das indústrias cimenteiras, provavelmente devem-se a esse baixo custo de descarte por tonelada. É importante salientar que esse custo refere-se, apenas, ao transporte da unidade geradora até a cava da mineração, não estando computados os gastos da mineradora, o que certamente é embutido no preço da tonelada do carvão.

Para a utilização de cinzas nos solos do RS, deve-se observar, além dos prováveis benefícios que possam trazer para a agricultura, também a possibilidade da contaminação por metais pesados dos vegetais crescidos nestes solos. Sabe-se que estas cinzas possuem teores variados de metais pesados ( Morsch, 1991 ), podendo os mesmos ser acumulados na planta.

Deve-se estudar as características químicas das cinzas, assim como os níveis que podemos aplicar das mesmas aos solos, de maneira que não venham a prejudicar o crescimento das plantas, nem a saúde daqueles que consumirão tais plantas. A quantidade de cinza resultante da dessulfuração que pode ser aplicada nestes locais será limitada provavelmente mais pela quantidade de sais solúveis e pelo alto pH desta cinza do que pela presença de elementos traços ( Stehouwer et al., 1995b ).

Trabalho em casa de vegetação com seis espécies vegetal, mostrou que cinzas ricas em sulfato de cálcio, quando acrescentadas em grande quantidade ao solo ( 50 a 75% ), diminuem o rendimento de matéria seca destas espécies ( Clark et al., 1995 ). Os autores acreditam que isto provavelmente ocorreu devido ao fato destas cinzas conterem níveis elevados de elementos tóxicos. Portanto, estudos detalhados em solos e plantas devem ser conduzidos para que se possa, com segurança, recomendar o uso de cinzas resultantes da queima de carvão para serem aplicadas na agricultura.

### 3. MATERIAL E MÉTODOS

Os experimentos foram conduzidos em casa de vegetação na EMBRAPA – CPACT – Estação de Terras Baixas / Pelotas, nos anos de 1997 a 1999, e em laboratório na UFPEL – Pelotas.

#### 3.1 Solos utilizados

Nos experimentos em casa de vegetação foram usadas amostras do horizonte superficial a uma profundidade de até 20 cm de um solo Podzólico Vermelho Amarelo, material de origem arenito, coletado no município de Candiota ( RS ), que apresentava característica de topografia, de localização e de morfologia de perfil semelhante à descrita para a unidade de mapeamento Alto das Canas ( Brasil, 1973 ), cuja caracterização encontra-se na tabela 2. Este solo é classificado atualmente como um Argissolo Vermelho Distrófico latossólico ( Embrapa, 1999 ).

Tabela 2 - Caracterização do solo Alto das Canas e Malha IV

| Características                                  | Solo           |          |
|--|----------------|----------|
|  | Alto das Canas | Malha IV |
| Argila (%)                                       | 24             | 32       |
| pH em água                                       | 4,9            | 4,2      |
| Índice SMP                                       | 5,3            | 5,0      |
| Matéria Orgânica (%)                             | 2,67           | 3,41     |
| P disponível (mg L <sup>-1</sup> )               | 0,8            | 4,2      |
| K disponível (mg L <sup>-1</sup> )               | 49             | 99       |
| Na disponível (mg L <sup>-1</sup> )              | 11             | 12       |
| Al trocável (cmol <sub>c</sub> L <sup>-1</sup> ) | 1,3            | 2,8      |
| Ca trocável (cmol <sub>c</sub> L <sup>-1</sup> ) | 2,0            | 2,5      |
| Mg trocável (cmol <sub>c</sub> L <sup>-1</sup> ) | 0,9            | 1,0      |
| Cu extraível (mg L <sup>-1</sup> )               | 0,4            | 1,6      |
| Zn extraível (mg L <sup>-1</sup> )               | 0,1            | 1,6      |
| Fe amorfo (%)                                    | 0,11           | 0,24     |
| Mn trocável (mg L <sup>-1</sup> )                | 22             | 11       |

Nos experimentos em laboratório, além do solo Alto das Canas, foram utilizadas, também, amostras de “solo” recuperado / regenerado oriundo de área impactada por mineração de carvão pela Companhia Riograndense de Mineração ( CRM ) em Candiota ( RS ), dentro da malha IV e regenerado com sete anos de recuperação, coletado a uma profundidade de até 20 cm, cuja localização é descrita por Gonçalves ( 1999 ) e que será denominado, neste trabalho, solo malha IV, caracterizado conforme tabela 2.

Subamostras destes solos foram peneiradas em peneira de 2 mm de abertura de malha para caracterização física e química ( Tabela 2 ) e para serem usadas nos experimentos de laboratório.

### **3.2 Cinzas utilizadas**

#### **3.2.1 Cinza UTPM 1**

Esta cinza foi coletada no ano de 1997, na Usina Termelétrica Presidente Médici ( UTPM ) de Candiota, sendo classificada de volante intemperizada, caracterizada conforme tabela 3. A mesma será aqui denominada cinza UTPM 1, sendo coletada úmida do local de carregamento dos caminhões que as levam para a cava da mina. Para ser utilizada no experimento, essa cinza foi seca ao ar e passada em peneira de 2 mm de abertura de malha.

#### **3.2.2 Cinza UTPM 2**

Foi usado também a cinza aqui denominada UTPM 2, coletada seca, no ano de 1999, dos precipitadores eletrostáticos da fase B da Usina Termelétrica Presidente Médici.

Foram usadas ainda cinzas resultantes do processo de dessulfuração dos gases da combustão do carvão com a adição de calcário, coletadas do equipamento de bancada de gaseificação de carvão da Universidade da Região da Campanha ( URCAMP ) – Bagé, RS e da Unidade Piloto de Desenvolvimento – Processo CICOM, da Fundação de Ciência e Tecnologia ( CIENTEC ) – Cachoeirinha, RS.

#### **3.2.3 Cinza URCAMP**

Na produção da cinza URCAMP, o carvão foi moído, sendo utilizada a fração passante em peneira de 1,00 mm, e retido em peneira de 0,3 mm. Junto ao carvão foi adicionado calcário na proporção de 10 %. O calcário utilizado foi o UNICAL passante em peneira de 0,59 mm, e retido na peneira de 0,25 mm.

### 3.2.4 Cinza CIENTEC

Na cinza CIENTEC a adição do calcário ao carvão foi na razão molar Ca / S de 2,5 , sendo utilizado o calcário Pinheiro Machado II, cuja caracterização encontra-se na Tabela 6, e a análise granulométrica, na Tabela 7. O carvão utilizado na produção das cinzas foi o Candiota CE 3300, cujas características encontram-se nas Tabelas 4 e 5.

As cinzas UTPM 2, URCAMP e CIENTEC foram peneiradas em peneiras de 2 mm de abertura de malha, sendo classificadas como volantes, não intemperizadas, e suas características encontram-se na Tabela 3.

Tabela 3 - Caracterização das cinzas UTPM 1, UTPM 2, URCAMP e CIENTEC

| Características            | UTPM 1 | UTPM 2 | URCAMP | CIENTEC |
|----------------------------|--------|--------|--------|---------|
| pH em água                 | 4,3    | 11,0   | 12,5   | 12,6    |
| N ( % )                    | nd     | < 0,01 | nd     | 0,03    |
| P ( % )                    | nd     | 0,01   | nd     | 0,03    |
| K ( % )                    | nd     | 0,64   | nd     | 0,98    |
| Ca ( % )                   | nd     | 0,38   | nd     | 4,2     |
| Mg ( % )                   | nd     | 0,03   | nd     | 1,2     |
| Na ( % )                   | nd     | 0,11   | nd     | 0,22    |
| Fe ( % )                   | nd     | 3,7    | nd     | 2,8     |
| Al ( % )                   | nd     | 11,3   | nd     | 9,0     |
| Si ( % )                   | nd     | 27     | nd     | 29      |
| Ti ( % )                   | nd     | 0,50   | nd     | 0,34    |
| B ( mg kg <sup>-1</sup> )  | nd     | 24     | nd     | 20      |
| Cu ( mg kg <sup>-1</sup> ) | nd     | 20     | nd     | 28      |
| Zn ( mg kg <sup>-1</sup> ) | nd     | 70     | nd     | 70      |
| Mn ( mg kg <sup>-1</sup> ) | nd     | 368    | nd     | 218     |
| Mo ( mg kg <sup>-1</sup> ) | nd     | < 30   | nd     | < 30    |
| Pb ( mg kg <sup>-1</sup> ) | nd     | < 10   | nd     | 14      |
| Ni ( mg kg <sup>-1</sup> ) | nd     | 62     | nd     | 44      |
| Cd ( mg kg <sup>-1</sup> ) | nd     | < 3    | nd     | < 3     |
| Cr ( mg kg <sup>-1</sup> ) | nd     | 48     | nd     | 1753    |
| C ( % )                    | 0,26   | 0,42   | 5,01   | 3,59    |
| S ( % )                    | 0,006  | 0,006  | 0,37   | 0,86    |
| Cinzas ( % )               | 99,73  | 99,57  | 94,63  | 95,55   |

nd = Parâmetro não determinado

As análises do carvão e do calcário foram realizadas pela CIENTEC, conforme normas da ABNT, e as análises nas cinzas de C, S e cinzas, segundo as normas ISO 334 e 157 para S e 1171 para cinzas, sendo essas análises realizadas pelo Laboratório de Geoquímica Ambiental da UFRGS ( LAGEAMB ). Os demais elementos foram determinados nas cinzas por digestão com HNO<sub>3</sub> e HF, em microondas, pelo método EPA 3052 ( USEPA, 2000 ), sendo as análises efetuadas pelo laboratório de análises de solos e outros materiais do Departamento de Solos da UFRGS.

Tabela 4 - Caracterização do carvão Candiota CE 3300

| Característica  |       |
|---|-------|
| Umidade total (%)   | 17,80 |
| Umidade superficial (%)                                   | 12,66 |
| Umidade higroscópica (%)                                  | 2,20  |
| Matérias voláteis – b.s. (%)                              | 18,7  |
| Carbono fixo – b.s. (%)                                   | 25,1  |
| Cinzas – b.s. (%)   | 56,2  |
| Carbono – b.s. (%)  | 31,56 |
| Hidrogênio – b.s. (%)                                     | 2,13  |
| Nitrogênio – b.s. (%)                                     | 0,68  |
| Enxofre total – b.s. (%)                                  | 1,13  |
| Oxigênio – b.s. (%)*                                      | 8,30  |
| Poder calorífico superior – b.s. (kcal kg <sup>-1</sup> ) | 2945  |
| Poder calorífico inferior – b.s. (kcal kg <sup>-1</sup> ) | 2835  |

\*deduzido por diferença

Tabela 5 - Análise granulométrica do carvão Candiota CE 3300

| Malha (mm)    | % Peso (retido) | Malha ABNT | % Ret. Acumulado |
|---------------|-----------------|------------|------------------|
| + 4,0         | 1,06            | 5          | 1,06             |
| 4,0 x 2,0     | 7,31            | 5 x 10     | 8,37             |
| 2,0 x 0,59    | 39,19           | 10 x 28    | 47,56            |
| 0,59 x 0,50   | 7,73            | 28 x 35    | 55,29            |
| 0,50 x 0,25   | 17,06           | 35 x 60    | 72,35            |
| 0,25 x 0,149  | 9,11            | 60 x 100   | 81,46            |
| 0,149 x 0,074 | 7,31            | 100 x 200  | 88,77            |
| -0,074        | 11,23           | fundo      | 100,00           |
| TOTAL         | 100,00          |            |                  |

Tabela 6 - Caracterização do calcário Pinheiro Machado II

| Característica                                       |       |
|--|-------|
| Umidade total (%)                                    | 0,18  |
| CO <sub>2</sub> (%)                                  | 45,51 |
| P. F. a 1000 ° C (%)                                 | 46,60 |
| Resíduo insolúvel (%)                                | 4,78  |
| CaO total (%)  | 30,40 |
| MgO total (%)  | 20,08 |
| R <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)                    | 0,54  |
| SiO <sub>2</sub> (%)                                 | 3,19  |
| Massa específica dos grãos – ps (kg m <sup>3</sup> ) | 2890  |

Tabela 7 - Análise granulométrica do calcário Pinheiro Machado II

| Peneira  | Abertura | % ret<br>(acumulado) | % ret.<br>(diferença) | Diâm. médio<br>(mm) |
|----------|----------|----------------------|-----------------------|---------------------|
| 10       | 2,00     | 0                    | 0                     | 0                   |
| 16       | 1,19     | 1                    | 1                     | 0,0119              |
| 30       | 0,595    | 10                   | 9                     | 0,0535              |
| 40       | 0,420    | 18                   | 8                     | 0,0336              |
| 50       | 0,297    | 28                   | 10                    | 0,0297              |
| 100      | 0,149    | 51                   | 23                    | 0,0343              |
| 200      | 0,074    | 65                   | 14                    | 0,0103              |
| 270      | 0,053    | 75                   | 10                    | 0,0053              |
| 325      | 0,044    | 83                   | 8                     | 0,0035              |
| 400      | 0,037    | 88                   | 5                     | 0,0019              |
| <400     |          | 100                  | 12                    |                     |
| Dp médio |          |                      |                       | 0,18                |

### 3.3 Experimento em casa de vegetação com cinza UTPM 1

Ao solo Alto das Canas foram incorporados cinco níveis de cinza UTPM 1 nas doses de 0, 25, 50, 75 e 100 % do volume do vaso, equivalente a 0, 750, 1500, 2250 e 3000 gramas de cinza por vaso de 4 litros de capacidade. Os tratamentos constaram das doses de cinza, com e sem adubação básica de N, P e K na dose de 100 mg L<sup>-1</sup> para cada elemento, tendo como fonte uréia, superfosfato triplo e cloreto de potássio, respectivamente.

Após a aplicação dos adubos e da cinza, as misturas foram colocadas nos vasos e mantidas durante o decorrer do experimento com umidade correspondente a 80 % da capacidade de campo previamente determinada para cada tratamento. Nos vasos foram semeadas dez sementes de feijão - *Phaseolus vulgaris* L., cultivar Guapo Brilhante, sendo desbastados doze dias após a semeadura e ficando quatro plantas por vaso. Os vasos foram distribuídos conforme um delineamento completamente casualizado, sendo utilizadas três repetições por tratamento.

Trinta e dois dias após a semeadura, a parte aérea das plantas foi colhida, seca em estufa a 65°C até atingir peso constante, determinando-se a produção de matéria seca. Este material foi então triturado e submetido à digestão por H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> e H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> para a determinação de nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio e magnésio ( Tedesco et al., 1995 ).

No solo, foram determinados, em amostras coletadas após a colheita das plantas em todos os tratamentos que não receberam adubação, os valores de pH em água ( 1:1 ), pH SMP e pH KCl ( 1:1 ), de fósforo extraível, de cobre e zinco disponíveis, de potássio, sódio, manganês, cálcio, magnésio e alumínio trocáveis e de ferro amorfo ( Tedesco et al., 1995 ).

Dos valores de produção de matéria seca da parte aérea do feijão, efetuaram-se as análises de variância e de regressão polinomial. Dos conteúdos de nutrientes nas plantas e dos demais elementos extraídos do solo pelos extratores, efetuaram-se a análise de variância, e as médias foram comparadas pelo teste de Duncan ao nível de 5 % de probabilidade ( Zonta et al.,1982 ).

### **3.4 Experimento em laboratório**

#### **3.4.1 Cinza UTPM 2 – Solo Alto das Canas**

O experimento ( A ) foi conduzido em laboratório, usando-se o solo Alto das Canas, no qual foram incorporados cinco níveis de cinzas UTPM 2, nas doses equivalentes a 0, 5, 10, 20 e 30 t ha<sup>-1</sup>, em vasos de 0,5 litro de capacidade que continham 400 gramas de solo ( base seca ). Nestes mesmos vasos foram incorporados ainda cinco níveis de calcário ( CaCO<sub>3</sub> p.a. PRNT de 100 % ), nas doses equivalentes a 0, 2, 4, 6, e 8 t ha<sup>-1</sup>.

Após a mistura nos vasos das doses correspondentes de cinza e calcário, os mesmos foram incubados durante noventa dias, com umidade correspondente a 80 % da capacidade de campo através da adição de água deionizada, sendo mantidos fechados com polietileno para não perderem umidade, tendo, no entanto, aberturas suficientes para permitir as trocas gasosas.

Em subamostras de cada vaso, foi determinado o pH em água ( 1:1 ) v / v aos 21, 42, 63 e 90 dias de incubação. Na cinza foi também determinado o pH em água ( 1:1 ) e o valor de neutralização. Estas determinações foram efetuadas segundo a técnica descrita por Tedesco et al., 1995.

O experimento constituiu-se de um fatorial  $5 \times 5$  ( 5 níveis de cinza x 5 níveis de calcário ), em delineamento inteiramente ao acaso, com duas repetições. Os dados foram submetidos à análise de variância e de regressão polinomial.

### **3.4.2 Cinza URCAMP – Solo Alto das Canas**

Neste experimento ( B ), ao solo Alto das Canas foram incorporados cinco níveis de cinzas URCAMP, nas doses equivalentes a 0, 5, 10, 20 e 30 t ha<sup>-1</sup>, em vasos de 0,5 litro de capacidade que continham 400 gramas de solo ( base seca ). Nestes mesmos vasos foram incorporados ainda cinco níveis de calcário ( CaCO<sub>3</sub> p.a. PRNT de 100 % ) nas doses equivalentes a 0, 2, 4, 6, e 8 t ha<sup>-1</sup>. Os demais procedimentos foram semelhantes aos descritos no item 3.4.1.

O experimento constituiu-se de um fatorial  $5 \times 5$  ( 5 níveis de cinza x 5 níveis de calcário ), em delineamento inteiramente ao acaso, com duas repetições. Os dados foram submetidos à análise de variância e de regressão polinomial.

### **3.4.3 Cinza CIENTEC – Solo Alto das Canas**

Ao solo Alto das Canas foram incorporados neste experimento ( C ), quatro níveis de cinza CIENTEC nas doses equivalentes a 0, 40, 80 e 150 t ha<sup>-1</sup>, e no outro experimento ( D ) cinco níveis de cinza nas doses equivalentes a 0, 5, 10, 15 e 20 t ha<sup>-1</sup>, em vasos de 0,25 litro de capacidade que continham 200 gramas de solo ( base seca ). Nestes mesmos vasos foram incorporados ainda, no experimento C, quatro níveis de calcário ( CaCO<sub>3</sub> p.a. PRNT de 100 % ) nas doses equivalentes a 0, 2, 3, e 4 t ha<sup>-1</sup>, e no experimento D, cinco níveis equivalentes a 0, 1, 2, 3 e 4 t ha<sup>-1</sup>.

Após as misturas nos vasos das doses correspondentes de cinza e calcário, os mesmos foram incubados durante cento e doze dias no experimento C e sessenta e três dias no experimento D, com umidade correspondente a 80 % da capacidade de campo através da adição de água deionizada, sendo mantidos fechados com polietileno para não perderem umidade, tendo, no entanto, aberturas suficientes para permitir as trocas gasosas.

Em subamostras de cada vaso, foi determinado o pH em H<sub>2</sub>O e em CaCl<sub>2</sub> 0,01 M ( 1:1 ) v v<sup>-1</sup>, aos 21, 42, 70 e 112 dias de incubação no experimento C, e aos 21, 42 e 63 dias de incubação no experimento D. Na cinza foi também determinado o pH em H<sub>2</sub>O ( 1:1 ) e o valor de neutralização. Essas determinações foram efetuadas segundo a técnica descrita por Tedesco et al., 1995.

Os experimentos constituíram-se de um fatorial 4 x 4 ( 4 níveis de cinza x 4 níveis de calcário ) no experimento C e 5 x 5 ( 5 níveis de cinza x 5 níveis de calcário ) no experimento D. Os experimentos foram realizados em delineamento inteiramente ao acaso, com duas repetições. Os dados foram submetidos à análise de variância e de regressão polinomial.

#### **3.4.4 Cinza CIENTEC – Solo malha IV**

Ao solo malha IV foram incorporados quatro níveis de cinza CIENTEC ( experimento E ) nas doses equivalentes a 0, 80, 150 e 300 t ha<sup>-1</sup>, em vasos de 0,25 litro de capacidade que continham 200 gramas de solo ( base seca ). Nesses vasos também foram incorporados quatro níveis de calcário ( CaCO<sub>3</sub> p.a. PRNT de 100 % ) nas doses equivalentes a 0, 5, 10 e 13 t ha<sup>-1</sup>.

Após as misturas nos vasos das doses correspondentes de cinza e calcário, os mesmos foram incubados durante cento e doze dias com umidade correspondente a 80 % da capacidade de campo através da adição de água deionizada, sendo mantidos fechados com polietileno para não perderem umidade, tendo, no entanto, aberturas suficientes para permitir as trocas gasosas. Em subamostras de cada vaso, foi determinado o pH em H<sub>2</sub>O e em CaCl<sub>2</sub> 0,01 M ( 1:1 ) v v<sup>-1</sup>, aos 21, 42, 70 e 112 dias de incubação. Essas determinações foram efetuadas segundo a técnica descrita por Tedesco et al., 1995.

O experimento constituiu-se de um fatorial 4 x 4 ( 4 níveis de cinza x 4 níveis de calcário ), em delineamento inteiramente ao acaso, com duas repetições. Os dados foram submetidos à análise de variância e de regressão polinomial.

### 3.4.5 Cinza UTPM 2 – Solo malha IV

Ao solo malha IV foram incorporados quatro níveis de cinza UTPM 2 ( experimento F ) nas doses equivalentes a 0, 80, 150 e 300 t ha<sup>-1</sup>, em vasos de 0,25 litro de capacidade que continham 200 gramas de solo ( base seca ). Nesses vasos também foram incorporados quatro níveis de calcário ( CaCO<sub>3</sub> p.a. PRNT de 100 % ) nas doses equivalentes a 0, 5, 10 e 13 t ha<sup>-1</sup>. Os demais procedimentos foram semelhantes aos descritos no item 3.4.4.

O experimento constituiu-se de um fatorial 4 x 4 ( 4 níveis de cinza x 4 níveis de calcário ), em delineamento inteiramente ao acaso, com duas repetições. Os dados foram submetidos à análise de variância e de regressão polinomial.

Os tipos de solo e cinza, os níveis de cinza e calcário utilizados e os dias de leituras do pH em cada experimento conduzido em laboratório, estão sumarizados na tabela 8.

Tabela 8 - Esquema dos experimentos conduzido em laboratório com cinza UTPM 2, URCAMP e CIENTEC.

| Exp. | Solo           | Cinza   | Níveis t ha <sup>-1</sup> |    |     |     |          |   |   |    | Dias incubação |   |    |    |    |     |
|------|----------------|---------|---------------------------|----|-----|-----|----------|---|---|----|----------------|---|----|----|----|-----|
|      |                |         | Cinza                     |    |     |     | Calcário |   |   |    |                |   |    |    |    |     |
| A    | Alto das Canas | UTPM 2  | 0                         | 5  | 10  | 20  | 30       | 0 | 2 | 4  | 6              | 8 | 21 | 42 | 63 | 90  |
| B    | Alto das Canas | URCAMP  | 0                         | 5  | 10  | 20  | 30       | 0 | 2 | 4  | 6              | 8 | 21 | 42 | 63 | 90  |
| C    | Alto das Canas | CIENTEC | 0                         | 40 | 80  | 150 |          | 0 | 2 | 3  | 4              |   | 21 | 42 | 70 | 112 |
| D    | Alto das Canas | CIENTEC | 0                         | 5  | 10  | 15  | 20       | 0 | 1 | 2  | 3              | 4 | 21 | 42 | 63 |     |
| E    | Malha IV       | CIENTEC | 0                         | 80 | 150 | 300 |          | 0 | 5 | 10 | 13             |   | 21 | 42 | 70 | 112 |
| F    | Malha IV       | UTPM 2  | 0                         | 80 | 150 | 300 |          | 0 | 5 | 10 | 13             |   | 21 | 42 | 70 | 112 |

### 3.5 Experimento em casa de vegetação com cinza CIENTEC

Neste experimento foi usado o solo Alto das Canas após ter sido homogeneizado, seco ao ar e peneirado em peneira de 5 mm de abertura de malha. Ao mesmo foram incorporados quatro níveis de cinza CIENTEC nas doses equivalentes à 0, 20, 40 e 80 t ha<sup>-1</sup>, em vasos de 4 litros de capacidade que continham 4 kg de solo ( base seca ).

Os tratamentos constaram das doses de cinza CIENTEC com e sem adubação básica N, P e K e com e sem calcário. A adubação constou da dose de  $100 \text{ mg L}^{-1}$  para cada elemento, tendo como fonte uréia para N, superfosfato triplo para P e cloreto de potássio para K. A calagem na dose equivalente a  $3 \text{ t ha}^{-1}$  foi feita utilizando-se uma mistura 3:1 Ca / Mg , tendo como fonte  $\text{CaCO}_3$  e  $\text{MgCO}_3$  p.a.. Após a aplicação desses tratamentos, as misturas foram colocadas nos vasos e mantidas durante o decorrer do experimento com umidade correspondente a 80 % da capacidade de campo previamente determinada para cada tratamento.

Nos vasos foram semeadas dez sementes de feijão - *Phaseolus vulgaris* L., cultivar Guapo Brilhante, tendo sido desbastados dez dias após a semeadura e ficando quatro plantas por vaso. Vinte e nove dias após a semeadura, a parte aérea das plantas foi colhida, sendo seca em estufa a  $65^\circ \text{ C}$  até atingir peso constante, determinando-se a produção de matéria seca.

Esse material foi então triturado, sendo submetido às seguintes análises, todas descritas por Tedesco et al. ( 1995 ): N, P, K, Ca e Mg totais extraídos por digestão por  $\text{H}_2\text{O}_2 + \text{H}_2\text{SO}_4$ . Enxofre, Cu, Zn, Fe, Mn, Na, Al, Pb, Ni, Cr e Cd extraídos por digestão com  $\text{HNO}_3 - \text{HClO}_4$ . Os metais foram determinados por espectrometria de absorção atômica com forno de grafite. O Boro foi extraído por queima em forno “mufla” a  $600^\circ \text{ C}$ .

No solo foram determinados, em amostras coletadas após a colheita das plantas, os valores do pH em  $\text{H}_2\text{O}$  e  $\text{CaCl}_2$  0,01 M ( ambos 1:1 ). Dos valores de produção de matéria seca, dos conteúdos de nutrientes e dos demais elementos extraídos dos tecidos das plantas pelos extratores e do pH do solo, efetuaram-se a análise de variância e de regressão polinomial, e as médias foram comparadas pelo teste bilateral de Dunnett e de Duncan ao nível de 5 % de probabilidade.

### **3.6 Experimento em casa de vegetação com cinza UTPM 2**

Neste experimento foi também usado o solo Alto das Canas após ter sido homogeneizado, seco ao ar e peneirado em peneira de 5 mm de abertura de malha. Ao mesmo, foram incorporados quatro níveis de cinza UTPM 2 nas doses de 0, 40, 80 e  $160 \text{ t ha}^{-1}$ , em vasos de 4 litros de capacidade que continham 4 kg de solo ( base seca ). Os tratamentos constaram das doses de cinza UTPM 2 com e sem adubação básica N, P e K e com e sem calcário. Os demais procedimentos foram idênticos aos descritos no item 3.5.

### 3.7 Experimento em casa de vegetação com Antracnose

Neste experimento foi usado também o solo Alto das Canas após ter sido homogeneizado, seco ao ar e peneirado em peneira de 5 mm de abertura de malha. Os vasos utilizados eram de 4 litros de capacidade e continham 4 kg ( base seca ) de solo.

Os níveis de cinza aplicados foram 40 e 80 g vaso<sup>-1</sup> para cinza CIENTEC e 80 e 160 g vaso<sup>-1</sup> para cinza UTPM 2, correspondendo respectivamente a 20 e 40 t ha<sup>-1</sup> e 40 e 80 t ha<sup>-1</sup>. A calagem foi feita com a mistura Cálcio / Magnésio na proporção 3:1 utilizando-se CaCO<sub>3</sub> e MgCO<sub>3</sub> p.a. na quantidade equivalente a 3 t ha<sup>-1</sup>. A adubação foi feita com a aplicação de 100 mg L<sup>-1</sup> de N P K, tendo como fonte uréia, superfosfato triplo e cloreto de potássio, respectivamente.

Após a aplicação dos tratamentos nos vasos, foram semeadas dez sementes de feijão - *Phaseolus vulgaris* L. cultivar Guapo Brillhante , tendo sido feito, após oito dias, o desbaste, deixando-se quatro plantas por vaso. Dois dias após esse desbaste, as plantas foram inoculadas com cepas do fungo *Colletotrichum lindemuthianum* ( Sacc. & Magn ), causador da antracnose. Os isolamentos dessas cepas tiveram origem de fragmentos de lesões do fungo na cultivar TB 95-02, componente do ensaio instalado na Estação Experimental da Cascata do Centro de Clima Temperado da EMBRAPA , usando-se o meio específico de “Mathur”.

Após o isolamento, foi feito o plaqueamento do fungo com o meio de crescimento, sendo mantidos em temperatura de 25 ° C em regime alternado de luz e escuridão, com período de 12 horas, para que o fungo tivesse condições de esporular. Para inoculação foi usada uma suspensão de  $1,2 \times 10^6$  adicionando-se 1 ml de Tween 80.

Após a inoculação, as plantas foram incubadas à temperatura de 22° C a 23° C, sendo o solo mantido com umidade equivalente a 80 % da capacidade de campo. Oito dias após a inoculação, foi feita uma avaliação visual das plantas quanto aos sintomas da doença, utilizando-se uma escala de valores de 1 a 9, descrita por Rava ( 1993 ), conforme tabela abaixo.

| Pontos | Interpretação        |
|--------|----------------------|
| 1 2 3  | Resistente           |
| 4 5 6  | Resistência moderada |
| 7 8    | Suscetível           |
| 9      | Altamente suscetível |

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Experimento em casa de vegetação com cinza UTPM 1

A análise de regressão para a produção de matéria seca em função dos níveis de cinza e adubação ( Figura 1 ), indica, pelas equações, que a adição de cinza UTPM 1 ( ~ 12 % sem adubo, ~ 14 % com adubo ) eleva a produção de matéria seca da parte aérea de feijão, quando comparado com a da testemunha e , nos níveis mais elevados, há um decréscimo da produção devido, provavelmente, à toxidez de algum elemento não identificado, ou por excesso de sais, já que havia sintomas visuais ( necroses ) nas folhas de feijão.

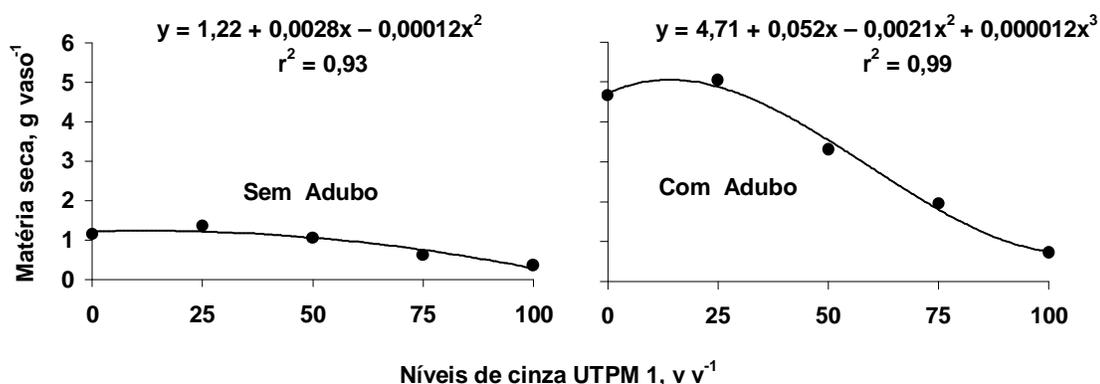


Figura 1 - Produção de matéria seca de feijão ( g vaso<sup>-1</sup> ), cultivado em vasos num solo Podzólico Vermelho Amarelo, influenciado pela aplicação de doses ( v v<sup>-1</sup> ) de cinza de carvão mineral UTPM 1 e adubação mineral. Média de três repetições.

A cinza UTPM 1 possuía um pH em água ácido ( 4,3 ) e menor do que o pH do solo ( 4,9 ) e, conseqüentemente, com o aumento das doses de cinza aplicadas ao solo, o pH em água da mistura reduziu-se significativamente ( Tabela 9 ). Provavelmente em decorrência deste pH baixo, o feijão cultivado só na cinza ( 100 % ), tanto com ou sem adubo, tenha produzido a menor quantidade de matéria seca. Neste pH a quantidade de sais solúveis é muito grande, principalmente porque a cinza UTPM 1 utilizada era pouco intemperizada, havendo liberação de muitos metais e, provavelmente, alguns deles devem ter provocado toxidez ao feijão. Tanto o pH em SMP como o pH em KCl foi mais alto com o aumento das doses de cinza, indicando que praticamente toda acidez da cinza era ativa.

Tabela 9 - Valores de pH do solo Podzólico Vermelho Amarelo, após cultivo de feijão em vasos, influenciado pela aplicação de doses de cinza UTPM 1 ( % v v<sup>-1</sup>) de carvão mineral. Médias de três repetições. \*

| Doses de<br>Cinza (%) | pH     |        |         |
|-----------------------|--------|--------|---------|
|                       | Água   | SMP    | KCl     |
| 0                     | 4,62 a | 5,29 d | 3,65 d  |
| 25                    | 4,38 b | 5,56 c | 3,69 cd |
| 50                    | 4,13 c | 5,63 c | 3,73 c  |
| 75                    | 4,07 c | 6,13 b | 3,82 b  |
| 100                   | 4,11 c | 6,82 a | 4,09 a  |
| CV (%)                | 1,83   | 1,36   | 0,72    |

\*Médias seguidas por letras distintas, nas colunas, diferem entre si pelo teste de Duncan ao nível de significância de 5 %.

Os teores de fósforo extraídos do solo ( Tabela 10 ) mostram que houve diferença significativa entre as doses de cinza. Analisando a quantidade do elemento no solo ( nível 0 ) e na cinza ( nível 100 ), observa-se uma concentração significativamente maior na cinza, refletindo-se na maior concentração do elemento no tecido de feijão nos níveis maiores de cinza ( Tabela 11 ), mostrando, com isso, que a cinza UTPM 1, apesar do seu pH baixo, deve possuir teores de fósforo disponível para as plantas de feijão.

Tabela 10 - Teores de macro e micronutrientes, sódio e alumínio do solo Podzólico Vermelho Amarelo, e sua mistura com doses de cinza volante de carvão mineral UTPM 1, após cultivo de feijão em vasos sem adubo. Médias de três repetições. \*

| Doses de cinza      | P                   | K     | Na     | Mn    | Cu     | Zn                                 | Ca    | Mg    | Al                  | Fe      |
|---------------------|---------------------|-------|--------|-------|--------|------------------------------------|-------|-------|---------------------|---------|
| % v v <sup>-1</sup> | mg dm <sup>-3</sup> |       |        |       |        | cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> |       |       | % m v <sup>-1</sup> |         |
| 0                   | 7 b                 | 55 c  | 88 c   | 22 a  | 0,4 d  | 0,1 c                              | 2,0 b | 1,2 a | 1,4 a               | 0,11 a  |
| 25                  | 2 c                 | 61 bc | 93 bc  | 19 ab | 0,5 cd | 0,3 c                              | 2,1 b | 1,0 b | 1,4 a               | 0,09 ab |
| 50                  | 3 c                 | 81 ab | 109 ab | 18 ab | 0,8 b  | 0,2 c                              | 2,6 a | 1,0 b | 1,3 a               | 0,08 bc |
| 75                  | 6 b                 | 99 a  | 115 a  | 16 b  | 0,7 bc | 0,6 b                              | 2,4 a | 0,7 c | 1,6 a               | 0,06 cd |
| 100                 | 13 a                | 80 ab | 121 a  | 6 c   | 1,1 a  | 1,4 a                              | 2,5 a | 0,4 d | 1,3 a               | 0,05 c  |
| CV(%)               | 21,77               | 14,3  | 9,61   | 15,33 | 19,64  | 35,01                              | 6,97  | 11,69 | 15,1                | 12,28   |

\*Médias seguidas por letras distintas, nas colunas, diferem entre si pelo teste de Duncan ao nível de significância de 5%.

Os teores de potássio, sódio, cobre, zinco e cálcio extraídos do solo também aumentaram significativamente com a adição de cinza UTPM 1, principalmente no nível 100 %, mostrando ser a cinza rica nestes elementos. Goepfert et al. ( 1980 ), também observaram um aumento dos teores de potássio total no solo após a aplicação de grandes quantidades de cinza volante ( 0 a 300 t ha<sup>-1</sup> ). Já os teores de manganês, magnésio e ferro extraídos do solo decresceram significativamente com o aumento dos níveis de cinza aplicados. O teor de alumínio extraído do solo não variou significativamente com a aplicação de níveis crescentes de cinza.

Tabela 11 - Teores de macronutrientes da parte aérea de feijão cultivado em vasos com solo Podzólico Vermelho Amarelo, influenciado pela aplicação de doses de cinza UTPM 1 sem e com adubação. Médias de três repetições. \*

| Doses de cinza | N             | P       | K       | Ca      | Mg      |
|----------------|---------------|---------|---------|---------|---------|
| %              | ----- % ----- |         |         |         |         |
|                | Sem adubação  |         |         |         |         |
| 0              | 0,71 d        | 0,17 c  | 1,97 d  | 1,32 c  | 0,81 c  |
| 25             | 1,13 cd       | 0,17 c  | 3,06 c  | 1,56 a  | 1,06 ab |
| 50             | 1,66 bc       | 0,26 bc | 4,63 a  | 1,56 a  | 1,12 a  |
| 75             | 2,00 b        | 0,33 b  | 4,91 a  | 1,48 ab | 0,90 bc |
| 100            | 3,74 a        | 0,76 a  | 3,63 b  | 1,34 bc | 0,56 d  |
|                | Com adubação  |         |         |         |         |
| 0              | 2,51 a        | 0,36 a  | 2,67 d  | 1,08 a  | 0,80 a  |
| 25             | 3,30 a        | 0,38 a  | 3,89 c  | 1,22 a  | 0,87 a  |
| 50             | 3,20 a        | 0,41 a  | 4,97 ab | 1,20 a  | 0,87 a  |
| 75             | 2,98 a        | 0,47 a  | 5,44 a  | 1,08 a  | 0,80 a  |
| 100            | 3,31 a        | 0,48 a  | 4,61 bc | 1,07 a  | 0,62 b  |
| CV (%)         | 18,85         | 16,03   | 5,28    | 6,87    | 8,68    |

\*Médias seguidas por letras distintas, nas colunas, diferem entre si pelo teste de Duncan ao nível de significância de 5 %.

A análise do tecido vegetal ( Tabela 11 ) mostra que houve um aumento significativo nos teores de nitrogênio, fósforo e potássio com o aumento das doses de cinza. O teor de nitrogênio e fósforo no tecido das plantas que não receberam adubação, no nível de 100 % de cinza, foi o mesmo daquelas que receberam o adubo, mostrando que a cinza, bem como a reserva de nutrientes da semente, supria a deficiência destes nutrientes, bem como de potássio. O baixo rendimento de matéria seca nesta dose de cinza se deve, provavelmente, ao excesso de sais solúveis.

## 4.2 Experimento em laboratório com cinza UTPM 2, URCAMP e CIENTEC

### 4.2.1 Solo Alto das Canas – cinza UTPM 2 e URCAMP

Houve variação do pH em função do tempo de incubação para ambas as cinzas ( experimento A e B ). Observou-se que, aos vinte e um dias de incubação, o pH do solo já havia alcançado valores máximos em cada tratamento com calcário, tendendo a decrescer com o tempo de incubação, e praticamente estabilizando-se aos sessenta e três dias. Isto, provavelmente, decorre do aumento da atividade microbiana com a elevação da umidade do solo, aumentando os processos de nitrificação e decomposição da matéria orgânica.

A determinação do valor de neutralização de ambas as cinzas, pelo método utilizado para calcário, não foi eficiente, dando valores negativos. No entanto, o pH em água das mesmas foi altamente alcalino ( 11,0 UTPM 2 e 12,5 URCAMP ) ( Tabela 3 ).

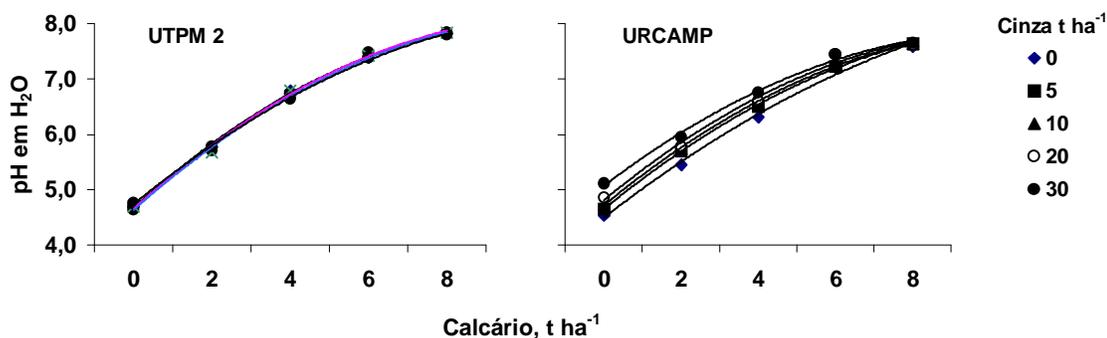


Figura 2 - Efeito das doses ( t ha<sup>-1</sup> ) de calcário e de cinza volante de carvão mineral produzida na UTPM 2 e na URCAMP sobre o pH do solo Alto das Canas. Média de 21, 42, 63 e 90 dias de incubação.

A análise de regressão polinomial mostra que a cinza UTPM 2, quando aplicada ao solo, mesmo na dose equivalente a 30 t ha<sup>-1</sup>, não elevou significativamente o pH do solo em nenhum nível de calcário e em nenhum tempo de incubação ( Figura 2 ). Apesar desta cinza possuir pH elevado ( 11,0 ), seu poder tamponante da acidez do solo não foi eficiente.

Já a cinza produzida na URCAMP em todos os períodos de incubação, e em praticamente todos os níveis de calcário ( 0, 2, 4 e 6 t ha<sup>-1</sup> ), aumentou significativamente o pH do solo ( Figura 2 ). Isto não ocorreu apenas quando se aplicou o equivalente à 8 t ha<sup>-1</sup> de calcário, provavelmente devido ao pH do solo estar acima de 7,0. Estes resultados já eram esperados, uma vez que dados de literatura com cinzas volantes obtidas em processo de dessulfuração, também se mostraram eficientes em reduzir a acidez do solo ( Adriano et al., 1982; Stout et al., 1997; Terman et al., 1978 ).

Como no processo de dessulfuração, parte do calcário aplicado que não reagiu com o enxofre transformou-se em CaO, estando este presente na cinza, provavelmente, o mesmo foi o responsável pela elevação do pH do solo.

Os efeitos da cinza URCAMP e do calcário para ambas as cinzas sobre o pH do solo foram altamente significativos, principalmente nos níveis menores de calcário. Como mostra figura 2, a partir do nível 6 de calcário, começa a haver uma certa estabilidade do pH em decorrência de seu valor já um tanto elevado.

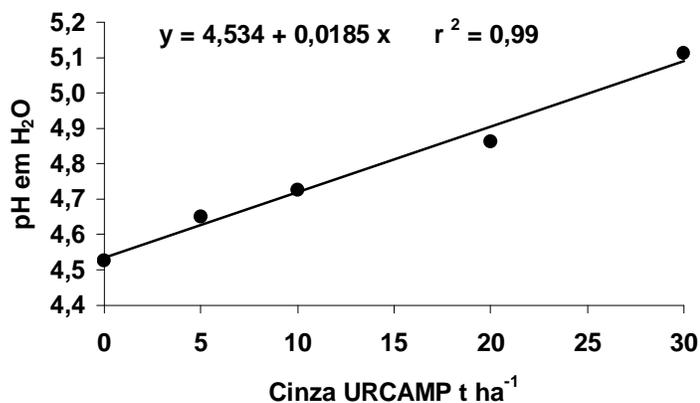


Figura 3 - Efeito das doses ( t ha<sup>-1</sup> ) de CaCO<sub>3</sub> e cinza volante de carvão mineral produzido na URCAMP sobre o pH do solo Alto das Canas. Médias de 21, 42, 63 e 90 dias de incubação.

A análise de regressão para níveis de cinza da URCAMP dentro do nível zero de calcário, indica pela equação que a aplicação de 5 t ha<sup>-1</sup> de cinza ao solo aumentou o pH em 0,09 unidade ( Figura 3 ). Essa figura mostra ainda, que o efeito da cinza sobre o pH do solo foi positivo, aumentando-o de 4,5 ( no nível zero de cinza ) para 5,1 no nível máximo da mesma ( 30 t ha<sup>-1</sup> ).

Como por titulação, em laboratório, não foi possível determinar na cinza o seu valor de neutralização da acidez do solo, para avaliar sua eficiência em relação ao calcário e a quantidade de calcário que poderá ser diminuída da dose recomendada para elevar o pH do solo a 6,0, foi construída a figura 3, a partir das doses de calcário necessárias para elevar o pH do solo a 6,0, estimadas para cada nível de cinza.

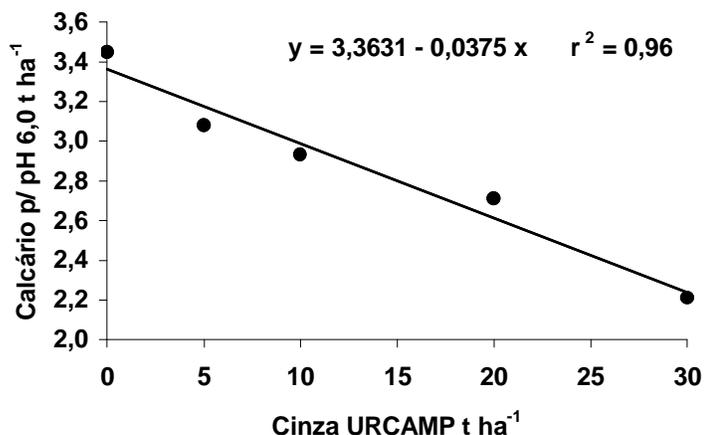


Figura 4 - Quantidade de cinza volante de carvão mineral produzida na URCAMP que poderá substituir as doses de calcário necessárias para elevar o pH do solo Alto das Canas a 6,0.

Como se pode observar pela equação de regressão ( Figura 4 ), para cada tonelada de cinza URCAMP aplicada ao solo Alto das Canas, pode-se reduzir em 38 kg a dose de calcário ( PRNT 100 % ) necessária para elevar o pH deste solo a 6,0. Ainda por esta equação e para este solo nas condições em que a cinza foi produzida, conclui-se que a mesma possui PRNT igual a 3,75 %.

#### 4.2.2 Solo malha IV – cinza UTPM 2 e CIENTEC

Houve uma pequena variação do pH do solo em função do tempo de incubação para ambas as cinzas e solos. Aos vinte e um dias de incubação, o pH do solo já havia atingido valores máximos para cada tratamento com calcário, estabilizando-se, nesta data, nos experimentos D e F, decrescendo com o tempo de incubação e, praticamente, estabilizando-se aos quarenta e dois dias nos experimentos C e E, ocorrendo isso, provavelmente, devido à elevação da atividade microbiana com o aumento da umidade do solo.

Usou-se em cada experimento a média das determinações de pH em todo o tempo de incubação, pois as variações em função desse tempo provavelmente seriam menores do que as flutuações em decorrência das próprias medidas potenciométricas do pH.

A análise de regressão mostra que a cinza UTPM 2, quando aplicada ao solo malha IV, mesmo na dose equivalente a  $300 \text{ t ha}^{-1}$ , não elevou significativamente a 1 % de probabilidade o pH do solo medido em água e em cloreto de cálcio, em nenhum nível de calcário e em nenhum tempo de incubação ( Figura 5 ), apesar da quantidade aplicada ser excessivamente alta e o pH da cinza ser também bastante elevado ( pH 11,0 ) ( Tabela 3 ).

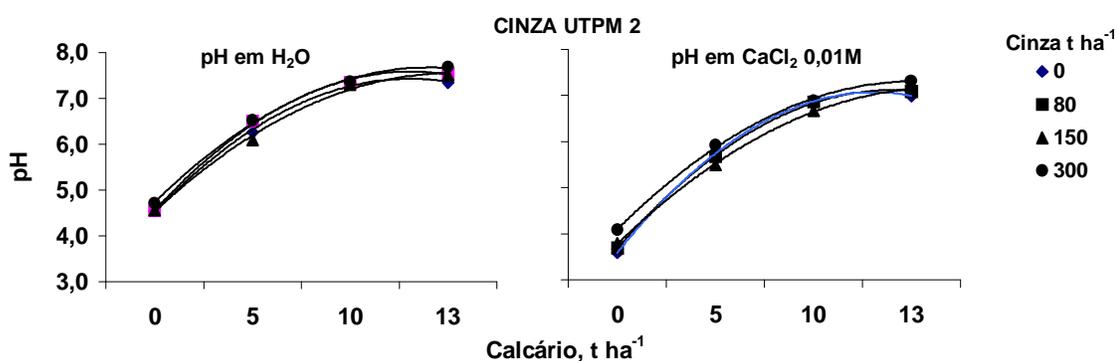


Figura 5 - Efeito das doses (  $\text{t ha}^{-1}$  ) de cinza UTPM 2 sobre o pH em água e em  $\text{CaCl}_2$  0,01M do solo Malha IV. Média de 21, 42, 70 e 112 dias de incubação.

As análises de regressão mostram ainda que a cinza produzida na CIENTEC, quando aplicadas a ambos solos e em todos os níveis de calcário, aumentaram significativamente o pH do solo em água e em cloreto de cálcio ( Figuras 6, 7, 9 )

A medida do pH em  $\text{CaCl}_2$  0,01 M foi utilizada para analisar se haveria algum efeito salino, devido à quantidade de sais solúveis na cinza que poderiam afetar a medida do pH em água , e também, para avaliar o efeito da cinza na acidez potencial do solo. Comparando-se as medidas feitas pelos dois extratores (  $\text{H}_2\text{O}$  e  $\text{CaCl}_2$  0,01M ), pode-se observar que não houve efeito salino; apenas, como era de se esperar, todos os valores de pH medidos em  $\text{CaCl}_2$  foram menores do que os medidos em água nos níveis mais baixos de pH do solo ( principalmente quando o pH em água era menor do que 5,0 ). Isto ocorre porque o  $\text{Ca}^{2+}$  irá substituir os  $\text{H}^+$  dos sítios de troca do solo, fazendo com que os mesmos permaneçam na solução do solo tornando seu pH menor. Com o pH mais elevado pela calagem, esses sítios de trocas que possuíam  $\text{H}^+$  já foram substituídos parcialmente pelo Ca do calcário e neutralizado por suas  $\text{OH}^-$  .

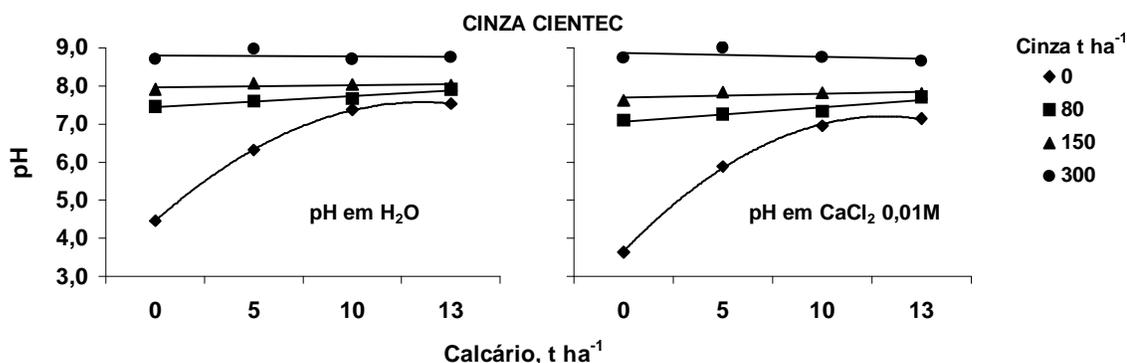


Figura 6 - Efeito das doses (  $t\ ha^{-1}$  ) de cinza CIENTEC sobre o pH em água e em  $CaCl_2$  0,01M do solo Malha IV. Média de 21, 42, 70 e 112 dias de incubação.

Na figura 6 observa-se que a quantidade de cinza aplicada ao solo Malha IV foi muita elevada, sendo que a primeira dose (  $80\ t\ ha^{-1}$  ) já elevou o pH do solo acima de 7,0. Isto também ocorreu no solo e Alto das Canas ( Figura 7 ). A grande quantidade escolhida de calcário e cinza aplicadas ao solo Malha IV foram baseadas na expectativa de que neste “solo” ainda estivesse presente quantidade apreciável de materiais piríticos, resultando num grande poder tampão do mesmo, conforme havia sido descrito por Gonçalves ( 1999 ) e Soares ( 1998 ).

#### 4.2.3 Solo Alto das Canas – cinza CIENTEC.

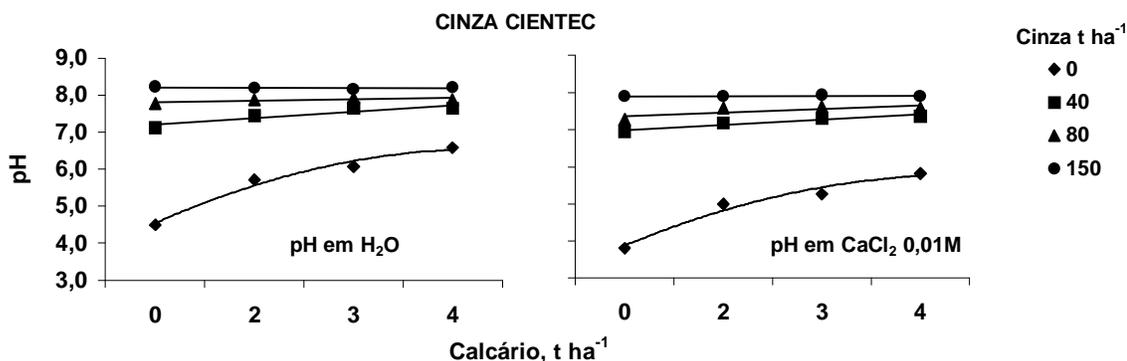


Figura 7 - Efeito das doses (  $t\ ha^{-1}$  ) de cinza CIENTEC sobre o pH em água e em  $CaCl_2$  0,01M do solo Alto das Canas. Média de 21, 42, 70 e 112 dias de incubação.

Como os valores do pH foram muito elevados nos experimentos, tanto devido às quantidades de cinza CIENTEC aplicadas serem muito altas no experimento C ( Figura 7 ), como as de cinza CIENTEC e calcário no experimento E ( Figura 6 ), os coeficientes de correlação foram não lineares ( Figura 8 ). Isso se deve porque, quanto mais alto for o pH do solo, devido ao seu poder tampão e por ser o pH uma medida logarítmica, maiores serão as quantidades de calcário ou de cinza necessárias para elevá-lo.

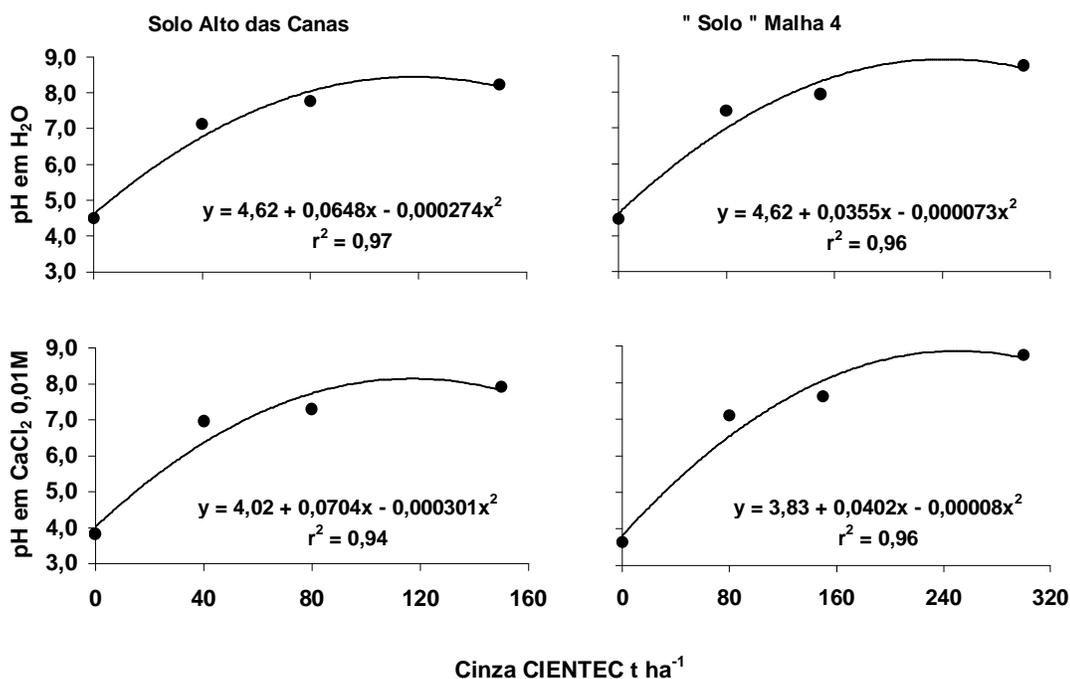


Figura 8 - Efeito das doses ( t ha<sup>-1</sup> ) de CaCO<sub>3</sub> e cinza CIENTEC sobre o pH em água e em CaCl<sub>2</sub> 0,01M dos solos Alto das Canas e Malha IV. Média de 21, 42, 70 e 112 dias de incubação.

Em decorrência desses valores inadequados de pH do solo, visto que a faixa ideal para agricultura situa-se entre 5,5 e 6,5 , foi realizado novo experimento ( D ) para determinar quanto da cinza CIENTEC era necessária para elevar o pH do solo a 6,0 e qual sua equivalência em carbonato de cálcio ( Eq.CaCO<sub>3</sub> ). Com as quantidades mais adequadas de cinza e calcário ( Figura 9 ), observa-se um coeficiente de correlação linear bastante elevado.

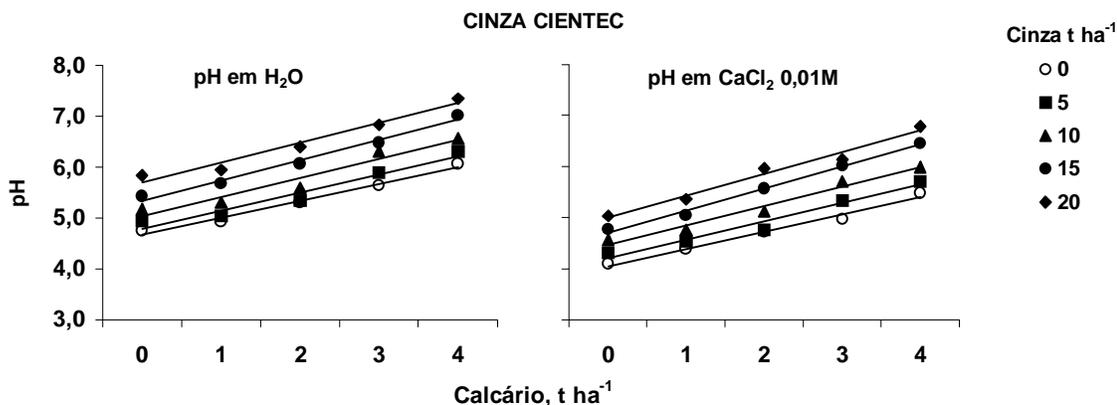


Figura 9 - Efeito das doses (  $t\ ha^{-1}$  ) de cinza CIENTEC sobre o pH em água e em  $CaCl_2$  0,01 M do solo Alto das Canas. Média de 21, 42 e 63 dias de incubação.

As figuras 8 e 10 foram construídas a partir dos dados da análise de regressão para níveis de cinza dentro do nível zero de calcário. Elas mostram que o efeito da cinza CIENTEC sobre o pH do solo foi positivo, passando de 4,5 para 8,2 no solo Alto das Canas ( experimento C ), e de 4,5 para 8,7 no “solo” Malha IV ( experimento E ) ( Figura 8 ), e de 4,8 para 5,8 no solo Alto das Canas ( experimento D ) ( Figura 10 ). Considerando-se a equação da figura 10, pode-se concluir que para cada tonelada de cinza CIENTEC aplicada ao solo Alto das Canas, seu pH em água aumenta em 0,5 unidade.

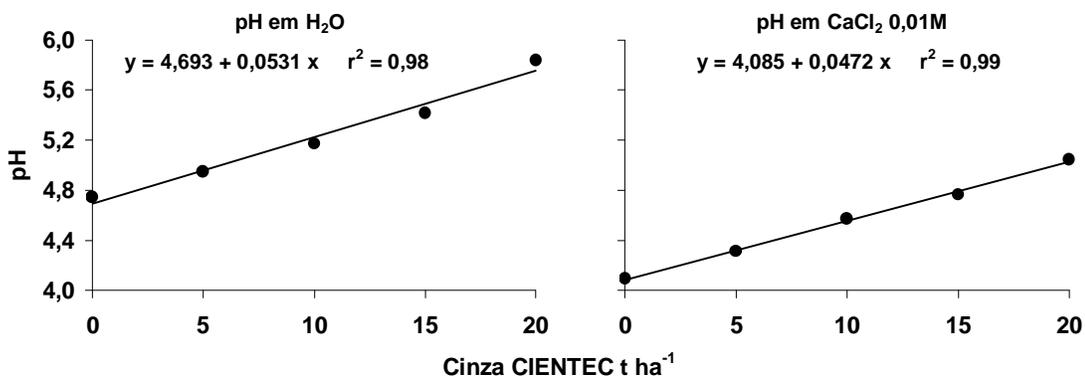


Figura 10 - Efeito das doses (  $t\ ha^{-1}$  ) de  $CaCO_3$  e cinza CIENTEC sobre o pH em água e em  $CaCl_2$  0,01M do solo Alto das Canas. Média de 21, 42 e 63 dias de incubação.

A determinação do Valor de Neutralização ( VN ) ou equivalência em carbonato de cálcio ( Eq.CaCO<sub>3</sub> ) das cinzas pelo mesmo método utilizado para o calcário ( Tedesco et al., 1995 ) para a cinza UTPM 2 não foi eficiente, gerando valores negativos, apesar de seu pH ser altamente alcalino ( 11,0 ); no entanto, para cinza CIENTEC o método foi eficiente, resultando num valor de neutralização igual a 15,1 %. Valor semelhante a este foi obtido por Phung et al., ( 1978 ) com cinza volante da planta de força de Mojave, em Nevada.

Como toda cinza utilizada era passante em peneira ABNT nº 50 ( diâmetro de furos de 0,30 mm ), resultando numa Eficiência Relativa ( ER ) igual a 100, o valor de neutralização determinado será igual ao seu Poder Relativo de Neutralização Total ( PRNT ), já que a determinação do PRNT segue a fórmula abaixo:

$$\text{PRNT} = \frac{\text{ER} \times \text{VN}}{100}$$

O valor de neutralização da cinza CIENTEC determinada por titulação ( 15,1 % ) aproximou-se, em muito, do valor real determinado por incubação que foi de 16,8 %, como mostra a equação da figura 11. Por esta equação conclui-se que, a cada tonelada de cinza CIENTEC aplicada ao solo, reduz-se em 168 kg a quantidade de calcário necessária para elevar seu pH em água a 6,0. Essa figura foi construída a partir dos dados estimados das doses de calcário necessárias para elevar o pH do solo a 6,0 para cada nível de cinza.

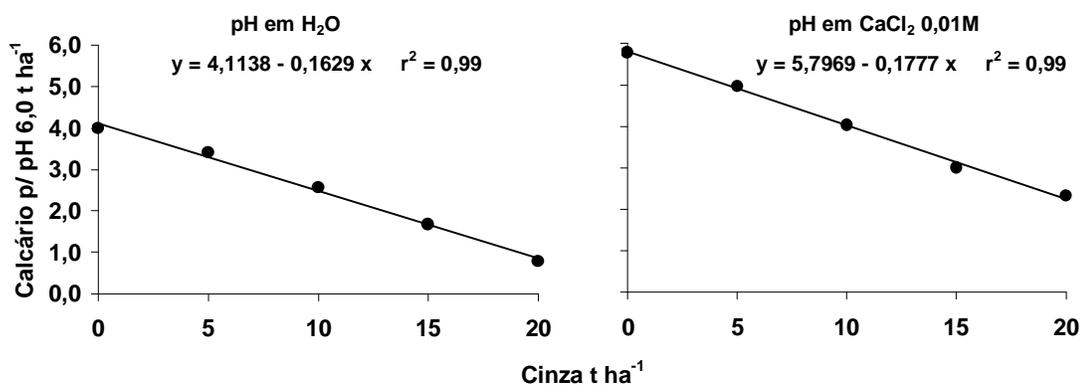


Figura 11 - Quantidade de cinza CIENTEC que poderá substituir as doses de calcário necessárias para elevar o pH em água e em CaCl<sub>2</sub> 0,01M do solo Alto das Canas a 6,0.

### 4.3 Experimento em casa de vegetação com cinza UTPM 2 e CIENTEC

Pelo teste bilateral de Dunnett ( D.M.S. 5 % = 0,36 ), a produção de matéria seca de feijão foi significativamente maior com a aplicação de 40 t ha<sup>-1</sup> de cinza UTPM 2 do que a testemunha, independentemente dos tratamentos adubação e calagem ( Apêndice 21 ). Nos níveis 20 CIENTEC e 80 UTPM 2 não houve diferença significativa, entretanto, a produção de matéria seca foi significativamente menor nos níveis 40 e 80 CIENTEC e 160 UTPM 2 do que a testemunha ( Figura 13 ).

Considerando-se apenas o efeito das cinzas, observa-se que só o nível 80 CIENTEC foi significativamente maior que a testemunha, sendo que nos demais níveis CIENTEC e em todos os níveis UTMP 2 não houve diferença significativa ( D.M.S. 5 % 0,73 ).

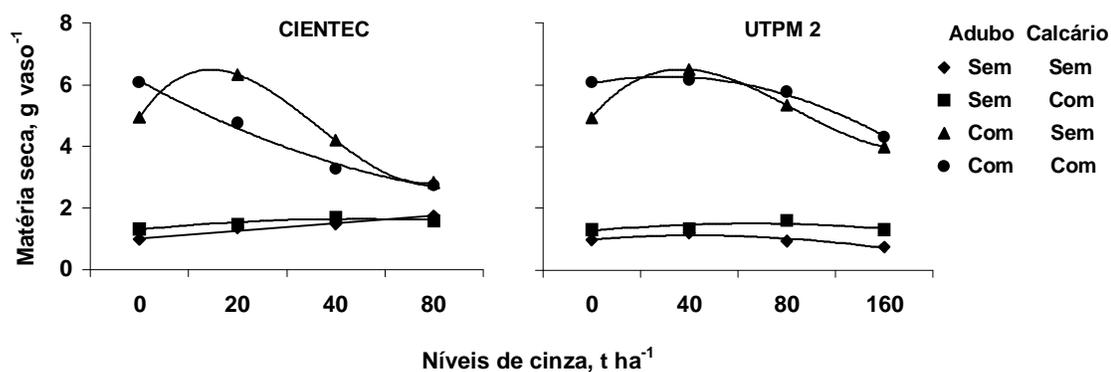


Figura 12 - Produção de matéria seca de feijão ( g vaso<sup>-1</sup> ), cultivado em vasos num solo Podzólico Vermelho Amarelo, influenciado pela aplicação de doses ( t ha<sup>-1</sup> ) de cinza de carvão mineral coletada da CIENTEC ( resultante de processo de dessulfuração ) e da UTPM 2, adubação mineral e calagem. Média de três repetições

Não houve efeito da calagem sem adubação em nenhum nível das cinzas, no entanto, com adubação a calagem diminuiu significativamente a produção de matéria seca para todos os níveis CIENTEC e também para o nível 160 UTPM 2.

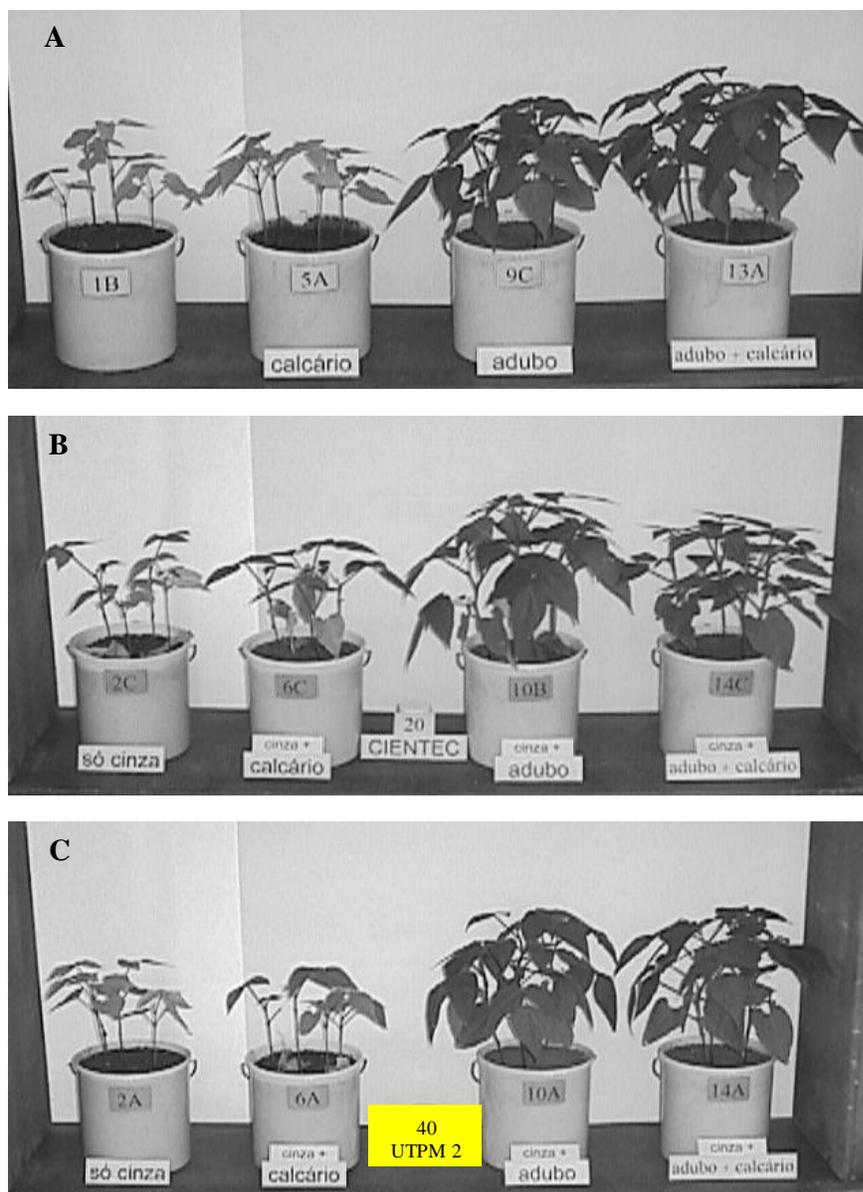


Figura 13 - Efeito da aplicação de doses equivalentes a 0 ( A = testemunha ), 20 t ha<sup>-1</sup> ( B = cinza CIENTEC ) e 40 t ha<sup>-1</sup> ( C = cinza UTPM 2 ) sobre as plantas de feijão cultivadas em solo Podzólico Vermelho Amarelo, em função dos seguintes tratamentos: A solo, solo + calcário, solo + adubo, solo + adubo + calcário; B e C cinza, cinza + calcário, cinza + adubo, cinza + adubo + calcário

O efeito mais significativo das cinzas foi nas doses de 20 CIENTEC e 40 UTPM 2, com adubação e sem calagem, sendo que na dose 80 UTPM 2 não houve diferença significativa, e nas demais doses a produção foi significativamente menor ( Figura 13 ).

Como era de se esperar, a produção de matéria seca de feijão na testemunha, foi significativamente maior no tratamento com adubo e calagem. Houve efeito significativo da adubação com e sem calagem, não havendo efeito, entretanto, da calagem sem adubação.

A maior produção de matéria seca para a cinza CIENTEC foi ao nível 20 com adubação e sem calagem. A não necessidade da calagem deveu-se à elevação do pH do solo pela cinza de 4,8 para 5,8 ; no entanto não parece ser o pH o fator mais determinante do rendimento de matéria seca, pois para a cinza UTPM 2, nos níveis 40 e 80 com adubação e com e sem calagem, ocorreram os maiores rendimentos, apesar da diferença significativa nos valores de pH ( Apêndices 21e 22 ).

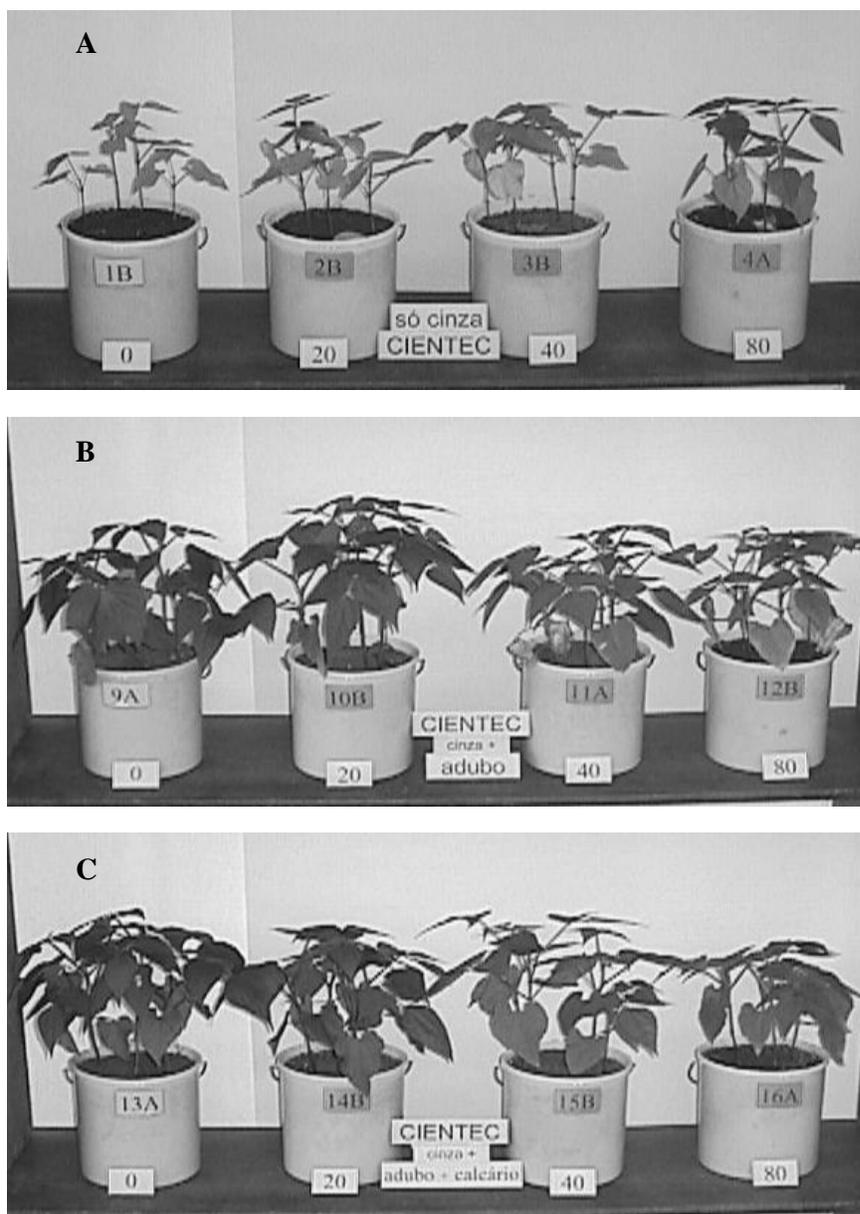


Figura 14 - Efeito da aplicação de doses crescentes de cinza CIENTEC equivalentes a 0, 20, 40 e 80 t ha<sup>-1</sup> ( A ) sobre as plantas de feijão cultivadas em solo Podzólico Vermelho Amarelo, da adubação ( B ) e da adubação + calagem ( C ).

Para ambas as cinzas, a maior produção de matéria seca foi devida à adubação, fator esse mais presente na cinza UTPM 2, já que com adubação não houve diferença significativa da calagem em nenhuma das doses de cinzas utilizadas, indicando com isso, que o fator limitante do crescimento do feijão neste solo é sua fertilidade natural e não sua acidez ( Figuras 12, 13, 14 e 15 e Apêndice 1 ).

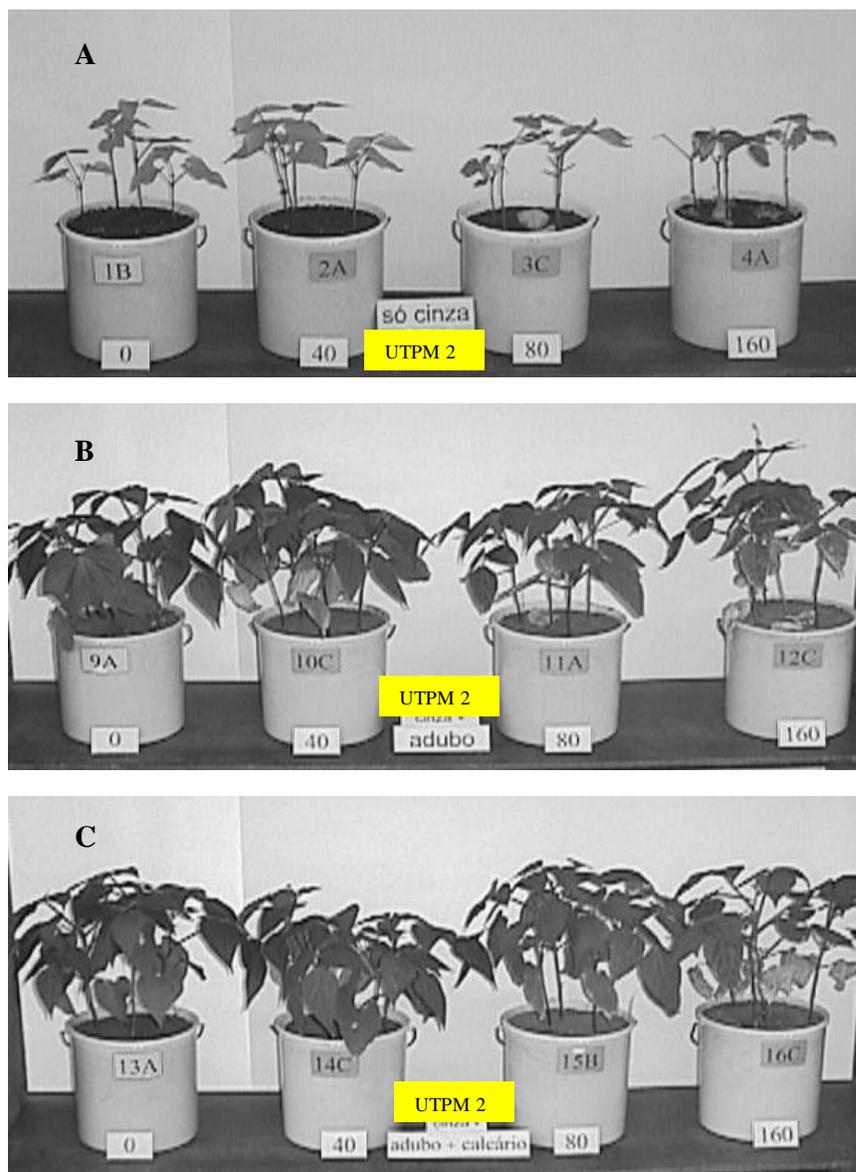


Figura 15 - Efeito da aplicação de doses crescentes de cinza UTPM 2 equivalentes a 0, 40, 80 e 160 t ha<sup>-1</sup> ( A ) sobre as plantas de feijão cultivadas em solo Podzólico Vermelho Amarelo, da adubação ( B ) e da adubação + calagem ( C ).

A análise de regressão ( Apêndice 1 ) e a Figura 12 nos mostram que a aplicação correspondente a 15,2 e 39,4 t ha<sup>-1</sup> de cinza CIENTEC e UTPM 2 com adubação adequada de N P K, produziram o melhor rendimento de matéria seca de feijão.

O menor rendimento da cinza CIENTEC nos níveis 40 e 80 com adubação e com e sem calagem e no nível 20 com adubação e com calagem, deveu-se, provavelmente, ao elevado pH do solo nestes níveis, sendo todos eles maiores que 6,7 ( Apêndice 22 ).

Em decorrência da instalação do experimento em casa de vegetação com a cinza CIENTEC concomitante com a incubação do solo com esta cinza para verificar seu poder de neutralização ( ainda não se tinha os dados de neutralização ), os dois últimos níveis ( 40 e 80 t ha<sup>-1</sup> ) de cinza aplicados foram muito altos em se tratando de cultivo agrícola; em consequência, elevaram o pH do solo medido em água para valores acima de 6,7. Com estes níveis de cinza mais a calagem, o pH em água do solo elevou-se para acima de 6,7 ( Apêndice 22 ) em todos os níveis de cinza CIENTEC. Isto mostra, assim, como os estudos de neutralização, a capacidade desta cinza em corrigir a acidez do solo.

A cinza CIENTEC em todos os níveis elevou significativamente o pH do solo tanto medido em H<sub>2</sub>O como em CaCl<sub>2</sub>. Muitos autores também obtiveram aumentos significativos no pH do dolo com adição de cinza volante alcalina ( Stehouwer et al. 1995 a; Terman et al. 1978; Zaifnejad et al. 1998 ).

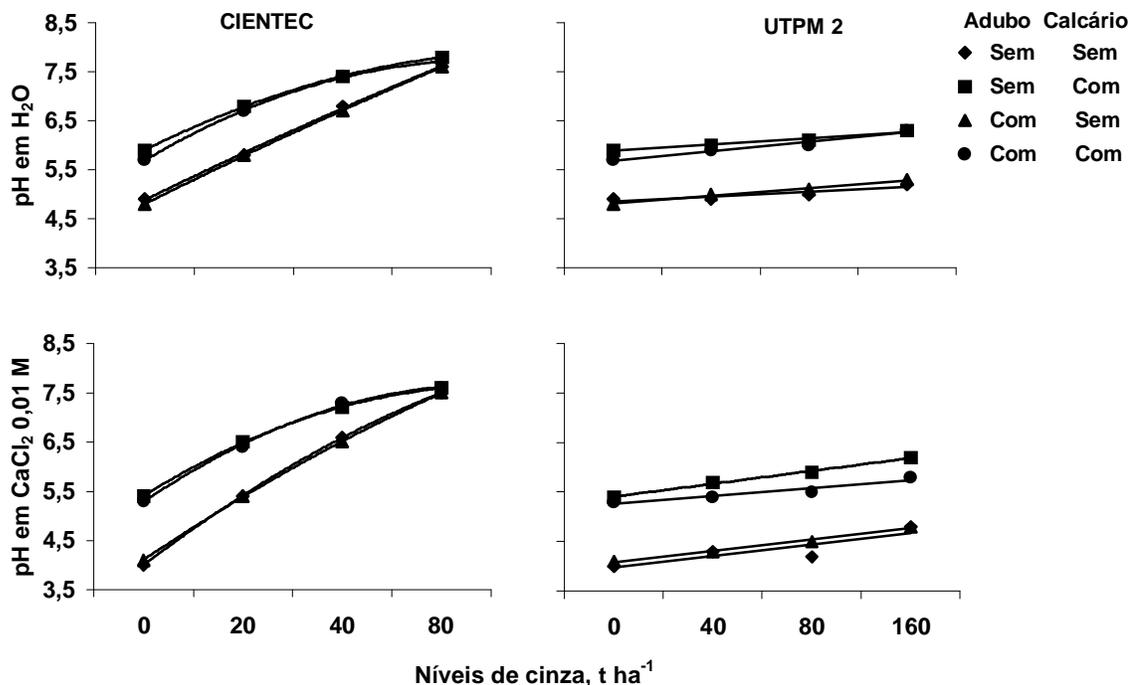


Figura 16 - Medidas de pH em água e em CaCl<sub>2</sub> 0,01M do solo Podzólico Vermelho Amarelo, influenciado pela aplicação de doses ( t ha<sup>-1</sup> ) de cinza de carvão mineral coletada da CIENTEC ( resultante de processo de dessulfuração ) e da UTPM 2, adubação mineral e calagem. Média de três repetições.

As análises de regressão mostram que a mudança do pH foi mais acentuada nos níveis menores de cinza CIENTEC, pois, a partir de um pH mais elevado, as quantidades de cinza têm que ser muito maiores para provocarem mudanças mais acentuadas no pH, havendo, por isso, como mostra a figura 16 e Apêndices 2, 3 e 4, um aumento não linear do pH com a aplicação da cinza.

Já a cinza UTPM 2, apesar de seu pH elevado ( Tabela 3 ), mesmo em quantidades equivalentes à  $160 \text{ t ha}^{-1}$ , elevou em apenas 0,3 unidade o pH do solo, mostrando, assim, como nos estudos de laboratório ( Figura 2 ), ser ineficiente em neutralizar a acidez do solo.

Para todos os tratamentos, os valores de pH em  $\text{CaCl}_2$  foram menores do que os medidos em água, em média 0,41 unidade, principalmente no nível zero de cinza, que foi em média de 0,64 unidade.

Com adição crescente da cinza, esta diferença de pH foi diminuindo, sendo mais evidente nos níveis de cinza CIENTEC devido, principalmente, ao pH do solo estar mais próximo da neutralidade ou mesmo acima de 7, mostrando com isso a eficiência desta cinza em diminuir a acidez potencial, visto que o  $\text{Ca}^{2+}$  de  $\text{CaCl}_2$  desloca o  $\text{H}^+$  e  $\text{Al}^{3+}$  do complexo de troca, e também pela compressão da dupla camada elétrica difusa que faz com que o pH seja próximo daquele da superfície das partículas.

Esta deve ter sido a razão da maior diferença de pH medido em  $\text{CaCl}_2$  ( 4,0 - 4,8 ) no nível 160 UTPM 2 sem calcário e sem adubo em relação ao nível zero, em decorrência, provavelmente, da quantidade de sais liberados na solução do solo, já que esta diferença, quando o pH foi medido em água, foi de 0,3 unidade. ( Figura 16 e Apêndices 22, 23 e 24 ). Também o aumento provável da quantidade de sais em solução pela adição das cinzas, calagem e adubação fez com que a diferença dos valores de pH medidos em água e em  $\text{CaCl}_2$  diminuíssem significativamente para todos os níveis de cinza CIENTEC ( diferença em média de 0,22 unidade ) em relação ao nível zero. Já para a cinza UTPM 2, este efeito não foi tão acentuado ( diferença em média de 0,53 unidade ).

O pH medido em  $\text{CaCl}_2$  foi menor do que o medido em água ( 0,41 unidade ), o que era de se esperar, já que o  $\text{Ca}^{2+}$  substitui os  $\text{H}^+$  e  $\text{Al}^{3+}$  nos pontos de troca ( medindo uma parte da acidez potencial ) e porque também diminui a dupla camada.

Observa-se que quanto menor o pH, maior é a diferença, pois, à medida que a acidez potencial é neutralizada, não haverá mais o efeito do  $\text{Ca}^{2+}$  deslocando o  $\text{H}^+$  e  $\text{Al}^{3+}$ .

A calagem além de elevar o pH neutralizando a acidez ativa e a potencial, aumenta a concentração de sais, assim como a adubação, diminuindo a diferença entre a medida em água e em  $\text{CaCl}_2$ .

O aumento nos níveis de cinza CIENTEC diminuíram a diferença ( 0,22 unidade ) entre o pH medido em  $\text{H}_2\text{O}$  e em  $\text{CaCl}_2$ , principalmente em decorrência da elevação do pH do solo, diminuindo o efeito do  $\text{Ca}^{2+}$  proveniente do  $\text{CaCl}_2$ , já que nestes pH próximos da neutralidade ou acima dela ( 6,8 – 7,8 ) haveria poucos  $\text{H}^+$  para serem deslocados.

No entanto, com a cinza UTPM 2 também houve diminuição da diferença com as doses crescentes de cinza ( 0,53 unidade ), só que com valores, em média, maiores que a cinza CIENTEC, devido ao fato de a cinza UTPM 2 ter valores menores de pH ( portanto, neutralizando pouco a acidez ), restando ainda acidez potencial a ser neutralizada. Com o aumento da quantidade de sais na solução pela aplicação das doses de cinza, esta diferença tendeu a diminuir em consequência destes sais tomarem os pontos de troca do  $\text{H}^+$  e  $\text{Al}^{3+}$  e também diminuir a dupla camada. Esta também deve ter sido a razão da maior diferença ocorrida no tratamento sem adubo e sem calcário no nível zero de cinza ( pH em  $\text{CaCl}_2$  4,0 ) e 160 ( pH em  $\text{CaCl}_2$  4,8 ), já que a diferença, quando o pH foi medido em água, foi de 0,3 unidade.

#### 4.3.1 – Nitrogênio

Como o experimento teve que ser colhido com as plântulas de feijão com apenas três semanas de crescimento, pois em alguns tratamentos ( níveis mais altos de cinza ) as mesmas apresentavam sintomas de toxidez / disfunção nutricional, começando a perder as folhas, poderá haver algum comprometimento na interpretação da absorção dos elementos pelas plantas ( Figuras 17 e 19 ).



Figura 17 - Efeito da aplicação de dose equivalente a  $40 \text{ t ha}^{-1}$  de cinza CIENTEC sobre as plantas de feijão cultivadas em solo Podzólico Vermelho Amarelo, com os seguintes tratamentos: A apenas cinza, B cinza + calcário, C cinza + adubo, D cinza + adubo + calcário.

Houve efeito significativo da adubação sobre o total de N, P e K extraído pelas plantas de feijão em todos os níveis de ambas as cinzas. Isso era de se esperar, já que foi feita uma adubação básica com esses três nutrientes.

Houve também efeito significativo da adição de cinza CIENTEC sem adubação, com e sem calagem, apenas no aumento da absorção de N, sendo que, para P e K, o aumento não foi significativo.

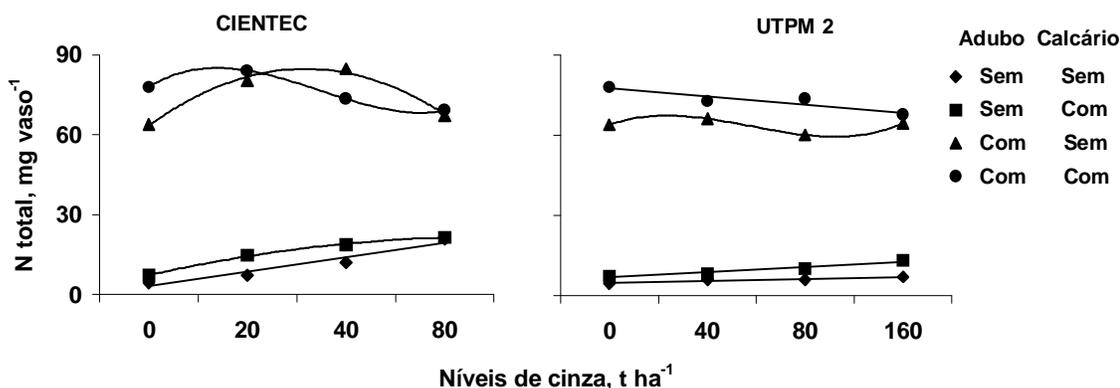


Figura 18 – Quantidade total de nitrogênio extraída ( mg vaso<sup>-1</sup> ) pelas plantas de feijão cultivadas em vasos num solo Podzólico Vermelho Amarelo, influenciado pela aplicação de doses ( t ha<sup>-1</sup> ) de cinza de carvão mineral, adubação e calagem. Média de três repetições.

Com o aumento da aplicação de cinza CIENTEC, houve um aumento significativo da absorção de nitrogênio nos quatro tratamentos, sendo que no tratamento 1 ( sem adubo e sem calcário ), este aumento foi linear; no tratamento 2 ( sem adubo e com calcário ) e no 3 ( com adubo e sem calcário ), este aumento foi uma curva quadrática, indicando um pico máximo de absorção do elemento, e depois caindo com o aumento das doses de cinza. Também no tratamento 4 ( com adubo e com calcário ) houve um aumento da absorção até o nível 20 de cinza; depois a mesma começou a decrescer ( Figura 18 e Apêndice 5 ).

Nos quatro níveis de cinza CIENTEC ( 0, 20, 40 e 80 t ha<sup>-1</sup> ) a absorção de N foi significativamente maior com a adubação e com a calagem. Para a cinza UTPM 2, a absorção de N só foi significativa com o aumento das doses de cinza. Apesar de não significativo, observa-se um aumento na absorção de N com o aumento das doses de cinza nos tratamentos 1 e 2 ( Apêndices 25 e 41 ). Também houve, para esta cinza, um aumento significativo da absorção de N em decorrência da adubação, tanto com ou sem calagem ( Figura 18 ).

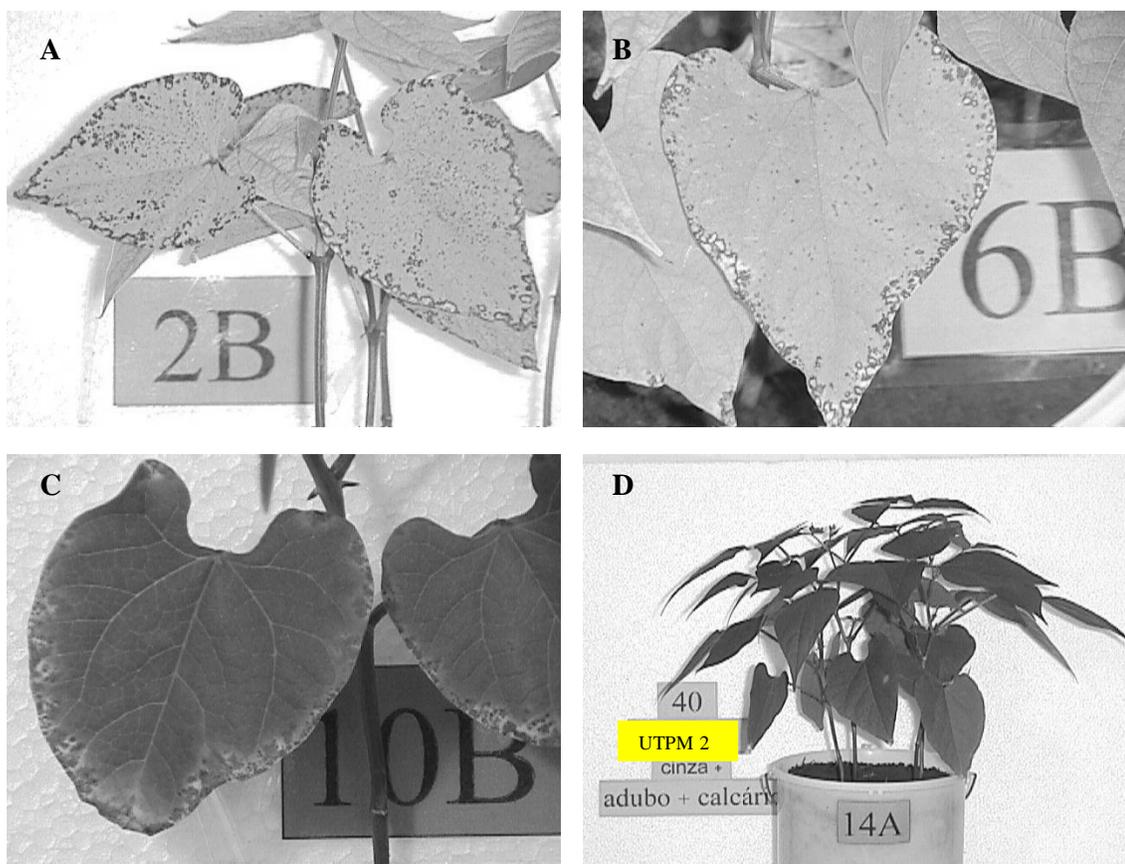


Figura 19 - Efeito da aplicação de dose equivalente a  $40 \text{ t ha}^{-1}$  de cinza UTPM 2 sobre as plantas de feijão cultivadas em solo Podzólico Vermelho Amarelo, com os seguintes tratamentos: A apenas cinza, B cinza + calcário, C cinza + adubo, D cinza + adubo + calcário

#### 4.3.2 – Fósforo

A disponibilidade do fósforo para as plantas está grandemente ligada ao pH do solo. À medida que o pH do solo vai diminuindo de 6,0, a disponibilidade de P vai diminuindo em consequência da precipitação (fixação) dos radicais fosfatos pelos íons  $\text{Al}^{3+}$  e  $\text{Fe}^{3+}$ . Por outro lado, acima de pH 7,0 - 7,5 o fósforo se precipita na forma de hidroxiapatita ( $\text{Ca}_5\text{OH}(\text{PO}_4)_3$ ), diminuindo também sua disponibilidade. Assim, a maior disponibilidade do fósforo está em torno de uma faixa de pH entre 6,0 - 7,0.

A absorção do P pelas plantas em função das doses de cinza CIENTEC não foi significativa nos tratamentos 1 e 2, no entanto, foi altamente significativa nos tratamentos 3 e 4, em decorrência da adubação fosfatada. Com as doses crescentes de cinza no tratamento 4, houve um decréscimo na absorção de P, provavelmente devido à elevação do pH do solo, que diminui sua disponibilidade para as plantas devido ao aumento da precipitação do fósforo pelo cálcio ( Figura 20, Apêndices 6, 26 e 42 ).

No tratamento 3 no nível 20 de cinza houve uma maior absorção de P, provavelmente devido ao aumento da sua disponibilidade em decorrência da elevação do pH do solo pela cinza, sendo que, no nível 40 e 80, houve diminuição da absorção devido à elevação do pH. No nível 80, em decorrência do alto pH do solo, houve diminuição do efeito da adubação na absorção de P, já que o fósforo aplicado deve ter se tornado menos disponível para a planta.

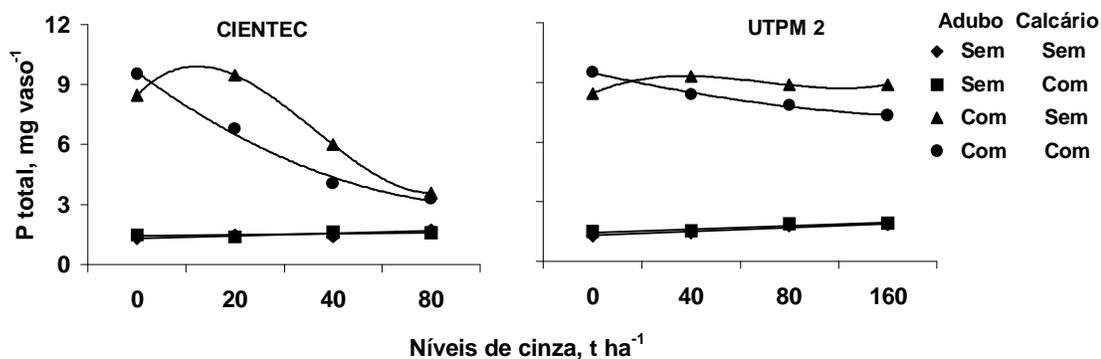


Figura 20 – Quantidade total de fósforo extraída ( mg vaso<sup>-1</sup> ) pelas plantas de feijão cultivadas em vasos num solo Podzólico Vermelho Amarelo, influenciado pela aplicação de doses ( t ha<sup>-1</sup> ) de cinza de carvão mineral, adubação e calagem. Média de três repetições.

Além do pH, a menor absorção de P nos níveis 40 e principalmente 80 CIENTEC deve-se também à quantidade de sais oriundos da cinza, o que, provavelmente, provocou um desequilíbrio fisiológico nas plantas.

Para a cinza UTPM 2 observa-se que a absorção de P em função das doses de cinza não foi significativa para os tratamentos 1, 2 e 3, sendo altamente significativo (  $R^2 = 0,99$  ) para o tratamento 4. Assim como para a cinza CIENTEC o nível de P do solo, provavelmente, foi o que mais influenciou na absorção do elemento.

Observa-se que, apesar de haver um pequeno aumento na absorção de P com o aumento das doses de cinza nos tratamentos 1 e 2, a baixa disponibilidade do elemento no solo ( Tabela 2 ) refletiu-se na baixa absorção do mesmo pelas plantas. Com o provimento do P pela adubação, a absorção foi significativamente maior nos tratamentos 3 e 4.

No tratamento 4 com a calagem, esperar-se-ia uma maior absorção de P do que no tratamento 3, principalmente em decorrência do aumento do pH do solo e do Ca disponível com a mesma, no entanto, isso não aconteceu, ocorrendo uma diminuição significativa linear da absorção do P, com o aumento das doses de cinza notadamente nos níveis 80 e 160. Mesmo assim, observa-se uma absorção significativamente maior de P nos tratamentos 3 e 4 da cinza UTPM 2 nos três níveis do que no nível 40 e 80 da cinza CIENTEC, indicando, com isso, que houve um suprimento adequado de P através da adubação; o que realmente influenciou na absorção de P nestes níveis foi o elevado pH do solo.

#### 4.3.3 – Potássio

Como o teor de K do solo Alto das Canas utilizado no experimento é baixo ( Tabela 2 ) segundo as tabelas de recomendação de adubação e de calagem para os estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina ( CFS / RS – SC, 1995 ), houve resposta significativa da adubação na absorção do elemento pelas plantas para ambas as cinzas ( Figura 21 ).

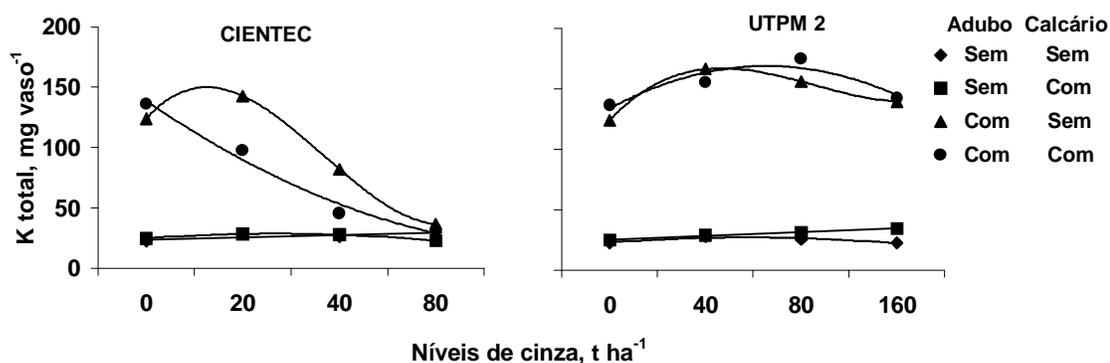


Figura 21 – Quantidade total de potássio extraída ( mg vaso<sup>-1</sup> ) pelas plantas de feijão cultivadas em vasos num solo Podzólico Vermelho Amarelo, influenciado pela aplicação de doses ( t ha<sup>-1</sup> ) de cinza de carvão mineral, adubação e calagem. Média de três repetições.

Apesar de haver um crescimento na absorção total de K em função das doses de ambas as cinzas nos tratamentos 1 e 2, o mesmo não foi significativo. Para a cinza UTPM 2 no tratamento 3 e 4, houve um crescimento significativo estimado pelas equações de regressão com a aplicação de até 46,4 t ha<sup>-1</sup> de cinza no tratamento 3, e de 85,3 t ha<sup>-1</sup> no tratamento 4, decrescendo após estes valores ( Apêndices 7, 27 e 43 ).

Já para a cinza CIENTEC no tratamento 3, houve um crescimento significativo com a aplicação de até 12,8 t ha<sup>-1</sup> de cinza decrescendo após este valor, e no tratamento 4 houve um decréscimo significativo em todas as doses de cinza. A razão para isso, provavelmente seja a elevação do pH com as doses de cinza , o que aumentou as cargas negativas das partículas do solo ( sítios de troca ) e também da cinza, aumentando com isso a adsorção do elemento a esses sítios, diminuindo sua concentração na solução do solo e, por conseqüência, a disponibilidade para as plantas. Esta deve ter sido a razão principal que, no nível 80 desta cinza, nos quatro tratamentos praticamente não houve diferença significativa na absorção de K em decorrência dos altos valores de pH e de serem estes muito próximos. Já para a cinza UTPM 2, como os valores de pH eram mais baixos, observa-se, dentro de cada nível, um efeito maior da adubação.

#### 4.3.4 – Cálcio

O teor de Ca trocável do solo Alto das Canas ( Tabela 2 ) utilizado no experimento é considerado baixo ( CFS / RS - SC, 1995 ). A aplicação de doses crescentes de cinza CIENTEC no tratamento 1, elevou significativamente a absorção do elemento pelas plantas de feijão em aproximadamente 197 %, o que está de acordo com dados obtidos para cinzas similares ( Elsewi et al. 1980 ). Isto ocorreu devido à cinza CIENTEC utilizada ser resultante de processo de dessulfuração e, portanto, apresentar um teor elevado de íons Ca<sup>2+</sup> ( Tabela 3 ), tanto proveniente do CaCO<sub>3</sub> utilizado no processo, como do sulfato de cálcio originado da apreensão do enxofre pelo calcário queimado junto com o carvão ( Elrashidi et al. 1999 ) ( Figura 22, Apêndices 8, 28 e 44 ).

Já no tratamento 2 para a cinza CIENTEC e no tratamento 1 e 2 para a cinza UTPM 2, não houve efeito significativo de cinza na absorção do Ca pelas plantas.

No tratamento 3, mesmo sem calagem, houve para ambas as cinzas, um aumento significativo na absorção do elemento em função dos níveis de cinza, sendo este aumento em torno de 63 % para a cinza CIENTEC e de 23 % para a cinza UTPM 2. Para a cinza CIENTEC isso se deve aos teores de  $\text{Ca}^{2+}$  na mesma; já para a cinza UTPM 2 isto se deve, provavelmente, ao efeito da adubação que melhorou o metabolismo das plantas, aumentando a absorção de nutrientes, refletindo em um melhor rendimento de matéria seca neste tratamento.

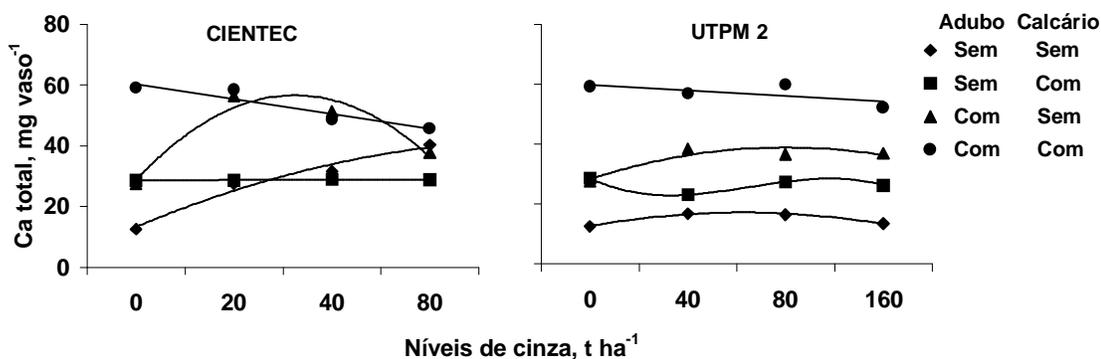


Figura 22 – Quantidade total de cálcio extraída ( $\text{mg vaso}^{-1}$ ) pelas plantas de feijão cultivadas em vasos num solo Podzólico Vermelho Amarelo, influenciado pela aplicação de doses ( $\text{t ha}^{-1}$ ) de cinza de carvão mineral, adubação e calagem. Média de três repetições.

No tratamento 4 houve um decréscimo significativo na absorção do Ca de ~ 25 % para a cinza CIENTEC e de ~ 11 % para a cinza UTPM 2 em função dos níveis crescentes das mesmas; no entanto, nos três níveis da cinza UTPM 2 e no nível 20 da CIENTEC os tratamentos não tiveram diferença significativa do nível zero (testemunha), quando comparado pelo teste bilateral de Dunnett.

Dentro do nível zero de cinza, a absorção do Ca foi maior no tratamento 4, o que era de se esperar, em função da calagem. Neste nível ainda, os tratamentos 2 e 3 não apresentaram diferença significativa, provavelmente em decorrência da adubação fosfatada utilizada, na qual a fonte de fósforo foi o superfosfato triplo ( $3\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ) que foi moído em almofariz e dissolvido em água, o que aumentou sua solubilidade e pronta disponibilidade para a planta.

No nível 20 e 40 da cinza CIENTEC não houve diferença na absorção do Ca entre os tratamentos 3 e 4, provavelmente em função de haver um suprimento adequado do elemento para as plantas provenientes tanto da própria cinza, da calagem e também da adubação fosfatada. Nos tratamentos 1 e 2 destes mesmos níveis também não houve diferença significativa da absorção do elemento, provavelmente porque o suprimento de Ca, tanto pela calagem como pela própria cinza, tenha sido suficiente. Já no nível 80 houve diferença significativa entre os tratamentos 1 e 2, indicando com isso que o suprimento de  $\text{Ca}^{2+}$  proveniente da cinza para as plantas neste nível foi superior ao oriundo da própria calagem.

Para a cinza UTPM 2, observa-se que a absorção do  $\text{Ca}^{2+}$  foi significativamente maior no tratamento 4 e depois no tratamento 3, indicando também a disponibilidade maior do cálcio proveniente do calcário e da adubação fosfatada. Houve uma absorção significativamente maior do elemento no tratamento 2 do que no 1 nos níveis 80 e 160, indicando com isso que a disponibilidade do  $\text{Ca}^{2+}$ , neste caso, era maior no calcário do que nesta cinza.

#### 4.3.5 – Magnésio

O teor de Mg trocável do solo Alto das Canas era médio ( $0,9 \text{ cmol}_c\text{L}^{-1}$ ), muito próximo do limite superior ( $>1,0$ ), que o classificaria como alto, segundo a comissão de fertilidade do solo (CFS / RS - SC, 1995), sendo esta a razão provável dos tratamentos 1 da cinza CIENTEC e 1, 2, 3 e 4 da cinza UTPM 2 serem não significativos, já que o suprimento de  $\text{Mg}^{2+}$  do solo era suficiente (Apêndices 9).

Apesar de não significativa, observa-se uma tendência de aumento na absorção de Mg em função das doses de cinza CIENTEC no tratamento 1. Isto ocorreu devido ao calcário que foi utilizado na queima com o carvão durante a dessulfuração (Tabela 5) possuir um teor elevado de MgO e parte do mesmo estar presente na cinza (Tabela 3). Já para a cinza UTPM 2 isto não ocorre, observando-se nenhuma diferença significativa entre as doses de cinza e o nível zero em nenhum dos tratamentos. Nesta cinza, o que elevou a absorção de Mg foi a adubação e a calagem, esta última, em decorrência da calagem ser feita com uma mistura 3:1 Ca / Mg (Figura 23, Apêndices 9, 29 e 45).

Com a cinza CIENTEC nos tratamentos 2, 3 e 4 a absorção de Mg foi respectivamente 151 %, 129 % e 183 %, aumentando significativamente com a aplicação das doses da mesma.

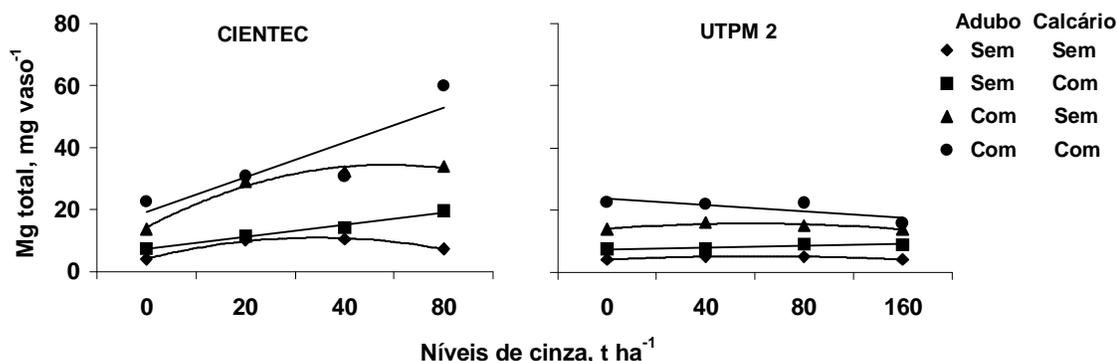


Figura 23 – Quantidade total de magnésio extraída ( mg vaso<sup>-1</sup> ) pelas plantas de feijão cultivadas em vasos num solo Podzólico Vermelho Amarelo, influenciado pela aplicação de doses ( t ha<sup>-1</sup> ) de cinza de carvão mineral, adubação e calagem. Média de três repetições.

#### 4.3.6 – Enxofre

Assim como o N, a disponibilidade de enxofre para as plantas está intimamente ligada ao teor de matéria orgânica do solo e da atividade microbiana do mesmo, uma vez que para ser absorvido pelas plantas o S orgânico deve ser mineralizado pelos microrganismos do solo. A forma principal de absorção do enxofre pelas plantas é como ânion  $\text{SO}_4^{2-}$ .

Pode-se observar que houve um aumento significativo na absorção do S pelas plantas de feijão no tratamento 1 de, aproximadamente, 708 % em função das doses de cinza CIENTEC e por elas possuírem um alto conteúdo de  $\text{SO}_4^{2-}$  proveniente da dessulfuração ( Tabela 3 ). Também nos tratamento 2 e 3 observa-se um aumento significativo da absorção em função das doses desta cinza. No tratamento 4, apesar de não significativo, observa-se também um aumento nesta absorção em função das doses de cinza ( Figura 24, Apêndices 10, 30 e 46 ).

Resultados similares também foram obtidos por Elsewi et al. ( 1978 ) e Page et al. ( 1979 ) com cinza volante alcalina, indicando estar o S na cinza oriunda da dessulfuração disponível para as plantas, podendo ser a mesma uma fonte do elemento para solos pobres dele.

Para a cinza UTPM 2 no tratamento 1 houve um crescimento significativo em função das doses aplicadas, sendo que a absorção na dose equivalente a 40 t ha<sup>-1</sup> foi significativamente maior que o nível zero, indicando neste nível, provavelmente, uma maior mineralização da matéria orgânica presente no solo.

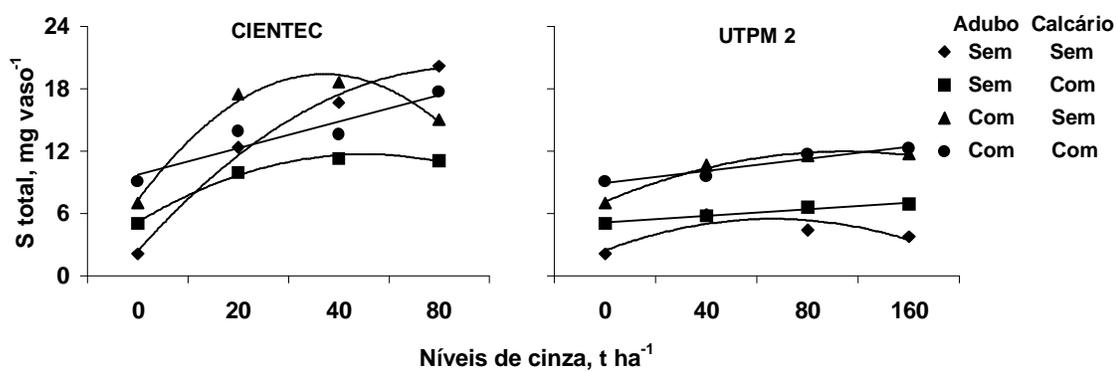


Figura 24 – Quantidade total de enxofre extraída ( mg vaso<sup>-1</sup> ) pelas plantas de feijão cultivadas em vasos num solo Podzólico Vermelho Amarelo, influenciado pela aplicação de doses ( t ha<sup>-1</sup> ) de cinza de carvão mineral, adubação e calagem. Média de três repetições.

A adubação no tratamento 3 também aumentou a absorção do elemento com as doses crescentes de cinza devido, provavelmente, ao aumento na atividade microbiana em decorrência da adubação.

Como a adubação fosfatada foi feita com superfosfato triplo e como o mesmo pode conter até ~ 1,4 % de enxofre, esta pode ter sido uma fonte do elemento para as plantas. Podemos observar nesta cinza em todos os níveis, bem como no nível zero, um efeito benéfico da adubação e da calagem na absorção do S, indicando o provável aumento com esses fatores na mineralização do S da matéria orgânica.

### 4.3.7 – Boro

A absorção de B pelas plantas de feijão não foi influenciada significativamente pelos tratamentos ( adubação e calagem ) nem pelas doses de cinza CIENTEC, exceto no tratamento 3, nível 20, onde houve uma maior absorção do elemento, provavelmente, em decorrência do melhor estado nutricional das plantas neste tratamento. Pela elevação do pH do solo a valores acima de 7 em alguns níveis de cinza CIENTEC, deveria se esperar uma menor absorção do B pelas plantas, já que nestes níveis de pH, o B permanece mais adsorvido às partículas do solo e da matéria orgânica, diminuindo sua concentração na solução do solo e diminuindo assim a disponibilidade para as plantas; no entanto, isso não aconteceu ( Figura 25, Apêndices 13, 33 e 49 ).

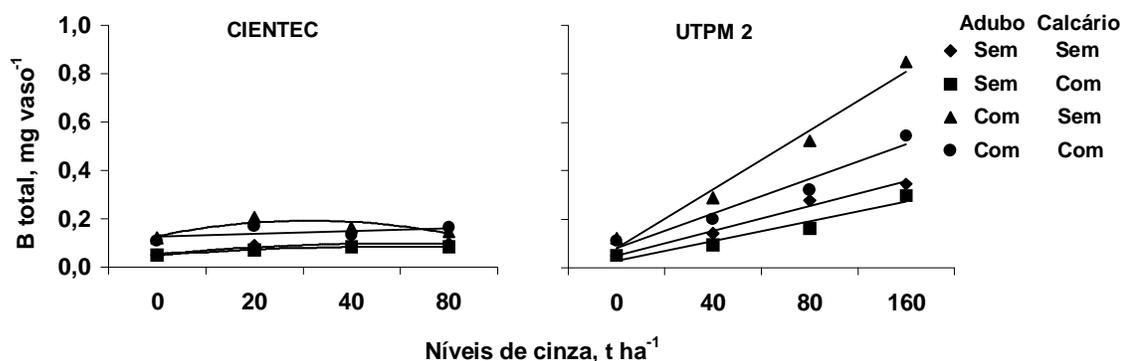


Figura 25 – Quantidade total de boro extraída ( mg vaso<sup>-1</sup> ) pelas plantas de feijão cultivadas em vasos num solo Podzólico Vermelho Amarelo, influenciado pela aplicação de doses ( t ha<sup>-1</sup> ) de cinza de carvão mineral, adubação e calagem. Média de três repetições.

Pelo aumento linear e significativo nos quatro tratamentos e nos níveis crescentes de cinza UTPM 2, concluímos que a mesma deve possuir níveis de B disponíveis para as plantas. Este aumento foi de, aproximadamente, 414 %, 631 % , 598 % e 420 % respectivamente para os tratamentos 1, 2, 3 e 4. Dentro dos níveis de cinza observa-se um aumento significativo da absorção em função da adubação e da calagem.

Na literatura existem vários trabalhos indicando o suprimento de B pela cinza de carvão e até mesmo toxidez ( Elseewi et al. 1981; Gutenmann et al. 1979; Kukier et al. 1994; Phung et al. 1978 ).

### 4.3.8 – Cobre e Zinco

Segundo a comissão de fertilidade do solo ( CFS / RS - SC, 1995 ), os níveis de  $\text{Cu}^{2+}$  (  $0,4 \text{ mg L}^{-1}$  ) e  $\text{Zn}$  (  $0,1 \text{ mg L}^{-1}$  ) no solo Alto das Canas utilizado no experimento são suficientes e baixos, respectivamente ( Tabela 2 ).

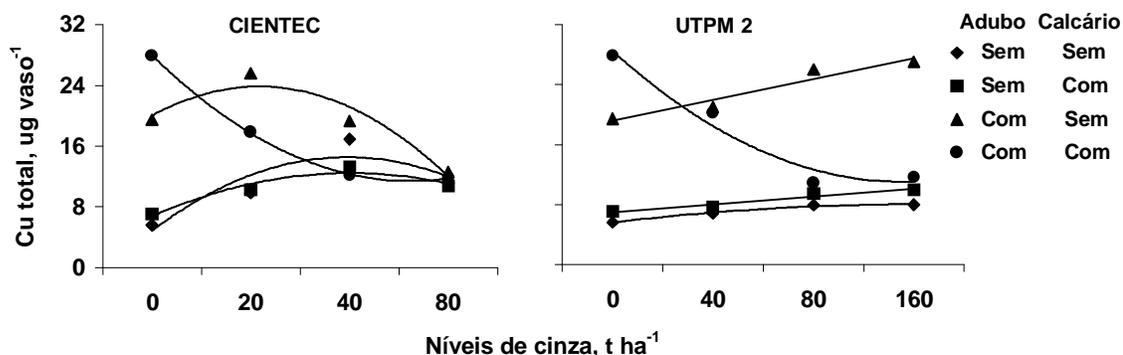


Figura 26 – Quantidade total de cobre extraída (  $\text{mg vaso}^{-1}$  ) pelas plantas de feijão cultivadas em vasos num solo Podzólico Vermelho Amarelo, influenciado pela aplicação de doses (  $\text{t ha}^{-1}$  ) de cinza de carvão mineral, adubação e calagem. Média de três repetições.

A adição de cinza CIENTEC aumentou significativamente a absorção destes elementos pelas plantas nos tratamentos 1 e 3, reduzindo, no entanto, no tratamento 4. No nível zero tem-se um aumento na absorção em função da adubação e da calagem do solo, que tende a diminuir à medida que aumentam os níveis desta cinza aplicados, em consequência do aumento do pH do solo que influencia grandemente na adsorção química do  $\text{Cu}^{2+}$  e do  $\text{Zn}^{2+}$  nas partículas do solo ( óxidos de Al e Fe e superfícies de argilas ) e da matéria orgânica. Esta deve ser a razão de no tratamento 4 haver queda significativa a partir do nível 20 de cinza para ambos elementos. No tratamento 3 há uma pequena suba e depois um decréscimo também devido à variação do pH do solo ( Figuras 26 e 27, Apêndices 16, 17, 36, 37, 52 e 53 ).

A adição de cinza UTPM 2 nos tratamentos 1 e 2 não foi significativa na absorção de Cu e Zn pelo feijão, sendo significativa nos tratamentos 3 e 4. A adição de adubo sem calcário ( tratamento 3 ) aumentou significativamente a absorção destes elementos pelo feijão em função das doses de cinza e, ao contrário, no tratamento 4 ( adubação e calagem ) houve diminuição significativa da absorção em função do aumento do pH do solo pela calagem, tornando estes elementos menos disponíveis para o feijão.

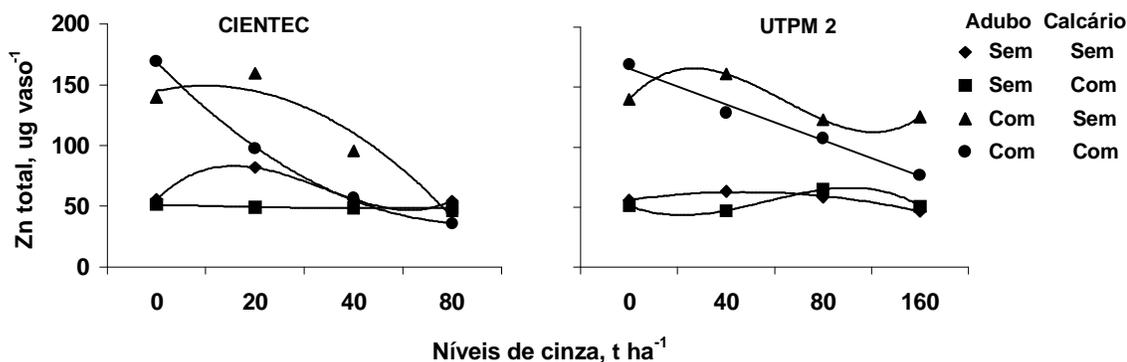


Figura 27 – Quantidade total de zinco extraída ( mg vaso<sup>-1</sup> ) pelas plantas de feijão cultivadas em vasos num solo Podzólico Vermelho Amarelo, influenciado pela aplicação de doses ( t ha<sup>-1</sup> ) de cinza de carvão mineral, adubação e calagem. Média de três repetições.

#### 4.3.9 – Manganês

Assim como o Cu<sup>2+</sup> e o Zn<sup>2+</sup>, a disponibilidade ( toxidez ) de manganês para as plantas é altamente dependente do pH do solo, visto sua adsorção química às superfícies das partículas do solo e da matéria orgânica serem extremamente dependentes do pH, bem como o Mn<sup>2+</sup> poder ser adsorvido eletrostaticamente às cargas negativas do solo e também formar óxidos de Mn<sup>4+</sup> ( MnO<sub>2</sub> ) bastante insolúveis, diminuindo sua disponibilidade para as plantas.

Para ambas as cinzas, a absorção de Mn pelas plantas decresceu significativamente em função das doses de cinza nos tratamentos 1, 3 e 4, sendo este decréscimo muito maior para a cinza CIENTEC em função da elevação do pH do solo com o aumento do nível desta cinza. Zafnejad et al. ( 1998 ) também obtiveram reduções significativas na concentração de Mn e Al com adição de cinza da dessulfuração, em decorrência da elevação do pH do solo ( Figura 28, Apêndices 11, 31 e 47 ).

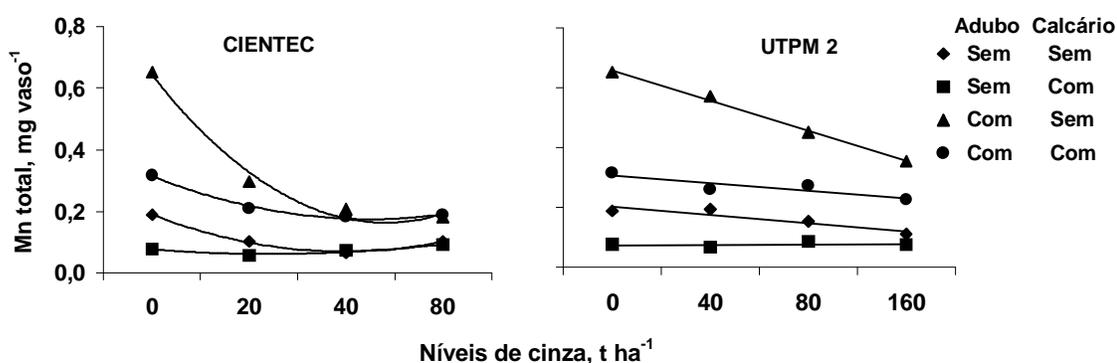


Figura 28 – Quantidade total de manganês extraída ( mg vaso<sup>-1</sup> ) pelas plantas de feijão cultivadas em vasos num solo Podzólico Vermelho Amarelo, influenciado pela aplicação de doses ( t ha<sup>-1</sup> ) de cinza de carvão mineral, adubação e calagem. Média de três repetições.

Também como o Cu e Zn, para a cinza UTPM 2, a calagem no tratamento 4 diminui significativamente a absorção quando comparado ao tratamento 3 em função da elevação do pH pela mesma.

#### 4.3.10 – Ferro - Alumínio - Sódio

Não houve efeito significativo das doses de cinza UTPM 2 na absorção de ferro em nenhum tratamento, assim como da cinza CIENTEC nos tratamentos 1 e 2. Observa-se para as cinzas um efeito da adubação e calagem, que deve ser reflexo da melhor nutrição das plantas, o que representou uma melhor absorção de praticamente todos os nutrientes ( Figura 29, Apêndices 14, 34 e 50 ).

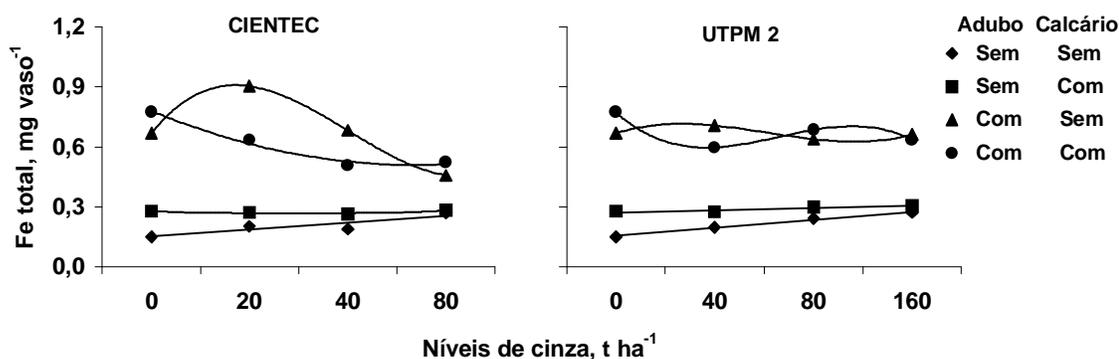


Figura 29 – Quantidade total de ferro extraída ( mg vaso<sup>-1</sup> ) pelas plantas de feijão cultivadas em vasos num solo Podzólico Vermelho Amarelo, influenciado pela aplicação de doses ( t ha<sup>-1</sup> ) de cinza de carvão mineral, adubação e calagem. Média de três repetições.

O comportamento do Al foi muito semelhante ao Fe, sendo a absorção pelas plantas de feijão significativa em função das doses de cinza UTPM 2 apenas no tratamento 3 desta cinza, sendo não significativo para todos os demais tratamentos de ambas cinzas. Também, exceto no nível 20 da cinza CIENTEC e no nível 40 da cinza UTPM 2 do tratamento 3 ( com adubo e sem calcário ), em todos os demais níveis de cinza não houve diferença significativa na absorção de Al<sup>3+</sup> pelas plantas. Deve-se observar que esses dois níveis foram os que apresentaram uma maior produção de matéria seca; portanto, essa maior absorção deve ser um reflexo desta maior produção ( Figura 30, Apêndices 15, 35 e 51 ).

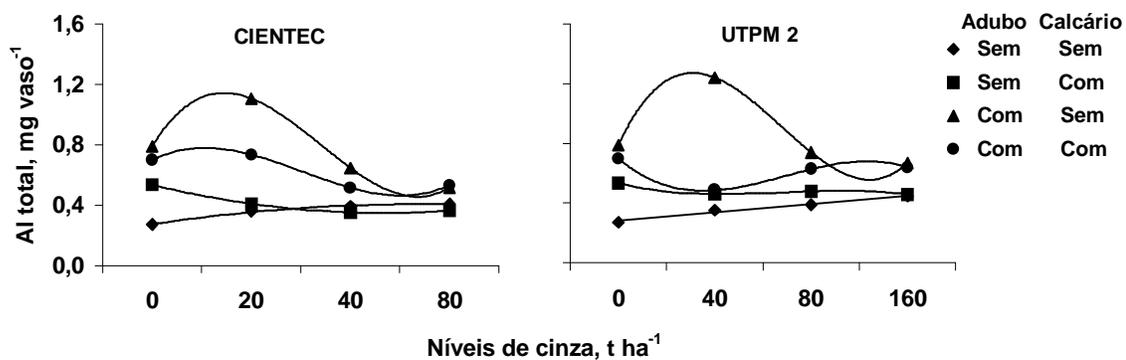


Figura 30 – Quantidade total de alumínio extraída (  $\text{mg vaso}^{-1}$  ) pelas plantas de feijão cultivadas em vasos num solo Podzólico Vermelho Amarelo, influenciado pela aplicação de doses (  $\text{t ha}^{-1}$  ) de cinza de carvão mineral, adubação e calagem. Média de três repetições.

Assim como o Al, a absorção de Na não foi significativa em nenhum dos tratamentos com cinza CIENTEC. Com a cinza UTPM 2 foi significativo nos tratamentos 2 e 4, tendo, no entanto, um valor significativo maior que o nível zero, apenas no nível 160 do tratamento 2, indicando com isso não ser o Na nem o Fe nem o Al, os elementos que poderiam prejudicar o rendimento de culturas quando plantadas com estas cinzas ( Figura 31, Apêndices 12, 32 e 48 ).

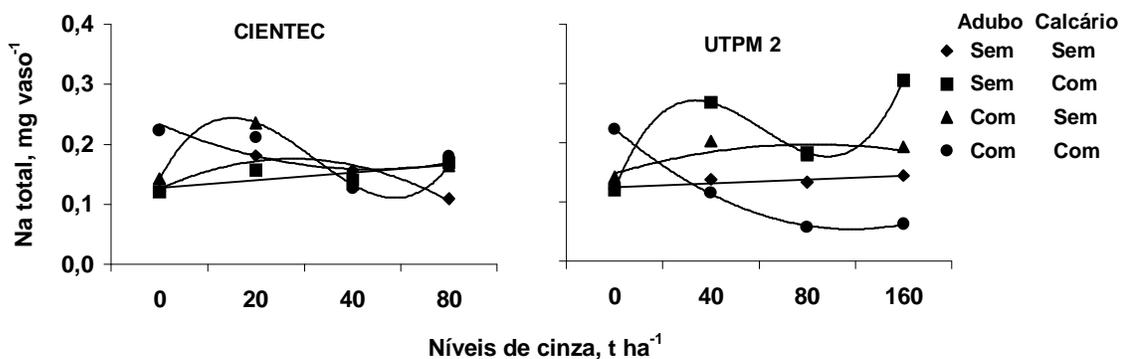


Figura 31 – Quantidade total de sódio extraída (  $\text{mg vaso}^{-1}$  ) pelas plantas de feijão cultivadas em vasos num solo Podzólico Vermelho Amarelo, influenciado pela aplicação de doses (  $\text{t ha}^{-1}$  ) de cinza de carvão mineral, adubação e calagem. Média de três repetições.

#### 4.3.11 – Níquel - Chumbo - Cromo - Cádmiio

A absorção de cádmio pelas plantas de feijão, em todos os tratamentos e em todos os níveis de cinza, foi  $\leq$  do que 1 ( Apêndice 57 ), indicando com isso que este elemento nestas cinzas utilizadas não apresenta nenhum problema para as plantas. Também a absorção de níquel e de chumbo, em função das doses de ambas as cinzas, não apresentou em nenhum tratamento e em nenhum nível de cinza, aumento significativo em relação ao nível zero ( testemunha ) ( Figuras 32 e 33, Apêndices 18, 19, 38, 39, 54 e 55 ).

Em relação ao cromo, observa-se um aumento significativo no nível 80 de cinza CIENTEC no tratamento 1 em relação ao nível zero; no entanto, o valor encontrado neste nível foi menor do que o encontrado no nível zero com adubação e com e sem calagem ( Figura 34, Apêndices 20, 40 e 56 ).

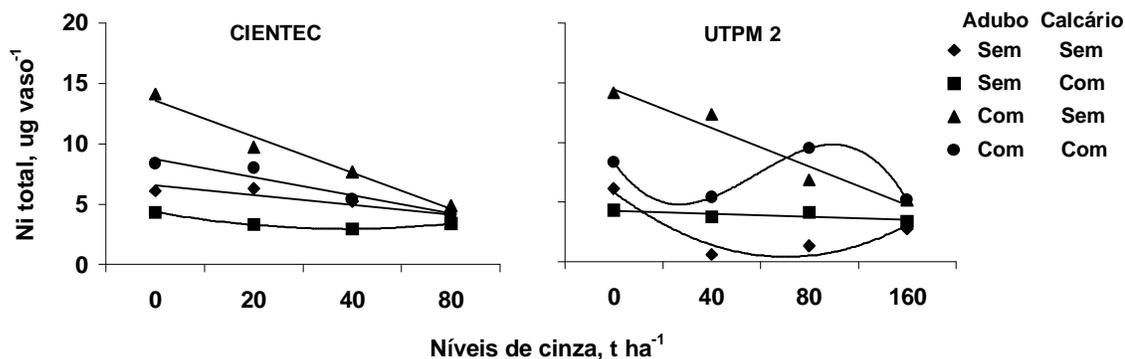


Figura 32 – Quantidade total de níquel extraída (  $\text{mg vaso}^{-1}$  ) pelas plantas de feijão cultivadas em vasos num solo Podzólico Vermelho Amarelo, influenciado pela aplicação de doses (  $\text{t ha}^{-1}$  ) de cinza de carvão mineral, adubação e calagem. Média de três repetições.

Para ambas as cinzas observam-se para o Ni e Pb uma maior absorção em função da adubação sem calagem, fato este, comum também aos nutrientes, provavelmente, em decorrência do melhor equilíbrio nutricional nestas condições. Observa-se também um efeito do pH do solo na diminuição da absorção de Ni, em função dos níveis crescentes de cinza CIENTEC.

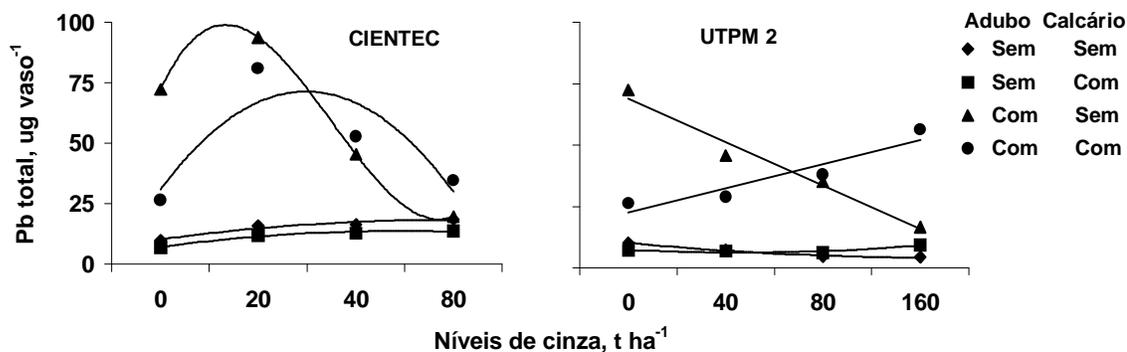


Figura 33 – Quantidade total de chumbo extraída (  $\text{mg vaso}^{-1}$  ) pelas plantas de feijão cultivadas em vasos num solo Podzólico Vermelho Amarelo, influenciado pela aplicação de doses (  $\text{t ha}^{-1}$  ) de cinza de carvão mineral, adubação e calagem. Média de três repetições.

Pelos valores obtidos de absorção total, não se consegue distinguir nenhum elemento que possa ter causado toxidez nos níveis mais altos de ambas as cinzas; no entanto, pelos pontos necróticos existentes nas folhas de feijão, sabe-se que houve transtornos metabólicos para as plantas de feijão que pode ter sido causado por excesso de sais e / ou toxidez de algum outro elemento não determinado neste estudo ( Figuras 17 e 19 ).

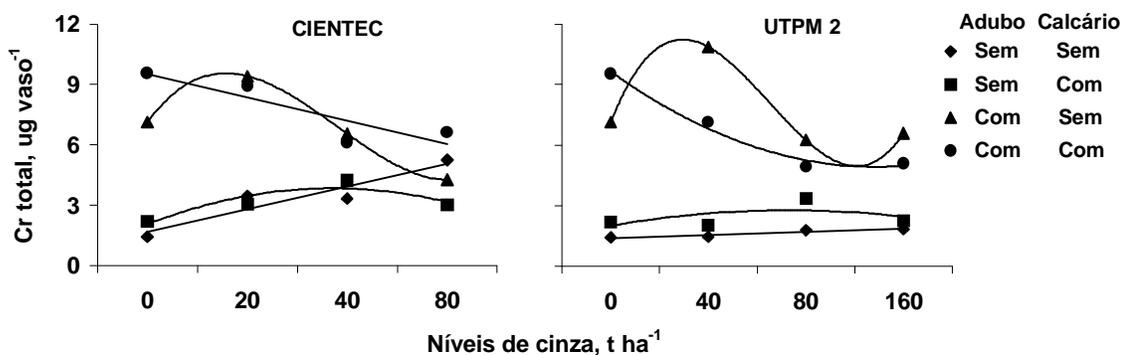


Figura 34 – Quantidade total de cromo extraída (  $\text{mg vaso}^{-1}$  ) pelas plantas de feijão cultivadas em vasos num solo Podzólico Vermelho Amarelo, influenciado pela aplicação de doses (  $\text{t ha}^{-1}$  ) de cinza de carvão mineral, adubação e calagem. Média de três repetições.

Como um dos objetivos desse trabalho foi determinar se as cinzas poderiam ser usadas como fonte de nutrientes para as culturas agrícolas, a interpretação dos dados de absorção foi realizada em função da quantidade total de cada elemento extraído pela cultura. ( Figuras 18, 20 a 34 ). No entanto, uma vez que a toxicidade e as deficiências nas plantas estão associadas às concentrações no tecido, esses dados também foram analisados e encontram-se nos Apêndices 41 a 57.

Analisando-se os teores ( % ) dos elementos no tecido das plantas de feijão ( Apêndices 41 a 57 ) apenas para o enxofre, encontram-se níveis significativamente maiores em todos os níveis de cinza CIENTEC e em todos os tratamentos do que no nível zero. Isso se refletiu também numa absorção total significativamente maior deste elemento em todos os tratamentos com as doses crescentes de cinza CIENTEC ( Figura 19 ).

Dos elementos analisados, considerando somente o efeito da cinza ( tratamento sem adubo e sem calcário ), apenas o cálcio e o enxofre - com a aplicação das doses crescentes da cinza CIENTEC - apresentaram teores no tecido de feijão significativamente maiores do que a testemunha ( Apêndices 44 e 46 ).

Para a cinza UTPM 2, considerando também somente o efeito da cinza, apenas o teor de enxofre e boro no tecido de feijão, foram significativamente maiores do que a testemunha com aplicação das doses crescentes da cinza ( Apêndices 46 e 49 ).

Considerando ainda o efeito apenas da cinza, observa-se que os teores de manganês e de níquel no tecido de feijão foram significativamente menores do que a testemunha em todos os níveis de cinza CIENTEC e UTPM 2 ( Apêndices 47 e 54 ).

O teor, no tecido de feijão dos demais elementos analisados, não mostrou diferenças significativas em relação à testemunha com a aplicação das doses crescentes de ambas as cinzas.

Importante ainda é salientar que a concentração no tecido das plantas de feijão dos elementos traços analisados ( Ni, Pb, Cr e Cd ) em função das doses crescentes de ambas as cinzas e em todos os tratamentos, não mostraram aumentos significativas em relação à testemunha, indicando que estes elementos sozinhos não foram os responsáveis pelos sintomas de toxidez apresentados pelas plantas em alguns tratamentos nos níveis maiores das cinzas ( Apêndices 54, 55, 56 e 57 ).

#### 4.4 - Experimento em casa de vegetação com antracnose

Apenas a dose 80 da cinza UTPM sem adubo, mostrou efeito quanto à suscetibilidade das plantas de feijoeiro quando inoculadas com patógeno da antracnose, sendo que neste tratamento as plantas mostraram-se resistentes à doença, devendo-se isto provavelmente ao aumento do teor de Si no tecido das mesmas. A figura 35 mostra uma planta de feijão ( seta ) infectada com antracnose.

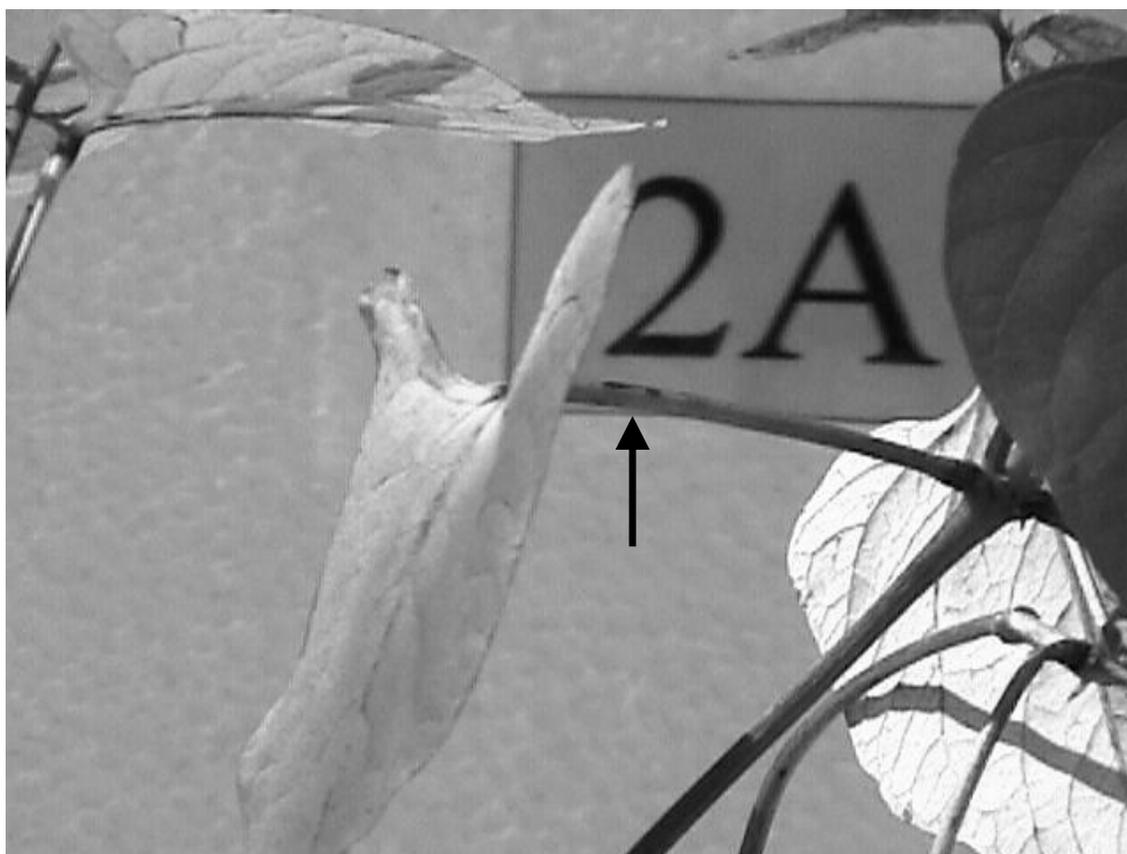


Figura 35 – Infecção de antracnose em plantas de feijão cultivadas em solo Podzólico Vermelho Amarelo que recebeu dose equivalente a  $40 \text{ t ha}^{-1}$  de cinza UTPM 2

Provavelmente, a utilização da cinza UTPM 2 no nível mais alto tornou as plantas mais resistentes à antracnose por diminuir a concentração de biomoléculas pequenas ( açúcares livres, aminoácidos, ácidos graxos, etc. ) na seiva da planta, segundo a teoria da trofobiose ( Chaboussou, 1967 e 1982 ). Por esta teoria, as plantas que apresentam seiva com maiores teores dessas biomoléculas pequenas são mais atrativas a pragas e doenças, portanto, tornando-as mais suscetíveis a esses patógenos indesejáveis.

O aumento provável na concentração de Si no tecido do feijão trouxe esses dois efeitos no aumento da resistência à antracnose: químico e físico. O químico pode ser explicado pela teoria acima, e o físico pode ser explicado pelo aumento da resistência das paredes celulares (resistência mecânica) em decorrência dos teores de Si, o que dificultaria a penetração das hifas do fungo nessas células ( Lima F<sup>o</sup> et al., 1999 ).

## 5. CONCLUSÕES

A cinza atualmente produzida pela UTPM, se coletada seca dos precipitadores eletrostáticos, apresenta pH alcalino ( cinza UTPM 2 ), no entanto, se coletada úmida, apresenta pH ácido ( cinza UTPM 1 ).

A adição de doses crescentes de cinza UTPM 1 aumentou a acidez do solo, a pesar disso, quando aplicada ao solo até 12 % v v<sup>-1</sup> sem adubação e 14 % v v<sup>-1</sup> com adubação, aumentou o rendimento de matéria seca de feijão. A aplicação de doses crescentes dessa cinza aumentou a concentração de N P K na parte aérea do feijão, não modificando a de Ca.

A cinza UTPM 2, apesar do seu pH elevado quando não intemperizada, não foi eficiente para corrigir a acidez do solo, aumentando, no entanto, a produção de matéria seca de feijão quando aplicada ao solo com adubação.

As cinzas resultantes do processo de dessulfuração, tanto a produzida na URCAMP quanto a produzida na CIENTEC, foram eficientes para a correção da acidez do solo, podendo substituir o calcário nesse propósito. Essas cinzas apresentaram uma equivalência em carbonato de cálcio de 3,75 % e 16,8 % respectivamente.

Pela metodologia descrita para calcário, não foi possível determinar por titulação em laboratório, para as cinzas UTPM 2 e URCAMP, o valor de neutralização da acidez do solo dessas cinzas. Entretanto, para a cinza CIENTEC, essa determinação mostrou valores muito próximos aos obtidos por incubação.

Com adubação N P K adequada, houve aumento no rendimento de matéria seca de feijão com aplicação correspondente a 15,2 e 39,4 t ha<sup>-1</sup> de cinza CIENTEC e UTPM 2, respectivamente.

A aplicação de cinza CIENTEC aumentou a absorção de S, Mg, Ca e N, diminuiu a de Ni, Mn, Cu e Zn e não influenciou na absorção de B pelas plantas de feijão. A adição de cinza UTPM 2 ao solo aumentou significativamente a absorção pelas plantas de feijão dos elementos B e S e diminuiu de Mn.

A aplicação de doses crescentes de cinzas CIENTEC e UTPM 2 não afetou a absorção pelas plantas de feijão dos elementos traços testados ( Cd, Cr e Pb ), indicando com isso, não haver problemas de toxidez desses elementos para essas plantas.

A adição de cinza UTPM 2 ao solo sem adubação aumentou a resistência do feijão ao patógeno da antracnose.

Os teores de enxofre encontrados na cinza URCAMP e, principalmente CIENTEC, mostram que o calcário foi efetivo na captura do elemento quando da queima do carvão no processo de dessulfuração.

Para que se possa utilizar essas cinzas na agricultura, outros experimentos devem ser conduzidos em casa de vegetação e , principalmente, em condições de campo.

As doses utilizadas de cinza CIENTEC no experimento em casa de vegetação foram muito altas, elevando o pH do solo Alto das Canas a valores não desejáveis para o cultivo agrícola.

A resposta das plantas de feijão à adubação e à calagem do solo Alto das Canas, mostra que esse solo utilizado apresenta problemas de fertilidade natural, sendo este fator mais limitante ao desenvolvimento da cultura do que sua acidez.

Considerando somente o efeito da cinza, dentre os elementos analisados, apenas o enxofre e o cálcio apresentaram concentrações no tecido de feijão significativamente maiores com a aplicação das doses crescentes de cinza CIENTEC do que a testemunha.

## **6. SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS**

Como no Brasil, em escala industrial, ainda não se emprega nenhuma técnica de dessulfuração, não há geração de quantidades significativas de cinza sulfatada, a não ser em plantas pilotos, para que se possa realizar com a mesma, experimentos com outros solos e em condições de campo.

Desta forma, sugere-se uma maior atenção à cinza atualmente gerada, a qual mostrou um grande potencial para utilização na agricultura. Para isso, deve-se conduzir com essa cinza experimentos com outros solos e culturas, em casa de vegetação, com vasos maiores, para que as plantas utilizadas possam completar seu ciclo e também possam ser analisados os teores de elementos traços nos grãos e em outras partes comestíveis das plantas.

Deve-se também realizar, após experimentos em casa de vegetação, outros a campo, visando aferir resposta da cinza em aumentar o rendimento das culturas. Como a cinza é extremamente pobre em carbono orgânico, sugere-se que ela seja aplicada junto com resíduos ricos em matéria orgânica, tais como, lodo de estações de tratamento de esgoto, de lixo ou, ainda, cama de animais.

No tecido das plantas devem ser analisados, entre outros elementos, o silício e o selênio, e também, analisado o efeito da cinza na resistência da planta ao ataque de insetos.

Sugere-se, por fim, uma amostragem significativa e seqüenciada da cinza produzida na Usina Termelétrica Presidente Médici, coletada dos precipitadores eletrostáticos e a coletada úmida para análises laboratoriais, visando determinar sua variabilidade.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADRIANO, D.C.; WOODFORD, T.A.; CIRAVOLO, T.G. Growth and elemental composition of corn and bean seedlings as influenced by soil application of coal ash. **Journal of Environmental Quality**, v.7, n.3, p.416-421, 1978.

ADRIANO, D.C. et al. Utilization and disposal of fly ash and other coal residues in terrestrial ecosystems: a review. **Journal of Environmental Quality**. v.9, n.3, p.333-344, 1980.

ADRIANO, D.C. et al. Cadmium availability to sudangrass grown on soils amended with sewage sludge and fly ash. **Journal of Environmental Quality**, v.11, n.2, p.197-203, 1982.

AITKEN, R.L.; BELL, L.C. Plant uptake and phytotoxicity of boron in Australian fly ashes. **Plant and Soil**, v.84, p.245-257, 1985.

AITKEN, R.L.; CAMPBELL, D.J.; BELL, L.C. Properties of Australian fly ashes relevant to their agronomic utilization. **Australian Journal of Soil Research**, v.22, n.4, p.443-453, 1984.

BHUMBLA, D.K. et al. Comparison of two methods for predicting trace elements from fly ash on acid mine spoils. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v.27, n.5-8, p.877-890, 1996.

BRASIL . Ministério de Minas e Energia. Departamento Nacional de Produção Mineral. **Informativo Anual da Indústria Carbonífera**, DNPM, Brasília, 1996.

BRASIL. Ministério da Agricultura. Departamento Nacional de Pesquisa Agropecuária. Divisão de Pesquisa Pedológica **Levantamento de Reconhecimento dos Solos do Estado do Rio Grande do Sul**. Recife, 1973. 431p. ( Boletim Técnico, 30 ).

BROWN, T.H.; BLAND, A.E.; WHEELDON, J.M. Pressurized fluidized bed combustion ash. **Fuel**, v.76, n.8, p.741-748, 1997.

- CARLSON, C.L. & ADRIANO, D.C. Growth and elemental content of two tree species growing on abandoned coal fly ash basins. **Journal of Environmental Quality**, v.20, p.581-587, Jul.-Sep. 1991.
- CARLSON, C.L. & ADRIANO, D.C. Environmental impacts of coal combustion residues. **Journal of Environmental Quality**, v.22, p.227-247, Apr.-Jun. 1993.
- CENTRO DE INFORMAÇÕES SOBRE O CARVÃO. **Carvões Minerais do Brasil. Características de Carvões Brutos do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre, 1980.
- CERVELLI, S. et al. Soil nitrogen and fly ash utilization: a laboratory investigation. **Agrochimica**, v.30, n.1-2, p.27-35, 1986.
- CERVELLI, S.; PETRUZZELLI, G.; PERNA, A. 1987. Fly ashes as an emendment in cultivated soils. I. Effect on mineralization and nitrification. **Water, Air, and Soil Pollution**, v.33, p.331-338, 1987.
- CHABOUSSOU, F. La trophobiose ou les rapports nutritionnels entre la plante-hôte et ses parasites. **Annales de la Societe Entomologique de France**, v.3, n.3, p.797-, 1967.
- CHABOUSSOU, F. Plants made sick by pesticides. **La Recherche**, v.13, n.130, p.273-, 1982.
- CHANG, A.C. et al. Physical Properties of fly ash amended soils. **Journal of Environmental Quality**, v.6, n.3, p.267-270, 1977.
- CHERKAUER, D.S. The effect of fly ash disposal on a shallow ground-water system. **Ground Water**, v.18, n.6, p.544-550, 1980.
- CLARK, R.B. et al. Grass and Legume growth on acid soil amended with FGD By-products. Part IX. Agricultural Applications. In: INTERNATIONAL ASH UTILIZATION SYMPOSIUM, Lexington. **Proceedings...** Lexington: University of Kentucky, Center for Applied Energy Research, 1995.
- CLARK, R.B. et al. Growth of forages on acid soil amended with flue gas desulfurization by-products. **Fuel**, v.76, n.8, p.771-775, 1997.
- COMISSÃO DE FERTILIDADE DO SOLO – CFS / RS – SC. **Recomendações de adubação e de calagem para os estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina**. 3.ed. Passo Fundo, SBCS – Núcleo Regional Sul, 1995. 224p.

DORAN, J.W.; MARTENS, D.C. 1972. Molybdenum availability by application of fly ash to soil. **Journal of Environmental Quality**, v.1, n.2, p.186-189, 1972.

EARY, L.E. et al. Geochemical factors controlling the mobilization of inorganic constituents from fossil fuel combustion residues: II. Review of the minor elements. **Journal of Environmental Quality**, v.19, n.3, p.202-214, Apr.-Jun. 1990.

EGEMEN, E. & YURTERI, C. Release of metal ions from fly ash deposits: a case study. **SWEMP**, v.94, p.529-540, 1994.

EL-MOGAZI, D.; LISK, D.J.; WEINSTEIN, L.H. A review of physical, chemical, and biological properties of fly ash and effects on agricultural ecosystems. **The Science of the Total Environment**, v.74, p.1-37, 1988.

ELRASHIDI, M.A. et al. Chemical composition of leachate of dairy manure mixed with fluidized bed combustion residue. **Journal of Environmental Quality**, v.28, p.1243-1251, Jul.-Aug.1999.

ELSEEWI, A.A.; BINGHAM, F.T.; PAGE, S.L. Availability of sulfur in fly ash to plants. **Journal of Environmental Quality**, v.7, n.1, p.69-73, 1978.

ELSEEWI, A.A. et al. Boron enrichment of plants and soils treated with coal ash. **Journal of Plant Nutrition**, v.3, n.1-4, p.409-427, 1981.

ELSEEWI, A.A.; STRAUGHAN, I.R.; PAGE, A.L. Sequential cropping of fly ash-amended soils: Effects on soil chemical properties and yield and elemental composition of plants. **The Science of the Total Environment**, v.15, p.247-259, 1980.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Brasília, 1999. 412 p.

FAIL JR., J.L. Growth response of two grasses and a legume on coal fly ash amended strip mine spoils. **Plant and Soil**, v.101, p.149-150, 1987.

FLORES, E.M.M. **Utilização de Amostras Ambientais das Regiões de Candiota e de Charqueadas ( RS ) como Bioindicadores de Poluição**. Santa Maria, 1990. 158p. Dissertação ( Mestrado em Química ) - Curso de Pós-Graduação em Química da UFSM.

FRANCIS, C.W.; DAVIS, E.C.; GOYERT, J.C. Plant uptake of trace elements from coal gasification ashes. **Journal of Environmental Quality**, v.14, n.4, p.561-569, 1985.

FURR, A.K. et al. Multielement residues in tissues of guinea pigs fed sweet clover grown on fly ash. **Archives Environmental Health**, v.30, p.244-248, May 1975.

FURR, A.K. et al. Multielemental uptake by vegetables and millet grown in pots on fly ash amended soil. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v.24, n.4, p.885-888, 1976.

FURR, A.K. et al. National survey of elements and radioactivity in fly ashes: Absorption of elements by cabbage grown in fly ash-soil mixtures. **Environmental Science & Technology**, v.11, n.13, p.1194-1201, 1977.

FURR, A.K. et al. Elemental content of vegetables, grains, and forages field-grown on fly ash amended soil. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v.26, n.2, p.357-359, 1978.

FURR, A.K. et al. Elemental content of apple, millet, and vegetables grown in pots of neutral soil amended with fly ash. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v.27, n.1, p.135-138, 1979.

GANGLOFF, W.J. et al. Field study: influence of fly ash on leachate composition in an excessively drained soil. **Journal of Environmental Quality**, v.26, p.714-723, May-Jun.1997.

GHODRATI, M; SIMS, J.T.; VASILAS, B. L. Evaluation of fly ash as a soil amendment for the Atlantic Coastal Plain: I. Soil hydraulic properties and elemental leaching. **Journal Water Soil Air Pollution**, v.81, p.349-361, 1995.

GOEPFERT, C.F.; BENDJOYA, B.; POMBO, L.A. Efeito da cinza de carvão de pedra sobre o rendimento de bulbos de cebola (*Allium cepa L.*) e as propriedades físicas e químicas do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, n.4, p.96-99, 1980.

GONÇALVES, P.R. **Caracterização química do solo regenerado em Candiota / RS.** Pelotas – RS, 1999. 74p. Dissertação ( Mestrado em Química ). Universidade Federal de Pelotas.

GORMAN, J.M. et al. Erodibility of fly ash used as a topsoil substitute in mineland reclamation. **Journal of Environmental Quality**, v.29, p.805-811, May-Jun.2000.

GUTENMANN, W.H. et al. Arsenic, boron, molybdenum, and selenium in successive cuttings of forage crops field grown on fly ash amended soil. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v.27, n.6 p.1393-1395, 1979.

JACKSON, B.P. et al. Trace element solubility from land application of fly ash/organic waste mixtures. **Journal of Environmental Quality**, v.28, p.639-647, Mar-Apr. 1999.

KLUBEK, B. et al. Characterization of microbial abundance and activity from three coal ash basins. **Soil Biology & Biochemistry**, v.24, n.11, p.1119-1125, 1992.

KOPSICK, D. A.; ANGINO, E.E. Effect of leachate solutions from fly and bottom ash on groundwater quality. **Journal of Hydrology**, v.54, p.341-356, 1981.

KUKIER, U.; SUMNER, M.E.; MILLER, W.P. Boron release from fly ash and its uptake by corn. **Journal of Environmental Quality**, v.23, p.596-603, May-Jun. 1994.

LIMA F<sup>o</sup>, O.F.; LIMA, M.T.G. de; TSAI, S.M. Supressão de Patógenos em solos induzida por agentes abióticos: o caso do silício. **Potafos - Informações Agronômicas**. Piracicaba, 1999, 16p. ( Boletim Técnico, 87 ). Encarte Técnico, p.1-12.

MACHADO, M.O. et al. Efeito da adubação orgânica e mineral na produção do arroz irrigado e nas propriedades químicas e físicas do solo de Pelotas. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.18, n.6, p.583-591, 1983.

MACHADO, M.O. et al. Efeito da cinza de carvão-de-pedra na cultura do arroz irrigado e sobre algumas propriedades químicas do solo. In: REUNIÃO DA CULTURA DO ARROZ IRRIGADO, XIII, 1984, Florianópolis, SC. **Anais...** p.202-210.

MACHADO, M.O. et al. Adubação orgânica e mineral na cultura do arroz irrigado, no solo Pelotas. I – Efeito sobre a produtividade. In: REUNIÃO DA CULTURA DO ARROZ IRRIGADO, XIV, 1985a, Pelotas, RS. **Anais...** p.187-195.

MACHADO, M.O. et. al. Adubação orgânica e mineral na cultura do arroz irrigado, no solo Pelotas. II – Efeito sobre as propriedades químicas do solo. In: REUNIÃO DA CULTURA DO ARROZ IRRIGADO, XIV, 1985b, Pelotas, RS. **Anais...** p.196-201.

MALAVOLTA, E. Potássio, Magnésio e Enxofre nos solos e culturas brasileiras. **Associação Brasileira para a Pesquisa da Potassa e do Fosfato**. Piracicaba, 1982. 91p. ( Boletim Técnico, 4 ).

- MALAVOLTA, E. Efeitos de doses e fontes de enxofre em culturas de interesse econômico. **Centro de Pesquisa e Promoção do Sulfato de Amônio**. São Paulo, 1984. 60p. ( Boletim Técnico, 3 ).
- MARTENS, D.C.; SCHNAPPINGER, M.G. Jr. ; ZELAZNY, L.W. 1970. The plant availability of potassium in fly ash. **Soil Science Society of America Proceedings**, v.34, p.453-456, 1970.
- MARTENS, D.C. Availability of plant nutrients in fly ash. **Compost Science**, v.12, p.15-19, Nov.-Dec. 1971.
- MATTIGOD, S.V. et al. Geochemical factors controlling the mobilization of inorganic constituents from fossil fuel combustion residues: I. Review of the major elements. **Journal of Environmental Quality**, v.19, p.188-201, Apr.-Jun. 1990.
- MATTOS, H.B. et al. Calagem e adubação de pastagens. **Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato**. Piracicaba, 1986. 476p.
- MBAGWU, J.S.C. Selenium concentrations in crops grown on low-selenium soils as affected by fly-ash amendment. **Plant and Soil**, v.74, p.75-81, 1983.
- MOLINER, A.M.; STREET, J.J. Effect of fly ash and lime on growth and composition of corn ( *Zea mays* L. ) on acid sandy soils. **Soil and Crop Science Society of Florida**, v.41, p.217-220, 1982.
- MORSCH, V.M. **Investigação do grau de contaminação de solos e de sedimentos das regiões de Candiota e de Charqueadas ( RS ) com elementos traço de relevância ambiental**. Santa Maria, 1991. 134p. Dissertação ( Mestrado em Química ) - Curso de Pós-Graduação em Química da UFSM.
- MULFORD, F.R.; MARTENS, D.C. Response of alfalfa to boron in fly ash. **Soil Science Society of America Proceedings**, v.35, p.296-300, 1971.
- MULHERN, D.W. et al. Vegetation of waste disposal areas at a coal-fired power plant in Kansas. **Journal of Environmental Quality**, v.18, p.285-292, Jul.-Sep. 1989.
- PAGE, A.L.; ELSEEWI, A.A.; STRAUGHAN, I.R. Physical and chemical properties of fly ash from coal-fired power plants with reference to environmental impacts. **Residue Review**, v.71, p 83-120, 1979.

PETRUZZELLI, G.; LUBRANO, L.; CERVELLI, S. Heavy metal uptake by wheat seedlings grown in fly ash-amended soils. **Water, Air, and Soil Pollution**, v.32, p.389-395, 1987.

PHUNG, H.T.; LUND, L.J.; PAGE, A.L. Potential use of fly ash as a liming material. In: ADRIANO, D.C. & BRISBIN, I.L. ( ed. ) **Environmental chemistry and cycling processes**. U.S. Dep. of Commerce, Springfield, VA. p.504-515, 1978.

PICHTEL, J. R. Microbial respiration in fly ash / sewage sludge - amended soils. **Environmental Pollution**, v.63, p.225-237, 1990.

PICHTEL, J.R.; HAYES, J.M. Influence of fly ash soil microbial activity and populations. **Journal of Environmental Quality**, v.19, p.593-597, Jul.-Sep. 1990.

PICHTEL, J.R.; DICK, W.A.; SUTTON, P. Comparison of amendments and management practices for long-term reclamation of abandoned mine lands. **Journal of Environmental Quality**, v.23, p.766-772, Jul.-Aug. 1994.

PLANK, C.O.; MARTENS, D.C. Boron availability as influenced by application of fly ash to soil. **Soil Science Society of America Proceedings**, v.38, p.974-977, 1974.

PLANK, C.O.; MARTENS, D.C.; HALLOCK, D.L. Effect of soil application of fly ash on chemical composition and yield of corn ( *Zea Mays* L. ) and on chemical composition of displaced soil solutions. **Plant and Soil**, v.42, p.465-476, 1975.

QUEROL, X.; FERNÁNDEZ-TURIEL, J.L.; LOPEZ-SOLER, A. 1995. Trace elements in Spanish subbituminous coals and their behaviour during coal combustion. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON COAL SCIENCE, 8.,1995, Elsevier, Spain. **Proceedings...** Elsevier, Spain. Pajares, J.A. & Tascón, J.M.D. ( ed. ), v.2, p.159-162.

RAVA, C.A et al. Determinacion de razas fisiológicas de *Colletotrichum lindemuthian* em Nicarágua. **Fitopatologia Brasileira**, v.18, p.388-391, 1993.

RENSBURG, L. van et al. Revegetation on a coal fine ash disposal site in South África. **Journal of Environmental Quality**, v.27, p.1479-1486, Nov.-Dec. 1998.

RISSATO, A.O.; SOUZA, M.L.V.D. Utilização de cinzas de carvão – uma revisão. In: ENCONTRO DE PESQUISADORES DE CARVÃO NO RIO GRANDE DO SUL, 1., 1985, Porto Alegre, RS. **Anais ...** Porto Alegre, 1985. v.1, p.197-206.

RITCHEY, K.D.; KINRAIDE, T.B.; WENDELL, R.R. Interactions of calcium sulfite with soils and plants. **Plant and Soil**, v.173, p.329-335, 1995.

SAKATA, M. Movement and neutralization of alkaline leachate at coal ash disposal sites. **Environmental Science & Technology**, v.21, n.8, p.771-777, 1987.

SALÉ, L.Y.; NAETH, M.A.; CHANASYK, D.S. Growth response of barley on unweathered fly ash-amended soil. **Journal of Environmental Quality**, v.25, p. 684-691, Jul.-Aug. 1996.

SALTER, P.J.; WILLIAMS, J.B. Effects of pulverized fuel ash on the moisture characteristics of soils. **Nature**, v.213, p.1157-1158, 1967.

SALTER, P.J.; WEBB, D.S.; WILLIAMS, J.B. Effects of pulverized fuel ash on the moisture characteristics of coarse-textured soils and on crop yields. **Journal of Agricultural Science, Cambridg**, v.77, p.53-60, 1971.

SCANLON, D.H., DUGGAN, J.C. Growth and element uptake of woody plants on fly ash. **Environmental Science & Technology**, v.13, p.311-315, 1979.

SCHNAPPINGER, M.G.; MARTENS, D.C.; PLANK, C.O. Zinc availability as influenced by application of fly ash to soil. **Environmental Science & Technology**, v.9, n.3, p.258-261, 1975.

SCHUMANN, A.W.; SUMNER, M.E. Plant nutrient availability from mixtures of fly ashes and biosolids. **Journal of Environmental Quality**, v.28, p.1651-1657, Sep.-Oct. 1999.

SCHUTTER, M.E.; FUHRMANN, J.J. Microbial responses to coal fly ash under field conditions. **Journal of Environmental Quality**, v.28, p.648-652, Mar.-Apr. 1999.

SHAHANDEH, H.; SUMNER, M.E. Establishment of vegetation on by-product gypsum materials. **Journal of Environmental Quality**, v.22, p.57-61, Jan.-Mar. 1993.

SIMS, J.T.; VASILAS, B.L.; GBODRATI, M. Effect of coal fly ash and co-composted sewage sludge on emergence and early growth of cover crops. **Communications of Soil Science and Plant Analysis**, v.24, n.5-6, p.503-512, 1993.

SOARES, E.R.. **Oxidação de pirita e distribuição de metais pesados em depósitos carboníferos explorados em Candiota – RS**. Viçosa – MG. 1998 146 p. Tese ( Doutorado em Ciência do Solo ) - Curso de Solos e Nutrição de Plantas da UFV.

STEHOUWER, R.C.; SUTTON, P.; DICK, W.A. Minespoil amendment with dry flue gas desulfurization by-products: plant growth. **Journal of Environmental Quality**, v.24, p.861-869, Sep.-Oct. 1995a.

STEHOUWER, R.C. et al. Minespoil Amendment with dry flue gas desulfurization by-products: element solubility and mobility. **Journal of Environmental Quality**, v.24, p.165-174, Jan.-Feb. 1995b.

STEWART, B.R. & DANIELS, W.L. Beneficial reuse of coal fly ash to improve plant growth on coarse coal refuse. Part IX. Agricultural Applications. In: INTERNATIONAL ASH UTILIZATION SYMPOSIUM, Lexington. **Proceedings...** Lexington: University of Kentucky, Center for Applied Energy Research, 1995.

STEWART, B.R.; DANIELS, W.L.; JACKSON, M.L. Evaluation of leachate quality from codisposed coal fly ash and coal refuse. **Journal of Environmental Quality**, v.26, p.1417-1424, Sep.-Oct. 1997.

STOUT, W.L. et. Agricultural uses of alkaline fluidized bed combustion ash: case studies. **Fuel**, v.76, n.8, p.767-769, 1997.

STOUT, W.L.; SHARPLEY, A.N.; PIONKE, H.B. Reducing soil phosphorus solubility with coal combustion by-products. **Journal of Environmental Quality**, v.27, p.111-118, Jan.-Feb. 1998.

STOUT, W.L. et al. Effects of fluidized bed combustion waste on the Ca, mg, S, and Zn levels in red clover, tall fescue, oat, and buckwheat. **Agronomy Journal**, v.71, p.662-665, Jul.-Aug. 1979.

STUCZYNSKI, T.I.; McCARTY, G.W.; WRIGHT, R.J. Impact of coal combustion product amendments on soil quality: I. Mobilization of soil organic nitrogen. **Soil Science**, v.163, n.12, p.952-959, Dec.1998a.

STUCZYNSKI, T.I. et al. Impact of coal combustion product amendments on soil quality: II. Mobilization of soil organic carbon. **Soil Science**, v.163, n.12, p.960-969, Dec.1998b.

SUTTON, P.; DICK, W.A. Reclamation of acidic mined lands in humid areas. **Advances in Agronomy**, v.41, p.377-405, 1987.

TAYLOR Jr, E.M.; SCHUMAN, G.E. Fly ash and lime amendment of acidic coal spoil to aid revegetation. **Journal of Environmental Quality**, v.17, n.1, p.120-124, 1988.

TEDESCO, M.J.; et al **Análise de solo, plantas e outros materiais**. Porto Alegre, 2 ed. Faculdade de Agronomia, UFRGS 1995. 174p. ( Boletim Técnico, 5 ).

TEDESCO, M.J. et. Reclamation of spoil and refuse material produced by coal mining using bottom ash and lime. **Environmental Technology**, v.20, p.523-529, 1999.

TERMAN, G.L. et al. Fluidized bed boiler waste as a source of nutrients and lime. **Journal of Environmental Quality**, v.7, n.1, p.147-150, 1978.

THEIS, T.L. & WIRTH, L. Sortive behavior of trace metals on fly ash in aqueous systems. **Environmental Science & Technology**, v.11, n.12, p.1096-1100, 1977.

THEIS, T. L. et al. Field investigation of trace metals in groundwater from fly ash disposal. **Journal Water Pollution Control Fed.**, v.50, p.2457-2469, Nov. 1978.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY ( USEPA ). 2000 **Method 3052** Microwave assisted acid digestion of siliceous and organically based matrices. Disponível em: <http://www.epa.gov>. Acesso em: abr. 2000.

VOLKWEISS, S.J. et al. **A calagem dos solos ácidos: Prática e Benefícios**. 2ed. Faculdade de Agronomia, UFRGS, Porto Alegre, 1992.

WALKER, W.J. DOWDY, R.H. Elemental composition of barley and ryegrass grown on acid soils amended with scrubber sludge. **Journal of Environmental Quality**, v.9, n.1, p.27-30, 1980.

WEELDREYER, P.D.; FINE, L.O. Phosphate in waters: II. Plant availability of lignite fly ash extracted forms in greenhouse trials. **Water Resources Bulletin**, v.17, p.1083-1085, Dec. 1981.

WONG, M.H. & WONG, J.W.C. Effects of fly ash on soil microbial activity. **Environmental Pollution (Series A)**, v.40, p.127-144, 1986.

ZAIFNEJAD, M. et al. Growth photosynthesis and water relations of wheat grown on acid soil amended with coal combustion by-products. **Crop Science**, v.36, p.968-974, Jul.-Ago. 1996a.

ZAIFNEJAD, M. et al. Chemical properties of acid soil treated with coal combustion by-products and leached. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v.27, n.15-17, p.2783-2797, 1996b.

ZAIFNEJAD, M. et al. Fluidized bed combustion by-products treatment and leaching of acid soil affects growth and boron acquisition of maize. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v.29, n.3-4, p.255-267, 1998.

ZANELLA, R. 1988. **Investigação dos Problemas Ambientais Relacionados com a Exploração Intensiva e a Queima do Carvão Termoelétrico em Candiota, RS**. Santa Maria, 1988. 82p. Dissertação ( Mestrado em Química ) - Curso de Pós-Graduação em Química da UFSM.

ZONTA, E.P.; MACHADO, A.A.; SILVEIRA JR., P. Sistema de Análise Estatística – SANEST. **Pelotas, 1982. Registro SEI nº 066060.**

## **8. APÊNDICES**

APÊNDICE 1 - Equações de regressão entre produção de matéria seca de feijão (g vaso<sup>-1</sup>), como variável dependente (y) das doses de cinza aplicadas (x), em t ha<sup>-1</sup>, num solo Podzólico Vermelho Amarelo

| Adubo         | Calcário | Equações   | R <sup>2</sup> |
|---------------|----------|--|----------------|
| Cinza CIENTEC |          |  |                |
| Sem           | Sem      | $Y = 1,0713 + 0,0091 x$                              | 0,92 **        |
| Sem           | Com      | $Y = 1,2968 + 0,0143 x - 0,0001 x^2$                 | ns             |
| Com           | Sem      | $Y = 4,9433 + 0,2133 x - 0,0086 x^2 + 0,000070 x^3$  | 0,99 **        |
| Com           | Com      | $Y = 6,1528 - 0,0932 x + 0,0006 x^2$                 | 0,99 **        |
| Cinza UTPM 2  |          |  |                |
| Sem           | Sem      | $Y = 1,0181 + 0,0023 x - 0,00003 x^2$                | ns             |
| Sem           | Com      | $Y = 1,2745 + 0,0061 x - 0,00004 x^2$                | ns             |
| Com           | Sem      | $Y = 4,9433 + 0,0913 x - 0,00155 x^2 + 0,000006 x^3$ | 0,99 **        |
| Com           | Com      | $Y = 6,0940 + 0,0039 x - 0,00009 x^2$                | 0,99 **        |

\*\* Significativo ao nível de 1% pelo teste F ns = não significativo

APÊNDICE 2 - Equações de regressão entre medidas de pH em água, como variável dependente (y) das doses de cinza aplicadas (x), em t ha<sup>-1</sup>, num solo Podzólico Vermelho Amarelo

| Adubo         | Calcário | Equações                             | R <sup>2</sup> |
|---------------|----------|--------------------------------------|----------------|
| Cinza CIENTEC |          |                                      |                |
| Sem           | Sem      | $Y = 4,8399 + 0,0592 x - 0,0003 x^2$ | 0,99 **        |
| Sem           | Com      | $Y = 5,9266 + 0,0493 x - 0,0003 x^2$ | 0,99 **        |
| Com           | Sem      | $Y = 4,7383 + 0,0623 x - 0,0003 x^2$ | 0,99 **        |
| Com           | Com      | $Y = 5,7281 + 0,0581 x - 0,0004 x^2$ | 0,99 **        |
| Cinza UTPM 2  |          |                                      |                |
| Sem           | Sem      | $Y = 4,8600 + 0,0019 x$              | 0,99 **        |
| Sem           | Com      | $Y = 5,9153 + 0,0023 x$              | 0,98 **        |
| Com           | Sem      | $Y = 4,7900 + 0,0033 x$              | 0,98 **        |
| Com           | Com      | $Y = 5,7360 + 0,0036 x$              | 0,99 **        |

\*\* Significativo ao nível de 1% pelo teste F ns = não significativo

APÊNDICE 3 - Equações de regressão entre medidas de pH em  $\text{CaCl}_2$  0,01M, como variável dependente (y) das doses de cinza aplicadas (x), em  $\text{t ha}^{-1}$ , num solo Podzólico Vermelho Amarelo

| Adubo         | Calcário | Equações                             | R <sup>2</sup> |
|---------------|----------|--------------------------------------|----------------|
| Cinza CIENTEC |          |                                      |                |
| Sem           | Sem      | $Y = 3,9413 + 0,0860 x - 0,0005 x^2$ | 0,99 **        |
| Sem           | Com      | $Y = 5,4588 + 0,0606 x - 0,0004 x^2$ | 0,99 **        |
| Com           | Sem      | $Y = 4,0528 + 0,0784 x - 0,0004 x^2$ | 0,99 **        |
| Com           | Com      | $Y = 5,2423 + 0,0701 x - 0,0005 x^2$ | 0,99 **        |
| Cinza UTPM 2  |          |                                      |                |
| Sem           | Sem      | $Y = 3,9747 + 0,0047 x$              | 0,93 **        |
| Sem           | Com      | $Y = 5,4167 + 0,0033 x$              | 0,98 **        |
| Com           | Sem      | $Y = 4,1007 + 0,0044 x$              | 0,99 **        |
| Com           | Com      | $Y = 5,2567 + 0,0034 x$              | 0,99 **        |

\*\* Significativo ao nível de 1% pelo teste F ns = não significativo

APÊNDICE 4 - Equações de regressão entre a diferença dos valores de pH em  $\text{CaCl}_2$  0,01M e em  $\text{H}_2\text{O}$  ( $\Delta \text{pH}$ ) como variável dependente (y) das doses de cinza aplicadas (x), em  $\text{t ha}^{-1}$ , num solo Podzólico Vermelho Amarelo

| Adubo         | Calcário | Equações                              | R <sup>2</sup> |
|---------------|----------|---------------------------------------|----------------|
| Cinza CIENTEC |          |                                       |                |
| Sem           | Sem      | $Y = 0,8985 - 0,0268 x + 0,00022 x^2$ | 0,99 **        |
| Sem           | Com      | $Y = 0,4677 - 0,0114 x + 0,00010 x^2$ | 0,97 **        |
| Com           | Sem      | $Y = 0,6855 - 0,0162 x + 0,00011 x^2$ | 0,99 **        |
| Com           | Com      | $Y = 0,4858 - 0,0120 x + 0,00009 x^2$ | 0,99 **        |
| Cinza UTPM 2  |          |                                       |                |
| Sem           | Sem      | $Y = 0,8853 - 0,0028 x$               | 0,85 **        |
| Sem           | Com      | $Y = 0,4789 - 0,0010 x$               | 0,91 **        |
| Com           | Sem      | $Y = 0,6893 - 0,0011 x$               | 0,99 **        |
| Com           | Com      | $Y = 0,4793 - 0,0002 x$               | ns             |

\*\* Significativo ao nível de 1% pelo teste F ns = não significativo

APÊNDICE 5 - Equações de regressão entre quantidade total de nitrogênio extraída (mg vaso<sup>-1</sup>) pela parte aérea de plantas de feijão, como variável dependente (y) das doses de cinza aplicadas (x), em t ha<sup>-1</sup>, num solo Podzólico Vermelho Amarelo

| Adubo         | Calcário | Equações   | R <sup>2</sup> |
|---------------|----------|--|----------------|
| Cinza CIENTEC |          |  |                |
| Sem           | Sem      | Y = 3,6701 + 0,2186 x  | 0,99 **        |
| Sem           | Com      | Y = 7,3184 + 0,4163 x - 0,0031 x <sup>2</sup>                            | 0,99 **        |
| Com           | Sem      | Y = 64,1940 + 1,0193 x - 0,0123 x <sup>2</sup>                           | 0,99 **        |
| Com           | Com      | Y = 78,0140 + 1,0130 x - 0,0423 x <sup>2</sup> + 0,000353 x <sup>3</sup> | 0,99 **        |
| Cinza UTPM 2  |          |  |                |
| Sem           | Sem      | Y = 4,8585 + 0,0145 x  | ns             |
| Sem           | Com      | Y = 7,0588 + 0,0383 x  | ns             |
| Com           | Sem      | Y = 63,9080 + 0,2510 x - 0,0059 x <sup>2</sup> + 0,000027 x <sup>3</sup> | ns             |
| Com           | Com      | Y = 77,1706 - 0,0590 x   | 0,89 **        |

\*\* Significativo ao nível de 1% pelo teste F ns = não significativo

APÊNDICE 6 - Equações de regressão entre quantidade total de fósforo extraída (mg vaso<sup>-1</sup>) pela parte aérea de plantas de feijão, como variável dependente (y) das doses de cinza aplicadas (x), em t ha<sup>-1</sup>, num solo Podzólico Vermelho Amarelo

| Adubo         | Calcário | Equações  | R <sup>2</sup> |
|---------------|----------|---|----------------|
| Cinza CIENTEC |          |   |                |
| Sem           | Sem      | Y = 1,2997 + 0,0052 x   | ns             |
| Sem           | Com      | Y = 1,4503 + 0,0022 x   | ns             |
| Com           | Sem      | Y = 8,4540 + 0,2373 x - 0,0112 x <sup>2</sup> + 0,000094 x <sup>3</sup> | 0,99 **        |
| Com           | Com      | Y = 9,6404 - 0,1858 x + 0,0013 x <sup>2</sup>                           | 0,99 **        |
| Cinza UTPM 2  |          |   |                |
| Sem           | Sem      | Y = 1,3459 + 0,0036 x   | ns             |
| Sem           | Com      | Y = 1,4943 + 0,0030 x   | ns             |
| Com           | Sem      | Y = 8,4540 + 0,0473 x - 0,0008 x <sup>2</sup> + 0,000003 x <sup>3</sup> | ns             |
| Com           | Com      | Y = 9,4819 - 0,0286 x + 0,0001 x <sup>2</sup>                           | 0,99 **        |

\*\* Significativo ao nível de 1% pelo teste F ns = não significativo

APÊNDICE 7 - Equações de regressão entre quantidade total de potássio extraída (mg vaso<sup>-1</sup>) pela parte aérea de plantas de feijão, como variável dependente (y) das doses de cinza aplicadas (x), em t ha<sup>-1</sup>, num solo Podzólico Vermelho Amarelo

| Adubo         | Calcário | Equações  | R <sup>2</sup> |
|---------------|----------|---|----------------|
| Cinza CIENTEC |          |   |                |
| Sem           | Sem      | Y = 24,0876 + 0,0720 x  | ns             |
| Sem           | Com      | Y = 25,1889 + 0,1860 x - 0,0027 x <sup>2</sup>                            | ns             |
| Com           | Sem      | Y = 123,7923 + 4,2335 x - 0,1970 x <sup>2</sup> + 0,001631 x <sup>3</sup> | 0,99 **        |
| Com           | Com      | Y = 139,7449 - 2,9885 x + 0,0708 x <sup>2</sup>                           | 0,98 **        |
| Cinza UTPM 2  |          |   |                |
| Sem           | Sem      | Y = 23,1645 + 0,0908 x - 0,0006 x <sup>2</sup>                            | ns             |
| Sem           | Com      | Y = 25,9325 + 0,0561 x  | ns             |
| Com           | Sem      | Y = 123,7923 + 2,0591 x - 0,0291 x <sup>2</sup> + 0,000105 x <sup>3</sup> | 0,99 **        |
| Com           | Com      | Y = 134,2059 + 0,8700 x - 0,0051 x <sup>2</sup>                           | 0,95 **        |

\*\* Significativo ao nível de 1% pelo teste F ns = não significativo

APÊNDICE 8 - Equações de regressão entre quantidade total de cálcio extraída (mg vaso<sup>-1</sup>) pela parte aérea de plantas de feijão, como variável dependente (y) das doses de cinza aplicadas (x), em t ha<sup>-1</sup>, num solo Podzólico Vermelho Amarelo

| Adubo         | Calcário | Equações   | R <sup>2</sup> |
|---------------|----------|--|----------------|
| Cinza CIENTEC |          |  |                |
| Sem           | Sem      | Y = 13,4570 + 0,6664 x - 0,0042 x <sup>2</sup>                           | 0,98 **        |
| Sem           | Com      | Y = 28,5146 + 0,0129 x - 0,0001 x <sup>2</sup>                           | ns             |
| Com           | Sem      | Y = 30,1849 + 1,2401 x - 0,0145 x <sup>2</sup>                           | 0,83 **        |
| Com           | Com      | Y = 59,3564 - 0,1830 x   | 0,86 **        |
| Cinza UTPM 2  |          |  |                |
| Sem           | Sem      | Y = 12,8795 + 0,1027 x - 0,0006 x <sup>2</sup>                           | ns             |
| Sem           | Com      | Y = 28,5507 - 0,3364 x + 0,0060 x <sup>2</sup> - 0,000025 x <sup>3</sup> | ns             |
| Com           | Sem      | Y = 28,7047 + 0,2071 x - 0,0010 x <sup>2</sup>                           | 0,78 **        |
| Com           | Com      | Y = 59,7683 - 0,0398 x   | 0,62 **        |

\*\* Significativo ao nível de 1% pelo teste F ns = não significativo

APÊNDICE 9 - Equações de regressão entre quantidade total de magnésio extraída (mg vaso<sup>-1</sup>) pela parte aérea de plantas de feijão, como variável dependente (y) das doses de cinza aplicadas (x), em t ha<sup>-1</sup>, num solo Podzólico Vermelho Amarelo

| Adubo         | Calcário | Equações                              | R <sup>2</sup> |
|---------------|----------|---------------------------------------|----------------|
| Cinza CIENTEC |          |                                       |                |
| Sem           | Sem      | $Y = 4,4501 + 0,3039 x - 0,0034 x^2$  | ns             |
| Sem           | Com      | $Y = 7,9443 + 0,1502 x$               | 0,99 **        |
| Com           | Sem      | $Y = 14,6582 + 0,7328 x - 0,0062 x^2$ | 0,97 **        |
| Com           | Com      | $Y = 20,0097 + 0,4566 x$              | 0,90 **        |
| Cinza UTPM 2  |          |                                       |                |
| Sem           | Sem      | $Y = 4,1657 + 0,0224 x - 0,0001 x^2$  | ns             |
| Sem           | Com      | $Y = 7,4769 + 0,0103 x$               | ns             |
| Com           | Sem      | $Y = 14,1212 + 0,0372 x - 0,0002 x^2$ | ns             |
| Com           | Com      | $Y = 23,6963 - 0,0438 x$              | ns             |

\*\* Significativo ao nível de 1% pelo teste F ns = não significativo

APÊNDICE 10 - Equações de regressão entre quantidade total de enxofre extraída (mg vaso<sup>-1</sup>) pela parte aérea de plantas de feijão, como variável dependente (y) das doses de cinza aplicadas (x), em t ha<sup>-1</sup>, num solo Podzólico Vermelho Amarelo

| Adubo         | Calcário | Equações                             | R <sup>2</sup> |
|---------------|----------|--------------------------------------|----------------|
| Cinza CIENTEC |          |                                      |                |
| Sem           | Sem      | $Y = 2,4797 + 0,5233 x - 0,0038 x^2$ | 0,99 **        |
| Sem           | Com      | $Y = 5,2931 + 0,2500 x - 0,0022 x^2$ | 0,98 **        |
| Com           | Sem      | $Y = 7,6212 + 0,5205 x - 0,0054 x^2$ | 0,95 **        |
| Com           | Com      | $Y = 10,1946 + 0,0968 x$             | 0,88 **        |
| Cinza UTPM 2  |          |                                      |                |
| Sem           | Sem      | $Y = 2,6203 + 0,0637 x - 0,0004 x^2$ | 0,60 **        |
| Sem           | Com      | $Y = 5,2876 + 0,0115 x$              | ns             |
| Com           | Sem      | $Y = 7,1997 + 0,0900 x - 0,0004 x^2$ | 0,98 **        |
| Com           | Com      | $Y = 9,1981 + 0,0209 x$              | 0,86 **        |

\*\* Significativo ao nível de 1% pelo teste F ns = não significativo

APÊNDICE 11 - Equações de regressão entre quantidade total de manganês extraída (mg vaso<sup>-1</sup>) pela parte aérea de plantas de feijão, como variável dependente (y) das doses de cinza aplicadas (x), em t ha<sup>-1</sup>, num solo Podzólico Vermelho Amarelo

| Adubo         | Calcário | Equações                              | R <sup>2</sup> |
|---------------|----------|---------------------------------------|----------------|
| Cinza CIENTEC |          |                                       |                |
| Sem           | Sem      | $Y = 0,1869 - 0,0051 x + 0,00005 x^2$ | 0,99 **        |
| Sem           | Com      | $Y = 0,0740 - 0,0006 x + 0,00001 x^2$ | ns             |
| Com           | Sem      | $Y = 0,6342 - 0,0175 x + 0,00015 x^2$ | 0,97 **        |
| Com           | Com      | $Y = 0,3113 - 0,0054 x + 0,00005 x^2$ | 0,98 **        |
| Cinza UTPM 2  |          |                                       |                |
| Sem           | Sem      | $Y = 0,1988 - 0,00053 x$              | 0,91 **        |
| Sem           | Com      | $Y = 0,0756 + 0,00001 x$              | ns             |
| Com           | Sem      | $Y = 0,6385 - 0,00189 x$              | 0,96 **        |
| Com           | Com      | $Y = 0,3030 - 0,00048 x$              | 0,81 **        |

\*\* Significativo ao nível de 1% pelo teste F ns = não significativo

APÊNDICE 12 - Equações de regressão entre quantidade total de sódio extraída (mg vaso<sup>-1</sup>) pela parte aérea de plantas de feijão, como variável dependente (y) das doses de cinza aplicadas (x), em t ha<sup>-1</sup>, num solo Podzólico Vermelho Amarelo

| Adubo         | Calcário | Equações   | R <sup>2</sup> |
|---------------|----------|--|----------------|
| Cinza CIENTEC |          |  |                |
| Sem           | Sem      | $Y = 0,1286 + 0,0023 x - 0,00003 x^2$                | ns             |
| Sem           | Com      | $Y = 0,1295 + 0,0005 x$                              | ns             |
| Com           | Sem      | $Y = 0,1424 + 0,0130 x - 0,0005 x^2 + 0,000004 x^3$  | ns             |
| Com           | Com      | $Y = 0,2350 - 0,0034 x + 0,00003 x^2$                | ns             |
| Cinza UTPM 2  |          |  |                |
| Sem           | Sem      | $Y = 0,1261 + 0,0001 x$                              | ns             |
| Sem           | Com      | $Y = 0,1207 + 0,0087 x - 0,0001 x^2 + 0,0000006 x^3$ | 0,99 **        |
| Com           | Sem      | $Y = 0,1511 + 0,0009 x - 0,000004 x^2$               | ns             |
| Com           | Com      | $Y = 0,2221 - 0,0031 x + 0,00001 x^2$                | 0,99 **        |

\*\* Significativo ao nível de 1% pelo teste F ns = não significativo

APÊNDICE 13 - Equações de regressão entre quantidade total de boro extraída (mg vaso<sup>-1</sup>) pela parte aérea de plantas de feijão, como variável dependente (y) das doses de cinza aplicadas (x), em t ha<sup>-1</sup>, num solo Podzólico Vermelho Amarelo

| Adubo         | Calcário | Equações                              | R <sup>2</sup> |
|---------------|----------|---------------------------------------|----------------|
| Cinza CIENTEC |          |                                       |                |
| Sem           | Sem      | $Y = 0,0542 + 0,0015 x - 0,00001 x^2$ | ns             |
| Sem           | Com      | $Y = 0,0499 + 0,0014 x - 0,00001 x^2$ | ns             |
| Com           | Sem      | $Y = 0,1332 + 0,0027 x - 0,00003 x^2$ | ns             |
| Com           | Com      | $Y = 0,1280 + 0,0005 x$               | ns             |
| Cinza UTPM 2  |          |                                       |                |
| Sem           | Sem      | $Y = 0,0734 + 0,0019 x$               | 0,92 **        |
| Sem           | Com      | $Y = 0,0406 + 0,0016 x$               | 0,99 **        |
| Com           | Sem      | $Y = 0,1231 + 0,0046 x$               | 0,99 **        |
| Com           | Com      | $Y = 0,1029 + 0,0027 x$               | 0,99 **        |

\*\* Significativo ao nível de 1% pelo teste F ns = não significativo

APÊNDICE 14 - Equações de regressão entre quantidade total de ferro extraída (mg vaso<sup>-1</sup>) pela parte aérea de plantas de feijão, como variável dependente (y) das doses de cinza aplicadas (x), em t ha<sup>-1</sup>, num solo Podzólico Vermelho Amarelo

| Adubo         | Calcário | Equações   | R <sup>2</sup> |
|---------------|----------|--|----------------|
| Cinza CIENTEC |          |  |                |
| Sem           | Sem      | $Y = 0,1553 + 0,0014 x$                              | ns             |
| Sem           | Com      | $Y = 0,2785 - 0,0007 x + 0,00001 x^2$                | ns             |
| Com           | Sem      | $Y = 0,6666 + 0,0299 x - 0,00107 x^2 + 0,000008 x^3$ | 0,99 **        |
| Com           | Com      | $Y = 0,7785 - 0,0097 x + 0,00008 x^2$                | 0,99 **        |
| Cinza UTPM 2  |          |  |                |
| Sem           | Sem      | $Y = 0,1637 + 0,0007 x$                              | ns             |
| Sem           | Com      | $Y = 0,2744 + 0,0002 x$                              | ns             |
| Com           | Sem      | $Y = 0,6666 + 0,0033 x - 0,0007 x^2 + 0,0000003 x^3$ | ns             |
| Com           | Com      | $Y = 0,7717 - 0,0098 x + 0,0002 x^2 - 0,0000006 x^3$ | ns             |

\*\* Significativo ao nível de 1% pelo teste F ns = não significativo

APÊNDICE 15 - Equações de regressão entre quantidade total de alumínio extraída (mg vaso<sup>-1</sup>) pela parte aérea de plantas de feijão, como variável dependente (y) das doses de cinza aplicadas (x), em t ha<sup>-1</sup>, num solo Podzólico Vermelho Amarelo

| Adubo         | Calcário | Equações  | R <sup>2</sup> |
|---------------|----------|---|----------------|
| Cinza CIENTEC |          |   |                |
| Sem           | Sem      | $Y = 0,2744 + 0,0045 x - 0,00004 x^2$                 | ns             |
| Sem           | Com      | $Y = 0,5331 - 0,0072 x + 0,00006 x^2$                 | ns             |
| Com           | Sem      | $Y = 0,7879 + 0,0483 x - 0,00195 x^2 + 0,000016 x^3$  | ns             |
| Com           | Com      | $Y = 0,6978 + 0,0133 x - 0,00070 x^2 + 0,000006 x^3$  | ns             |
| Cinza UTPM 2  |          |   |                |
| Sem           | Sem      | $Y = 0,2920 + 0,0010 x$                               | ns             |
| Sem           | Com      | $Y = 0,5354 - 0,0038 x + 0,00006 x^2 - 0,0000002 x^3$ | ns             |
| Com           | Sem      | $Y = 0,7879 + 0,0311 x - 0,00059 x^2 + 0,0000024 x^3$ | 0,99 **        |
| Com           | Com      | $Y = 0,6978 - 0,0125 x + 0,00021 x^2 - 0,0000008 x^3$ | ns             |

\*\* Significativo ao nível de 1% pelo teste F ns = não significativo

APÊNDICE 16 - Equações de regressão entre quantidade total de cobre extraída (µg vaso<sup>-1</sup>) pela parte aérea de plantas de feijão, como variável dependente (y) das doses de cinza aplicadas (x), em t ha<sup>-1</sup>, num solo Podzólico Vermelho Amarelo

| Adubo         | Calcário | Equações                              | R <sup>2</sup> |
|---------------|----------|---------------------------------------|----------------|
| Cinza CIENTEC |          |                                       |                |
| Sem           | Sem      | $Y = 4,8674 + 0,4423 x - 0,0045 x^2$  | 0,89 **        |
| Sem           | Com      | $Y = 6,8465 + 0,2479 x - 0,0025 x^2$  | ns             |
| Com           | Sem      | $Y = 20,6119 + 0,1593 x - 0,0033 x^2$ | 0,80 **        |
| Com           | Com      | $Y = 27,8459 - 0,5897 x + 0,0049 x^2$ | 0,99 **        |
| Cinza UTPM 2  |          |                                       |                |
| Sem           | Sem      | $Y = 5,5846 + 0,0395 x - 0,0002 x^2$  | ns             |
| Sem           | Com      | $Y = 7,1984 + 0,0190 x$               | ns             |
| Com           | Sem      | $Y = 19,8342 + 0,0502 x$              | 0,85 **        |
| Com           | Com      | $Y = 28,5653 - 0,3014 x + 0,0012 x^2$ | 0,97 **        |

\*\* Significativo ao nível de 1% pelo teste F ns = não significativo

APÊNDICE 17 - Equações de regressão entre quantidade total de zinco extraída ( $\mu\text{g vaso}^{-1}$ ) pela parte aérea de plantas de feijão, como variável dependente (y) das doses de cinza aplicadas (x), em  $\text{t ha}^{-1}$ , num solo Podzólico Vermelho Amarelo

| Adubo         | Calcário | Equações  | R <sup>2</sup> |
|---------------|----------|---|----------------|
| Cinza CIENTEC |          |   |                |
| Sem           | Sem      | $Y = 55,6707 + 3,4893 x - 0,1305 x^2 + 0,001084 x^3$  | 0,99 **        |
| Sem           | Com      | $Y = 51,2368 - 0,1044 x + 0,0009 x^2$                 | ns             |
| Com           | Sem      | $Y = 148,9222 - 0,4553 x - 0,0108 x^2$                | 0,87 **        |
| Com           | Com      | $Y = 168,4163 - 4,0304 x + 0,0297 x^2$                | 0,99 **        |
| Cinza UTPM 2  |          |   |                |
| Sem           | Sem      | $Y = 56,6723 + 0,1559 x - 0,0014 x^2$                 | ns             |
| Sem           | Com      | $Y = 51,4107 - 0,6136 x + 0,0156 x^2 - 0,000074 x^3$  | ns             |
| Com           | Sem      | $Y = 139,9570 + 1,8084 x - 0,0387 x^2 + 0,000168 x^3$ | 0,99 **        |
| Com           | Com      | $Y = 159,0854 - 0,5522 x$                             | 0,94 **        |

\*\* Significativo ao nível de 1% pelo teste F ns = não significativo

APÊNDICE 18 - Equações de regressão entre quantidade total de níquel extraída ( $\mu\text{g vaso}^{-1}$ ) pela parte aérea de plantas de feijão, como variável dependente (y) das doses de cinza aplicadas (x), em  $\text{t ha}^{-1}$ , num solo Podzólico Vermelho Amarelo

| Adubo         | Calcário | Equações  | R <sup>2</sup> |
|---------------|----------|---|----------------|
| Cinza CIENTEC |          |   |                |
| Sem           | Sem      | $Y = 6,4705 - 0,0323 x$                             | ns             |
| Sem           | Com      | $Y = 4,3094 - 0,0594 x + 0,0006 x^2$                | ns             |
| Com           | Sem      | $Y = 12,9462 - 0,1100 x$                            | 0,92 **        |
| Com           | Com      | $Y = 8,4312 - 0,0558 x$                             | 0,91 **        |
| Cinza UTPM 2  |          |   |                |
| Sem           | Sem      | $Y = 5,6026 - 0,1160 x + 0,0006 x^2$                | 0,82 **        |
| Sem           | Com      | $Y = 4,2571 - 0,0050 x$                             | ns             |
| Com           | Sem      | $Y = 13,7513 - 0,0587 x$                            | 0,88 **        |
| Com           | Com      | $Y = 8,3256 - 0,2318 x + 0,0048 x^2 - 0,000022 x^3$ | 0,99 **        |

\*\* Significativo ao nível de 1% pelo teste F ns = não significativo

APÊNDICE 19 - Equações de regressão entre quantidade total de chumbo extraída ( $\mu\text{g vaso}^{-1}$ ) pela parte aérea de plantas de feijão, como variável dependente (y) das doses de cinza aplicadas (x), em  $\text{t ha}^{-1}$ , num solo Podzólico Vermelho Amarelo

| Adubo         | Calcário | Equações   | R <sup>2</sup> |
|---------------|----------|--|----------------|
| Cinza CIENTEC |          |  |                |
| Sem           | Sem      | $Y = 10,4023 + 0,2492 x - 0,0019 x^2$                | ns             |
| Sem           | Com      | $Y = 7,2759 + 0,2363 x - 0,0020 x^2$                 | ns             |
| Com           | Sem      | $Y = 72,3133 + 3,9917 x - 0,1750 x^2 + 0,001461 x^3$ | 0,99**         |
| Com           | Com      | $Y = 34,1252 + 1,7410 x - 0,0221 x^2$                | 0,57**         |
| Cinza UTPM 2  |          |  |                |
| Sem           | Sem      | $Y = 10,1231 - 0,0958 x + 0,0004 x^2$                | ns             |
| Sem           | Com      | $Y = 7,1371 - 0,0308 x + 0,0003 x^2$                 | ns             |
| Com           | Sem      | $Y = 65,3607 - 0,3288 x$                             | 0,93 **        |
| Com           | Com      | $Y = 23,5253 + 0,1962 x$                             | ns             |

\*\* Significativo ao nível de 1% pelo teste F ns = não significativo

APÊNDICE 20 - Equações de regressão entre quantidade total de cromo extraída ( $\mu\text{g vaso}^{-1}$ ) pela parte aérea de plantas de feijão, como variável dependente (y) das doses de cinza aplicadas (x), em  $\text{t ha}^{-1}$ , num solo Podzólico Vermelho Amarelo

| Adubo         | Calcário | Equações  | R <sup>2</sup> |
|---------------|----------|---|----------------|
| Cinza CIENTEC |          |   |                |
| Sem           | Sem      | $Y = 1,8562 + 0,0431 x$                             | 0,89 **        |
| Sem           | Com      | $Y = 2,0759 + 0,0838 x - 0,0009 x^2$                | 0,91 **        |
| Com           | Sem      | $Y = 7,1310 + 0,3219 x - 0,0124 x^2 + 0,000098 x^3$ | 0,99 **        |
| Com           | Com      | $Y = 9,1820 - 0,0397 x$                             | 0,65 **        |
| Cinza UTPM 2  |          |   |                |
| Sem           | Sem      | $Y = 1,4233 + 0,0029 x$                             | ns             |
| Sem           | Com      | $Y = 1,9799 + 0,0209 x - 0,0001 x^2$                | ns             |
| Com           | Sem      | $Y = 7,1310 + 0,2702 x - 0,0053 x^2 + 0,000023 x^3$ | 0,99 **        |
| Com           | Com      | $Y = 9,6495 - 0,0837 x + 0,0003 x^2$                | 0,99 **        |

\*\* Significativo ao nível de 1% pelo teste F ns = não significativo

APÊNDICE 21 - Produção de matéria seca (g vaso<sup>-1</sup>) de feijão cultivado num solo Podzólico Vermelho Amarelo, influenciado pela aplicação de doses de cinza de carvão mineral, adubação e calagem. Média de três repetições C.V.=11,0 %

| Adubo | Calcário | Nível zero de Cinza | Cinza CIENTEC – t ha <sup>-1</sup> |                      |                      | Cinza UTPM 2 – t ha <sup>-1</sup> |                      |                      |
|-------|----------|---------------------|------------------------------------|----------------------|----------------------|-----------------------------------|----------------------|----------------------|
|       |          |                     | 20                                 | 40                   | 80                   | 40                                | 80                   | 160                  |
| Sem   | Sem      | 0,97 c              | 1,36 <sup>ns</sup> c               | 1,48 <sup>ns</sup> c | 1,75 * b             | 1,20 <sup>ns</sup> b              | 0,94 <sup>ns</sup> c | 0,74 <sup>ns</sup> c |
| Sem   | Com      | 1,32 c              | 1,48 <sup>ns</sup> c               | 1,70 <sup>ns</sup> c | 1,59 <sup>ns</sup> b | 1,35 <sup>ns</sup> b              | 1,61 <sup>ns</sup> b | 1,31 <sup>ns</sup> b |
| Com   | Sem      | 4,94 b              | 6,33 * a                           | 4,19 * a             | 2,83 * a             | 6,49 * a                          | 5,34 <sup>ns</sup> b | 3,99 * a             |
| Com   | Com      | 6,08 a              | 4,74 * b                           | 3,28 * b             | 2,74 * a             | 6,15 <sup>ns</sup> a              | 5,77 <sup>ns</sup> a | 4,31 * a             |
| Média |          | 3,33                | 3,48 <sup>ns</sup>                 | 2,66 *               | 2,23 *               | 3,80 *                            | 3,42 <sup>ns</sup>   | 2,59 *               |

Dose de cinza dentro de cada tratamento, na horizontal, comparada com o nível zero pelo teste bilateral de Dunnett. \* significativo a 5%. <sup>ns</sup> não-significativo D.M.S. 5% = 0,73 para tratamentos. D.M.S. 5% = 0,36 para média. Valores seguidos por letras distintas, nas colunas, diferem entre si, pelo teste de Duncan, a 5 %.

APÊNDICE 22 - Medidas de pH em água de um solo Podzólico Vermelho Amarelo, influenciado pela aplicação de doses de cinza de carvão mineral, adubação e calagem. Média de três repetições C.V.=0,8 %

| Adubo | Calcário | Nível zero de Cinza | Cinza CIENTEC – t ha <sup>-1</sup> |          |          | Cinza UTPM 2 – t ha <sup>-1</sup> |          |          |
|-------|----------|---------------------|------------------------------------|----------|----------|-----------------------------------|----------|----------|
|       |          |                     | 20                                 | 40       | 80       | 40                                | 80       | 160      |
| Sem   | Sem      | 4,86 c              | 5,84 * c                           | 6,77 * b | 7,63 * b | 4,93 <sup>ns</sup> c              | 5,00 * c | 5,16 * c |
| Sem   | Com      | 5,92 a              | 6,78 * a                           | 7,38 * a | 7,81 * a | 5,97 <sup>ns</sup> a              | 6,12 * a | 6,28 * a |
| Com   | Sem      | 4,75 d              | 5,80 * c                           | 6,74 * b | 7,61 * b | 4,97 * c                          | 5,05 * c | 5,31 * b |
| Com   | Com      | 5,74 b              | 6,67 * b                           | 7,43 * a | 7,74 * a | 5,86 * b                          | 6,02 * b | 6,31 * a |
| Média |          | 5,3                 | 6,3 *                              | 7,1 *    | 7,7 *    | 5,4 *                             | 5,6 *    | 5,8 *    |

Dose de cinza dentro de cada tratamento, na horizontal, comparada com o nível zero pelo teste bilateral de Dunnett. \* significativo a 5%. <sup>ns</sup> não-significativo D.M.S. 5% = 0,10 para tratamentos. D.M.S. 5% = 0,05 para média. Valores seguidos por letras distintas, nas colunas, diferem entre si, pelo teste de Duncan, a 5 %.

APÊNDICE 23 - Medidas de pH em  $\text{CaCl}_2$  0,01M de um solo Podzólico Vermelho Amarelo, influenciado pela aplicação de doses de cinza de carvão mineral, adubação e calagem. Média de três repetições C.V.=0,7 %

| Adubo | Calcário | Nível zero de Cinza | Cinza CIENTEC – t ha <sup>-1</sup> |          |          | Cinza UTPM 2 – t ha <sup>-1</sup> |          |          |
|-------|----------|---------------------|------------------------------------|----------|----------|-----------------------------------|----------|----------|
|       |          |                     | 20                                 | 40       | 80       | 40                                | 80       | 160      |
| Sem   | Sem      | 3,96 d              | 5,39 * c                           | 6,59 * c | 7,47 * b | 4,25 * d                          | 4,24 * d | 4,75 * c |
| Sem   | Com      | 5,45 a              | 6,54 * a                           | 7,19 * b | 7,63 * a | 5,51 <sup>ns</sup> a              | 5,68 * a | 5,96 * a |
| Com   | Sem      | 4,07 c              | 5,41 * c                           | 6,52 * d | 7,53 * b | 4,32 * c                          | 4,45 * c | 4,80 * c |
| Com   | Com      | 5,26 b              | 6,39 * b                           | 7,28 * a | 7,62 * a | 5,37 * b                          | 5,54 * b | 5,80 * b |
| Média |          | 4,69                | 5,93 *                             | 6,90 *   | 7,57 *   | 4,86 *                            | 4,98 *   | 5,33 *   |

Dose de cinza dentro de cada tratamento, na horizontal, comparada com o nível zero pelo teste bilateral de Dunnett. \* significativo a 5%. <sup>ns</sup> não-significativo D.M.S. 5% = 0,09 para tratamentos. D.M.S. 5% = 0,04 para média. Valores seguidos por letras distintas, nas colunas, diferem entre si, pelo teste de Duncan, a 5 %.

APÊNDICE 24 - Medidas entre a diferença dos valores de pH em  $\text{CaCl}_2$  0,01M e em  $\text{H}_2\text{O}$  ( $\Delta$  pH) de um solo Podzólico Vermelho Amarelo, influenciado pela aplicação de doses de cinza de carvão mineral, adubação e calagem. Média de três repetições C.V.= 9,72 %

| Adubo | Calcário | Nível zero de Cinza | Cinza CIENTEC – t ha <sup>-1</sup> |          |           | Cinza UTPM 2 – t ha <sup>-1</sup> |                      |                      |
|-------|----------|---------------------|------------------------------------|----------|-----------|-----------------------------------|----------------------|----------------------|
|       |          |                     | 20                                 | 40       | 80        | 40                                | 80                   | 160                  |
| Sem   | Sem      | 0,90 a              | 0,45 * a                           | 0,18 * a | 0,15 * a  | 0,69 * a                          | 0,76 * a             | 0,41 * b             |
| Sem   | Com      | 0,48 c              | 0,25 * b                           | 0,19 * a | 0,18 * a  | 0,47 <sup>ns</sup> b              | 0,45 <sup>ns</sup> c | 0,33 * c             |
| Com   | Sem      | 0,69 b              | 0,39 * a                           | 0,22 * a | 0,08 * b  | 0,65 <sup>ns</sup> a              | 0,60 * b             | 0,52 * a             |
| Com   | Com      | 0,48 c              | 0,29 * b                           | 0,15 * a | 0,12 * ab | 0,49 <sup>ns</sup> b              | 0,49 <sup>ns</sup> c | 0,52 <sup>ns</sup> a |
| Média |          | 0,64                | 0,34 *                             | 0,19 *   | 0,13 *    | 0,57 *                            | 0,57 *               | 0,44 *               |

Dose de cinza dentro de cada tratamento, na horizontal, comparada com o nível zero pelo teste bilateral de Dunnett. \* significativo a 5%. <sup>ns</sup> não-significativo D.M.S. 5% = 0,09 para tratamentos. D.M.S. 5% = 0,04 para média. Valores seguidos por letras distintas, nas colunas, diferem entre si, pelo teste de Duncan, a 5 %.

APÊNDICE 25 – Extração total de nitrogênio (mg vaso<sup>-1</sup>) pelas plantas de feijão cultivadas em vasos num solo Podzólico Vermelho Amarelo, influenciado pela aplicação de doses de cinza de carvão mineral, adubação e calagem. Média de três repetições C.V.= 10,02 %

| Adubo | Calcário | Nível zero de Cinza | Cinza CIENTEC – t ha <sup>-1</sup> |                       |                       | Cinza UTPM 2 – t ha <sup>-1</sup> |                       |                       |
|-------|----------|---------------------|------------------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------------------|-----------------------|-----------------------|
|       |          |                     | 20                                 | 40                    | 80                    | 40                                | 80                    | 160                   |
| Sem   | Sem      | 4,47 c              | 7,23 <sup>ns</sup> c               | 12,04 <sup>ns</sup> c | 20,91 * b             | 5,96 <sup>ns</sup> b              | 6,02 <sup>ns</sup> c  | 7,04 <sup>ns</sup> b  |
| Sem   | Com      | 7,20 c              | 14,71 <sup>ns</sup> b              | 18,80 * c             | 21,55 * b             | 8,36 <sup>ns</sup> b              | 10,19 <sup>ns</sup> c | 13,21 <sup>ns</sup> b |
| Com   | Sem      | 63,91 b             | 80,43 * a                          | 84,75 * a             | 67,24 <sup>ns</sup> a | 66,22 <sup>ns</sup> a             | 60,08 <sup>ns</sup> b | 64,44 <sup>ns</sup> a |
| Com   | Com      | 78,01 a             | 84,19 <sup>ns</sup> a              | 73,49 <sup>ns</sup> b | 69,15 <sup>ns</sup> a | 72,87 <sup>ns</sup> a             | 73,68 <sup>ns</sup> a | 67,60 * a             |
| Média |          | 38,40               | 46,64 *                            | 47,27 *               | 44,71 *               | 38,35 <sup>ns</sup>               | 37,49 <sup>ns</sup>   | 38,07 <sup>ns</sup>   |

Dose de cinza dentro de cada tratamento, na horizontal, comparada com o nível zero pelo teste bilateral de Dunnett. \* significativo a 5%. <sup>ns</sup> não-significativo D.M.S. 5% = 9,00 para tratamentos. D.M.S. 5% = 4,50 para média. Valores seguidos por letras distintas, nas colunas, diferem entre si, pelo teste de Duncan, a 5 %.

APÊNDICE 26 – Extração total de fósforo (mg vaso<sup>-1</sup>) pelas plantas de feijão cultivadas em vasos num solo Podzólico Vermelho Amarelo, influenciado pela aplicação de doses de cinza de carvão mineral, adubação e calagem. Média de três repetições C.V.= 11,64 %

| Adubo | Calcário | Nível zero de Cinza | Cinza CIENTEC – t ha <sup>-1</sup> |                      |                      | Cinza UTPM 2 – t ha <sup>-1</sup> |                      |                      |
|-------|----------|---------------------|------------------------------------|----------------------|----------------------|-----------------------------------|----------------------|----------------------|
|       |          |                     | 20                                 | 40                   | 80                   | 40                                | 80                   | 160                  |
| Sem   | Sem      | 1,29 c              | 1,50 <sup>ns</sup> c               | 1,39 <sup>ns</sup> c | 1,75 <sup>ns</sup> b | 1,46 <sup>ns</sup> c              | 1,79 <sup>ns</sup> c | 1,85 <sup>ns</sup> c |
| Sem   | Com      | 1,49 c              | 1,37 <sup>ns</sup> c               | 1,64 <sup>ns</sup> c | 1,60 <sup>ns</sup> b | 1,53 <sup>ns</sup> c              | 1,88 <sup>ns</sup> c | 1,93 <sup>ns</sup> c |
| Com   | Sem      | 8,45 b              | 9,46 <sup>ns</sup> a               | 5,99 * a             | 3,58 * a             | 9,31 <sup>ns</sup> a              | 8,87 <sup>ns</sup> a | 8,89 <sup>ns</sup> a |
| Com   | Com      | 9,51 a              | 6,80 * b                           | 4,07 * b             | 3,29 * a             | 8,41 <sup>ns</sup> b              | 7,86 * b             | 7,33 * b             |
| Média |          | 5,19                | 4,78 <sup>ns</sup>                 | 3,27 *               | 2,56 *               | 5,18 <sup>ns</sup>                | 5,10 <sup>ns</sup>   | 5,00 <sup>ns</sup>   |

Dose de cinza dentro de cada tratamento, na horizontal, comparada com o nível zero pelo teste bilateral de Dunnett. \* significativo a 5%. <sup>ns</sup> não-significativo D.M.S. 5% = 1,12 para tratamentos. D.M.S. 5% = 0,56 para média. Valores seguidos por letras distintas, nas colunas, diferem entre si, pelo teste de Duncan, a 5 %.

APÊNDICE 27 – Extração total de potássio ( $\text{mg vaso}^{-1}$ ) pelas plantas de feijão cultivadas em vasos num solo Podzólico Vermelho Amarelo, influenciado pela aplicação de doses de cinza de carvão mineral, adubação e calagem. Média de três repetições C.V.=9,29 %

| Adubo | Calcário | Nível zero de Cinza | Cinza CIENTEC – $\text{t ha}^{-1}$ |                       |                        | Cinza UTPM 2 – $\text{t ha}^{-1}$ |                       |                        |
|-------|----------|---------------------|------------------------------------|-----------------------|------------------------|-----------------------------------|-----------------------|------------------------|
|       |          |                     | 20                                 | 40                    | 80                     | 40                                | 80                    | 160                    |
| Sem   | Sem      | 22,47 c             | 28,36 <sup>ns</sup> c              | 25,96 <sup>ns</sup> c | 29,64 <sup>ns</sup> ab | 27,69 <sup>ns</sup> b             | 25,19 <sup>ns</sup> c | 22,54 <sup>ns</sup> c  |
| Sem   | Com      | 24,97 c             | 28,42 <sup>ns</sup> c              | 27,88 <sup>ns</sup> c | 22,93 <sup>ns</sup> b  | 29,00 <sup>ns</sup> b             | 31,12 <sup>ns</sup> c | 34,35 <sup>ns</sup> b  |
| Com   | Sem      | 123,79 b            | 142,70 * a                         | 82,30 * a             | 36,70 * a              | 166,33 * a                        | 156,17 * b            | 139,56 * a             |
| Com   | Com      | 136,14 a            | 97,70 * b                          | 45,46 * b             | 31,71 * ab             | 155,69 * a                        | 175,03 * a            | 142,18 <sup>ns</sup> a |
| Média |          | 76,84               | 74,30 <sup>ns</sup>                | 45,40 *               | 30,24 *                | 94,68 *                           | 96,88 *               | 84,66 *                |

Dose de cinza dentro de cada tratamento, na horizontal, comparada com o nível zero pelo teste bilateral de Dunnett. \* significativo a 5%. <sup>ns</sup> não-significativo D.M.S. 5% = 14,43 para tratamentos. D.M.S. 5% = 7,22 para média. Valores seguidos por letras distintas, nas colunas, diferem entre si, pelo teste de Duncan, a 5 %.

APÊNDICE 28 – Extração total de cálcio ( $\text{mg vaso}^{-1}$ ) pelas plantas de feijão cultivadas em vasos num solo Podzólico Vermelho Amarelo, influenciado pela aplicação de doses de cinza de carvão mineral, adubação e calagem. Média de três repetições C.V.= 11 %

| Adubo | Calcário | Nível zero de Cinza | Cinza CIENTEC – $\text{t ha}^{-1}$ |                       |                       | Cinza UTPM 2 – $\text{t ha}^{-1}$ |                       |                       |
|-------|----------|---------------------|------------------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------------------|-----------------------|-----------------------|
|       |          |                     | 20                                 | 40                    | 80                    | 40                                | 80                    | 160                   |
| Sem   | Sem      | 12,55 c             | 27,52 * b                          | 31,60 * b             | 40,25 * ab            | 16,86 <sup>ns</sup> c             | 16,45 <sup>ns</sup> d | 13,47 <sup>ns</sup> d |
| Sem   | Com      | 28,55 b             | 28,63 <sup>ns</sup> b              | 28,91 <sup>ns</sup> b | 28,75 <sup>ns</sup> c | 23,14 <sup>ns</sup> c             | 27,39 <sup>ns</sup> c | 26,25 <sup>ns</sup> c |
| Com   | Sem      | 27,54 b             | 56,24 * a                          | 51,35 * a             | 37,65 * b             | 38,51 * b                         | 36,64 * b             | 37,01 * b             |
| Com   | Com      | 59,13 a             | 58,29 <sup>ns</sup> a              | 48,60 * a             | 45,79 * a             | 56,90 <sup>ns</sup> a             | 59,77 <sup>ns</sup> a | 52,12 <sup>ns</sup> a |
| Média |          | 31,94               | 42,67 *                            | 40,11 *               | 38,11 *               | 33,85 <sup>ns</sup>               | 35,06 <sup>ns</sup>   | 32,21 <sup>ns</sup>   |

Dose de cinza dentro de cada tratamento, na horizontal, comparada com o nível zero pelo teste bilateral de Dunnett. \* significativo a 5%. <sup>ns</sup> não-significativo D.M.S. 5% = 8,63 para tratamentos. D.M.S. 5% = 4,31 para média. Valores seguidos por letras distintas, nas colunas, diferem entre si, pelo teste de Duncan, a 5 %.

APÊNDICE 29 – Extração total de magnésio ( $\text{mg vaso}^{-1}$ ) pelas plantas de feijão cultivadas em vasos num solo Podzólico Vermelho Amarelo, influenciado pela aplicação de doses de cinza de carvão mineral, adubação e calagem. Média de três repetições C.V.= 28,97 %

| Adubo | Calcário | Nível zero de Cinza | Cinza CIENTEC – $\text{t ha}^{-1}$ |                       |                      | Cinza UTPM 2 – $\text{t ha}^{-1}$ |                        |                       |
|-------|----------|---------------------|------------------------------------|-----------------------|----------------------|-----------------------------------|------------------------|-----------------------|
|       |          |                     | 20                                 | 40                    | 80                   | 40                                | 80                     | 160                   |
| Sem   | Sem      | 4,11 c              | 10,09 <sup>ns</sup> b              | 10,55 <sup>ns</sup> b | 7,35 <sup>ns</sup> d | 4,98 <sup>ns</sup> b              | 4,95 <sup>ns</sup> c   | 4,16 <sup>ns</sup> b  |
| Sem   | Com      | 7,44 bc             | 11,42 <sup>ns</sup> b              | 14,24 <sup>ns</sup> b | 19,69 * c            | 7,40 <sup>ns</sup> b              | 9,10 <sup>ns</sup> bc  | 8,85 <sup>ns</sup> ab |
| Com   | Sem      | 13,82 b             | 29,07 * a                          | 32,37 * a             | 33,87 * b            | 16,03 <sup>ns</sup> a             | 14,94 <sup>ns</sup> ab | 13,96 <sup>ns</sup> a |
| Com   | Com      | 22,68 a             | 30,65 <sup>ns</sup> a              | 30,66 <sup>ns</sup> a | 59,97 * a            | 21,91 <sup>ns</sup> a             | 22,26 <sup>ns</sup> a  | 15,65 <sup>ns</sup> a |
| Média |          | 12,01               | 20,31 *                            | 21,96 *               | 30,22 *              | 12,58 <sup>ns</sup>               | 12,81 <sup>ns</sup>    | 10,66 <sup>ns</sup>   |

Dose de cinza dentro de cada tratamento, na horizontal, comparada com o nível zero pelo teste bilateral de Dunnett. \* significativo a 5%. <sup>ns</sup> não-significativo D.M.S. 5% = 10,79 para tratamentos. D.M.S. 5% = 5,39 para média. Valores seguidos por letras distintas, nas colunas, diferem entre si, pelo teste de Duncan, a 5 %.

APÊNDICE 30 – Extração total de enxofre ( $\text{mg vaso}^{-1}$ ) pelas plantas de feijão cultivadas em vasos num solo Podzólico Vermelho Amarelo, influenciado pela aplicação de doses de cinza de carvão mineral, adubação e calagem. Média de três repetições C.V.= 13,5 %

| Adubo | Calcário | Nível zero de Cinza | Cinza CIENTEC – $\text{t ha}^{-1}$ |           |           | Cinza UTPM 2 – $\text{t ha}^{-1}$ |                       |                       |
|-------|----------|---------------------|------------------------------------|-----------|-----------|-----------------------------------|-----------------------|-----------------------|
|       |          |                     | 20                                 | 40        | 80        | 40                                | 80                    | 160                   |
| Sem   | Sem      | 2,13 c              | 12,35 * bc                         | 16,65 * a | 20,18 * a | 5,89 * b                          | 4,44 <sup>ns</sup> b  | 3,76 <sup>ns</sup> c  |
| Sem   | Com      | 5,08 b              | 9,96 * c                           | 11,30 * b | 11,08 * d | 5,78 <sup>ns</sup> b              | 6,58 <sup>ns</sup> b  | 6,93 <sup>ns</sup> b  |
| Com   | Sem      | 7,03 ab             | 17,45 * a                          | 18,65 * a | 15,00 * c | 10,62 * a                         | 11,57 * a             | 11,69 * a             |
| Com   | Com      | 9,12 a              | 13,90 * b                          | 13,57 * b | 17,74 * b | 9,58 <sup>ns</sup> a              | 11,71 <sup>ns</sup> a | 12,23 <sup>ns</sup> a |
| Média |          | 5,84                | 13,42 *                            | 15,04 *   | 16,00 *   | 7,97 *                            | 8,57 *                | 8,65 *                |

Dose de cinza dentro de cada tratamento, na horizontal, comparada com o nível zero pelo teste bilateral de Dunnett. \* significativo a 5%. <sup>ns</sup> não-significativo D.M.S. 5% = 3,15 para tratamentos. D.M.S. 5% = 1,58 para média. Valores seguidos por letras distintas, nas colunas, diferem entre si, pelo teste de Duncan, a 5 %.

APÊNDICE 31 – Extração total de manganês (mg vaso<sup>-1</sup>) pelas plantas de feijão cultivadas em vasos num solo Podzólico Vermelho Amarelo, influenciado pela aplicação de doses de cinza de carvão mineral, adubação e calagem. Média de três repetições C.V.= 13,24 %

| Adubo | Calcário | Nível zero de Cinza | Cinza CIENTEC – t ha <sup>-1</sup> |                       |                       | Cinza UTPM 2 – t ha <sup>-1</sup> |                       |                       |
|-------|----------|---------------------|------------------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------------------|-----------------------|-----------------------|
|       |          |                     | 20                                 | 40                    | 80                    | 40                                | 80                    | 160                   |
| Sem   | Sem      | 0,188 c             | 0,103 * c                          | 0,065 * b             | 0,103 * b             | 0,194 <sup>ns</sup> c             | 0,154 <sup>ns</sup> c | 0,110 * c             |
| Sem   | Com      | 0,077 d             | 0,058 <sup>ns</sup> c              | 0,073 <sup>ns</sup> b | 0,091 <sup>ns</sup> b | 0,068 <sup>ns</sup> d             | 0,086 <sup>ns</sup> d | 0,075 <sup>ns</sup> c |
| Com   | Sem      | 0,652 a             | 0,297 * a                          | 0,207 * a             | 0,182 * a             | 0,570 * a                         | 0,450 * a             | 0,354 * a             |
| Com   | Com      | 0,316 b             | 0,211 * b                          | 0,183 * a             | 0,188 * a             | 0,260 <sup>ns</sup> b             | 0,273 <sup>ns</sup> b | 0,227 * b             |
| Média |          | 0,308               | 0,167 *                            | 0,132 *               | 0,141 *               | 0,273 *                           | 0,241 *               | 0,192 *               |

Dose de cinza dentro de cada tratamento, na horizontal, comparada com o nível zero pelo teste bilateral de Dunnett. \* significativo a 5%. <sup>ns</sup> não-significativo D.M.S. 5% = 0,059 para tratamentos. D.M.S. 5% = 0,030 para média. Valores seguidos por letras distintas, nas colunas, diferem entre si, pelo teste de Duncan, a 5 %.

APÊNDICE 32 – Extração total de sódio (mg vaso<sup>-1</sup>) pelas plantas de feijão cultivadas em vasos num solo Podzólico Vermelho Amarelo, influenciado pela aplicação de doses de cinza de carvão mineral, adubação e calagem. Média de três repetições C.V.= 48,23 %

| Adubo | Calcário | Nível zero de Cinza | Cinza CIENTEC – t ha <sup>-1</sup> |                       |                       | Cinza UTPM 2 – t ha <sup>-1</sup> |                       |                        |
|-------|----------|---------------------|------------------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------------------|-----------------------|------------------------|
|       |          |                     | 20                                 | 40                    | 80                    | 40                                | 80                    | 160                    |
| Sem   | Sem      | 0,122 a             | 0,181 <sup>ns</sup> a              | 0,156 <sup>ns</sup> a | 0,109 <sup>ns</sup> a | 0,138 <sup>ns</sup> ab            | 0,134 <sup>ns</sup> a | 0,145 <sup>ns</sup> b  |
| Sem   | Com      | 0,121 a             | 0,157 <sup>ns</sup> a              | 0,140 <sup>ns</sup> a | 0,169 <sup>ns</sup> a | 0,268 <sup>ns</sup> a             | 0,183 <sup>ns</sup> a | 0,306 * a              |
| Com   | Sem      | 0,142 a             | 0,236 <sup>ns</sup> a              | 0,133 <sup>ns</sup> a | 0,164 <sup>ns</sup> a | 0,203 <sup>ns</sup> ab            | 0,179 <sup>ns</sup> a | 0,193 <sup>ns</sup> ab |
| Com   | Com      | 0,223 a             | 0,212 <sup>ns</sup> a              | 0,127 <sup>ns</sup> a | 0,179 <sup>ns</sup> a | 0,116 <sup>ns</sup> b             | 0,058 <sup>ns</sup> a | 0,063 <sup>ns</sup> b  |
| Média |          | 0,152               | 0,196 <sup>ns</sup>                | 0,139 <sup>ns</sup>   | 0,155 <sup>ns</sup>   | 0,181 <sup>ns</sup>               | 0,139 <sup>ns</sup>   | 0,176 <sup>ns</sup>    |

Dose de cinza dentro de cada tratamento, na horizontal, comparada com o nível zero pelo teste bilateral de Dunnett. \* significativo a 5%. <sup>ns</sup> não-significativo D.M.S. 5% = 0,170 para tratamentos. D.M.S. 5% = 0,085 para média. Valores seguidos por letras distintas, nas colunas, diferem entre si, pelo teste de Duncan, a 5 %.

APÊNDICE 33 – Extração total de boro ( $\text{mg vaso}^{-1}$ ) pelas plantas de feijão cultivadas em vasos num solo Podzólico Vermelho Amarelo, influenciado pela aplicação de doses de cinza de carvão mineral, adubação e calagem. Média de três repetições C.V.= 27,61 %

| Adubo | Calcário | Nível zero de Cinza | Cinza CIENTEC – $\text{t ha}^{-1}$ |                       |                       | Cinza UTPM 2 – $\text{t ha}^{-1}$ |                       |           |
|-------|----------|---------------------|------------------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------------------|-----------------------|-----------|
|       |          |                     | 20                                 | 40                    | 80                    | 40                                | 80                    | 160       |
| Sem   | Sem      | 0,051 a             | 0,089 <sup>ns</sup> b              | 0,089 <sup>ns</sup> a | 0,099 <sup>ns</sup> a | 0,142 <sup>ns</sup> bc            | 0,277 * b             | 0,345 * c |
| Sem   | Com      | 0,050 a             | 0,071 * b                          | 0,086 <sup>ns</sup> a | 0,084 <sup>ns</sup> a | 0,093 <sup>ns</sup> c             | 0,163 <sup>ns</sup> c | 0,298 * c |
| Com   | Sem      | 0,121 a             | 0,206 <sup>ns</sup> a              | 0,166 <sup>ns</sup> a | 0,146 <sup>ns</sup> a | 0,289 * a                         | 0,523 * a             | 0,850 * a |
| Com   | Com      | 0,111 a             | 0,169 <sup>ns</sup> ab             | 0,132 <sup>ns</sup> a | 0,163 <sup>ns</sup> a | 0,202 <sup>ns</sup> ab            | 0,321 * b             | 0,544 * b |
| Média |          | 0,083               | 0,134 <sup>ns</sup>                | 0,118 <sup>ns</sup>   | 0,123 <sup>ns</sup>   | 0,182 *                           | 0,321 *               | 0,509 *   |

Dose de cinza dentro de cada tratamento, na horizontal, comparada com o nível zero pelo teste bilateral de Dunnett. \* significativo a 5%. <sup>ns</sup> não-significativo D.M.S. 5% = 0,125 para tratamentos. D.M.S. 5% = 0,063 para média. Valores seguidos por letras distintas, nas colunas, diferem entre si, pelo teste de Duncan, a 5 %.

APÊNDICE 34 – Extração total de ferro ( $\text{mg vaso}^{-1}$ ) pelas plantas de feijão cultivadas em vasos num solo Podzólico Vermelho Amarelo, influenciado pela aplicação de doses de cinza de carvão mineral, adubação e calagem. Média de três repetições C.V.= 20,65 %

| Adubo | Calcário | Nível zero de Cinza | Cinza CIENTEC – $\text{t ha}^{-1}$ |                       |                       | Cinza UTPM 2 – $\text{t ha}^{-1}$ |                       |                       |
|-------|----------|---------------------|------------------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------------------|-----------------------|-----------------------|
|       |          |                     | 20                                 | 40                    | 80                    | 40                                | 80                    | 160                   |
| Sem   | Sem      | 0,151 b             | 0,203 <sup>ns</sup> c              | 0,188 <sup>ns</sup> c | 0,269 <sup>ns</sup> b | 0,198 <sup>ns</sup> b             | 0,241 <sup>ns</sup> b | 0,271 <sup>ns</sup> b |
| Sem   | Com      | 0,277 b             | 0,271 <sup>ns</sup> c              | 0,262 <sup>ns</sup> c | 0,282 <sup>ns</sup> b | 0,274 <sup>ns</sup> b             | 0,298 <sup>ns</sup> b | 0,306 <sup>ns</sup> b |
| Com   | Sem      | 0,667 a             | 0,903 * a                          | 0,681 <sup>ns</sup> a | 0,458 * a             | 0,706 <sup>ns</sup> a             | 0,638 <sup>ns</sup> a | 0,661 <sup>ns</sup> a |
| Com   | Com      | 0,772 a             | 0,635 <sup>ns</sup> b              | 0,506 * b             | 0,520 * a             | 0,597 <sup>ns</sup> a             | 0,684 <sup>ns</sup> a | 0,635 <sup>ns</sup> a |
| Média |          | 0,467               | 0,503 <sup>ns</sup>                | 0,409 <sup>ns</sup>   | 0,382 <sup>ns</sup>   | 0,444 <sup>ns</sup>               | 0,465 <sup>ns</sup>   | 0,468 <sup>ns</sup>   |

Dose de cinza dentro de cada tratamento, na horizontal, comparada com o nível zero pelo teste bilateral de Dunnett. \* significativo a 5%. <sup>ns</sup> não-significativo D.M.S. 5% = 0,200 para tratamentos. D.M.S. 5% = 0,100 para média. Valores seguidos por letras distintas, nas colunas, diferem entre si, pelo teste de Duncan, a 5 %.

APÊNDICE 35 – Extração total de alumínio (mg vaso<sup>-1</sup>) pelas plantas de feijão cultivadas em vasos num solo Podzólico Vermelho Amarelo, influenciado pela aplicação de doses de cinza de carvão mineral, adubação e calagem. Média de três repetições C.V.= 53,31 %

| Adubo | Calcário | Nível zero de Cinza | Cinza CIENTEC – t ha <sup>-1</sup> |                       |                       | Cinza UTPM 2 – t ha <sup>-1</sup> |                       |                       |
|-------|----------|---------------------|------------------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------------------|-----------------------|-----------------------|
|       |          |                     | 20                                 | 40                    | 80                    | 40                                | 80                    | 160                   |
| Sem   | Sem      | 0,272 a             | 0,358 <sup>ns</sup> b              | 0,393 <sup>ns</sup> a | 0,407 <sup>ns</sup> a | 0,352 <sup>ns</sup> b             | 0,389 <sup>ns</sup> a | 0,447 <sup>ns</sup> a |
| Sem   | Com      | 0,534 a             | 0,409 <sup>ns</sup> b              | 0,352 <sup>ns</sup> a | 0,363 <sup>ns</sup> a | 0,460 <sup>ns</sup> b             | 0,479 <sup>ns</sup> a | 0,458 <sup>ns</sup> a |
| Com   | Sem      | 0,788 a             | 1,106 <sup>ns</sup> a              | 0,647 <sup>ns</sup> a | 0,518 <sup>ns</sup> a | 1,240 <sup>ns</sup> a             | 0,740 <sup>ns</sup> a | 0,668 <sup>ns</sup> a |
| Com   | Com      | 0,698 a             | 0,734 <sup>ns</sup> ab             | 0,515 <sup>ns</sup> a | 0,532 <sup>ns</sup> a | 0,485 <sup>ns</sup> b             | 0,626 <sup>ns</sup> a | 0,639 <sup>ns</sup> a |
| Média |          | 0,573               | 0,652 <sup>ns</sup>                | 0,477 <sup>ns</sup>   | 0,455 <sup>ns</sup>   | 0,634 <sup>ns</sup>               | 0,558 <sup>ns</sup>   | 0,553 <sup>ns</sup>   |

Dose de cinza dentro de cada tratamento, na horizontal, comparada com o nível zero pelo teste bilateral de Dunnett. \* significativo a 5%. <sup>ns</sup> não-significativo D.M.S. 5% = 0,643 para tratamentos. D.M.S. 5% = 0,321 para média. Valores seguidos por letras distintas, nas colunas, diferem entre si, pelo teste de Duncan, a 5 %.

APÊNDICE 36 – Extração total de cobre (µg vaso<sup>-1</sup>) pelas plantas de feijão cultivadas em vasos num solo Podzólico Vermelho Amarelo, influenciado pela aplicação de doses de cinza de carvão mineral, adubação e calagem. Média de três repetições C.V.= 27,46 %

| Adubo | Calcário | Nível zero de Cinza | Cinza CIENTEC – t ha <sup>-1</sup> |                        |                       | Cinza UTPM 2 – t ha <sup>-1</sup> |                       |                       |
|-------|----------|---------------------|------------------------------------|------------------------|-----------------------|-----------------------------------|-----------------------|-----------------------|
|       |          |                     | 20                                 | 40                     | 80                    | 40                                | 80                    | 160                   |
| Sem   | Sem      | 5,64 c              | 9,86 <sup>ns</sup> c               | 16,89 * ab             | 11,18 <sup>ns</sup> a | 6,79 <sup>ns</sup> b              | 7,88 <sup>ns</sup> b  | 8,00 <sup>ns</sup> b  |
| Sem   | Com      | 7,06 c              | 10,25 <sup>ns</sup> c              | 13,24 <sup>ns</sup> ab | 10,81 <sup>ns</sup> a | 7,64 <sup>ns</sup> b              | 9,48 <sup>ns</sup> b  | 9,94 <sup>ns</sup> b  |
| Com   | Sem      | 19,43 b             | 25,62 <sup>ns</sup> a              | 19,34 <sup>ns</sup> a  | 12,62 <sup>ns</sup> a | 20,97 <sup>ns</sup> a             | 25,99 <sup>ns</sup> a | 27,03 <sup>ns</sup> a |
| Com   | Com      | 27,89 a             | 17,87 * b                          | 12,15 * b              | 11,84 * a             | 20,24 <sup>ns</sup> a             | 10,88 * b             | 11,65 * b             |
| Média |          | 15,01               | 15,90 <sup>ns</sup>                | 15,40 <sup>ns</sup>    | 11,61 <sup>ns</sup>   | 13,91 <sup>ns</sup>               | 13,55 <sup>ns</sup>   | 14,16 <sup>ns</sup>   |

Dose de cinza dentro de cada tratamento, na horizontal, comparada com o nível zero pelo teste bilateral de Dunnett. \* significativo a 5%. <sup>ns</sup> não-significativo D.M.S. 5% = 8,44 para tratamentos. D.M.S. 5% = 4,22 para média. Valores seguidos por letras distintas, nas colunas, diferem entre si, pelo teste de Duncan, a 5 %.

APÊNDICE 37 – Extração total de zinco ( $\mu\text{g vaso}^{-1}$ ) pelas plantas de feijão cultivadas em vasos num solo Podzólico Vermelho Amarelo, influenciado pela aplicação de doses de cinza de carvão mineral, adubação e calagem. Média de três repetições C.V.= 115,45 %

| Adubo | Calcário | Nível zero de Cinza | Cinza CIENTEC – t ha <sup>-1</sup> |                       |                       | Cinza UTPM 2 – t ha <sup>-1</sup> |                        |                        |
|-------|----------|---------------------|------------------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------------------|------------------------|------------------------|
|       |          |                     | 20                                 | 40                    | 80                    | 40                                | 80                     | 160                    |
| Sem   | Sem      | 55,67 c             | 81,93 <sup>ns</sup> b              | 55,80 <sup>ns</sup> b | 54,44 <sup>ns</sup> a | 63,38 <sup>ns</sup> c             | 58,34 <sup>ns</sup> b  | 46,75 <sup>ns</sup> c  |
| Sem   | Com      | 51,41 c             | 49,06 <sup>ns</sup> c              | 48,91 <sup>ns</sup> b | 48,82 <sup>ns</sup> a | 47,17 <sup>ns</sup> c             | 64,61 <sup>ns</sup> b  | 50,96 <sup>ns</sup> c  |
| Com   | Sem      | 139,96 b            | 159,43 <sup>ns</sup> a             | 95,53 * a             | 46,35 * a             | 161,11 <sup>ns</sup> a            | 122,80 <sup>ns</sup> a | 125,15 <sup>ns</sup> a |
| Com   | Com      | 169,28 a            | 97,40 * b                          | 56,49 * b             | 35,95 * a             | 128,63 * b                        | 107,07 * a             | 76,74 * b              |
| Média |          | 104,08              | 96,96 <sup>ns</sup>                | 64,18 *               | 46,39 *               | 100,07 <sup>ns</sup>              | 88,20 *                | 74,90 *                |

Dose de cinza dentro de cada tratamento, na horizontal, comparada com o nível zero pelo teste bilateral de Dunnett. \* significativo a 5%. <sup>ns</sup> não-significativo D.M.S. 5% = 27,43 para tratamentos. D.M.S. 5% = 13,71 para média. Valores seguidos por letras distintas, nas colunas, diferem entre si, pelo teste de Duncan, a 5 %.

APÊNDICE 38 – Extração total de níquel ( $\mu\text{g vaso}^{-1}$ ) pelas plantas de feijão cultivadas em vasos num solo Podzólico Vermelho Amarelo, influenciado pela aplicação de doses de cinza de carvão mineral, adubação e calagem. Média de três repetições C.V.= 33,47 %

| Adubo | Calcário | Nível zero de Cinza | Cinza CIENTEC – t ha <sup>-1</sup> |                       |                      | Cinza UTPM 2 – t ha <sup>-1</sup> |                       |                      |
|-------|----------|---------------------|------------------------------------|-----------------------|----------------------|-----------------------------------|-----------------------|----------------------|
|       |          |                     | 20                                 | 40                    | 80                   | 40                                | 80                    | 160                  |
| Sem   | Sem      | 6,11 bc             | 6,27 <sup>ns</sup> bc              | 5,22 <sup>ns</sup> ab | 3,75 <sup>ns</sup> a | 0,59 * c                          | 1,33 * c              | 2,79 <sup>ns</sup> a |
| Sem   | Com      | 4,33 c              | 3,31 <sup>ns</sup> c               | 2,93 <sup>ns</sup> b  | 3,39 <sup>ns</sup> a | 3,77 <sup>ns</sup> b              | 4,14 <sup>ns</sup> bc | 3,40 <sup>ns</sup> a |
| Com   | Sem      | 14,15 a             | 9,74 * a                           | 7,64 * a              | 4,85 * a             | 12,33 <sup>ns</sup> a             | 6,86 * ab             | 5,15 * a             |
| Com   | Com      | 8,33 b              | 7,97 <sup>ns</sup> ab              | 5,43 <sup>ns</sup> ab | 4,19 * a             | 5,38 <sup>ns</sup> b              | 9,49 <sup>ns</sup> a  | 5,22 <sup>ns</sup> a |
| Média |          | 8,23                | 6,82 <sup>ns</sup>                 | 5,31 *                | 4,04 *               | 5,52 *                            | 5,45 *                | 4,14 *               |

Dose de cinza dentro de cada tratamento, na horizontal, comparada com o nível zero pelo teste bilateral de Dunnett. \* significativo a 5%. <sup>ns</sup> não-significativo D.M.S. 5% = 4,08 para tratamentos. D.M.S. 5% = 2,04 para média. Valores seguidos por letras distintas, nas colunas, diferem entre si, pelo teste de Duncan, a 5 %.

APÊNDICE 39 – Extração total de chumbo ( $\mu\text{g vaso}^{-1}$ ) pelas plantas de feijão cultivadas em vasos num solo Podzólico Vermelho Amarelo, influenciado pela aplicação de doses de cinza de carvão mineral, adubação e calagem. Média de três repetições C.V.= 55,9 %

| Adubo | Calcário | Nível zero de Cinza | Cinza CIENTEC – t ha <sup>-1</sup> |                        |                       | Cinza UTPM 2 – t ha <sup>-1</sup> |                       |                       |
|-------|----------|---------------------|------------------------------------|------------------------|-----------------------|-----------------------------------|-----------------------|-----------------------|
|       |          |                     | 20                                 | 40                     | 80                    | 40                                | 80                    | 160                   |
| Sem   | Sem      | 9,96 b              | 15,83 <sup>ns</sup> b              | 16,50 <sup>ns</sup> ab | 18,57 <sup>ns</sup> a | 7,32 <sup>ns</sup> b              | 4,47 <sup>ns</sup> a  | 4,21 <sup>ns</sup> b  |
| Sem   | Com      | 6,97 b              | 12,04 <sup>ns</sup> b              | 12,95 <sup>ns</sup> b  | 13,65 <sup>ns</sup> a | 6,80 <sup>ns</sup> b              | 6,08 <sup>ns</sup> a  | 9,24 <sup>ns</sup> b  |
| Com   | Sem      | 72,31 a             | 93,83 <sup>ns</sup> a              | 45,49 <sup>ns</sup> ab | 19,81 * a             | 45,64 <sup>ns</sup> a             | 35,00 <sup>ns</sup> a | 16,42 * b             |
| Com   | Com      | 26,29 b             | 80,99 <sup>ns</sup> a              | 52,75 <sup>ns</sup> a  | 34,62 <sup>ns</sup> a | 28,64 <sup>ns</sup> ab            | 37,78 <sup>ns</sup> a | 56,31 <sup>ns</sup> a |
| Média |          | 28,88               | 50,67 <sup>ns</sup>                | 31,92 <sup>ns</sup>    | 21,66 <sup>ns</sup>   | 22,10 <sup>ns</sup>               | 20,83 <sup>ns</sup>   | 21,55 <sup>ns</sup>   |

Dose de cinza dentro de cada tratamento, na horizontal, comparada com o nível zero pelo teste bilateral de Dunnett. \* significativo a 5%. <sup>ns</sup> não-significativo D.M.S. 5% = 46,84 para tratamentos. D.M.S. 5% = 23,42 para média. Valores seguidos por letras distintas, nas colunas, diferem entre si, pelo teste de Duncan, a 5 %.

APÊNDICE 40 – Extração total de cromo ( $\mu\text{g vaso}^{-1}$ ) pelas plantas de feijão cultivadas em vasos num solo Podzólico Vermelho Amarelo, influenciado pela aplicação de doses de cinza de carvão mineral, adubação e calagem. Média de três repetições C.V.= 25,06 %

| Adubo | Calcário | Nível zero de Cinza | Cinza CIENTEC – t ha <sup>-1</sup> |                       |                       | Cinza UTPM 2 – t ha <sup>-1</sup> |                       |                      |
|-------|----------|---------------------|------------------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------------------|-----------------------|----------------------|
|       |          |                     | 20                                 | 40                    | 80                    | 40                                | 80                    | 160                  |
| Sem   | Sem      | 1,43 c              | 3,46 <sup>ns</sup> b               | 3,33 <sup>ns</sup> c  | 5,25 * ab             | 1,45 <sup>ns</sup> c              | 1,79 <sup>ns</sup> c  | 1,84 <sup>ns</sup> b |
| Sem   | Com      | 2,20 c              | 3,05 <sup>ns</sup> b               | 4,25 <sup>ns</sup> bc | 3,02 <sup>ns</sup> c  | 2,03 <sup>ns</sup> c              | 3,35 <sup>ns</sup> bc | 2,26 <sup>ns</sup> b |
| Com   | Sem      | 7,13 b              | 9,42 <sup>ns</sup> a               | 6,55 <sup>ns</sup> a  | 4,26 <sup>ns</sup> bc | 10,87 * a                         | 6,25 <sup>ns</sup> a  | 6,58 <sup>ns</sup> a |
| Com   | Com      | 9,54 a              | 8,91 <sup>ns</sup> a               | 6,10 * ab             | 6,62 * a              | 7,14 <sup>ns</sup> b              | 4,93 * ab             | 5,08 * a             |
| Média |          | 5,07                | 6,21 <sup>ns</sup>                 | 5,06 <sup>ns</sup>    | 4,79 <sup>ns</sup>    | 5,37 <sup>ns</sup>                | 4,08 <sup>ns</sup>    | 3,94 <sup>ns</sup>   |

Dose de cinza dentro de cada tratamento, na horizontal, comparada com o nível zero pelo teste bilateral de Dunnett. \* significativo a 5%. <sup>ns</sup> não-significativo D.M.S. 5% = 2,67 para tratamentos. D.M.S. 5% = 1,34 para média. Valores seguidos por letras distintas, nas colunas, diferem entre si, pelo teste de Duncan, a 5 %.

APÊNDICE 41 - Teores de nitrogênio (%) na parte aérea de plantas de feijão cultivado em vasos num solo Podzólico Vermelho Amarelo, influenciado pela aplicação de doses de cinza de carvão mineral, adubação e calagem. Média de três repetições C.V.= 8,4 %

| Adubo | Calcário | Nível zero de Cinza | Cinza CIENTEC – t ha <sup>-1</sup> |          |          | Cinza UTPM 2 – t ha <sup>-1</sup> |                      |          |
|-------|----------|---------------------|------------------------------------|----------|----------|-----------------------------------|----------------------|----------|
|       |          |                     | 20                                 | 40       | 80       | 40                                | 80                   | 160      |
| Sem   | Sem      | 0,46 b              | 0,53 <sup>ns</sup> d               | 0,82 * d | 1,24 * b | 0,49 <sup>ns</sup> c              | 0,64 <sup>ns</sup> c | 0,95 * b |
| Sem   | Com      | 0,55 b              | 1,00 * c                           | 1,11 * c | 1,33 * b | 0,62 <sup>ns</sup> c              | 0,63 <sup>ns</sup> c | 1,02 * b |
| Com   | Sem      | 1,30 a              | 1,28 <sup>ns</sup> b               | 2,03 * b | 2,38 * a | 1,02 * b                          | 1,13 <sup>ns</sup> b | 1,63 * a |
| Com   | Com      | 1,28 a              | 1,78 * a                           | 2,29 * a | 2,53 * a | 1,19 <sup>ns</sup> a              | 1,28 <sup>ns</sup> a | 1,57 * a |
| Média |          | 0,90                | 1,15 *                             | 1,56 *   | 1,87 *   | 0,83 <sup>ns</sup>                | 0,92 <sup>ns</sup>   | 1,29 *   |

Dose de cinza dentro de cada tratamento, na horizontal, comparada com o nível zero pelo teste bilateral de Dunnett. \* significativo a 5%. <sup>ns</sup> não-significativo D.M.S. 5% = 0,22 para tratamentos. D.M.S. 5% = 0,11 para média. Valores seguidos por letras distintas, nas colunas, diferem entre si, pelo teste de Duncan, a 5 %.

APÊNDICE 42 - Teores de fósforo (%) na parte aérea de plantas de feijão cultivado em vasos num solo Podzólico Vermelho Amarelo, influenciado pela aplicação de doses de cinza de carvão mineral, adubação e calagem. Média de três repetições C.V.=7,8 %

| Adubo | Calcário | Nível zero de Cinza | Cinza CIENTEC – t ha <sup>-1</sup> |                      |                      | Cinza UTPM 2 – t ha <sup>-1</sup> |                      |                      |
|-------|----------|---------------------|------------------------------------|----------------------|----------------------|-----------------------------------|----------------------|----------------------|
|       |          |                     | 20                                 | 40                   | 80                   | 40                                | 80                   | 160                  |
| Sem   | Sem      | 0,13 b              | 0,11 <sup>ns</sup> b               | 0,09 * c             | 0,10 * b             | 0,12 <sup>ns</sup> bc             | 0,19 * a             | 0,25 * a             |
| Sem   | Com      | 0,11 c              | 0,09 <sup>ns</sup> b               | 0,10 <sup>ns</sup> c | 0,10 <sup>ns</sup> b | 0,11 <sup>ns</sup> c              | 0,12 <sup>ns</sup> d | 0,15 * d             |
| Com   | Sem      | 0,17 a              | 0,15 <sup>ns</sup> a               | 0,14 * a             | 0,13 * a             | 0,14 * a                          | 0,17 * b             | 0,22 * b             |
| Com   | Com      | 0,16 a              | 0,14 <sup>ns</sup> a               | 0,12 * b             | 0,12 * a             | 0,14 <sup>ns</sup> ab             | 0,14 <sup>ns</sup> c | 0,17 <sup>ns</sup> c |
| Média |          | 0,14                | 0,12 *                             | 0,11 *               | 0,11 *               | 0,13 *                            | 0,15 <sup>ns</sup>   | 0,20 *               |

Dose de cinza dentro de cada tratamento, na horizontal, comparada com o nível zero pelo teste bilateral de Dunnett. \* significativo a 5%. <sup>ns</sup> não-significativo D.M.S. 5% = 0,02 para tratamentos. D.M.S. 5% = 0,01 para média. Valores seguidos por letras distintas, nas colunas, diferem entre si, pelo teste de Duncan, a 5 %.

APÊNDICE 43 - Teores de potássio (%) na parte aérea de plantas de feijão cultivado em vasos num solo Podzólico Vermelho Amarelo, influenciado pela aplicação de doses de cinza de carvão mineral, adubação e calagem. Média de três repetições C.V.=7,5 %

| Adubo | Calcário | Nível zero de Cinza | Cinza CIENTEC – t ha <sup>-1</sup> |                      |           | Cinza UTPM 2 – t ha <sup>-1</sup> |                      |           |
|-------|----------|---------------------|------------------------------------|----------------------|-----------|-----------------------------------|----------------------|-----------|
|       |          |                     | 20                                 | 40                   | 80        | 40                                | 80                   | 160       |
| Sem   | Sem      | 2,31 ab             | 2,08 <sup>ns</sup> ab              | 1,76 * ab            | 1,69 * a  | 2,33 <sup>ns</sup> ab             | 2,68 * b             | 3,05 * b  |
| Sem   | Com      | 1,90 c              | 1,95 <sup>ns</sup> b               | 1,64 <sup>ns</sup> b | 1,45 * ab | 2,16 <sup>ns</sup> b              | 1,94 <sup>ns</sup> c | 2,64 * c  |
| Com   | Sem      | 2,53 a              | 2,26 <sup>ns</sup> a               | 1,97 * a             | 1,30 * bc | 2,57 <sup>ns</sup> a              | 2,94 * ab            | 3,52 * a  |
| Com   | Com      | 2,24 b              | 2,06 <sup>ns</sup> ab              | 1,34 * c             | 1,16 * c  | 2,54 <sup>ns</sup> a              | 3,04 * a             | 3,29 * ab |
| Média |          | 2,25                | 2,09 <sup>ns</sup>                 | 1,68 *               | 1,40 *    | 2,40 <sup>ns</sup>                | 2,65 *               | 3,13 *    |

Dose de cinza dentro de cada tratamento, na horizontal, comparada com o nível zero pelo teste bilateral de Dunnett. \* significativo a 5%. <sup>ns</sup> não-significativo D.M.S. 5% = 0,36 para tratamentos. D.M.S. 5% = 0,18 para média. Valores seguidos por letras distintas, nas colunas, diferem entre si, pelo teste de Duncan, a 5 %.

APÊNDICE 44 - Teores de cálcio (%) na parte aérea de plantas de feijão cultivado em vasos num solo Podzólico Vermelho Amarelo, influenciado pela aplicação de doses de cinza de carvão mineral, adubação e calagem. Média de três repetições C.V.= 8,2 %

| Adubo | Calcário | Nível zero de Cinza | Cinza CIENTEC – t ha <sup>-1</sup> |          |          | Cinza UTPM 2 – t ha <sup>-1</sup> |                      |                      |
|-------|----------|---------------------|------------------------------------|----------|----------|-----------------------------------|----------------------|----------------------|
|       |          |                     | 20                                 | 40       | 80       | 40                                | 80                   | 160                  |
| Sem   | Sem      | 1,29 b              | 2,02 * a                           | 2,14 * a | 2,30 * a | 1,43 <sup>ns</sup> b              | 1,75 * a             | 1,82 * b             |
| Sem   | Com      | 2,18 a              | 1,97 <sup>ns</sup> a               | 1,71 * b | 1,81 * b | 1,72 * a                          | 1,70 * a             | 1,99 <sup>ns</sup> a |
| Com   | Sem      | 0,56 d              | 0,89 * c                           | 1,23 * c | 1,33 * c | 0,59 <sup>ns</sup> d              | 0,69 <sup>ns</sup> c | 0,93 * d             |
| Com   | Com      | 0,97 c              | 1,23 * b                           | 1,51 * b | 1,67 * b | 0,93 <sup>ns</sup> c              | 1,04 <sup>ns</sup> b | 1,21 <sup>ns</sup> c |
| Média |          | 1,25                | 1,53 *                             | 1,65 *   | 1,78 *   | 1,17 <sup>ns</sup>                | 1,30 <sup>ns</sup>   | 1,49 *               |

Dose de cinza dentro de cada tratamento, na horizontal, comparada com o nível zero pelo teste bilateral de Dunnett. \* significativo a 5%. <sup>ns</sup> não-significativo D.M.S. 5% = 0,26 para tratamentos. D.M.S. 5% = 0,13 para média. Valores seguidos por letras distintas, nas colunas, diferem entre si, pelo teste de Duncan, a 5 %.

APÊNDICE 45 - Teores de magnésio (%) na parte aérea de plantas de feijão cultivado em vasos num solo Podzólico Vermelho Amarelo, influenciado pela aplicação de doses de cinza de carvão mineral, adubação e calagem. Média de três repetições C.V.= 27,3 %

| Adubo | Calcário | Nível zero de Cinza | Cinza CIENTEC – t ha <sup>-1</sup> |                      |                      | Cinza UTPM 2 – t ha <sup>-1</sup> |                      |                      |
|-------|----------|---------------------|------------------------------------|----------------------|----------------------|-----------------------------------|----------------------|----------------------|
|       |          |                     | 20                                 | 40                   | 80                   | 40                                | 80                   | 160                  |
| Sem   | Sem      | 0,42 a              | 0,74 <sup>ns</sup> a               | 0,73 <sup>ns</sup> a | 0,42 <sup>ns</sup> c | 0,42 <sup>ns</sup> b              | 0,53 <sup>ns</sup> a | 0,56 <sup>ns</sup> b |
| Sem   | Com      | 0,57 a              | 0,78 <sup>ns</sup> a               | 0,84 <sup>ns</sup> a | 1,23 * b             | 0,55 <sup>ns</sup> a              | 0,57 <sup>ns</sup> a | 0,67 <sup>ns</sup> a |
| Com   | Sem      | 0,28 a              | 0,46 <sup>ns</sup> a               | 0,77 * a             | 1,20 * b             | 0,25 <sup>ns</sup> c              | 0,28 <sup>ns</sup> c | 0,35 <sup>ns</sup> c |
| Com   | Com      | 0,37 a              | 0,65 <sup>ns</sup> a               | 0,95 * a             | 2,19 * a             | 0,36 <sup>ns</sup> b              | 0,39 <sup>ns</sup> b | 0,36 <sup>ns</sup> c |
| Média |          | 0,41                | 0,66 *                             | 0,82 *               | 1,26 *               | 0,39 <sup>ns</sup>                | 0,44 <sup>ns</sup>   | 0,49 <sup>ns</sup>   |

Dose de cinza dentro de cada tratamento, na horizontal, comparada com o nível zero pelo teste bilateral de Dunnett. \* significativo a 5%. <sup>ns</sup> não-significativo D.M.S. 5% = 0,38 para tratamentos. D.M.S. 5% = 0,19 para média. Valores seguidos por letras distintas, nas colunas, diferem entre si, pelo teste de Duncan, a 5 %.

APÊNDICE 46 - Teores de enxofre (%) na parte aérea de plantas de feijão cultivado em vasos num solo Podzólico Vermelho Amarelo, influenciado pela aplicação de doses de cinza de carvão mineral, adubação e calagem. Média de três repetições C.V.= 12,8 %

| Adubo | Calcário | Nível zero de Cinza | Cinza CIENTEC – t ha <sup>-1</sup> |          |           | Cinza UTPM 2 – t ha <sup>-1</sup> |                      |          |
|-------|----------|---------------------|------------------------------------|----------|-----------|-----------------------------------|----------------------|----------|
|       |          |                     | 20                                 | 40       | 80        | 40                                | 80                   | 160      |
| Sem   | Sem      | 0,22 b              | 0,91 * a                           | 1,14 * a | 1,15 * a  | 0,50 * a                          | 0,47 * a             | 0,51 * a |
| Sem   | Com      | 0,39 a              | 0,69 * b                           | 0,67 * b | 0,70 * b  | 0,43 <sup>ns</sup> b              | 0,41 <sup>ns</sup> a | 0,53 * a |
| Com   | Sem      | 0,14 b              | 0,28 * c                           | 0,45 * c | 0,53 * c  | 0,16 <sup>ns</sup> c              | 0,22 <sup>ns</sup> b | 0,29 * b |
| Com   | Com      | 0,15 b              | 0,29 * c                           | 0,43 * c | 0,65 * bc | 0,16 <sup>ns</sup> c              | 0,20 <sup>ns</sup> b | 0,28 * b |
| Média |          | 0,23                | 0,54 *                             | 0,67 *   | 0,76 *    | 0,31 *                            | 0,33 *               | 0,40 *   |

Dose de cinza dentro de cada tratamento, na horizontal, comparada com o nível zero pelo teste bilateral de Dunnett. \* significativo a 5%. <sup>ns</sup> não-significativo D.M.S. 5% = 0,13 para tratamentos. D.M.S. 5% = 0,06 para média. Valores seguidos por letras distintas, nas colunas, diferem entre si, pelo teste de Duncan, a 5 %.

APÊNDICE 47 - Teores de manganês ( $\text{mg kg}^{-1}$ ) na parte aérea de plantas de feijão cultivado em vasos num solo Podzólico Vermelho Amarelo, influenciado pela aplicação de doses de cinza de carvão mineral, adubação e calagem. Média de três repetições C.V.= 11,2 %

| Adubo | Calcário | Nível zero de Cinza | Cinza CIENTEC – $\text{t ha}^{-1}$ |                      |                      | Cinza UTPM 2 – $\text{t ha}^{-1}$ |                      |                      |
|-------|----------|---------------------|------------------------------------|----------------------|----------------------|-----------------------------------|----------------------|----------------------|
|       |          |                     | 20                                 | 40                   | 80                   | 40                                | 80                   | 160                  |
| Sem   | Sem      | 192,7 a             | 75,3 * a                           | 44,3 * a             | 58,9 * a             | 162,6 * a                         | 163,6 * a            | 149,0 * a            |
| Sem   | Com      | 58,7 c              | 39,5 * b                           | 42,9 <sup>ns</sup> a | 57,6 <sup>ns</sup> a | 50,5 <sup>ns</sup> c              | 53,5 <sup>ns</sup> c | 57,0 <sup>ns</sup> c |
| Com   | Sem      | 134,3 b             | 46,9 * b                           | 49,5 * a             | 64,4 * a             | 87,9 * b                          | 84,3 * b             | 88,9 * b             |
| Com   | Com      | 52,0                | 44,4 <sup>ns</sup> b               | 57,6 <sup>ns</sup> a | 68,7 <sup>ns</sup> a | 42,4 <sup>ns</sup> c              | 47,5 <sup>ns</sup> c | 52,5 <sup>ns</sup> c |
| Média |          | 109,4               | 51,5 *                             | 48,6 *               | 62,4 *               | 85,8 *                            | 87,2 *               | 86,9 *               |

Dose de cinza dentro de cada tratamento, na horizontal, comparada com o nível zero pelo teste bilateral de Dunnett. \* significativo a 5%. <sup>ns</sup> não-significativo D.M.S. 5% = 18,41 para tratamentos. D.M.S. 5% = 9,21 para média. Valores seguidos por letras distintas, nas colunas, diferem entre si, pelo teste de Duncan, a 5 %.

APÊNDICE 48 - Teores de sódio ( $\text{mg kg}^{-1}$ ) na parte aérea de plantas de feijão cultivado em vasos num solo Podzólico Vermelho Amarelo, influenciado pela aplicação de doses de cinza de carvão mineral, adubação e calagem. Média de três repetições C.V.= 43,7 %

| Adubo | Calcário | Nível zero de Cinza | Cinza CIENTEC – $\text{t ha}^{-1}$ |                     |                     | Cinza UTPM 2 – $\text{t ha}^{-1}$ |                     |                     |
|-------|----------|---------------------|------------------------------------|---------------------|---------------------|-----------------------------------|---------------------|---------------------|
|       |          |                     | 20                                 | 40                  | 80                  | 40                                | 80                  | 160                 |
| Sem   | Sem      | 126 a               | 135 <sup>ns</sup> a                | 107 <sup>ns</sup> a | 62 <sup>ns</sup> b  | 112 <sup>ns</sup> b               | 143 <sup>ns</sup> a | 194 <sup>ns</sup> a |
| Sem   | Com      | 92 a                | 107 <sup>ns</sup> a                | 83 <sup>ns</sup> a  | 111 <sup>ns</sup> a | 197 * a                           | 123 <sup>ns</sup> a | 228 * a             |
| Com   | Sem      | 30 b                | 37 <sup>ns</sup> b                 | 32 <sup>ns</sup> b  | 58 <sup>ns</sup> b  | 31 <sup>ns</sup> c                | 34 <sup>ns</sup> b  | 48 <sup>ns</sup> b  |
| Com   | Com      | 37 b                | 45 <sup>ns</sup> b                 | 38 <sup>ns</sup> b  | 66 <sup>ns</sup> b  | 18 <sup>ns</sup> c                | 10 <sup>ns</sup> b  | 15 <sup>ns</sup> b  |
| Média |          | 71                  | 81 <sup>ns</sup>                   | 65 <sup>ns</sup>    | 74 <sup>ns</sup>    | 90 <sup>ns</sup>                  | 78 <sup>ns</sup>    | 121 *               |

Dose de cinza dentro de cada tratamento, na horizontal, comparada com o nível zero pelo teste bilateral de Dunnett. \* significativo a 5%. <sup>ns</sup> não-significativo D.M.S. 5% = 78,2 para tratamentos. D.M.S. 5% = 39,1 para média. Valores seguidos por letras distintas, nas colunas, diferem entre si, pelo teste de Duncan, a 5 %.

APÊNDICE 49 - Teores de boro ( $\text{mg kg}^{-1}$ ) na parte aérea de plantas de feijão cultivado em vasos num solo Podzólico Vermelho Amarelo, influenciado pela aplicação de doses de cinza de carvão mineral, adubação e calagem. Média de três repetições C.V.= 57,4 %

| Adubo | Calcário | Nível zero de Cinza | Cinza CIENTEC – $\text{t ha}^{-1}$ |                    |                    | Cinza UTPM 2 – $\text{t ha}^{-1}$ |                     |                     |
|-------|----------|---------------------|------------------------------------|--------------------|--------------------|-----------------------------------|---------------------|---------------------|
|       |          |                     | 20                                 | 40                 | 80                 | 40                                | 80                  | 160                 |
| Sem   | Sem      | 52 a                | 66 <sup>ns</sup> a                 | 61 <sup>ns</sup> a | 56 <sup>ns</sup> a | 119 <sup>ns</sup> a               | 295 * a             | 454 * a             |
| Sem   | Com      | 38 b                | 49 <sup>ns</sup> b                 | 51 <sup>ns</sup> a | 53 <sup>ns</sup> a | 69 <sup>ns</sup> a                | 101 <sup>ns</sup> b | 228 * b             |
| Com   | Sem      | 25 c                | 32 <sup>ns</sup> c                 | 40 <sup>ns</sup> a | 52 <sup>ns</sup> a | 44 <sup>ns</sup> a                | 98 <sup>ns</sup> b  | 213 * b             |
| Com   | Com      | 18 c                | 36 <sup>ns</sup> c                 | 42 <sup>ns</sup> a | 60 <sup>ns</sup> a | 33 <sup>ns</sup> a                | 55 <sup>ns</sup> b  | 126 <sup>ns</sup> b |
| Média |          | 33                  | 46 <sup>ns</sup>                   | 48 <sup>ns</sup>   | 55 <sup>ns</sup>   | 66 <sup>ns</sup>                  | 137 *               | 255 *               |

Dose de cinza dentro de cada tratamento, na horizontal, comparada com o nível zero pelo teste bilateral de Dunnett. \* significativo a 5%. <sup>ns</sup> não-significativo D.M.S. 5% = 113,7 para tratamentos. D.M.S. 5% = 56,8 para média. Valores seguidos por letras distintas, nas colunas, diferem entre si, pelo teste de Duncan, a 5 %.

APÊNDICE 50 - Teores de ferro ( $\text{mg kg}^{-1}$ ) na parte aérea de plantas de feijão cultivado em vasos num solo Podzólico Vermelho Amarelo, influenciado pela aplicação de doses de cinza de carvão mineral, adubação e calagem. Média de três repetições C.V.= 29,7 %

| Adubo | Calcário | Nível zero de Cinza | Cinza CIENTEC – $\text{t ha}^{-1}$ |                     |                     | Cinza UTPM 2 – $\text{t ha}^{-1}$ |                      |                     |
|-------|----------|---------------------|------------------------------------|---------------------|---------------------|-----------------------------------|----------------------|---------------------|
|       |          |                     | 20                                 | 40                  | 80                  | 40                                | 80                   | 160                 |
| Sem   | Sem      | 152 a               | 150 <sup>ns</sup> a                | 132 <sup>ns</sup> a | 150 <sup>ns</sup> a | 163 <sup>ns</sup> a               | 255 <sup>ns</sup> a  | 367 * a             |
| Sem   | Com      | 210 a               | 183 <sup>ns</sup> a                | 155 <sup>ns</sup> a | 180 <sup>ns</sup> a | 202 <sup>ns</sup> a               | 184 <sup>ns</sup> ab | 234 <sup>ns</sup> b |
| Com   | Sem      | 138 a               | 143 <sup>ns</sup> a                | 164 <sup>ns</sup> a | 162 <sup>ns</sup> a | 109 <sup>ns</sup> a               | 120 <sup>ns</sup> b  | 167 <sup>ns</sup> b |
| Com   | Com      | 127 a               | 134 <sup>ns</sup> a                | 158 <sup>ns</sup> a | 190 <sup>ns</sup> a | 97 <sup>ns</sup> a                | 119 <sup>ns</sup> b  | 147 <sup>ns</sup> b |
| Média |          | 157                 | 152 <sup>ns</sup>                  | 152 <sup>ns</sup>   | 170 <sup>ns</sup>   | 143 <sup>ns</sup>                 | 170 <sup>ns</sup>    | 229 *               |

Dose de cinza dentro de cada tratamento, na horizontal, comparada com o nível zero pelo teste bilateral de Dunnett. \* significativo a 5%. <sup>ns</sup> não-significativo D.M.S. 5% = 107,6 para tratamentos. D.M.S. 5% = 53,8 para média. Valores seguidos por letras distintas, nas colunas, diferem entre si, pelo teste de Duncan, a 5 %.

APÊNDICE 51 - Teores de alumínio ( $\text{mg kg}^{-1}$ ) na parte aérea de plantas de feijão cultivado em vasos num solo Podzólico Vermelho Amarelo, influenciado pela aplicação de doses de cinza de carvão mineral, adubação e calagem. Média de três repetições C.V.= 46,7 %

| Adubo | Calcário | Nível zero de Cinza | Cinza CIENTEC – $\text{t ha}^{-1}$ |                     |                     | Cinza UTPM 2 – $\text{t ha}^{-1}$ |                      |                     |
|-------|----------|---------------------|------------------------------------|---------------------|---------------------|-----------------------------------|----------------------|---------------------|
|       |          |                     | 20                                 | 40                  | 80                  | 40                                | 80                   | 160                 |
| Sem   | Sem      | 274 ab              | 265 <sup>ns</sup> a                | 273 <sup>ns</sup> a | 222 <sup>ns</sup> a | 284 <sup>ns</sup> ab              | 411 <sup>ns</sup> a  | 603 <sup>*</sup> a  |
| Sem   | Com      | 406 a               | 275 <sup>ns</sup> a                | 209 <sup>ns</sup> a | 234 <sup>ns</sup> a | 339 <sup>ns</sup> a               | 296 <sup>ns</sup> ab | 350 <sup>ns</sup> b |
| Com   | Sem      | 165 b               | 176 <sup>ns</sup> a                | 154 <sup>ns</sup> a | 183 <sup>ns</sup> a | 191 <sup>ns</sup> ab              | 140 <sup>ns</sup> b  | 169 <sup>ns</sup> b |
| Com   | Com      | 115 b               | 155 <sup>ns</sup> a                | 158 <sup>ns</sup> a | 194 <sup>ns</sup> a | 79 <sup>ns</sup> b                | 108 <sup>ns</sup> b  | 147 <sup>ns</sup> b |
| Média |          | 240                 | 218 <sup>ns</sup>                  | 198 <sup>ns</sup>   | 208 <sup>ns</sup>   | 223 <sup>ns</sup>                 | 239 <sup>ns</sup>    | 317 <sup>ns</sup>   |

Dose de cinza dentro de cada tratamento, na horizontal, comparada com o nível zero pelo teste bilateral de Dunnett. \* significativo a 5%. <sup>ns</sup> não-significativo D.M.S. 5% = 236,6 para tratamentos. D.M.S. 5% = 118,3 para média. Valores seguidos por letras distintas, nas colunas, diferem entre si, pelo teste de Duncan, a 5 %.

APÊNDICE 52 - Teores de cobre ( $\text{mg kg}^{-1}$ ) na parte aérea de plantas de feijão cultivado em vasos num solo Podzólico Vermelho Amarelo, influenciado pela aplicação de doses de cinza de carvão mineral, adubação e calagem. Média de três repetições C.V.= 22,5 %

| Adubo | Calcário | Nível zero de Cinza | Cinza CIENTEC – $\text{t ha}^{-1}$ |                      |                      | Cinza UTPM 2 – $\text{t ha}^{-1}$ |                      |                      |
|-------|----------|---------------------|------------------------------------|----------------------|----------------------|-----------------------------------|----------------------|----------------------|
|       |          |                     | 20                                 | 40                   | 80                   | 40                                | 80                   | 160                  |
| Sem   | Sem      | 5,79 a              | 7,29 <sup>ns</sup> a               | 10,82 <sup>*</sup> a | 6,34 <sup>ns</sup> a | 5,67 <sup>ns</sup> a              | 8,37 <sup>ns</sup> a | 10,80 <sup>*</sup> a |
| Sem   | Com      | 5,37 a              | 6,70 <sup>ns</sup> a               | 7,83 <sup>ns</sup> b | 6,48 <sup>ns</sup> a | 5,67 <sup>ns</sup> a              | 5,94 <sup>ns</sup> b | 7,56 <sup>ns</sup> b |
| Com   | Sem      | 4,05 a              | 4,05 <sup>ns</sup> b               | 4,59 <sup>ns</sup> c | 4,46 <sup>ns</sup> a | 3,24 <sup>ns</sup> b              | 4,86 <sup>ns</sup> b | 6,75 <sup>ns</sup> b |
| Com   | Com      | 4,59 a              | 3,78 <sup>ns</sup> b               | 3,78 <sup>ns</sup> c | 4,32 <sup>ns</sup> a | 3,24 <sup>ns</sup> b              | 1,89 <sup>ns</sup> c | 2,70 <sup>ns</sup> c |
| Média |          | 4,95                | 5,45 <sup>ns</sup>                 | 6,75 <sup>*</sup>    | 5,40 <sup>ns</sup>   | 4,46 <sup>ns</sup>                | 5,27 <sup>ns</sup>   | 6,95 <sup>*</sup>    |

Dose de cinza dentro de cada tratamento, na horizontal, comparada com o nível zero pelo teste bilateral de Dunnett. \* significativo a 5%. <sup>ns</sup> não-significativo D.M.S. 5% = 2,72 para tratamentos. D.M.S. 5% = 1,36 para média. Valores seguidos por letras distintas, nas colunas, diferem entre si, pelo teste de Duncan, a 5 %.

APÊNDICE 53 - Teores de zinco ( $\text{mg kg}^{-1}$ ) na parte aérea de plantas de feijão cultivado em vasos num solo Podzólico Vermelho Amarelo, influenciado pela aplicação de doses de cinza de carvão mineral, adubação e calagem. Média de três repetições C.V.= 10,9 %

| Adubo | Calcário | Nível zero de Cinza | Cinza CIENTEC – t ha <sup>-1</sup> |                       |          | Cinza UTPM 2 – t ha <sup>-1</sup> |                      |                      |
|-------|----------|---------------------|------------------------------------|-----------------------|----------|-----------------------------------|----------------------|----------------------|
|       |          |                     | 20                                 | 40                    | 80       | 40                                | 80                   | 160                  |
| Sem   | Sem      | 57,3 a              | 60,4 <sup>ns</sup> a               | 37,7 * a              | 30,4 * a | 53,2 <sup>ns</sup> a              | 62,0 <sup>ns</sup> a | 63,2 <sup>ns</sup> a |
| Sem   | Com      | 39,2 b              | 33,2 <sup>ns</sup> b               | 28,9 * b              | 30,3 * a | 35,0 <sup>ns</sup> b              | 40,5 <sup>ns</sup> b | 38,8 <sup>ns</sup> b |
| Com   | Sem      | 28,4 c              | 25,2 <sup>ns</sup> c               | 22,9 <sup>ns</sup> bc | 16,4 * b | 24,9 <sup>ns</sup> c              | 23,0 <sup>ns</sup> c | 31,4 <sup>ns</sup> c |
| Com   | Com      | 27,9 c              | 20,5 <sup>ns</sup> c               | 17,8 <sup>ns</sup> c  | 13,1 * b | 20,8 <sup>ns</sup> c              | 18,8 * c             | 17,8 * d             |
| Média |          | 38,2                | 34,8 <sup>ns</sup>                 | 26,8 *                | 22,5 *   | 33,5 *                            | 36,1 <sup>ns</sup>   | 37,8 <sup>ns</sup>   |

Dose de cinza dentro de cada tratamento, na horizontal, comparada com o nível zero pelo teste bilateral de Dunnett. \* significativo a 5%. <sup>ns</sup> não-significativo D.M.S. 5% = 7,72 para tratamentos. D.M.S. 5% = 3,86 para média. Valores seguidos por letras distintas, nas colunas, diferem entre si, pelo teste de Duncan, a 5 %.

APÊNDICE 54 - Teores de níquel ( $\mu\text{g kg}^{-1}$ ) na parte aérea de plantas de feijão cultivado em vasos num solo Podzólico Vermelho Amarelo, influenciado pela aplicação de doses de cinza de carvão mineral, adubação e calagem. Média de três repetições C.V.= 32,4 %

| Adubo | Calcário | Nível zero de Cinza | Cinza CIENTEC – t ha <sup>-1</sup> |                      |                      | Cinza UTPM 2 – t ha <sup>-1</sup> |                      |                       |
|-------|----------|---------------------|------------------------------------|----------------------|----------------------|-----------------------------------|----------------------|-----------------------|
|       |          |                     | 20                                 | 40                   | 80                   | 40                                | 80                   | 160                   |
| Sem   | Sem      | 6293 a              | 4628 * a                           | 3520 * a             | 2144 * a             | 496 * b                           | 1484 * a             | 3768 * a              |
| Sem   | Com      | 3330 b              | 2287 <sup>ns</sup> b               | 1729 * b             | 2210 <sup>ns</sup> a | 2793 <sup>ns</sup> a              | 2561 <sup>ns</sup> a | 2617 <sup>ns</sup> ab |
| Com   | Sem      | 2852 b              | 1539 <sup>ns</sup> b               | 1830 <sup>ns</sup> b | 1714 <sup>ns</sup> a | 1878 <sup>ns</sup> ab             | 1284 * a             | 1299 <sup>ns</sup> b  |
| Com   | Com      | 1370 c              | 1680 <sup>ns</sup> b               | 1684 <sup>ns</sup> b | 1522 <sup>ns</sup> a | 892 <sup>ns</sup> b               | 1642 <sup>ns</sup> a | 1173 <sup>ns</sup> b  |
| Média |          | 3461                | 2534 *                             | 2191 *               | 1897 *               | 1515 *                            | 1743 *               | 2214 *                |

Dose de cinza dentro de cada tratamento, na horizontal, comparada com o nível zero pelo teste bilateral de Dunnett. \* significativo a 5%. <sup>ns</sup> não-significativo D.M.S. 5% = 1155,6 para tratamentos. D.M.S. 5% = 777,8 para média. Valores seguidos por letras distintas, nas colunas, diferem entre si, pelo teste de Duncan, a 5 %.

APÊNDICE 55 - Teores de chumbo ( $\text{mg kg}^{-1}$ ) na parte aérea de plantas de feijão cultivado em vasos num solo Podzólico Vermelho Amarelo, influenciado pela aplicação de doses de cinza de carvão mineral, adubação e calagem. Média de três repetições C.V.= 55,9 %

| Adubo | Calcário | Nível zero de Cinza | Cinza CIENTEC – t ha <sup>-1</sup> |                    |                    | Cinza UTPM 2 – t ha <sup>-1</sup> |                   |                    |
|-------|----------|---------------------|------------------------------------|--------------------|--------------------|-----------------------------------|-------------------|--------------------|
|       |          |                     | 20                                 | 40                 | 80                 | 40                                | 80                | 160                |
| Sem   | Sem      | 10 ab               | 12 <sup>ns</sup> a                 | 11 <sup>ns</sup> a | 10 <sup>ns</sup> a | 6 <sup>ns</sup> a                 | 5 <sup>ns</sup> a | 6 <sup>ns</sup> b  |
| Sem   | Com      | 5 ab                | 8 <sup>ns</sup> a                  | 8 <sup>ns</sup> a  | 8 <sup>ns</sup> a  | 5 <sup>ns</sup> a                 | 4 <sup>ns</sup> a | 7 <sup>ns</sup> b  |
| Com   | Sem      | 15 a                | 15 <sup>ns</sup> a                 | 11 <sup>ns</sup> a | 7 <sup>ns</sup> a  | 7 <sup>ns</sup> a                 | 7 <sup>ns</sup> a | 4 * b              |
| Com   | Com      | 4 b                 | 17 * a                             | 16 * a             | 13 <sup>ns</sup> a | 5 <sup>ns</sup> a                 | 7 <sup>ns</sup> a | 13 <sup>ns</sup> a |
| Média |          | 9                   | 13 <sup>ns</sup>                   | 12 <sup>ns</sup>   | 10 <sup>ns</sup>   | 6 <sup>ns</sup>                   | 5 <sup>ns</sup>   | 7 <sup>ns</sup>    |

Dose de cinza dentro de cada tratamento, na horizontal, comparada com o nível zero pelo teste bilateral de Dunnett. \* significativo a 5%. <sup>ns</sup> não-significativo D.M.S. 5% = 10,5 para tratamentos. D.M.S. 5% = 5,3 para média. Valores seguidos por letras distintas, nas colunas, diferem entre si, pelo teste de Duncan, a 5 %.

APÊNDICE 56 - Teores de cromo ( $\mu\text{g kg}^{-1}$ ) na parte aérea de plantas de feijão cultivado em vasos num solo Podzólico Vermelho Amarelo, influenciado pela aplicação de doses de cinza de carvão mineral, adubação e calagem. Média de três repetições C.V.= 33,8 %

| Adubo | Calcário | Nível zero de Cinza | Cinza CIENTEC – t ha <sup>-1</sup> |                      |                       | Cinza UTPM 2 – t ha <sup>-1</sup> |                      |                      |
|-------|----------|---------------------|------------------------------------|----------------------|-----------------------|-----------------------------------|----------------------|----------------------|
|       |          |                     | 20                                 | 40                   | 80                    | 40                                | 80                   | 160                  |
| Sem   | Sem      | 1456 a              | 2646 <sup>ns</sup> a               | 2212 <sup>ns</sup> a | 2940 * a              | 1208 <sup>ns</sup> a              | 1893 <sup>ns</sup> a | 2494 <sup>ns</sup> a |
| Sem   | Com      | 1668 a              | 2039 <sup>ns</sup> a               | 2510 <sup>ns</sup> a | 1815 <sup>ns</sup> ab | 1504 <sup>ns</sup> a              | 2029 <sup>ns</sup> a | 1734 <sup>ns</sup> b |
| Com   | Sem      | 1483 a              | 1499 <sup>ns</sup> a               | 1571 <sup>ns</sup> a | 1505 <sup>ns</sup> b  | 1672 <sup>ns</sup> a              | 1165 <sup>ns</sup> b | 1668 <sup>ns</sup> b |
| Com   | Com      | 1567 a              | 1880 <sup>ns</sup> a               | 1987 <sup>ns</sup> a | 2398 <sup>ns</sup> ab | 1159 <sup>ns</sup> a              | 855 <sup>ns</sup> b  | 1176 <sup>ns</sup> b |
| Média |          | 1544                | 2216 <sup>ns</sup>                 | 2070 <sup>ns</sup>   | 2164 <sup>ns</sup>    | 1386 <sup>ns</sup>                | 1486 <sup>ns</sup>   | 1768 <sup>ns</sup>   |

Dose de cinza dentro de cada tratamento, na horizontal, comparada com o nível zero pelo teste bilateral de Dunnett. \* significativo a 5%. <sup>ns</sup> não-significativo D.M.S. 5% = 1298,8 para tratamentos. D.M.S. 5% = 649,4 para média. Valores seguidos por letras distintas, nas colunas, diferem entre si, pelo teste de Duncan, a 5 %.

APÊNDICE 57 - Teores de cádmio ( $\text{mg kg}^{-1}$ ) na parte aérea de plantas de feijão cultivado em vasos num solo Podzólico Vermelho Amarelo, influenciado pela aplicação de doses de cinza de carvão mineral, adubação e calagem. Média de três repetições C.V.=7,5 %

| Adubo | Calcário | Nível zero de Cinza | Cinza CIENTEC – $\text{t ha}^{-1}$ |    |    | Cinza UTPM 2 – $\text{t ha}^{-1}$ |    |     |
|-------|----------|---------------------|------------------------------------|----|----|-----------------------------------|----|-----|
|       |          |                     | 20                                 | 40 | 80 | 40                                | 80 | 160 |
| Sem   | Sem      | <1                  | <1                                 | <1 | <1 | <1                                | <1 | <1  |
| Sem   | Com      | <1                  | <1                                 | <1 | <1 | <1                                | <1 | <1  |
| Com   | Sem      | <1                  | <1                                 | <1 | <1 | <1                                | <1 | <1  |
| Com   | Com      | <1                  | <1                                 | <1 | <1 | <1                                | <1 | <1  |
| Média |          |                     |                                    |    |    |                                   |    |     |

Dose de cinza dentro de cada tratamento, na horizontal, comparada com o nível zero pelo teste bilateral de Dunnett. \* significativo a 5%. <sup>ns</sup> não-significativo D.M.S. 5% = 0,,36 para tratamentos. D.M.S. 5% = 0,18 para média. Valores seguidos por letras distintas, nas colunas, diferem entre si, pelo teste de Duncan, a 5 %.

APÊNDICE 58 - Notas proporcionais ao grau de infecção por antracnose de plantas de feijão cultivado em vasos num solo Podzólico Vermelho Amarelo, influenciado pela aplicação de doses de cinza de carvão mineral, adubação e calagem. Média de três repetições C.V.=9,21 %

| Adubo | Calcário | Nível zero de Cinza | Cinza CIENTEC – $\text{t ha}^{-1}$ |                     | Cinza UTPM 2 – $\text{t ha}^{-1}$ |                     |
|-------|----------|---------------------|------------------------------------|---------------------|-----------------------------------|---------------------|
|       |          |                     | 20                                 | 40                  | 40                                | 80                  |
| Sem   | Sem      | 8,3 a               | 8,0 <sup>ns</sup> a                | 8,0 <sup>ns</sup> a | 7,7 <sup>ns</sup> a               | 3,0* c              |
| Sem   | Com      | 7,3 a               | 7,7 <sup>ns</sup> a                | 7,0 <sup>ns</sup> a | 8,0 <sup>ns</sup> a               | 5,0 <sup>ns</sup> b |
| Com   | Sem      | 7,7 a               | 7,7 <sup>ns</sup> a                | 8,0 <sup>ns</sup> a | 8,3 <sup>ns</sup> a               | 8,3 <sup>ns</sup> a |
| Com   | Com      | 7,7 a               | 6,7 <sup>ns</sup> a                | 7,7 <sup>ns</sup> a | 7,3 <sup>ns</sup> a               | 7,3 <sup>ns</sup> a |
| Média |          | 7,71                | 7,46 <sup>ns</sup>                 | 7,64 <sup>ns</sup>  | 7,91 <sup>ns</sup>                | 5,58*               |

Dose de cinza dentro de cada tratamento, na horizontal, comparada com o nível zero pelo teste bilateral de Dunnett. \* significativo a 5%. <sup>ns</sup> não-significativo D.M.S. 5% = 0,51 para tratamentos. D.M.S. 5% = 0,26 para média. Valores seguidos por letras distintas, nas colunas, diferem entre si, pelo teste de Duncan, a 5 %.