

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE PELOTAS
INSTITUTO DE QUÍMICA E GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM QUÍMICA



Dissertação de Mestrado

**CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DO LODO SECO DA
PARBOILIZAÇÃO DE ARROZ E SUA UTILIZAÇÃO NA
AGRICULTURA**

Isis Saraiva Pinto

Pelotas, 2009

Isis Saraiva Pinto

**CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DO LODO SECO DA
PARBOILIZAÇÃO DE ARROZ E SUA UTILIZAÇÃO NA
AGRICULTURA**

Dissertação apresentada ao Programa de
Pós-Graduação em Química da
Universidade Federal de Pelotas, como
requisito parcial à obtenção do título de
Mestre em Ciências (área de
concentração: Química).

Orientador: Prof. Dr. Jorge Luiz Martins

PELOTAS
FEVEREIRO DE 2009

Isis Saraiva Pinto

Caracterização Físico-Química do Lodo Seco da Parboilização de Arroz e sua Utilização na Agricultura. 2009.

Dissertação (Mestrado em Química) – Universidade Federal de Pelotas.
Programa de Pós-Graduação em Química. Departamento de Química analítica Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Jorge Luiz Martins

1. Resíduo de arroz parboilizado. . 2. Efluentes. 3. Reator UASB. 4. Fósforo.
5. Propriedades químicas. 6. Propriedades físicas. 7. Calcita

A banca examinadora, abaixo assinada, aprova a Dissertação de Mestrado intitulada “Caracterização Físico-Química do Lodo Seco da Parboilização de Arroz e sua Utilização na Agricultura”, de autoria de Isis Saraiva Pinto.

Banca examinadora:

.....
Prof. Dr. Jorge Luiz Martins (Orientador)

.....
Prof. Dr. Benildo Sousa Cavada - DB - Centro de Ciências - UFC

.....
Prof. Dr. Ricardo Pires dos Santos - Eng. Computação - UFC - Sobral

Dedico esta dissertação à minha mãe Otilia Maria, por sua gratidão, amor, carinho, compreensão e apoio para que eu realizasse todos os meus sonhos e à memória de meu pai Ramão Carlos Pinto.

Ao meu marido, Raphael, que sempre se fez presente durante toda a minha caminhada de formação profissional, trazendo-me apoio e transmitindo-me incentivo, paz e felicidade.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Jorge, pela orientação, ensinamentos e oportunidade concedida a realização deste curso.

Ao meu irmão Ariel, que sempre esteve ao meu lado incentivando-me.

À minha avó e madrinha Maria Zulcar, por estar sempre presente e também as minhas tias Leda e Sara.

Aos meus sogros Marco Aurélio e Maria Tereza, que me incentivaram a ir atrás dos meus objetivos.

Aos estagiários do laboratório de Química Ambiental que sempre estiveram presentes durante esta caminhada, ajudando-me e colaborando mutuamente: Rodrigo, Elisa, Henrique (parrudinho) e Carolina que já se direcionaram para outras atividades, mas em especial ao Henrique (Joseph), que até hoje acompanha meu trabalho, tornando esta realização possível.

Às colegas de curso Patrícia Velleda e Márcia Ortiz pela amizade e companheirismo.

À minha amiga Patrícia Ferreira, que conquistei nesta etapa da minha vida, pela sua amizade, carinho e dedicação que sempre foram demonstrados em todos os momentos, deixo meu reconhecimento.

À minha amiga de muitos anos, Thais, que sempre esteve presente e me ajudou a concluir este trabalho.

A todos que sempre estiveram e colaboraram comigo de alguma maneira.

A DEUS, por toda a força que precisei durante este trabalho, pois sem Ele não conseguiria superar as dificuldades que surgiram em meu caminho.

À Banca Examinadora, pela disponibilidade e contribuição.

ÍNDICE

Página

LISTA DE TABELAS.....	x
LISTA DE FIGURAS.....	xi
LISTA DE ABREVIATURAS.....	xv
RESUMO.....	xvii
ABSTRACT.....	xviii
1 INTRODUÇÃO E OBJETIVOS	1
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	3
2.1 Arroz.....	3
2.1.1 Composição do Arroz.....	6
2.1.2 Arroz Parboilizado	9
2.1.2.1 Processo de Parboilização	10
2.1.2.2 Vantagens e Desvantagens do Arroz Parboilizado	12
2.2 Resíduos	13
2.3 Eutrofização	18
2.4 Solo	22
2.5 Métodos de Análises	24
2.5.1 Difração de Raios-X (XRD)	26
2.5.2 Microscopia Ótica	28
2.5.3 Espectroscopia no Infravermelho (IR)	32
2.5.4 Absorção Atômica (AA)	35
2.5.5 Espectrometria de Emissão de Plasma (ICP)	38
3 MATERIAL E MÉTODOS	41
3.1 RS-UASB da Parboilização do Arroz Tratado em Reator UASB.....	41
3.2 Características Físico-Químicas do RS-UASB.....	41
3.2.1 Determinação do pH e Valor de Neutralização	41
3.2.2 Conteúdo de Carbono Orgânico.....	42
3.2.3 Nitrogênio Kjeldahl	42
3.2.4 Concentrações de Macro e Micronutrientes e Metais Pesados.....	42
3.2.5 Concentrações de N-NH ₄ ⁺ , N-NO ₃ ⁻ e N-NO ₂ ⁻	42

	ix
3.2.6 Quantidade de Proteína Bruta.....	43
3.2.7 Difração por Raios-X.....	43
3.2.8 Espectroscopia no Infravermelho.....	43
3.2.9 Medida de Umidade.....	44
3.2.10 Conteúdo de Cinzas.....	44
3.2.11 Densidade Aparente.....	44
3.2.12 Microscopia Ótica.....	45
3.3 Solo Utilizado.....	45
3.4 Experimento em Laboratório.....	46
3.5 Experimento em Casa de Vegetação.....	48
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	50
4.1 Características Físico-Químicas do RS-UASB.....	50
4.2 Experimento em Laboratório.....	56
4.3 Experimento em Casa de Vegetação.....	58
4.3.1 Nitrogênio.....	63
4.3.2 Fósforo.....	64
4.3.3 Potássio.....	66
4.3.4 Cálcio.....	67
4.3.5 Magnésio.....	69
4.3.6 Enxofre.....	70
4.3.7 Sódio.....	71
4.3.8 Cobre e Zinco.....	72
4.3.9 Ferro - Manganês - Alumínio.....	74
4.3.10 Cromo - Níquel - Chumbo - Cádmio.....	76
5 CONCLUSÃO.....	80
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	81
7 APÊNDICES.....	87

LISTA DE TABELAS

Página

Tabela 1 - Produção e consumo de arroz em casca, nos principais países, média dos anos 1999/2001.....	5
Tabela 2 - Principais importadores e exportadores de arroz beneficiado, 2002.	5
Tabela 3 - Composição do arroz.	8
Tabela 4 - Geração de resíduos de uma indústria de parboilização de arroz.	12
Tabela 5 - Principais métodos experimentais e as propriedades físico-químicas envolvidas	25
Tabela 6 - Caracterização física e química do solo Pelotas (Planossolo Háplico Eutrófico Solódico) utilizado nos experimentos.	46
Tabela 7 - Caracterização química do RS-UASB da parboilização do arroz	51
Tabela 8 - Medidas de pH em água do solo, produção de matéria seca (g vaso^{-1}) e extração total (mg vaso^{-1}) de nitrogênio, fósforo e potássio pelas plantas de aveia cultivadas em vasos num solo Planossolo Háplico Eutrófico Solódico, influenciado pela aplicação de doses (Mg ha^{-1}) crescentes de RS-UASB da parboilização de arroz, calagem e adubação mineral. Médias de três repetições.*	62
Tabela 9 - Extração total (mg vaso^{-1}) de cálcio, magnésio enxofre e sódio pelas plantas de aveia cultivadas em vasos num solo Planossolo Háplico Eutrófico Solódico, influenciado pela aplicação de doses (Mg ha^{-1}) crescentes de RS-UASB da parboilização de arroz, calagem e adubação mineral. Médias de três repetições.*	68
Tabela 10 - Extração total ($\mu\text{g vaso}^{-1}$) de cobre, zinco ferro manganês e alumínio pelas plantas de aveia cultivadas em vasos num solo Planossolo Háplico Eutrófico Solódico, influenciado pela aplicação de doses (Mg ha^{-1}) crescentes de RS-UASB da parbolização de arroz, calagem e adubação mineral. Médias de três repetições.*	73
Tabela 11 - Extração total ($\mu\text{g vaso}^{-1}$) de cromo, níquel chumbo e cádmio pelas plantas de aveia cultivadas em vasos num solo Planossolo Háplico Eutrófico Solódico, influenciado pela aplicação de doses (Mg ha^{-1}) crescentes de RS-UASB da parboilização de arroz, calagem e adubação mineral. Médias de três repetições.....	79

LISTA DE FIGURAS

	Página
Figura 1 - Distribuição por continente da produção e consumo mundial de arroz.....	4
Figura 2 - Estrutura do grão do arroz	7
Figura 3 - Processo da Parboilização do Arroz.	11
Figura 4 - Estrutura do ácido fítico	16
Figura 5 - Processo do tratamento do efluente gerado na parboilização do arroz.	17
Figura 6 - Ciclo do Nitrogênio	21
Figura 7 - Difratorômetro de raios-X (a); Difratorograma de uma argila (b), mostrando suas fases cristalinas: Caulinita (C), Quartzo (Q) e Ilita (I).....	27
Figura 8 - Microscópio metalográfico Eclipse LV100D da Nikon (a); Esquema do sistema ótico de um microscópio metalográfico (b).....	32
Figura 9 - Esquema de um espectrômetro no infravermelho	35
Figura 10 - Espectrofotômetro de Absorção Atômica com Forno de Grafite	36
Figura 11 - Espectrofotômetro de Absorção Atômica com chama	37
Figura 12 - Plasma acoplado indutivamente.	38
Figura 13 - Um nebulizador típico para a injeção de amostras em uma fonte de plasma.	39
Figura 14 - Vista parcial do experimento de incubação do RS-UASB no solo Pelotas.....	47
Figura 15 - RS-UASB originado da parboilização do arroz	50
Figura 16 - Difratorograma do RS-UASB mostrando a principal fase cristalina: calcita.....	52
Figura 17 - Espectro infravermelho do RS-UASB mostrando as bandas associadas com íons carbonato e fosfato.	54
Figura 18 - Imagens de microscopia ótica mostrando o pó do RS-UASB em diferentes ampliações. Em microscopia de campo claro sob iluminação episcópica podem ser observadas pequenas partículas sobre a superfície de partículas maiores, nos aumentos de 40x (a) e 100x (b). Em microscopia de polarização sob iluminação diascópica, os cristais de calcita podem ser observados separadamente nas ampliações de 200x (c) e 400x (d).	55
Figura 19 - Efeito das doses (Mg ha^{-1}) de calcário e de RS-UASB da parboilização do arroz sobre o pH do solo Pelotas. Média de 24, 58, e 88 dias de incubação.....	56

- Figura 20** - Efeito das doses (Mg ha^{-1}) de CaCO_3 e de RS-UASB da parboilização do arroz sobre o pH do solo Pelotas. Média de 24, 58, e 88 dias de incubação.....57
- Figura 21**- Quantidade de RS-UASB da parboilização do arroz que poderá substituir as doses de calcário necessárias para elevar o pH do solo Pelotas a 6,5.....58
- Figura 22** - Produção de matéria seca de aveia (g vaso^{-1}) cultivada em vasos num solo Planossolo Háplico Eutrófico Solódico, influenciada pela aplicação de doses (Mg ha^{-1}) de RS-UASB da parboilização do arroz, calagem e adubação mineral. Média de três repetições.59
- Figura 23** - Efeito da aplicação de doses equivalentes a 0 (testemunha sem NPK e sem CaCO_3 – tratamento 1); 1,5 ; 3,0 ; 4,5 e 6,0 Mg ha^{-1} de RS-UASB da parboilização do arroz sobre as plantas de aveia cultivadas em solo Planossolo Háplico Eutrófico Solódico.....59
- Figura 24** - Efeito da aplicação de doses equivalentes a 0 (testemunha sem NPK e com CaCO_3 – tratamento 2); 1,5 ; 3,0 ; 4,5 e 6,0 Mg ha^{-1} de RS-UASB da parboilização do arroz sobre as plantas de aveia cultivadas em solo Planossolo Háplico Eutrófico Solódico..... 60
- Figura 25** - Efeito da aplicação de doses equivalentes a 0 (testemunha com NPK e sem CaCO_3 – tratamento 3); 1,5 ; 3,0 ; 4,5 e 6,0 Mg ha^{-1} de RS-UASB da parboilização do arroz sobre as plantas de aveia cultivadas em solo Planossolo Háplico Eutrófico Solódico..... 60
- Figura 26** - Efeito da aplicação de doses equivalentes a 0 (testemunha com NPK e com CaCO_3 – tratamento 4); 1,5 ; 3,0 ; 4,5 e 6,0 Mg ha^{-1} de RS-UASB da parboilização do arroz sobre as plantas de aveia cultivadas em solo Planossolo Háplico Eutrófico Solódico.....61
- Figura 27** - Medidas de pH do solo Planossolo Háplico Eutrófico Solódico, influenciado pela aplicação de doses (Mg ha^{-1}) de RS-UASB da parboilização do arroz, calagem e adubação mineral. Média de três repetições.....63
- Figura 28** - Quantidade total de nitrogênio extraída (mg vaso^{-1}) pelas plantas de aveia cultivadas em vasos num solo Planossolo Háplico Eutrófico Solódico, influenciado pela aplicação de doses (Mg ha^{-1}) de RS-UASB da parboilização do arroz, calagem e adubação mineral. Média de três repetições..... 64
- Figura 29** - Quantidade total de fósforo extraída (mg vaso^{-1}) pelas plantas de aveia cultivadas em vasos num solo Planossolo Háplico Eutrófico Solódico, influenciado pela aplicação de doses (Mg ha^{-1}) de RS-UASB da parboilização do arroz, calagem e adubação mineral. Média de três repetições.....65

- Figura 30** - Quantidade total de potássio extraída (mg vaso^{-1}) pelas plantas de aveia cultivadas em vasos num solo Planossolo Háplico Eutrófico Solódico, influenciado pela aplicação de doses (Mg ha^{-1}) de RS-UASB da parboilização do arroz, calagem e adubação mineral. Média de três repetições..... 67
- Figura 31** - Quantidade total de cálcio extraída (mg vaso^{-1}) pelas plantas de aveia cultivadas em vasos num solo Planossolo Háplico Eutrófico Solódico, influenciado pela aplicação de doses (Mg ha^{-1}) de RS-UASB da parboilização do arroz, calagem e adubação mineral. Média de três repetições..... 68
- Figura 32** - Quantidade total de magnésio extraída (mg vaso^{-1}) pelas plantas de aveia cultivadas em vasos num solo Planossolo Háplico Eutrófico Solódico, influenciado pela aplicação de doses (Mg ha^{-1}) de RS-UASB da parboilização do arroz, calagem e adubação mineral. Média de três repetições..... 69
- Figura 33** - Quantidade total de enxofre extraída (mg vaso^{-1}) pelas plantas de aveia cultivadas em vasos num solo Planossolo Háplico Eutrófico Solódico, influenciado pela aplicação de doses (Mg ha^{-1}) de RS-UASB da parboilização do arroz, calagem e adubação mineral. Média de três repetições..... 70
- Figura 34** - Quantidade total de sódio extraída (mg vaso^{-1}) pelas plantas de aveia cultivadas em vasos num solo Planossolo Háplico Eutrófico Solódico, influenciado pela aplicação de doses (Mg ha^{-1}) de RS-UASB da parboilização do arroz, calagem e adubação mineral. Média de três repetições..... 71
- Figura 35** - Quantidade total de cobre extraída ($\mu\text{g vaso}^{-1}$) pelas plantas de aveia cultivadas em vasos num solo Planossolo Háplico Eutrófico Solódico, influenciado pela aplicação de doses (Mg ha^{-1}) de RS-UASB da parboilização do arroz, calagem e adubação mineral. Média de três repetições..... 72
- Figura 36** - Quantidade total de zinco extraída ($\mu\text{g vaso}^{-1}$) pelas plantas de aveia cultivadas em vasos num solo Planossolo Háplico Eutrófico Solódico, influenciado pela aplicação de doses (Mg ha^{-1}) de RS-UASB da parboilização do arroz, calagem e adubação mineral. Média de três repetições..... 73
- Figura 37** - Quantidade total de ferro extraída ($\mu\text{g vaso}^{-1}$) pelas plantas de aveia cultivadas em vasos num solo Planossolo Háplico Eutrófico Solódico, influenciado pela aplicação de doses (Mg ha^{-1}) de RS-UASB da parboilização do arroz, calagem e adubação mineral. Média de três repetições..... 74

- Figura 38** - Quantidade total de manganês extraída ($\mu\text{g vaso}^{-1}$) pelas plantas de aveia cultivadas em vasos num solo Planossolo Háplico Eutrófico Solódico, influenciado pela aplicação de doses (Mg ha^{-1}) de RS-UASB da parboilização do arroz, calagem e adubação mineral. Média de três repetições..... 75
- Figura 39** - Quantidade total de alumínio extraída ($\mu\text{g vaso}^{-1}$) pelas plantas de aveia cultivadas em vasos num solo Planossolo Háplico Eutrófico Solódico, influenciado pela aplicação de doses (Mg ha^{-1}) de RS-UASB da parboilização do arroz, calagem e adubação mineral. Média de três repetições..... 76
- Figura 40** - Quantidade total de cromo extraída ($\mu\text{g vaso}^{-1}$) pelas plantas de aveia cultivadas em vasos num solo Planossolo Háplico Eutrófico Solódico, influenciado pela aplicação de doses (Mg ha^{-1}) de RS-UASB da parboilização do arroz, calagem e adubação mineral. Média de três repetições..... 77
- Figura 41** - Quantidade total de níquel extraída ($\mu\text{g vaso}^{-1}$) pelas plantas de aveia cultivadas em vasos num solo Planossolo Háplico Eutrófico Solódico, influenciado pela aplicação de doses (Mg ha^{-1}) de RS-UASB da parboilização do arroz, calagem e adubação mineral. Média de três repetições..... 77
- Figura 42** - Quantidade total de chumbo extraída ($\mu\text{g vaso}^{-1}$) pelas plantas de aveia cultivadas em vasos num solo Planossolo Háplico Eutrófico Solódico, influenciado pela aplicação de doses (Mg ha^{-1}) de RS-UASB da parboilização do arroz, calagem e adubação mineral. Média de três repetições..... 78
- Figura 43** - Quantidade total de cádmio extraída ($\mu\text{g vaso}^{-1}$) pelas plantas de aveia cultivadas em vasos num solo Planossolo Háplico Eutrófico Solódico, influenciado pela aplicação de doses (Mg ha^{-1}) de RS-UASB da parboilização do arroz, calagem e adubação mineral. Média de três repetições..... 78

LISTA DE ABREVIATURAS

AA	Absorção Atômica
AN	Abertura Numérica da Lente
AOAC	Association of Official Analytical Chemists
CQFS / RS – SC	Manual de Adubação e de Calagem para os estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina
CTC	Capacidade de Troca de Cátions
DBO	Demanda Bioquímica de Oxigênio
DBWS	DBWS
DQAI-IQG/UFPel	Departamento de Química Analítica Inorgânica do IQG/UFPel
DQO	Demanda Química De Oxigênio
EPA	Environmental Protection Agency
ER	Eficiência Relativa
FEPAM-RS	Fundação Estadual de Proteção Ambiental Henrique Luis Roessler – RS
FAAS	Espectrometria de Absorção Atômica em Chama
GFAAS	Espectrometria de Absorção Atômica em Forno de Grafite
H + Al	Acidez Potencial
ICP	Espectrometria de Emissão de Plasma
ICP-MS	Espectrometria de Massas com Fonte de Plasma Indutivamente Acoplado
ICP-OES	Espectrometria de Emissão Óptica com Plasma Indutivamente Acoplado
ICTR	Instituto de Ciência e Tecnologia em Resíduos e Desenvolvimento Sustentável
IQG – UFPel	Instituto de Química e Geociência da UFPel
IR	Espectroscopia no Infravermelho
NTK	Nitrogênio Total de Kjeldahl

PB	Proteína Bruta
PHB	Polihidroxibutirato
PRNT	Poder Relativo de Neutralização Total
QuiAmb-Lab	Laboratório de Química Analítica Ambiental
RBA	Reator Biológico Aerado
RBS	Reator em Batelada Seqüencial
RS-UASB	Resíduo Seco Gerado no Reator UASB (lodo seco)
SMP	Solução Tampão de $K_2Cr_2O_7$ a pH 7,5
XRD	X-Ray Diffraction / Difração de Raios-X
UASB	Upflow Anaerobic Sludge Blanket/ Reator Anaeróbio com manto de lodo e fluxo ascendente
UFC	Universidade Federal do Ceará
UFPeI	Universidade Federal de Pelotas
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul
VN	Valor de Neutralização

RESUMO

Título: Caracterização Físico-Química do Lodo Seco da Parboilização de Arroz e sua Utilização na Agricultura

Autor: Isis Saraiva Pinto

Orientador: Prof. Dr. Jorge Luiz Martins

A disposição de resíduos de parboilização do arroz na agricultura representa uma alternativa menos agressiva ao ambiente do ponto de vista de reciclagem da nutrientes. A parboilização é um processo hidrotérmico no qual o arroz é submetido a um período de encharcamento, seguido de autoclavagem e posterior secagem, havendo a difusão de nutrientes da casca para o interior dos grãos, ocorrendo também, simultaneamente, a lixiviação de vários compostos para a água de encharcamento. O lodo obtido no processo de parboilização possui alto teor de compostos orgânicos, nitrogênio e fósforo que, se forem aproveitados, evitarão problemas ambientais como a eutrofização de mananciais. O objetivo deste trabalho foi caracterizar química e fisicamente o lodo seco da parboilização de arroz (RS-UASB) e avaliar o seu efeito quando aplicado ao solo no crescimento e nutrição de plantas. O RS-UASB apresentou um pH igual a 7,3, um valor de neutralização de 55% medido por titulação e de 67,3% medido por incubação. Apresentou ainda um alto teor de Ca (25%), P (4,2%), Na (1,2%) e K (0,97%). A difração de raio-X mostrou um percentual de cristalinidade ao redor de 62%, sendo o principal composto a calcita. Sua densidade foi de $0,77 \text{ g cm}^{-3}$. Exceto pelo fósforo, todos os elementos detectados estavam abaixo dos níveis permitidos pela FEPAM-RS para descarte de efluentes. No experimento realizado em casa de vegetação, mantido durante 60 dias, foram utilizadas as doses correspondentes à 16, 32, 48 e 64 Mg ha^{-1} do RS-UASB. A aplicação deste resíduo ao solo Planossolo elevou o pH do mesmo. As doses crescentes deste, até valores correspondentes a 64 Mg ha^{-1} , aumentaram a produção de matéria seca de aveia (*Avena sativa* L.), bem como a absorção total de N, P, K, Ca, Mg, Fe, Mn, Cu e Zn pelas plantas. A aplicação de lodo seco de parboilização de arroz ao solo tem potencial para ser usado como fertilizante.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PELOTAS

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM QUÍMICA

Dissertação de Mestrado em Química

Pelotas, Fevereiro de 2009.

ABSTRACT

Title: **Physical and Chemical Characterization of the Dry Residue Rice Parboiling and application agriculture**

Author: Isis Saraiva Pinto

Academic Advisor: Prof. Dr. Jorge Luiz Martins

The rice parboiling residues disposition on the agriculture can represent a less aggressive alternative to the environment, when it comes to nutrient recycling. The parboiling is a hydrothermal process, in which the rice is submitted to a soaking period, followed by autoclaving and drying, causing the movement of nutrients within the rice rind into the grain interior, along with the lixiviation of several compounds into the water used for the soaking of grains. The silt obtained in this process presents high rates of organic compounds, nitrogen and phosphor, of which, if used, could avoid environmental problems such as the water sources eutrophication. The objective of this study was to characterize the chemical and physical of the rice parbolization dry silt (RS-UASB), and thus, evaluate its effects when applied on the soil, regarding the plants growth and nutrition. The RS-UASB showed a pH of 7,3, a neutralization value of 55% measured by titration, and 67,3% measured by incubation. It also demonstrated high levels of Ca (25%), P (25%), Na (1,2%) and K (0,97%). X-ray diffraction showed percentage crystallinity around 62%, with calcite as the main compound. Its density was of 0,77 g cm⁻³. Except by phosphor, all detected elements were below the levels permitted by FEPAM-RS to effluents discard. On the experiment carried in greenhouse, maintained for a period of 60 days, it was utilized the dosages of 16, 32, 48 e 64 Mg ha⁻¹ from RS-UASB. The application of these residues to the Planossoil soil, raised the respective pH. With raising dosages of such residues, until values correspondent to 64 Mg h⁻¹, it was observed the raising of the Oat (*Avena sativa* L.) dry matter, and increasing absorption of total N , P , K , Ca , Mg , Fe , Mn , Cu and Zn by the plants. The application of dry silt originated from the rice parboiling has potential of being used as a fertilizer on the soil.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PELOTAS

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM QUÍMICA

Master Dissertation in Chemistry

Pelotas, February 2009.

1 INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

Em decorrência do acúmulo de resíduos derivados da atividade humana no meio urbano e rural, ficou evidenciada, principalmente a partir das décadas de 1970 e 1980, a necessidade de dar destino adequado a estes resíduos, principalmente o lodo de esgoto, o lixo e os resíduos industriais (COSTA, 2001).

A incorporação de resíduos da parboilização do arroz em solos agrícolas poderá representar uma alternativa menos agressiva ao meio ambiente em relação à deposição em rios ou lagoas. A incorporação desse material ao solo, como fertilizante, se viável, poderá reduzir os custos de produção agrícola.

O arroz é o alimento básico mais importante para metade da população mundial e proporciona mais de 20 % da ingestão mundial de calorias. A produção brasileira de arroz em casca estimada para 2005 foi de 13.233.624 Mg. No Brasil, 25% do total de arroz produzido é parboilizado, assim como no resto do mundo. O Rio Grande do Sul ocupa o primeiro lugar na produção de arroz brasileira¹ (FARIA, 2006; ABIAP, 2008).

O processo de parboilização do arroz é o processo hidrotérmico, no qual o arroz em casca é imerso em água potável, a uma temperatura acima de 58°C, seguido de gelatinização do amido e secagem. Nas indústrias mais tecnificadas essas operações são responsáveis pelo aumento do rendimento, da capacidade de conservação e valor nutritivo do produto, o que torna o processo mais vantajoso (DOS SANTOS, 2003; SANTOS, 2004). Durante a parboilização ocorre a difusão de nutrientes da casca para o interior dos grãos, assim como também ocorre simultaneamente a lixiviação de vários compostos para a água de encharcamento como, por exemplo, nitritos, nitratos, fosfatos e matéria orgânica. Quanto maior for a temperatura em que ocorre a operação, maior será a lixiviação de sólidos dos grãos (DOS SANTOS, 2003; SANTOS, 2004).

O processo de parboilização de arroz utiliza em média 1,12 L de água e gera 0,83 L de efluente por quilograma de arroz em casca processado. O lodo resultante deste processo apresenta altas cargas de substâncias orgânicas, nitrogênio e fósforo, além de outros nutrientes que, se fossem aproveitados, evitariam problemas

¹ Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/home/estatística/indicadores/agropecuária/lspa/lspa09200405>>

ambientais como a eutrofização de lagos e rios (FARIA, 2006).

Assim, com o alto custo dos fertilizantes agrícolas e a dificuldade de descarte de resíduos, o uso do lodo gerado na parboilização do arroz quando seco (RS-UASB) na agricultura seria uma alternativa atrativa do ponto de vista de reciclagem de nutrientes. O trabalho teve por objetivo caracterizar física e quimicamente o RS-UASB da parboilização de arroz e avaliar o efeito de sua aplicação ao solo no crescimento e nutrição de aveia (*Avena sativa* L.), e a biodisponibilidade de seus constituintes para as plantas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Arroz

Segundo vários historiadores como botânicos e evidências arqueológicas, diz-se que o arroz teve sua origem no Sudeste da Ásia (constituído por sete espécies *Oryza barthii*, *Oryza glaberrima*, *Oryza latifolia*, *Oryza longistaminata*, *Oryza punctata*, *Oryza rufipogon* e *Oryza sativa*) e foi a primeira planta a ser cultivada. As mais antigas referências² ao arroz são encontradas na literatura chinesa, há cerca de 5.000 anos. O uso do arroz também é muito antigo na Índia, sendo citado em todas as escrituras hindus. Variedades especiais usadas como oferendas em cerimônias religiosas, já eram conhecidas em épocas remotas e talvez sendo considerado o principal alimento. De acordo com alguns autores como Américo Vespúcio, considera-se que o Brasil foi o primeiro país da América a ter o cultivo deste cereal (DOS SANTOS, 2006; Portal Embrapa Arroz e Feijão, 2008).

O arroz é uma planta da família das gramíneas que alimenta mais da metade da população humana do mundo. Para poder ser cultivado com sucesso, o arroz irrigado necessita de água em abundância, para manter a temperatura ambiente dentro de intervalos adequados, e, nos sistemas tradicionais, de mão-de-obra intensiva. Desenvolve-se bem mesmo em terrenos muito inclinados e é costume, nos países do sudeste asiático encontrarem-se terraços onde é cultivado. Em qualquer dos casos, a água mantém-se em constante movimento, embora circule a velocidade muito reduzida. Isso porque já existem variedades de arroz de sequeiro, que não necessita da irrigação contínua. Esse grão é a terceira maior cultura cerealífera do mundo, apenas ultrapassado pelo milho e trigo (GOMES, 2004 e DOS SANTOS, 2006).

A Ásia ocupa a primeira posição em consumo e produção mundiais. A América do Sul, a segunda em produção e a terceira em consumo, onde o Brasil é o nono produtor mundial, sendo a produção oriunda de dois sistemas de cultivo: de várzea (irrigado) e de terras altas (sequeiro).

² Disponível em: <<http://www.vivernocampo.com.br/agricultura/historiaarroz.htm>>.

Cultivado em todos os continentes, o arroz tem grande parte do seu consumo local, sendo apenas de 4 a 5% comercializado internacionalmente, isso faz com que o mercado se torne sensível as quebras de safra, levando a mudanças na disponibilidade para exportação ou à necessidade de importação. Em relação a qualidade e tipo do grão há uma segmentação e definida pelos países importadores, predominando atualmente o comércio de grãos longos. De acordo com a figura 1, verifica-se que a Ásia retém 90% da produção e consumo mundial deste cereal, onde 49% são de importações e 78% de exportações.

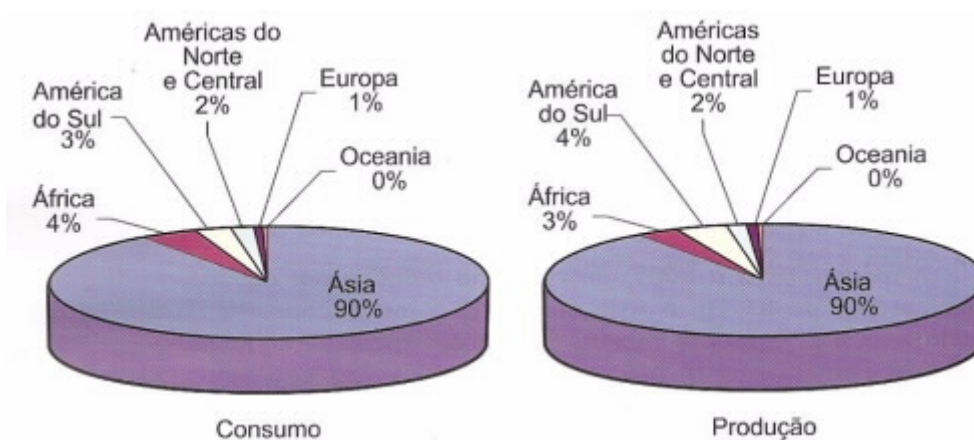


Figura 1 - Distribuição por continente da produção e consumo mundial de arroz.

Fonte: Gomes, 2004.

Cerca de 85% da produção mundial está localizada entre os países da Ásia (tabela 1), onde os maiores produtores também são os maiores consumidores, como a China, seguindo a Índia e Indonésia, totalizando 62,3% da produção e 63% do consumo, sendo a Indonésia o maior importador (tabela 1). Na tabela 2 são mostrados os principais países importadores deste cereal, destacando a Indonésia como sendo o principal importador.

Tabela 1 - Produção e consumo de arroz em casca, nos principais países, média dos anos 1999/2001.

Países	Produção (10⁶Mg)	Participação no Total (%)	Consumo (10⁶Mg)	Participação no Total (%)
China	189,8	31,4	188,7	32,5
Índia	135,3	22,4	123,4	21,4
Indonésia	51,1	8,5	53,8	9,3
Vietnã	32,0	5,3	23,5	4,1
Bangladesh	36,2	6,0	34,4	5,9
Tailândia	25,6	4,2	14,0	2,4
Mianmar	21,1	3,5	17,3	3,0
Brasil	11,0	1,8	11,8	2,0
Japão	11,3	1,9	12,4	2,1
Filipinas	12,4	2,1	12,9	2,2

Fonte: Dados compilados, FAO – FAOSTAT Database Results (GOMES, 2004).

Tabela 2 - Principais importadores e exportadores de arroz beneficiado, 2002.

Exportação		Importação	
Países	Milhões Mg	Países	Milhões Mg
Tailândia	7,2	Indonésia	3,5
Vietnã	3,2	Iraque	1,2
Estados Unidos	3,3	Filipinas	1,2
Índia	6,2	Brasil	0,6
China	2,1	Irã	1,0
Paquistão	1,6	Nigéria	1,8
Uruguai	0,6	Arábia Saudita	0,9
Mianmar	0,7	Costa do Marfim	1,0
Outros	2,8	Outros	16,9
Total Mundial	28,1	Total Mundial	28,1

Fonte: Dados compilados FAO – FAOSTAT Database Results (GOMES, 2004).

O mercado vem atendendo duas frentes de consumidores, os com melhor poder de compra, que seguem buscando alternativas do alimento, como o produto semipronto de qualidade superior e os que buscam suprir suas necessidades energéticas diárias, onde grande parte está localizada na África e Ásia, sendo o volume mais importante que a qualidade desse alimento. Já os países em desenvolvimento, tradicionais consumidores de arroz, buscam produtos melhores, mas possuem o poder aquisitivo como limitador (FAO, 1995; GOMES, 2004).

No Brasil o arroz é um dos cereais mais importantes, significando cerca de 15% a 20% do total de grãos colhidos no país. Ele é cultivado praticamente em todos os estados e consumido por todas as classes sociais, principalmente pelos de baixa renda. O arroz ocupa a posição de destaque do ponto de vista econômico e social devido ao seu aporte de calorias e proteínas na dieta básica da alimentação (GOMES, 2004).

2.1.1 Composição do Arroz

O arroz é um cereal rico em uma grande quantidade de nutrientes como proteínas, vitaminas, sais minerais, fibras e uma excelente fonte de carboidratos que gera energia devido a alta concentração de amido contido no endosperma do grão (NAVES, 2007). O grão do arroz possui dois tipos de amido: amilose e a amilopectina, onde o teor de amilose constitui uma variável de grande interesse no processamento e tecnologia em geral do arroz (JULIANO, 1993; NAVES, 2007). Ele é recomendado para substituir a ingestão de açúcar e gorduras, diminuir os riscos de diabetes e cardiopatias e também por preservar as proteínas. Mas possui uma concentração muito baixa de lipídios (menor que 1%), sendo que o seu farelo, no entanto, chega a possuir até 20%. O arroz apresenta ainda um volume considerável de ferro e zinco, elementos de muita importância na alimentação humana (DOS SANTOS, 2006).

O arroz no Brasil é consumido principalmente na forma de grãos inteiros. O consumo deste cereal se dá por meio de três formas principais: arroz integral, arroz polido e arroz parboilizado (DOS SANTOS, 2003).

Com o grande consumo deste cereal e seus derivados no Brasil é possível evitar uma das doenças mais comuns entre as pessoas, a anemia ferropriva, causada pela deficiência de ferro (Fe), muito comum quando há a falta de arroz, o

alimento básico da alimentação do brasileiro, que é indicado para a prevenção dessa carência (TORRES e QUEIROS, 2000). O arroz integral é o mais indicado para suprir essa deficiência, devido ser uma fonte considerável de Fe (AGTE, 1999).

O arroz pode ser dividido em três tipos: arroz integral, arroz polido e arroz parboilizado e isso é devido as suas características físicas e química e também da maneira como ele é “produzido”.

A figura 2 mostra as partes do grão do arroz, que são “modificadas” dependendo do tipo de processo pelo qual o grão passa, antes de ser utilizado como produto comercial.

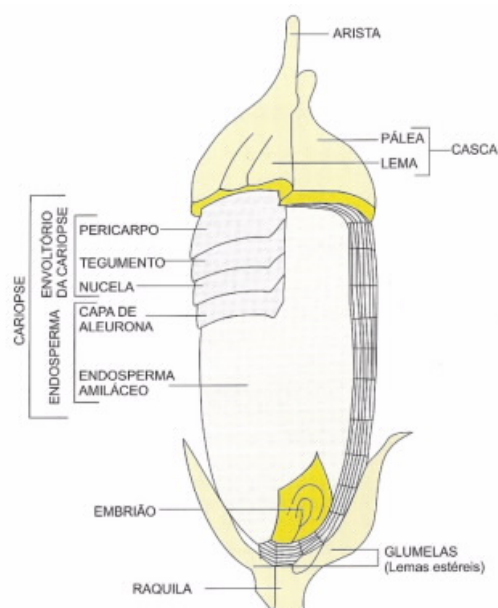


Figura 2 - Estrutura do grão do arroz

Fonte: Gomes, 2004.

O arroz integral é o arroz do qual é retirada apenas a casca, a qual deve ser realizada com muita cautela para minimizar a ocorrência de quebra e rachaduras. Depois ele passa pelo dessecador e vai para uma câmara de aspiração, onde os grãos descascados são separados das cascas, ou palha, geralmente removida por sucção. O grão não passa pela etapa do polimento, como ocorre no arroz polido, com isso ele retém as camadas mais externas ficando com uma coloração mais escura, gosto mais acentuado e uma textura mais dura após o cozimento. Mas, apesar dessas características ele é mais nutritivo do que o arroz tradicional (branco polido) por reter grande parte dos nutrientes que são eliminados durante o processo do polimento (DOS SANTOS, 2006).

O arroz polido é o arroz branquinho o qual é obtido quando o grão do arroz é submetido ao descasque e polimento do grão integral. Durante a brunição, o produto passa por máquinas que provocam o atrito nos grãos, removendo parte das camadas externas do endosperma e do germe, deixando o arroz contendo basicamente carboidratos (80%). Para o acabamento é dado o polimento, onde a quebra dos grãos é reduzida e eles ganham aspecto vítreo, utilizando-se da adição de sacarose, óleo ou parafina para embelezar o produto. Esse processo pelo qual ele passa, provoca perdas consideráveis de certos nutrientes como de lipídios (cerca de 80%) de fibra, niacina (até 70%), Fe e Zn (em torno de 50%), deixando menos nutritivo em relação aos outros (DOS SANTOS, 2006; NAVES, 2007) (Tabela 3).

Já, o arroz parboilizado, ainda em casca, passa por um processo hidrotérmico no qual ele é imerso em água aquecida (58°C) sob pressão e posteriormente é exposto ao vapor e a secagem. Desse procedimento resulta um grão mais firme e solto, contendo mais nutrientes do que o arroz polido (branco). Na verdade, esse processo pelo qual o grão do arroz passa é um pré-cozimento que resulta na gelatinização do amido, total ou parcial. Devido a isso, é mais fácil o seu modo de preparo e também acaba ficando “soltinho” (DOS SANTOS, 2006).

Tabela 3 - Composição do arroz.

Componentes	Integral		Polido		Parboilizado	
	Cru	Cozido	Cru	Cozido	Seco	Cozido
Umidade (%)	12,0	70,3	12,0	72,6	10,3	73,4
Proteína (%)	7,5	2,5	6,7	2	7,4	2,1
Gordura (%)	1,9	0,6	0,4	0,1	0,3	0,1
Carboidrato(%)	77,4	25,5	80,4	24,2	81,3	23,3
Fibra alimentar (%)	0,9	0,3	0,3	0,1	0,2	0,1
Cinza (%)	1,2	1,1	0,5	1,1	0,7	1,1
Cálcio (mg)	32	12	24	10	60	19
Fósforo (mg)	221	73	94	28	200	5,7
Sódio ⁽¹⁾ (mg)	9	-	5	-	9	-
Potássio (mg)	214	70	92	28	150	43

⁽¹⁾O teor de sódio no produto cozido é variável em função do teor de sódio na água e da adição de sal durante o cozimento.

Fonte: Embrapa Arroz e Feijão – Santo Antonio de Goias - GO

Um dos processos utilizados no arroz para que ele mantenha suas características originais por mais tempo é a Parboilização.

2.1.2 Arroz Parboilizado

Antigamente conhecia-se o arroz malekizado, que tinha esse nome devido ao pesquisador Malek, que pesquisava sobre a doença do Beriberi, que atacava as pessoas da China, por terem como base de sua alimentação o arroz branco (polido). Isso porque esse arroz é pobre em todas as vitaminas do complexo B, incluindo a Tiamina (Vitamina B1) e menos fibras, tendo apenas parcelas de gordura e amido, causando vários sintomas as pessoas relacionados com o sistema nervoso e o aparelho cardiovascular. Com isso pesquisadores, inclusive Malek, continuaram informando-se a respeito sobre essa doença, descobrindo a Vitamina B1 e sua fonte, dando início à era das vitaminas (ABIAP, 2008). Desta maneira, a tiamina foi descoberta nas camadas mais externas do grão do arroz, além disso, são nessas películas que estão às outras vitaminas A, B12, o ferro, o fósforo e o boro, as proteínas e os carboidratos.

Já o processo de parboilização do arroz, por isso também o nome de arroz parboilizado (mais conhecido assim), foi descoberto, por acaso, pelo químico e nutricionista inglês Eric Huzenlaub, no início do século XX, onde ele percorrendo as tribos da Índia e África, cuja sua alimentação básica também era o arroz, constatou a grande ocorrência da mesma doença das pessoas na China, o Beriberi, onde as quais também consumiam o produto sem a parboilização, mas percebeu que não havia nenhum sintoma de anormalidade, entre aqueles que utilizavam o arroz parboilizado.

Nesta época, a parboilização era um processo primitivo, no qual o arroz com casca era mergulhado em potes de barro com água à temperatura ambiente e em seguida, era secado ao sol ou em chapas aquecidas, sendo posteriormente descascado (ABIAP, 2008). Então, a palavra parboilizado (de arroz parboilizado) teve origem na adaptação do termo inglês parboiled, proveniente da aglutinação de partial + boiled, isto é, "parcialmente fervido".

2.1.2.1 Processo de Parboilização

A tecnologia de parboilização de arroz, no Brasil, foi introduzida na década de cinquenta, onde o processo se diferencia do beneficiamento convencional de industrialização de arroz polido por passar por algumas intervenções hidrotérmicas anteriormente ao descascamento. Nas indústrias mais tecnificadas essas operações, encharcamento, autoclavagem e secagens aplicadas no grão ainda com casca, são responsáveis pelas vantagens advindas de aumento do rendimento, da capacidade de conservação e valor nutritivo deste cereal (DOS SANTOS, 2003).

De acordo com a legislação brasileira (BRASIL, 1998), o processo da parboilização é baseado em um tratamento hidrotérmico, enquanto o arroz ainda está dentro da casca. Ele é tratado em tanques com água morna, durante algumas horas, a uma temperatura de 58°C onde se dissolvem as vitaminas e sais minerais que estão na casca e no fruto do arroz. Estes nutrientes ficam em suspensão na água, a qual está livre de produtos químicos e migram para centro do grão do arroz por absorção, ocorrendo também, simultaneamente, a lixiviação de vários compostos para a água utilizada nesse processo (nitritos, nitratos, fosfatos e matéria orgânica).

À medida que a temperatura é maior, consequentemente a lixiviação dos sólidos do grão também. Em seguida, o arroz ainda úmido é sujeitado a uma elevada temperatura sob pressão de vapor, ocorrendo alteração na sua estrutura, no qual o amido do grão é gelatinizado (processo em autoclave), isto é, ficando mais compacto para a fixação dos nutrientes. Durante os próximos estágios o arroz vai para um secador e depois para outros processos para ser descascado, polido e selecionado. Atualmente o Brasil possui a tecnologia mais avançada do mundo da parboilização do arroz (ABIAP, 2008). A figura 3 mostra um esquema do procedimento que ocorre durante o processo da parboilização do arroz.



Figura 3 - Processo da Parboilização do Arroz.

Utiliza-se no processo da parboilização do arroz, aproximadamente 1,12L de água, gerando 0,83L de efluente/Kg do grão de arroz. O efluente representa cerca de 73% do total da água utilizada no processo (FARIA, 2006), apresentando as seguintes características: demanda química de oxigênio (DQO) 3600 mg L⁻¹, nitrogênio total Kjeldahl (NTK) 120 mg L⁻¹ e fósforo total (P) 100 mg L⁻¹. Estes valores estão muito acima dos padrões exigidos pela Fundação Estadual de Proteção Ambiental RS (FEPAM), que é de 300,0 mg L⁻¹ para a DQO, 10,0 mg L⁻¹ para o NTK e 1,0 mg L⁻¹ para o P (SANTOS, 2003).

Segundo dados fornecidos por uma indústria de parboilização de arroz da Região Sul do Estado do Rio Grande do Sul, a produção anual de lodo está apresentada na tabela 4, onde demonstra o volume total de lodo gerado pela indústria da parboilização do arroz ao longo de um ano.

Tabela 4 - Geração de resíduos de uma indústria de parboilização de arroz.

	Produção Diária	Produção Mensal (26 dias)	Produção Anual (300 dias)
Produto Processado (Kg)	600 000	$15,6 \times 10^6$	180×10^6
Água utilizada no processo (L)	672 000	$17,5 \times 10^6$	202×10^6
Efluente Gerado(L)	432 000	$11,2 \times 10^6$	130×10^6
Lodo Descartado dia ⁻¹ (L)	5 000	$0,13 \times 10^6$	$1,5 \times 10^6$

Fonte: Indústria de Parboilização de Arroz da Região Sul (Dados pessoais).

2.1.2.2 Vantagens e Desvantagens do Arroz Parboilizado

O arroz parboilizado apresenta vantagens sobre os outros tipos de arroz (por exemplo, sobre o polido) por ter melhor valor nutricional, por sua maior concentração de micronutrientes. Se essa comparação for feita com o arroz integral, o parboilizado sai perdendo em quantidade destes nutrientes, e também de fibras, porém, como tem a película retirada após o tratamento hidrotérmico, fica livre de compostos nela presentes, chamados ácidos orgânicos, que se associam a determinados minerais e prejudicam sua absorção pelo organismo.

Outros pontos favoráveis em relação ao integral são o aroma mais suave, nenhum composto químico é adicionado e o menor tempo de cozimento. Ele representa um meio termo entre o polido e o integral, apresentando valor nutricional que justifica sua introdução na alimentação do dia-a-dia (BITENCOURT, 2006).

Este arroz também se destaca, pois durante o seu processo de obtenção, ele gera um resíduo rico em ferro, nitrogênio, fósforo, entre outros, que são os micro e macronutrientes essenciais as plantas e por também na fase do seu tratamento passar a possuir íons metálicos como o sódio que é um elemento utilizado na nutrição das plantas, podendo ser utilizado como adubo.

Embora, o arroz parboilizado seja rico em nutrientes para o consumo das pessoas e também gerar um resíduo que pode ser aproveitado, ele também possui suas desvantagens. Isso ocorre devido ao resultado de sua aparência após o processo de parboilização, onde o arroz passa a possuir uma coloração mais escura, prejudicando sua aparência e interferindo na sua aceitação para o consumo, quando comparado a outro produto mais claro e atrativo (DOS SANTOS, 2006).

2.2 Resíduos

Os resíduos (lixo) são produzidos pelos diversos estágios das atividades humanas, nas residências, nos comércios, nos setores públicos, nos diversos ramos da indústria e até mesmo pelo próprio ambiente. Eles variam de acordo com a sua composição e em relação aos seus volumes.

Segundo Leripio (2004), “somos a sociedade do lixo, cercados totalmente por ele, mas só recentemente acordamos para este triste aspecto de nossa realidade”. Ele diz ainda que, nos últimos 20 anos, a população mundial cresceu menos que o volume de lixo por ela produzido. Enquanto de 1970 a 1990 a população do planeta aumentou em 18%, a quantidade de lixo sobre a Terra passou a ser 25% maior.³

O volume do lixo produzido no mundo aumentou três vezes mais do que a população nos últimos 30 anos. A proliferação de embalagens descartáveis e acultura do consumo e do desperdício já são responsáveis pelo despojo de 30 bilhões de toneladas de resíduos sólidos no planeta todos os anos (COLAVITTI, 2003).

O resíduo industrial é originado nas atividades dos diversos ramos da indústria, tais como: o metalúrgico, o químico, o petroquímico, o de papelaria, da indústria alimentícia, entre outros. O lixo industrial é bastante variado, podendo ser representado por cinzas, lodos, óleos, resíduos alcalinos ou ácidos, plásticos, papel, madeira, fibras, borracha, metal, escórias, vidros, cerâmicas. Nesta categoria, inclui-se grande quantidade de lixo tóxico. Esse tipo de lixo necessita de tratamento especial pelo seu potencial de envenenamento (LERIPIO, 2004).

³ Disponível em: <<http://www.eps.ufsc.br/~lgqa/Coferecidos.html>>.

Apenas 28% das quase 3 milhões de toneladas de resíduos industriais geradas anualmente no Brasil recebem tratamento adequado. O restante acaba em lixões ou aterros clandestinos e em corpos hídricos, contaminando o solo, a água e ameaçando a saúde pública. Esses danos ainda podem ser maiores, pois não existem levantamentos precisos no país, onde “esse número faz referência apenas aos resíduos gerados por empresas ligadas a Associação de Empresas de Tratamento de Resíduos, que são 14”, de acordo com Diógenes Del Bel, diretor-executivo da Aberte (COLAVITTI, 2003).

Com todos esses resíduos produzidos de várias indústrias do país, “os responsáveis pelo destino desses lixos são as próprias empresas. Como não há legislação que obrigue as indústrias a declarar a quantidade de resíduos que geram e tratam, fica difícil evitar que o material não vá parar em locais irregulares” explica o economista Sabetai Calderoni, diretor-executivo do Instituto de Ciência e Tecnologia em Resíduos e Desenvolvimento Sustentável (ICTR). Com isso o ICTR elaborou uma proposta de lei de responsabilidade ambiental com o objetivo de gerar essas informações e facilitar o acesso a elas. A idéia é que as empresas preencham declarações anuais sobre a quantidade de materiais produzidos, a natureza e o volume gerado e o destino dado a cada um deles, inclusive o nome e o registro da empresa que os coletou (COLAVITTI, 2003).

As indústrias que fazem o tratamento dos resíduos deverão declarar a quantidade de resíduos recebidos e os seus destinos. Essa proposta também estabelece que os órgãos ambientais de cada Estado entreguem relatórios anuais sobre os solos contaminados conhecidos no primeiro dia do ano e as providências tomadas. “Com essas informações, o governo federal poderá fazer relatórios anuais sobre o estado do meio ambiente e elaborar um plano nacional de resíduos industriais”, segundo Calderoni citado por COLAVITTI (2003).

Na indústria da parboilização do arroz, o resíduo gerado, é rico em nutrientes devido a composição do grão de arroz. Este, se tratado, pode ser aproveitado como fertilizante agrícola, por possuir vários componentes importantes para a nutrição das plantas.

Durante o processo da parboilização do arroz, antes da água utilizada ser descartada, o efluente é submetido a um tratamento primário, secundário e terciário. No tratamento primário há um processo de remoção física de partículas grosseiras e material suspenso, onde o pH é ajustado em torno de 6 a 7 com NaOH 10%. O tratamento secundário é realizado em dois estágios, primeiro por um reator Upflow Anaerobic Sludge Blanket (UASB) do tipo digestor anaeróbio, onde durante o processo anaeróbio ao formar uma cobertura de lodo granular o líquido fica em suspensão no tanque. Esse resíduo líquido atravessa a cobertura sendo digeridos por organismos anaeróbios. Já no segundo estágio do tratamento secundário, ele ocorre em um reator em batelada seqüencial (SRB) onde o oxigênio é injetado para reduzir a demanda bioquímica de oxigênio (DBO) e a demanda química de oxigênio (DQO) para tornar o resíduo apropriado para despejos em esgoto ou para o uso agrícola. No tratamento terciário há a remoção do nitrogênio do efluente, sendo composto por dois vetores de desnitrificações ligados ao mesmo reator do segundo estágio do tratamento secundário, o reator em batelada seqüencial (SRB).

O RS-UASB é gerado no tratamento secundário, no reator UASB, no qual há a remoção de substâncias orgânicas, além de outros nutrientes como o nitrogênio e o fósforo. O fósforo provém dos resíduos agrícolas de adubação, defensivos agrícolas e da hidrólise da fitina. Porém neste caso, ele vem da hidrólise da fitina, que é uma substância presente na casca do grão de arroz que, hidrolisada durante o processo de encharcamento na parboilização do arroz, libera o fósforo como ortofosfato, polifosfato e fósforo orgânico, sendo que os ortofosfatos apresentam-se na forma de ácido fosfórico (H_3PO_4) e de íons fosfatos (H_2PO_4^- , HPO_4^{2-} e PO_4^{3-}) dependendo do pH do meio. Já os polifosfatos se transformam por hidrólise em ortofosfatos, a qual normalmente é lenta. O fósforo orgânico no tratamento de efluentes e nos corpos receptores é convertido a ortofosfato (CARDOSO, 2006). Os fosfatos no arroz apresentam-se em cerca de 73% na forma de ácido fítico (figura 4). A quantidade de fósforo pode ser reduzida por um reagente precipitante como o CaO, durante o tratamento.

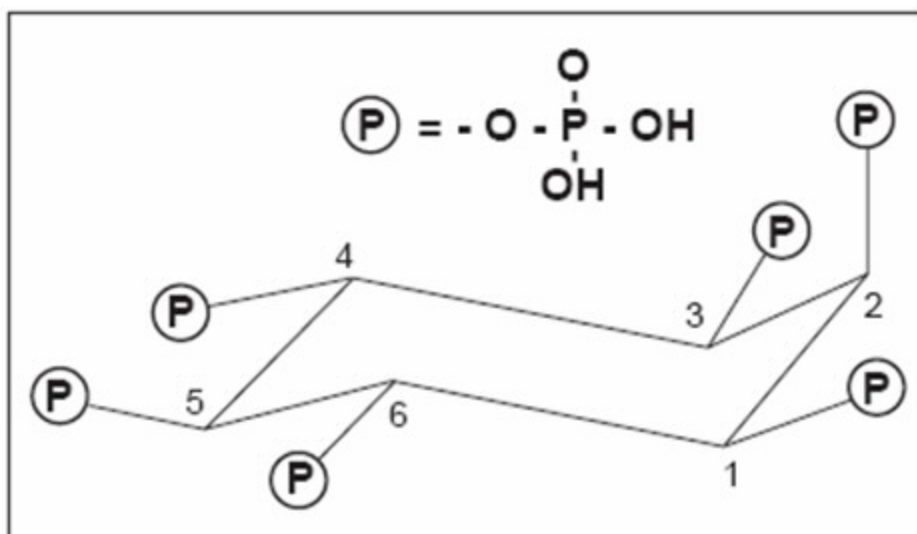


Figura 4 - Estrutura do ácido fítico

Fonte: Ciênc. Tecnol. Aliment., Campinas, 26(2): 309-317, abr.-jun. 2006

O fósforo na forma de fosfato pode ser removido de diversas maneiras, mas as mais utilizadas são o tratamento biológico realizado no reator UASB e a precipitação química. Durante o tratamento secundário, realizado no reator UASB, o mecanismo de remoção biológica de fósforo baseado na atividade dos microrganismos acumuladores, possui etapas que se constituem de fermentação e estocagem de ácidos graxos voláteis, na fase anaeróbia e absorção de fósforo para manutenção e produção de novas células, na fase aeróbia (DOS SANTOS, 2003; PINHEIRO, 2004).

A remoção biológica de fósforo envolve a sua incorporação na biomassa como material celular. A retirada de fósforo do sistema se dá através da purga da biomassa. O processo de remoção biológica de fósforo constitui-se de sistemas combinados de anaerobiose/aerobiose. O fósforo é liberado da célula das bactérias removedoras de fósforo, em meio anaeróbio, absorvendo carbono e transformando em polihidroxibutirato (PHB), que é armazenado no interior da célula. O PHB é liberado na forma de energia em meio aeróbio e o ortofosfato é então absorvido pela bactéria (KOETZ e FARIA, 2003).

Já a precipitação química torna-se necessária quando a concentração de fósforo, resultante do tratamento biológico secundário e da sedimentação primária, é maior que a exigida nos padrões dos órgãos de proteção ambiental como a FEPAM-RS. Essa remoção química de fósforo está na transformação de ortofosfatos

dissolvidos em particulados, através da precipitação química. Compostos de baixa solubilidade se formam pela adição de sais de cálcio, ferro ou alumínio, como o sulfato de alumínio, cloreto férrico ou óxido de cálcio. Os compostos formados possuem diferentes solubilidades, sendo essencial o controle do pH para se obter uma maior eficiência de remoção com a precipitação química (DOS SANTOS, 2003).

Também há o tratamento terciário, que é necessário para que ocorra a remoção do nitrogênio que ainda está presente no efluente. Esse tratamento é composto por dois reatores de desnitrificação interligados ao Reator Biológico Aerado (RBA). Durante esse processo de remoção de nitrogênio há duas etapas constituintes a de oxidação da amônia (nitrogênio inorgânico) e do nitrogênio orgânico, realizado pelos organismos nitrificantes e posteriormente há a conversão do nitrato (NO_3^-) em nitrogênio gasoso (N_2) em meio anóxico (CARDOSO, 2006). A figura 5, a seguir, mostra de forma esquemática as etapas do tratamento do resíduo gerado na parboilização do arroz.

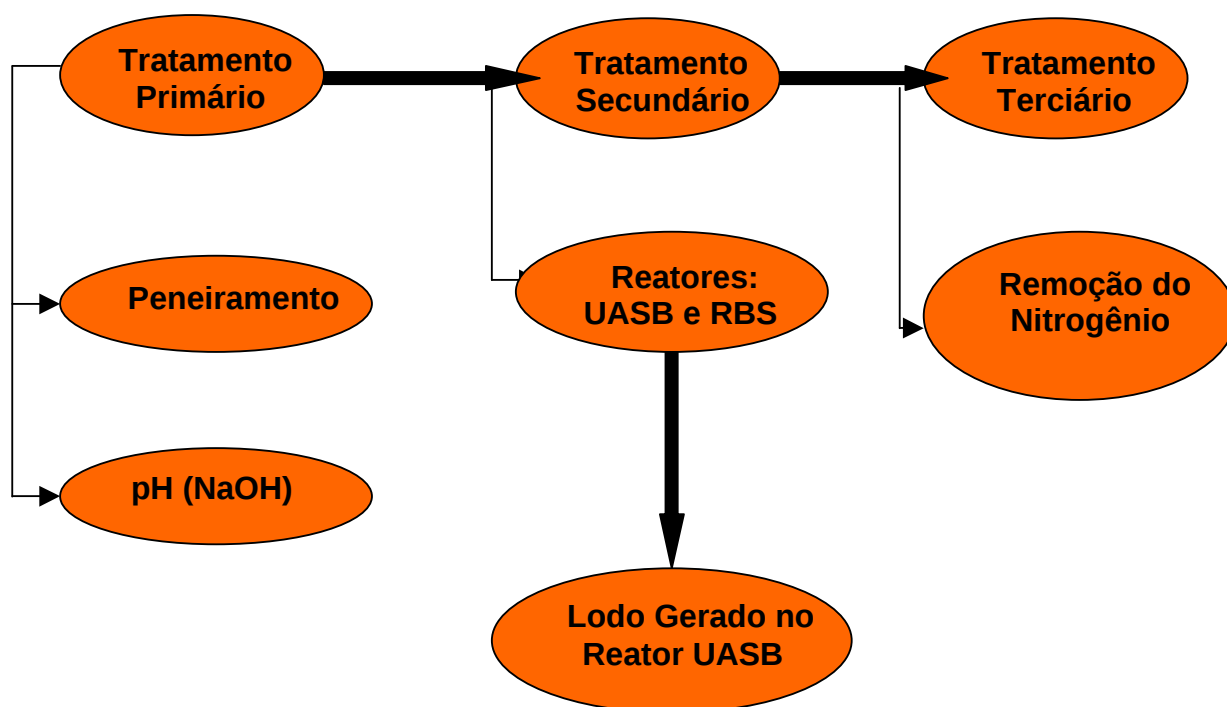
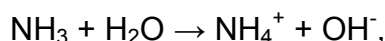


Figura 5 - Processo do tratamento do efluente gerado na parboilização do arroz.

2.3 Eutrofização

O crescimento da população de microorganismos em corpos hídricos geralmente é causado por despejos de efluentes de atividades humanas industriais, domésticas e agrícolas, como por exemplo, a indústria da parboilização do arroz, devido gerar um resíduo rico em matéria orgânica. Esse material causa um aumento rápido de algas que está relacionado com o acúmulo de nutrientes derivados do nitrogênio (nitratos), do fósforo (fosfatos), do enxofre (sulfatos), mas também de potássio, cálcio e magnésio que recebe o nome de “florescimento” ou “bloom”, causando uma coloração azul-esverdeada, vermelha ou acastanhada à água, pelas espécies de algas favorecidas pela situação (FARIA, 2006).

Este fenômeno chama-se eutrofização, aonde o termo vem do grego “eu”, que significa bom, verdadeiro e “trophein”, nutrir, assim eutrófico significa “bem nutrido”. A eutrofização é um processo que ocorre através da floração de cianobactérias que se alimentam pela decomposição de nutrientes químicos que estão em excesso, tipicamente de compostos que contém nitrogênio e fósforo (principais nutrientes – macronutrientes – para o processo biológico), os quais causam o aumento da concentração de íons como os nitratos (NO_3^-), nitritos (NO_2^-) e amônio (NH_4^+) que é formada a partir da reação:



onde a matéria orgânica ingerida pelas bactérias é hidrolisada em aminoácidos e fosfatos (PO_4^{3-}), lançados em águas residuárias do ecossistema. Ela pode ser considerada um dos principais problemas ecológicos que teve a segunda metade do século XX.

A eutrofização causa alta deficiência de oxigênio dissolvido na água provocando grandes mudanças no ecossistema aquático. A flora submersa desaparece pela falta de energia luminosa, consequência do excessivo crescimento de algas, impedindo que a luz penetre causando a morte de peixes e na maioria dos invertebrados aquáticos. Em condições anaeróbias se desenvolvem outros organismos que liberam na água outros elementos indesejáveis ao consumo do homem. Muitos efeitos ecológicos podem surgir da produção primária estimulada,

mas existem três impactos ambientais particularmente problemáticos que são: diminuição da biodiversidade, modificações na predominância e composição das espécies e efeitos de toxidez.

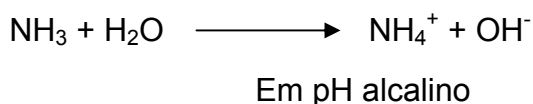
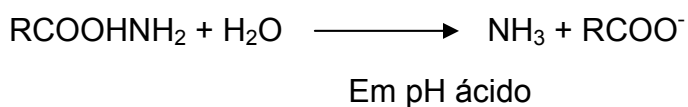
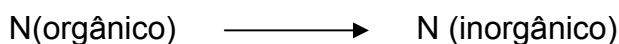
O aceleração das atividades humanas, a agricultura e o desenvolvimento também são fatores da poluição destes ecossistemas, pois aumentam o fluxo de compostos orgânicos e inorgânicos, onde o P é freqüentemente considerado o principal culpado nos casos de eutrofização de lagos quando há pontos de poluição de origem de despejos de esgotos, estimulando o crescimento desordenado de microorganismos fotossintetizantes (MARTIN, 1994; FARIA, 2006). Ele é essencial a todas as formas de vida, sendo parte da estrutura celular, apesar de ser reativo ele não se apresenta na sua forma elementar, mas nas formas inorgânicas derivados do ácido fosfórico ou orgânicas (ácido polifosfórico e polifosfatos). Na água se apresenta de quatro maneiras: inorgânicas não dissolvidas, orgânicas não dissolvidas, inorgânicas dissolvidas e orgânicas dissolvidas.

Segundo Canadá (1999, p.78, apud NIEWEGLOWSKI, 2006, p. 58), a disponibilidade do Fósforo está correlacionada com as taxas de absorção e desprendimento deste pela biota, especiação química (forma orgânica ou inorgânica), abundancia relativa deste elemento e tempo de residência da fração dissolvida de Fósforo no ambiente. A forma predominante de ortofosfato é o H_2PO_4^- (10%) e HPO_4^{2-} (90%). Os fosfatos são rapidamente complexados com cátions disponíveis na água (exemplo: ferro, alumínio e cálcio), formando complexos insolúveis, quelados e sais. A formação e a dissolução destes compostos é a maior parte do ciclo do fósforo que ocorre em função do pH, da concentração de fosfatos, íons metálicos e ligantes, da solubilidade de vários compostos metalo-fosfóricos, do potencial redox e das atividades da biota (bactérias, fungos, plancton e vertebrados). Essas associações removem o fosfato da coluna d'água e reduz a concentração de muitos metais pela precipitação de compostos metalo-fosfóricos.

O nitrogênio também é decorrente destas atividades, ele na sua forma inorgânica contribui para o processo de nitrificação no ambiente aquático. Com o aumento da produtividade de algas ocorre o consumo excessivo de oxigênio, que acaba causando a ocorrência de baixas concentrações deste, nas camadas mais profundas dos lagos e dessa forma a diversidade de organismo é afetada.

O nitrogênio amoniacal é um nutriente que se apresenta na água na forma do íon amônio (NH_4^+). Esse íon é liberado, através da decomposição das substâncias nitrogenadas (proteínas, aminoácidos e uréia). Em ambiente anaeróbico o amônio pode surgir pela redução do nitrato (NO_3^- – processo de amonificação).

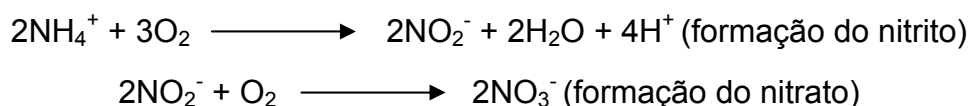
Reação de amonificação:



Geralmente, o amônio, nas águas, é oxidado por microrganismos nitrificantes, via nitrito, se transformando a nitrato, o que pode significar uma carga grande para o equilíbrio do oxigênio no corpo hídrico. Na sua forma de amônia (NH_3), há o favorecimento a eutrofização, ocorrendo a sua transformação em nitrato. Quando o pH do ambiente está acima de 7,0 e temperatura crescente, o amoníaco se faz presente, sendo altamente tóxico para peixes. Fatores como pH e temperatura, presença de outros poluentes, concentração de oxigênio dissolvido, cálcio e alcalinidade influenciam na toxicidade da amônia (NIEWEGLOWSKI, 2006).

Já o nitrito (NO_2^-) aparece na fase intermediária do ciclo do nitrogênio, na oxidação microbiana do nitrato. Quando o nitrito é formado, é imediatamente oxidado para a forma de nitrato (nitrificação) ou reduzido para gás nitrogênio (N_2 – desnitrificação), mas se há aumentos drásticos de temperatura e pH, o amônio se transforma em amônia que é um gás tóxico para o manancial (NIEWEGLOWSKI, 2006).

Reação de nitrificação (oxidação)



Os efeitos da eutrofização se manifestam na quebra do equilíbrio ecológico, onde há uma produção de matéria orgânica além do que o sistema é capaz de decompor. As principais alterações estão de acordo com as condições físico-químicas do meio, como no aumento da concentração de nutrientes e gases, alterações significativas do pH em curto período de tempo, e também biológicas mostrando-se nas alterações da diversidade e na densidade dos organismos.⁴

Com estes efeitos causados pelo processo de eutrofização a população de peixes e outros organismos residentes nestes corpos hídricos acabam morrendo por asfixias. Durante o estágio final desse processo artificial, o curso d'água acaba apresentando pouca profundidade, coluna d'água com grande deficiência de oxigênio, organismos mortos flutuando na superfície e grande quantidade de “colchões” de algas a deriva. Devido a essas características é possível constatar que o ecossistema está agonizando e só poderá ser recuperado através de investimentos elevados e a utilização de tecnologia moderna, comprovando que os danos ao ambiente resultam em gastos muito elevados para a sua recuperação.⁵

2.4 Solo

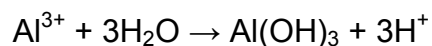
A maioria dos solos no Brasil é ácido, inclusive os do Rio Grande do Sul, devido ao clima ser subtropical, a solubilidade de bases do solo, a decomposição de resíduos orgânicos pelos microorganismos, a ação do homem, as reações de hidrólise que ocorrem na solução solo e a própria absorção dos nutrientes pelas plantas colaboram com a acidificação do solo (MEURER, 2000).

Os solos também podem ser naturalmente ácidos devido à própria pobreza das bases do material de origem, ou pelos processos de formação que favorecem a remoção ou lavagem de elementos básicos, como potássio, cálcio, magnésio e sódio, na utilização da maioria dos fertilizantes químicos solúveis e outros. Geralmente esses solos apresentam grandes teores de alumínio (Al) e manganês (Mn) que podem ser tóxicos as plantas, prejudicando o seu desenvolvimento e rendimentos (MEURER, 2000).

⁴ In: <<http://www.agr.feis.unesp.br/ctl28082004.php>>.

⁵ In: <<http://www.agr.feis.unesp.br/ctl28082004.php>>.

As reações que liberam íons H^+ para o meio, como a do alumínio, podem ser um grande agente para o solo ser ácido, devido reagirem com a água e formar hidróxido liberando ao mesmo tempo os íons H^+ como na reação seguinte:



À medida que os íons alumínio vão sendo solubilizados, liberam íons H^+ , que ficam na solução do solo, tornando-o ácido.

Também as reações bioquímicas da decomposição dos vegetais pelos microorganismos, contribuem para o processo de mineralização e formação de substâncias húmicas, como mostrado na reação simplificada abaixo:



Outros exemplos de reações químicas que ocorrem no solo mostram porque ele passa a ter seu caráter ácido.



Na agricultura, para diminuir a acidez do solo utiliza-se, como exemplo os carbonatos (CO_3^{2-}), a cal virgem (CaO), a cal apagada ($Ca(OH)_2$), o calcário calcinado, as conchas marinhas moídas (ricas em carbonatos). A efetividade do corretivo é dada pelo valor do poder relativo de neutralização total (PRNT) (MEURER, 2000).

2.5 Métodos de Análises

Os métodos analíticos são normalmente classificados, por razões históricas, como clássicos e instrumentais. Os métodos clássicos (ou de via úmida) são aqueles realizados por separação dos componentes focos da análise (os analitos), em uma amostra, por meio de técnicas de precipitação, extração ou destilação. Os componentes separados são submetidos à ação de certos reagentes resultando em produtos reconhecíveis por suas cores, solubilidade, pontos de ebulição e fusão, seus odores ou atividades óticas (análise qualitativa).

Para uma análise quantitativa, a massa do analito e dos compostos originados deste é determinada por meio de gravimetria ou por procedimentos titulométricos, onde é medido o volume ou a massa de um reagente padrão para reagir completamente com o analito.

Os métodos instrumentais são aqueles que utilizam fenômenos distintos dos clássicos para explorar a composição e estrutura de materiais. Propriedades associadas aos fenômenos de emissão, absorção, espalhamento, refração e difração da radiação; bem como medidas do potencial elétrico, carga e resistência elétrica, massa, relação massa/carga, velocidade da reação, características térmicas e de radiatividade, interação da luz visível, elétrons e de sondas com a superfície são utilizadas para a análise quantitativa. A cada uma destas propriedades está associado um método instrumental (Tabela 5), que fazem uso normalmente de equipamentos sofisticados.

Também são utilizadas técnicas eficientes de cromatografia e de eletroforese, em substituição a destilação, extração e precipitação na separação de componentes de misturas complexas, utilizadas nos métodos clássicos. Os métodos analíticos instrumentais vêm dominando os laboratórios, como técnica padrão para o estudo da composição e estrutura de materiais (BACCAN ET al., 1979; SKOOG, 2002; HARRIS, 2005).

Tabela 5 - Principais métodos experimentais e as propriedades físico-químicas envolvidas

Método instrumental	Propriedade
Espectroscopia de emissão (raios-X, UV, VIS, elétrons, Auger); fluorescência, fosforescência e luminescência.	Emissão de radiação
Espectroscopia e fotometria (raios-X, UV, VIS, IV); espectroscopia fotoacústica; ressonância magnética nuclear e de spin eletrônico.	Absorção da radiação
Turbidimetria; nefelometria; espectroscopia Raman	Espalhamento da radiação
Refratometria; interferometria	Refração da radiação
Métodos de difração de raios-X e elétrons	Difração da radiação
Polarimetria; dispersão óptica rotatória; dicroísmo circular	Rotação da radiação
Potenciometria; cronopotenciometria	Potencial elétrico
Coulometria	Carga elétrica
Amperometria; polarometria	Corrente elétrica
Condutimetria	Resistência elétrica
Massa	Gravimetria (balança e microbalança de cristal de quartzo)
Espectrometria de massa	Relação massa/carga
Métodos cinéticos	Velocidade da reação
Gravimetria e titulometria térmica; calorimetria diferencial exploratória; análise térmica diferencial e métodos de condutimetria térmica	Características térmicas
Métodos de ativação e diluição de isótopos	Radiatividade
Microscopia ótica	Interação da luz visível com a matéria
Microscopia eletrônica	Interação de elétrons com a matéria
Microscopia de tunelamento	Tunelamento de elétrons de uma superfície
Microscopia de força atômica	Interação de uma sonda com a superfície (forças de atração, adesão, de van der Waals)
Dureza/microdureza	Propriedades mecânicas da superfície

2.5.1 Difração de Raios-X (XRD)

A difração de raios-X (em inglês, “X-Ray Diffraction” ou XRD, como é mais conhecida), é realizada através de um equipamento chamado difratômetro (Figura 7a) é uma técnica que nos permite obter informações sobre as estruturas cristalinas presentes numa amostra, através do uso de um tipo de radiação eletromagnética: os raios-X. Os raios-X têm comprimento de onda da ordem do diâmetro atômico (10^{-10} m) ou do espaçamento entre os átomos/íons em sólidos. Quando os raios-X são direcionados para um sólido com uma estrutura cristalina, suas ondas são espalhadas pelo ambiente ordenado do cristal, ocorrendo a interferência entre os raios espalhados (tanto construtiva como destrutiva) porque as distâncias entre os centros espalhadores são da mesma ordem de grandeza que o comprimento de onda da radiação. O resultado é a difração (AZAROFF, 1968; SKOOG, 2002).

Desde a sua descoberta em 1912, por Von Laue, a difração de raios-X tem sido uma importante fonte de informação para a ciência e a indústria. A maior parte do que é conhecido sobre o espaçamento e arranjo dos átomos em materiais cristalinos foi determinada diretamente por estudos de difração. Além disso, esses estudos levaram ao entendimento das propriedades físicas dos metais, materiais poliméricos e de outros sólidos. A difração de raios-X é, atualmente, o método de maior importância na elucidação de estruturas cristalinas complexas.

A difração de raios-X também fornece um meio conveniente e prático para a identificação qualitativa e quantitativa de compostos cristalinos. O método de difração de raios-X, usando uma amostra policristalina (método do pó), é capaz de fornecer informação qualitativa e quantitativa sobre os compostos presentes na amostra sólida. Os métodos de difração de raios-X de pó estão baseados no fato de que o padrão de difração (chamado de difratograma) (figura 7b) é único para cada substância cristalina. Assim, se é encontrada uma concordância exata entre o padrão produzido pela amostra desconhecida e o de uma amostra conhecida, então a identidade química da amostra desconhecida pode ser atribuída.

A identificação de uma espécie a partir de seu difratograma de pó está baseada na posição das linhas em termos do ângulo entre a onda incidente e a onda espalhada (2θ) e suas intensidades relativas. O ângulo 2θ é função do espaçamento de um conjunto particular de planos. Estas linhas formam picos com intensidades e distâncias entre si que variam de substância para substância.

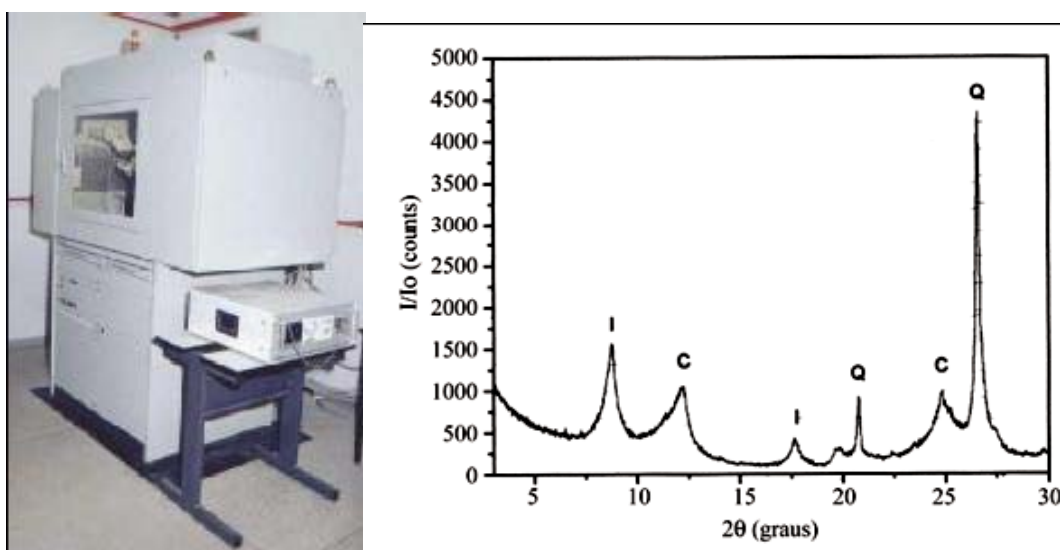


Figura 7 - Difrátômetro de raios-X (a); Difrátograma de uma argila (b), mostrando suas fases cristalinas: Caulinita (C), Quartzo (Q) e Ilita (I) (Albers et al., 2002).

Diferentes materiais (ou fases) possuem diferentes arranjos espaciais de átomos ou íons, e a interação com a radiação incidente resultam numa "assinatura" muito própria. Pela medida da intensidade das linhas de difração e sua comparação com difratogramas de padrões feitos com quantidades conhecidas, torna-se possível a análise quantitativa de misturas cristalinas (JACOBS, 1997, CULLITY, 1998; SKOOG, 2002,).

Atualmente, a comparação com padrões de difração, para identificação das fases cristalinas de um composto (análise qualitativa) é feita por intermédio de softwares especialmente desenvolvidos para tal fim. Estes softwares são compostos por um extenso banco de dados cristalográfico (padrões de difração) e utilizam os arquivos de dados gerados pelo próprio difratômetro. Como exemplo, temos o X'Pert HighScore da Philips.

Já para a análise quantitativa, o procedimento mais usado é a simulação do perfil difratométrico a partir das estruturas das fases componentes de uma amostra através do método Rietveld. Este método é baseado na construção de um padrão de difração calculado, de acordo com o modelo estrutural. O padrão calculado é obtido pela introdução direta dos dados cristalográficos, como: simetria do grupo espacial, posições atômicas, posições de ocupação e parâmetros de rede. O padrão calculado ao se ajustar ao padrão observado fornece dados dos parâmetros estruturais do material e parâmetros do perfil de difração.

O termo refinamento no método de Rietveld refere-se ao processo de ajuste do modelo de parâmetros utilizados no cálculo de um padrão de difração, que seja o mais próximo do observado. O refinamento é conduzido pela minimização da soma das diferenças entre as intensidades calculadas e observadas (método dos mínimos quadrados), a cada passo angular do padrão de difração. O método de Rietveld permite o refinamento de estruturas cristalinas complexas, sendo aplicado ao fornecimento de dados quantitativos (percentual de cada fase na amostra) com precisão reconhecida (BISH e HOWARD, 1988; LUTTEROTIL, 1990; YOUNG, 1994; YOUNG, 1995; FANCIO, 1999). Os principais softwares utilizados para o refinamento de difratogramas de pó são o DBWS e o Rietica, ambos de livre distribuição.

2.5.2 Microscopia Ótica

A microscopia ótica se refere ao uso de qualquer microscópio que utiliza a luz visível para tornar espécimes observáveis. O microscópio ótico usa lentes de vidro e luz visível para formar uma imagem aumentada de um objeto. O poder de resolução de um microscópio óptico pode ser definido tecnicamente como a menor distância entre dois pontos que permite sua separação e conseqüente distinção. Depende do comprimento de onda de luz e das propriedades da lente. O poder de resolução é definido como:

$$R = \frac{0,61\lambda}{AN}$$

onde λ é o comprimento de onda da luz e AN é a abertura numérica da lente, sendo definida como:

$$AN = n \sin \alpha$$

com n igual ao índice de refração médio entre a lente e a amostra e α o ângulo entre o eixo da objetiva e o raio de luz mais oblíquo que atravessa a lente, sendo uma função das dimensões desta. Como o sistema ótico está imerso em ar, então $n = 1$.

Os valores de AN das lentes diferem de acordo com o poder de aumento e com outras propriedades. O valor de AN é gravado nas laterais de cada lente objetiva (a lente mais próxima ao objeto) de um microscópio ótico.

Os valores mais comuns para as lentes objetivas, encontradas com frequência em microscópios óticos modernos, são 0,25 para baixo poder de resolução, 0,65 para alto poder de resolução e 1,25 para lentes de imersão. Para um comprimento de onda típico da luz de 550 nm e para as dimensões das objetivas atualmente fabricadas, a resolução máxima de um microscópio ótico será da ordem de 0,22 μm , que representa mil vezes a capacidade do olho humano.

A qualidade da imagem microscópica é determinada pela ampliação, grau de difração, distorção devido a aberrações das lentes e contraste. Para melhorar a resolução, os microscopistas utilizam comprimentos de onda de radiação eletromagnética cada vez menores. A luz visível não é capaz de separar distâncias inferiores a 220 nm. A luz ultravioleta, de comprimento de onda de 100 a 400 nm, pode separar distâncias tão pequenas quanto 110 nm. Assim, o microscópio que usa luz ultravioleta ao invés de visível possui maior resolução, permitindo a observação de mais detalhes das estruturas analisadas (BLACK, 2002).

O microscópio ótico moderno não descende da lente única de Leeuwenhoek, mas sim, do microscópio composto de Hooke (um microscópio com mais de uma lente). As lentes únicas geram dois problemas: não podem focalizar o campo inteiro simultaneamente e acrescentam anéis coloridos ao redor dos objetos no campo. Ambos os problemas são hoje resolvidos através do uso de múltiplas lentes de correção colocadas próximo à lente de aumento principal. Utilizadas em objetivas e oculares de microscópios compostos modernos, as lentes corretivas proporcionam imagens praticamente isentas de correção (PLUTA, 1988; BLACK, 2002).

O microscópio ótico composto é aquele que tem duas lentes, uma objetiva e a outra ocular, possibilitando dois estágios de amplificação. Um microscópio composto com uma única ocular é chamado monocular; aquele com duas oculares, de binocular. A luz penetra o microscópio através de uma fonte de luz na base e, freqüentemente, passa através de um filtro azul, que filtra seus maiores comprimentos de onda, deixando passar os menores, melhorando a resolução. Então, ela passa por um condensador, que converge os raios luminosos para que

possam passar através do objeto. O diafragma íris controla a quantidade de luz que passa através do objeto e que vai para a lente objetiva. Quanto maior o aumento, maior a quantidade de luz necessária para ver claramente o objeto.

A lente objetiva aumenta a imagem antes que a mesma atravesse o tubo ou canhão para a lente ocular. A lente ocular aumenta mais ainda a imagem. Uma mesa mecânica permite o controle preciso do movimento da lâmina, que é especialmente útil em estudos mais detalhado de objetos. O aumento total de um microscópio composto é dado pelo produto do aumento da objetiva pela ocular, variando de 30 a 1000 vezes (HERMAN, 1990).

O condensador utilizado em um microscópio ótico comum faz com que a luz seja concentrada e transmitida diretamente através do objeto. Isto confere uma iluminação de campo claro. Contudo, em alguns casos, é melhor examinar objetos que exibem pouco contraste em um campo claro, sob outra iluminação. Neste caso, utiliza-se a iluminação de campo escuro. Um microscópio ótico adaptado para a iluminação de campo escuro possui um condensador que impede a luz de ser transmitida através do objeto. Em vez disto, leva a luz a refletir do objeto de modo oblíquo. Quando estes raios são coletados e focalizados em uma imagem, um objeto claro é visto em um fundo escuro (BLACK, 2002).

Um microscópio ótico de contraste de fase possui um condensador especial e lentes objetivas que acentuam pequenas diferenças no índice de refração de várias estruturas localizadas no objeto. A luz que passa através dos objetos de diferentes índices de refração é reduzida e difratada. As modificações na velocidade da luz são visualizadas como diferentes gradações de claridade (ZERNIKE, 1942; BLACK, 2002).

O microscópio ótico Nomarski, do mesmo modo que o microscópio de contraste de fase usa os diferentes índices de difração para visualizar detalhes no objeto. Contudo, o microscópio Nomarski (também chamado de contraste de interferência diferencial), proporciona resolução bastante superior ao microscópio padrão de contraste de fase. Ele possui uma profundidade de campo (a espessura do objeto que está em foco a qualquer momento) extremamente curta e pode proporcionar uma imagem próxima a tridimensional (ZERNIKE, 1942, BLACK, 2002).

A microscopia ótica de fluorescência utiliza-se do fato que certas substâncias, quando sob a ação de irradiações de comprimento de onda curtos, começam a emitir radiação própria, composta por ondas de comprimento mais longo, luminosas e visíveis, ou seja, fluorescem. Certas substâncias quando ativadas por luz ultravioleta, violeta ou azul, apresentarão fluorescência no azul, verde, amarelo ou vermelho, segundo sua natureza.

A simplicidade e exatidão colocaram desde logo a microscopia de fluorescência no controle de alimentos, mineralogia e botânica. Nos primórdios desta microscopia, só era usada a chamada fluorescência “própria” ou primária. Entretanto, descobriu-se que se poderiam tratar substâncias ou mesmo tecidos animais e vegetais com diluições de certos corantes orgânicos e obter assim uma fluorescência secundária. O tratamento com fluorocromos abriu a modalidade de microscopia de fluorescência também em células e tecidos animais, na citologia, histologia, patologia, hematologia, bacteriologia, etc. Corantes fluorescentes existem vários, como por exemplo: amarelo de acridina, auromina, aurofosfina, sulfato de berberina, extrato de clorofila, fluoresceína, rodamina, tioflavina e tripaflavina (BUCHERL, 1972).

O microscópio de polarização se diferencia de um microscópio comum por possuir um equipamento para a produção de luz linearmente polarizada. A utilização da luz polarizada tem produzido resultados bem interessantes; corpos isotrópicos são facilmente diferenciados de anisotrópicos ou birrefringentes (BUCHERL, 1972).

O microscópio metalográfico (figura 8a) é um microscópio ótico composto que utiliza a luz refletida sobre o material a ser observado (figura 8b) para registrar imagens de amostras sólidas. Amostras opacas, como amostras metalográficas, são tipicamente observadas por estes microscópios (JACOBS e KILDUFF, 1994).

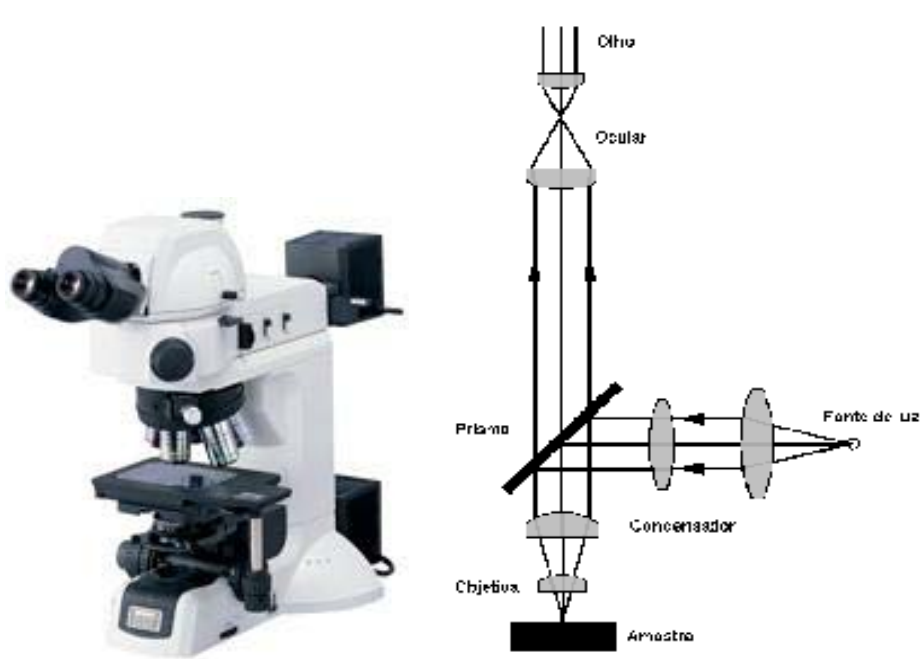


Figura 8 - Microscópio metalográfico Eclipse LV100D da Nikon (a); Esquema do sistema ótico de um microscópio metalográfico (b).

2.5.3 Espectroscopia no Infravermelho (IR)

A espectroscopia no infravermelho é uma técnica muito utilizada para a análise de compostos orgânicos. A região do infravermelho do espectro eletromagnético cobre a faixa logo após o visível ($7,8 \times 10^{-7}$ m) até aproximadamente 10^{-4} m, mas apenas a porção média de $2,5 \times 10^{-6}$ m a $2,5 \times 10^{-5}$ m é mais utilizada em química orgânica. Os comprimentos de onda dentro da região do infravermelho são geralmente dados em micrometros, e as frequências são dadas em números de onda preferencialmente em hertz. O número de onda é o recíproco do comprimento de onda em centímetros e, portanto, expresso em unidades de cm^{-1} . Assim, a região útil do infravermelho é a partir de 4000 até 400 cm^{-1} .

Todas as moléculas têm uma certa quantidade de energia distribuída por toda a sua estrutura, provocando o estiramento e contrações das ligações, ou provocando a movimentação dos átomos para trás e para frente, entre outras vibrações moleculares. A quantidade de energia que uma molécula contém não é continuamente variável, mas ela é quantizada. Isto é, a molécula pode se esticar ou se deformar apenas a uma frequência específica, correspondendo a um nível de energia específico.

Quando uma molécula é irradiada com radiação eletromagnética, a energia é absorvida se a frequência da radiação corresponde à frequência da vibração. O resultado dessa absorção de energia é um aumento da amplitude para a vibração. Como cada frequência absorvida pela molécula corresponde a um movimento molecular específico, podemos conhecer os tipos de movimentos que uma molécula possui pela medida de seu espectro na região do infravermelho. Pela interpretação desses movimentos, pode-se descobrir quais tipos de ligação (grupos funcionais) estão presentes na molécula. As ligações podem vibrar de seis modos: estiramento simétrico, estiramento assimétrico, tesoura, rotação, wag e twist (MCMURRAY, 2005).

A interpretação completa de um espectro na região do infravermelho é difícil por que a maioria das moléculas são tão grandes que possuem dezenas de movimentos diferentes de estiramento e deformações angulares das ligações. Assim, um espectro da região do infravermelho contém dezenas de absorções. Em um certo sentido, essa complexidade é válida por que um espectro na região do infravermelho serve como uma impressão digital rara de um composto específico. Na verdade, a região complexa do espectro no infravermelho a partir de 1500 cm^{-1} até próximo de 400 cm^{-1} é chamada região de impressão digital. Se dois compostos possuem espectros no infravermelho idênticos, são quase certamente idênticos.

Felizmente, não se necessita interpretar por completo um espectro na região do infravermelho para obter informações estruturais úteis. A maioria dos grupos funcionais possui bandas de absorção características no infravermelho, que não mudam de um composto para outro. A absorção C=O de uma cetona está quase sempre na faixa de 1680 a 1750 cm^{-1} ; a absorção O-H de um álcool está quase sempre na faixa de 3400 a 3650 cm^{-1} ; a absorção C=C de um alceno está quase sempre na faixa de 1640 a 1680 cm^{-1} ; e assim por diante. Aprendendo onde as absorções dos grupos funcionais característicos ocorrem, é possível obter informação estrutural e composicional a partir do espectro no infravermelho (MCMURRAY, 2005).

As medidas em infravermelho podem ser realizadas em amostras sólidas ou líquidas. As amostras líquidas podem ser prensadas entre duas placas de um sal de alta pureza (como o cloreto de sódio). Essas placas têm de ser transparente à luz infravermelha e, dessa forma, não introduzirem nenhuma linha no espectro da

amostra. Essas placas obviamente são bem solúveis em água, então a amostra, os reagentes de lavagem e o meio precisam ser anidros (isto é, sem água).

As amostras sólidas normalmente são preparadas misturando-se certa quantidade da amostra com um sal altamente purificado (geralmente brometo de potássio). Essa mistura é triturada e prensada a fim de se formar uma pastilha pela qual a luz pode passar. Essa pastilha precisa ser prensada a altas pressões a fim de garantir de que ela seja translúcida, mas isso não pode ser alcançado sem um equipamento apropriado (como uma prensa hidráulica). Da mesma forma que o cloreto de sódio, o brometo de potássio não absorve radiação infravermelha, então as únicas linhas espectrais a aparecer virão do analito.

Três tipos de instrumentos para medidas de absorção infravermelha estão disponíveis por fornecedores comerciais: (1) espectrômetros dispersivos de rede, que são usados principalmente para trabalho qualitativo; (2) instrumentos multiplexados, empregando transformada de Fourier, que são apropriados tanto para medidas qualitativas como para quantitativas; e (3) fotômetros não-dispersivos que foram desenvolvidos para determinações quantitativas de uma variedade de espécies orgânicas na atmosfera por espectroscopia de absorção, emissão e reflectância (SKOOG, 2002).

Nos espectrômetros infravermelhos (figura 9), um feixe de luz infravermelha é produzido e dividido em dois raios separados. Um passa pela amostra, e o outro por uma referência que é normalmente a substância na qual a amostra está dissolvida ou misturada. Ambos os feixes são refletidos de volta ao detector, porém primeiro eles passam por divisor que rapidamente alterna qual dos dois raios entra no detector. Os dois sinais são comparados e então os dados são coletados. Uma referência é usada por duas razões:

- Previne que flutuações da energia elétrica da saída da fonte não afetem os resultados finais, uma vez que tanto a amostra quanto a referência são afetadas da mesma forma
- Por essa mesma razão, também previne a influência de variações no resultado final devido ao fato de que a fonte não necessariamente emite a mesma intensidade de luz para todos os comprimentos de onda
- Permite que os efeitos do solvente sejam cancelados, já que a referência é normalmente a forma pura do solvente na qual ela se encontra.

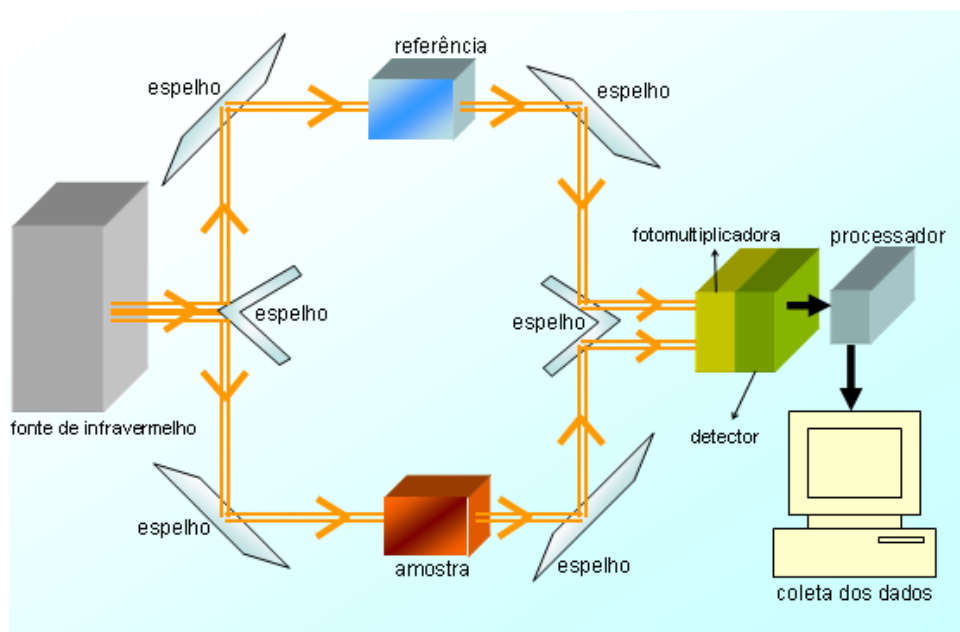


Figura 9 - Esquema de um espectrômetro no infravermelho

2.5.4 Absorção Atômica (AA)

A absorção atômica é um método utilizado para espécies atômicas neutras, não-excitadas, em estado gasoso, determinando qualitativamente e quantitativamente a presença de metais. O elétron absorve energia e salta, essa quantidade de energia absorvida é diretamente proporcional a concentração. A maioria dessas transições corresponde a comprimentos de ondas nas regiões ultravioleta e visível, onde a espécie neutra é capaz de absorver radiações de comprimentos de onda iguais aos das radiações que ela, quando excitada, é capaz de emitir (SKOOG, 2002).

O uso mais prático e bem sucedido é a lâmpada de descarga luminosa com cátodo oco. Essa consiste em dois eletrodos um dos quais em forma de copo e feito com o elemento especificado (ou uma liga daquele elemento); o material do ânodo não é crítico. A lâmpada é preenchida com um gás nobre, a baixa pressão. A aplicação de 100 a 200V produzirá, após um breve tempo, uma descarga luminosa com a maior parte da emissão vinda de dentro do cátodo oco. As radiações consistem de linhas discretas do metal mais as do gás de enchimento. O gás é escolhido pelo fabricante para dar as menores interferências espectrais com o referido metal (figura 10) (EWING, 1989).



Figura 10 - Espectrofotômetro de Absorção Atômica com Forno de Grafite

A maioria das interferências encontradas na espectroscopia de absorção atômica podem ser reduzidas ou completamente eliminadas através de alguns procedimentos como usar se possível, padrões e amostras de decomposição semelhante para eliminar os efeitos de matriz (ajuste de matriz), alterar a composição da chama ou sua temperatura para reduzir a formação de compostos estáveis na chama, selecionar raias de ressonância que não sofram interferência espectral de outros átomos ou moléculas e de fragmentos moleculares, separar por extração com solventes ou processos de troca iônica o elemento interferente (necessário na espectroscopia de emissão de chama) e utilizar um método de correção de radiação de fundo (SKOOG, 2002).

Na absorção atômica de chama (espectrofotometria de chama), o elemento a determinar é levado à condição de uma dispersão atômica gasosa através da qual se faz passar, então, o feixe de radiação de uma fonte apropriada (figura 11). O processo usual consiste em introduzir a solução da amostra, na forma de um aerossol, em uma chama apropriada. A chama cumpre, assim, a função da célula na absorciometria convencional. A extensão da absorção, que se processa a custa de transições eletrônicas do estado fundamental a um estado energético mais alto, é uma medida da população de átomos do elemento responsável presente na chama e, portanto, da concentração do elemento na amostra (EWING, 1989; SKOOG, 2002).



Figura 11 - Espectrofotômetro de Absorção Atômica com chama

A espectrofotometria de absorção atômica oferece uma série de vantagens sobre a espectroscopia de chama. Uma delas relaciona-se com o fato do número de átomos no estado fundamental ser várias ordens de grandeza maior do que o número de átomos excitados; resultando numa sensibilidade muito maior para a técnica da absorção atômica.

Pode-se citar como algumas aplicações da espectrofotometria de absorção atômica por exemplo, na determinação de zinco em fertilizante, onde o método usado para aplicação de fosfatos pode influenciar a disponibilidade de zinco. Em solos de baixo teor de zinco disponível, à aplicação de fertilizantes fosfatados em sulcos ou ao lado das fileiras das plantas induzem a uma deficiência do zinco, enquanto que aplicação dos mesmos fertilizantes em cobertura total não afetou sua disponibilidade. Além deste exemplo, também é aplicada na determinação de traços de elementos em vários sistemas orgânicos, inorgânicos e biológicos (EWING, 1989).

2.5.5 Espectrometria de Emissão de Plasma (ICP)

O plasma por definição é uma mistura gasosa condutora de eletricidade, que possui uma concentração de cátions e elétrons, onde essas cargas tendem a se aproximar de zero. Por exemplo, num plasma de argônio, freqüentemente empregado para análises por emissão, os seus íons e elétrons são os principais condutores da amostra, onde depois de formados em plasma, absorvem energia suficiente para manter a temperatura (maiores que 10.000K), no qual ionizações adicionais sustentam o plasma indefinidamente (SKOOG, 2002).

A espectrometria de emissão óptica com plasma indutivamente acoplado (ICP-OES) apresenta-se como uma ferramenta bastante útil, principalmente devido à sua capacidade de determinação multielementar, onde na prática ocorre aproximadamente 70 elementos, esses com razoável sensibilidade. Também há à determinação em uma faixa ampla de concentrações dos elementos em uma mesma amostra. A alta temperatura e a atmosfera inerte do gás argônio do plasma também diminuem as interferências não espectrais, resultando em boa sensibilidade, precisão e exatidão (DOS SANTOS, 2007).

Na figura 12, mostra uma fonte típica de ICP, chamada de tocha, onde consiste de três tubos de quartzo, por onde passam fluxos de gás argônio. Em torno do topo fica uma bobina de indução, resfriada por água e alimentada por um gerador de radiofrequência. A ionização do fluxo de argônio é iniciada por uma centelha proveniente de uma bobina de Tesla, então, os íons resultantes e os elétrons associados interagem com o campo magnético flutuante.

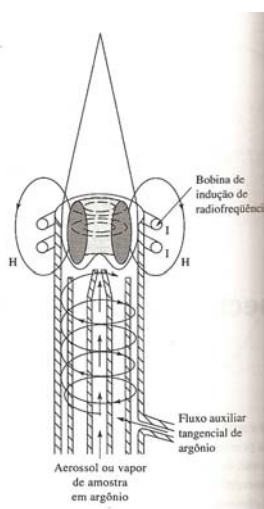


Figura 12 - Plasma acoplado indutivamente.

A temperatura do plasma formado nesse caminho é alta o suficiente para fazer o isolamento térmico do cilindro de quartzo mais externo. O fluxo tangencial resfria as paredes internas do tubo central e centralizada radialmente o plasma (SKOOG, 2002).

A amostra é introduzida no plasma, geralmente na forma líquida, quando é utilizado um sistema constituído por uma câmara de nebulização e um nebulizador. A amostra é nebulizada por um nebulizador de fluxo transversal através de um jato de argônio, e as gotas resultantes são carregadas para dentro do plasma (SKOOG, 2002).

Quando a amostra na forma de aerossol, após passar pelo nebulizador, vai para a câmara de expansão ou nebulização (Figura 13), a qual permite que somente gotículas menores que 10 μm de diâmetro alcancem o plasma. O diâmetro médio é ao redor de 2 μm e gotículas deste tamanho permitem eficiente vaporização e excitação da amostra durante o tempo de residência no plasma (3-5 milissegundos) (DOS SANTOS, 2007).

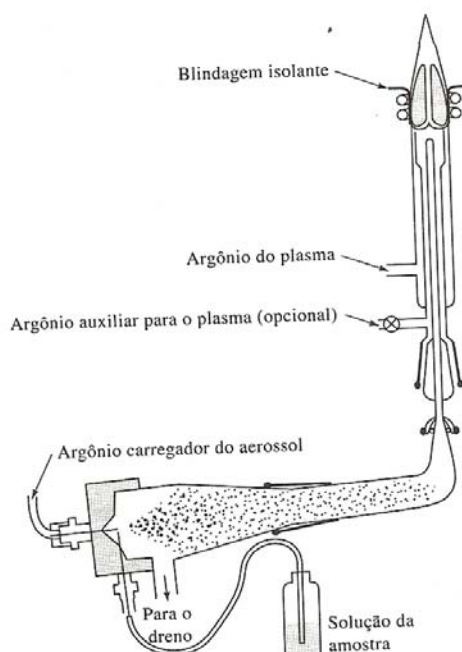


Figura 13 - Um nebulizador típico para a injeção de amostras em uma fonte de plasma.

Comparada a outras fontes de excitação atômica, ICP-OES exibe como vantagens a possibilidade de determinação multielementar e simultânea, com alta frequência analítica. A seletividade de ICP-OES em espectrometria analítica a torna uma técnica aplicável à análise elementar em diferentes matrizes (BOUMANS, 1987).

De acordo com as diferentes técnicas de análise de absorção atômica, é constatado que há alguns erros analíticos que ocorrem durante as análises de espectrometria de absorção atômica em chama (FAAS), como alterações na temperatura da chama, na taxa de aspiração do soluto e na composição da amostra. Então, através de uma comparação com a espectrometria de absorção atômica em forno de grafite (GFAAS), a qual é substancialmente mais sensível e versátil, face à configuração do tubo de grafite e ao seu caráter dual: reator químico e atomizador percebe-se que existem alterações tanto instrumentais como operacionais. Essas são variações na temperatura e na taxa de aquecimento do tubo de grafite, no volume injetado de amostra, na radiação emitida da fonte, nas diluições, na estrutura do atomizador, o que também afetam no desempenho analítico (SKOOG, 2002).

Devido a estes inconvenientes, compensam-se essas técnicas e garantem qualidade nos resultados, empregando-se a espectrometria de absorção atômica, espectrometria de emissão ótica com fonte de plasma indutivamente acoplado (ICP-OES) e espectrometria de massas com fonte de plasma indutivamente acoplado (ICP-MS), onde há o embasamento na comparação de um ou mais sinais analíticos (analito) com um ou mais sinais de referência de elementos previamente selecionados (padrão interno) (TAKADA, 1981; TANGEN, 1999).

3 MATERIAL E MÉTODOS

Os experimentos foram conduzidos em casa de vegetação na UFPEL – Campus Universitário – localizado no município de Capão do Leão (RS), nos anos de 2007 a 2008, e no laboratório de Química Ambiental do IQG – UFPEL. Parte da caracterização do material foi feito na UFC e na UFRGS.

3.1 RS-UASB da Parboilização do Arroz Tratado em Reator UASB

O lodo foi proveniente das descargas do reator UASB da estação de tratamento de efluentes de uma indústria de parboilização de arroz, no ano de 2005, localizada no município de Pelotas (RS) e transportado para o Laboratório de Química Ambiental (QuiAmb-Lab) do DQAI-IQG/UFPEL. Devido ao alto teor de fósforo do lodo, o mesmo antes de ser tratado no reator UASB, passou por um processo de tratamento com óxido de cálcio (CaO) visando precipitar quimicamente parte do fósforo. A quantidade de efluente usada para obter o RS-UASB foi de 173 L. O lodo foi decantado, e após seco em estufa à temperatura de 90°C, por cinco horas, com rendimento total de 2,0 quilogramas de RS-UASB.

3.2 Características Físico-Químicas do RS-UASB

3.2.1 Determinação do pH e Valor de Neutralização

O pH do RS-UASB foi determinado (valor médio de três repetições) pelo método descrito por Tedesco et al. (1995). Uma quantidade de 10 cm³ de amostra foi adicionada em 10 mL de água destilada. A solução foi agitada e deixada em repouso por 30 minutos para posterior medição com pHmetro calibrado.

O valor de neutralização foi determinado por volumetria de neutralização conforme metodologia descrita por Silva (1999) e por Brasil (2004).

3.2.2 Conteúdo de Carbono Orgânico

O conteúdo de carbono orgânico foi medido (valor médio de duas repetições) pelo método Walkley-Black de digestão ácida (NELSON and SOMMERS, 1982; SWIFT, 1996).

3.2.3 Nitrogênio Kjeldahl

O conteúdo total de nitrogênio Kjeldahl (NTK) foi determinado (valor médio de duas repetições) pelo método Kjeldahl como descrito por AOAC (HELRICH, 1990).

3.2.4 Concentrações de Macro e Micronutrientes e Metais Pesados

As concentrações totais dos elementos P, K, Ca, Mg, S, Cu, Zn, Fe, Mn, Na, Cd, Cr, Ni, Pb, Al, Mo, Co, e B foram determinadas (valor médio de duas repetições) por meio de espectroscopia de emissão ótica por plasma indutivamente acoplado (ICP-OES) com um instrumento ICP-OES da Perkin-Elmer, modelo Optima 3000DV (Norwalk, CT, USA), após digestão (úmida) em microondas com um sistema fechado usando HNO_3 concentrado (BOSS and FREDEEN, 1999). O conteúdo de Hg (valor médio de duas repetições) foi determinado pelo método EPA 7471. O conteúdo total de B foi determinado (valor médio de duas repetições) por digestão seca (forno de microondas) e posteriormente analisado por espectrofotometria UV/VIS. (SILVA, 1999)

3.2.5 Concentrações de N-NH_4^+ , N-NO_3^- e N-NO_2^-

As concentrações de N-NH_4^+ , N-NO_3^- e N-NO_2^- foram determinadas (valor médio de duas repetições) por extração com KCl (MAYNARD and KALRA, 1993).

3.2.6 Quantidade de Proteína Bruta

A quantidade de proteína bruta (PB) foi calculada multiplicando o percentual de N orgânico total pelo fator 6,25 (SILVA e QUEIROZ, 2002).

3.2.7 Difração por Raios-X

O padrão de difração de raios-X (XRD), para a análise mineralógica cristalográfica, foi obtido pelo método do pó, na temperatura ambiente (300K) em difratômetro de pó Philips, modelo X'Pert PRO, no Laboratório de Raios-X do Departamento de Física da Universidade Federal do Ceará (UFC). Usou-se a geometria Bragg-Bretando com radiação Cu- α . O tubo foi operado com 40kV e 40mA. Os dados de difração foram coletados em um intervalo de varredura de $10^\circ \leq 2\theta \leq 80^\circ$ com passos de $0,02^\circ$ e tempo de integração de 2 segundos por ponto. A cristalinidade (%) foi determinada pela razão percentual entre a área das fases cristalinas e a área total do difratograma (HAYAKAWA et al., 1997).

Foi utilizado o programa X'Pert HighScore para identificação de fases cristalinas e o método de Rietveld, através do programa Rietica – versão 1.7.7 (C.J. HOWARD and B.A. HUNTER, 1997 - Lucas Heights Research Laboratories), para o refinamento do difratograma e conseqüente análise quantitativa.

3.2.8 Espectroscopia no Infravermelho

Foi realizada a espectroscopia no infravermelho do RS-UASB. Um gral com pistilo de ágata foram umedecidos e limpos com auxílio de papel absorvente umedecido em acetona. No gral foram triturados 1 mg de RS-UASB previamente dessecado e adicionado 100 mg de brometo de potássio (KBr) seco e finamente pulverizado. O triturado (pó) foi espalhado uniformemente no molde da pastilha e comprimida em prensa uniaxial a uma pressão de 800 MPa, por 1,5 a 2 minutos. A pastilha foi colocada numa célula, coberta com o imã. A pastilha foi então introduzida no equipamento previamente calibrado e zerado com KBr e procedidas as leituras na resolução de 4 cm^{-1} , de 400 a 4000 cm^{-1} com 900 varreduras.

As medidas foram realizadas em Espectrofotômetro da IV BOMEN Hartmann & Braun - MB Séries com método referência: PHARMACOPEIA 24 ed. (1999), no Departamento de Química da Universidade Federal do Ceará (UFC).

3.2.9 Medida de Umidade

A absorção de umidade do resíduo foi determinada pelo método de secagem em estufa (DE KNEGT & BRING, 1998). Uma massa de 10 g de RS-UASB foi seco a 102 °C por 24 horas e repesada. A umidade (%) foi então obtida (valor médio de três repetições) por subtração de 100 da razão percentual entre as massas de RS-UASB desidratado.

3.2.10 Conteúdo de Cinzas

O conteúdo de cinzas foi determinado conforme Ahmedna (1998). Uma massa de 10 g de RS-UASB foi colocada em cadinhos cerâmicos previamente pesados, secos a 102°C por 24 horas e repesadas. As amostras foram aquecidas em forno tipo mufla a 760 °C durante 6 horas. Os cadinhos foram esfriados em um dessecador e a quantidade de cinzas foi pesada em balança analítica. O conteúdo de cinzas (%) foi determinado (valor médio de três repetições) da razão percentual entre as massas de cinzas e a massa de RS-UASB.

3.2.11 Densidade Aparente

A densidade aparente foi determinada usando o método de Ahmedna (1998). Um cilindro de 100 mL (100 cm³) foi cheio com RS-UASB (previamente seco em estufa a 102 °C durante 24 horas). O cilindro foi tampado por 1-2 minutos (para a compactação do material). A densidade aparente foi obtida (valor médio de três repetições) da razão entre a massa e o volume do RS-UASB compactado.

3.2.12 Microscopia Ótica

Foi realizada a microscopia ótica de campo claro sob iluminação episcópica e microscopia de polarização sob luz diascópica do RS-UASB em microscópio Nikon Eclipse LV100D, com lâmpada de mercúrio de 100W. As imagens foram feitas com ocular de 10x e objetivas de 4x e 10x (campo claro); 20x e 40x (polarização) com câmera Evolution MP 5.0 resfriada (MediaCybernetics, Silver Spring, MDI, USA). O programa QImaging foi utilizado para a captura das imagens, que foram salvas em formato TIFF (RGB image).

3.3 Solo Utilizado

Nos experimentos foram usadas amostras do horizonte superficial a uma profundidade de até 20 cm de um solo Planossolo Háplico Eutrófico Solódico, material de origem arenito, coletado no município de Pelotas (RS), que apresentava característica de topografia, de localização e de morfologia de perfil semelhante à descrita para a unidade de mapeamento Pelotas (SANTOS, 2006). Subamostras destes solos foram peneiradas em peneira de 2 mm de abertura de malha para caracterização física e química (Tabela 1) e para serem usadas nos experimentos de laboratório. A caracterização físico-química do solo seguiu a metodologia descrita em Tedesco *et al.* (1995).

Tabela 6 - Caracterização física e química do solo Pelotas (Planossolo Háplico Eutrófico Solódico) utilizado nos experimentos.

Parâmetro		Concentração
Argila (%)		14
pH em água		4,9
Índice SMP		6,1
Matéria Orgânica (%)		1,7
Textura		4
Potássio (mg dm^{-3})		40
Cálcio ($\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$)		1,4
Magnésio ($\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$)		0,5
Alumínio ($\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$)		0,5
CTC efetiva ($\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$)		2,5
H + Al ($\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$)		3,9
% Saturação da CTC:	Bases	34
	Al	20
Cobre (mg dm^{-3})		1,2
Zinco (mg dm^{-3})		1,0
Ferro (mg dm^{-3})		14
Sódio (mg dm^{-3})		13
Fósforo (mg dm^{-3})		6,8
Manganês (mg dm^{-3})		78

3.4 Experimento em Laboratório

O experimento foi conduzido em laboratório, usando-se o solo Pelotas, no qual foram incorporados cinco níveis de lodo seco da parboilização do arroz nas doses equivalentes à 0; 2; 4 ; 6 e 8 Mg ha^{-1} , em vasos de 0,4 litros de capacidade que continham 300 gramas de solo (base seca). Nestes mesmos vasos foram incorporados ainda cinco níveis de calcário (CaCO_3 p.a. PRNT de 100 %), nas doses equivalentes a 0, 1, 2, 3, e 4 Mg ha^{-1} .

Após a mistura nos vasos das doses correspondentes de RS-UASB e calcário, os mesmos foram incubados durante oitenta e oito dias, com umidade correspondente a 80 % da capacidade de campo através da adição de água destilada, sendo mantidos fechados com polietileno para não perderem umidade, tendo, no entanto, aberturas suficientes para permitir as trocas gasosas (Figura 14).



Figura 14 - Vista parcial do experimento de incubação do RS-UASB no solo Pelotas.

Em subamostras de cada vaso, foi determinado o pH em água (1:1) v v⁻¹ aos 24, 58, e 88 dias de incubação. No RS-UASB 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 x 5 (5 níveis de RS-UASB 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.

3.5 Experimento em Casa de Vegetação

Neste experimento também foi usado o solo Pelotas 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 RS-UASB da parboilização do arroz nas doses equivalentes a 1,5; 3,0; 4,5 e 6,0 Mg ha⁻¹, em vasos de 4 litros de capacidade que continham 4 kg de solo (base seca) correspondendo, respectivamente, aos tratamentos 5, 6, 7 e 8. Como tratamentos controles foram utilizados adubação mineral (NPK), calcário (CaCO₃) e testemunha sem adubação e calcário.

No tratamento 1 foi usado apenas solo, no tratamento 2 solo com adição de CaCO₃, no tratamento 3 solo com adição de NPK e no tratamento 4 solo com adição de CaCO₃ e NPK.

Nos tratamentos adubação mineral NPK, foram aplicados doses de 100 mg L⁻¹ para cada elemento, tendo como fonte uréia – CO(NH₂)₂ – para N, superfosfato triplo – Ca(H₂PO₄)₂ – para P e cloreto de potássio – KCl – para K. O calcário – CaCO₃ – foi aplicado nos tratamentos 2 e 4 com dose equivalente à 8 Mg ha⁻¹. 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.

Os vasos foram semeados com 14 sementes de aveia preta - *Avena sativa* L., cultivar “ALPHA 94113”, perfazendo oito tratamentos com três repetições por tratamento, dispostos em um delineamento inteiramente ao acaso. Após trinta dias ocorreu o desbaste, ficando seis plantas em cada vaso. A colheita das plantas ocorreu 71 dias após a semeadura.

Após, colhida a parte aérea das plantas as mesmas foram mantidas à temperatura de 65°C em estufa de circulação forçada de ar, até peso constante, para determinação da massa seca da parte aérea da aveia. Esse material foi então triturado, em moinho tipo Wiley e a parte passante em peneira com malha de 20 mesh (0,85 mm) foi submetida às seguintes análises, todas descritas por Tedesco et al. (1995): N, P, K, Ca e Mg totais extraídos por digestão por H₂O₂ + H₂SO₄. Enxofre, Cu, Zn, Fe, Mn, Na, Al, Pb, Ni, Cr e Cd extraídos por digestão com HNO₃ – HClO₄. Os metais foram determinados por espectrometria de absorção atômica com forno

de grafite.

No solo foram determinados, em amostras coletadas após a colheita das plantas, os valores do pH em H₂O (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 de Duncan ao nível de 5 % de probabilidade.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Características Físico-Químicas do RS-UASB

Após a secagem, o RS-UASB apresentou-se como um pó de coloração marrom claro conforme mostra figura 15.



Figura 15 - RS-UASB originado da parboilização do arroz

O RS-UASB apresentou um pH igual a 7,32, originado do processo de neutralização do efluente com NaOH, após tratamento primário. O conteúdo de carbono orgânico, nitrogênio e fósforo total, íons metálicos, enxofre, boro, íons N-NH_4^+ (amônio), N-NO_3^- (nitrato), N-NO_2^- (nitrito) bem como o valor de neutralização são mostrados na Tabela 8. Nessa tabela são mostrados ainda os limites de detecção para cada determinação.

Tabela 7 - Caracterização química do RS-UASB da parboilização do arroz

Determinações	Concentração	Limites de detecção
Carbono orgânico (%)	2,8	0,01%
Nitrogênio total Kjeldahl – NTK(%)	0,40	0,01%
Fósforo total – P (%)	4,2	0,01%
Potássio total – K (%)	0,97	0,01%
Cálcio total – Ca (%)	25	0,01%
Magnésio total – Mg (%)	1,4	0,01%
Enxofre total – S (%)	0,18	0,01%
Ferro total – Fe (%)	0,12	4 mg kg ⁻¹
Manganês total – Mn (%)	0,23	4 mg kg ⁻¹
Sódio total – Na (%)	1,2	0,01%
Cobre total – Cu (mg kg ⁻¹)	31	0,6 mg kg ⁻¹
Zinco total – Zn (mg kg ⁻¹)	573	2 mg kg ⁻¹
Cádmio total – Cd (mg kg ⁻¹)	0,6	0,2 mg kg ⁻¹
Cromo total – Cr (mg kg ⁻¹)	7	0,4 mg kg ⁻¹
Níquel total – Ni (mg kg ⁻¹)	7	0,4 mg kg ⁻¹
Chumbo total – Pb (mg kg ⁻¹)	4	2 mg kg ⁻¹
Alumínio total – Al (mg kg ⁻¹)	637	0,01%
Molibdênio total – Mo(mg kg ⁻¹)	1	0,2 mg kg ⁻¹
Cobalto total – Co (mg kg ⁻¹)	1	0,4 mg kg ⁻¹
Boro total – B (mg kg ⁻¹)	8	1 mg kg ⁻¹
Mercúrio – Hg (mg kg ⁻¹)	0,05	0,01 mg kg ⁻¹
Amônia – N-NH ₄ ⁺ (mg kg ⁻¹)	48	1 mg kg ⁻¹
Nitrato – N-NO ₃ ⁻ (mg kg ⁻¹)	< 1	1 mg kg ⁻¹
Nitrito – N-NO ₂ ⁻ (mg kg ⁻¹)	< 1	1 mg kg ⁻¹
Valor de neutralização – %	55	1 %

A neutralização com NaOH foi responsável por parte da quantidade de sódio do RS-UASB. As baixas concentrações de carbono orgânico e nitrogênio total foram associados com o primeiro estágio da remoção biológica, da material orgânica, realizado no reator UASB e com o baixo conteúdo de amônia. Desde que há pouca amônia, nitrato e nitrito, a maioria do nitrogênio tem origem orgânica e a quantidade de proteína bruta foi determinada pela multiplicação do percentual de

nitrogênio total pelo fator 6,25, resultando em 2,5%. O alto conteúdo de cálcio (25%) foi originado do CaO usado na remoção do fósforo pela precipitação química, e das camadas externas do grão de arroz (aleurona e pericarpo), durante a lixiviação dos nutrientes no processo de encharque (RIVERO-HUGUET et al., 2006). Estas são as únicas fontes de cálcio no processo de parboilização.

A concentração de fósforo (4,2%) pode ter sido originada de defensivos agrícolas, no entanto a hipótese mais provável é principalmente a hidrólise da fitina fosforosa. A maior proporção de fósforo (90 %) no farelo está na forma de fitina forforosa. Fitato de potássio e magnésio (sais de ácido fítico) são substâncias presentes na casca do arroz que, quando hidrolisadas no encharcamento, liberam fosfato (BELITZ and GROSCH, 1988). A lixiviação foi também responsável pela presença dos outros elementos no RS-UASB.

A detecção de elementos tóxicos como cádmio, cromo e mercúrio podem estar associados à presença de aditivos ao solo, como fertilizantes fosfatados e outros resíduos (MERIAN, 1991). Exceto pelo fósforo, todos os elementos detectados estavam abaixo dos níveis máximos permitidos pela Fundação Estadual de Proteção Ambiental do Rio Grande do Sul (FEPAM-RS) para o descarte de efluentes.

A Figura 16 apresenta o difratograma de raios-X do RS-UASB. O percentual de cristalinidade determinado foi em torno de 62%, indicando a presença de fases amorfas.

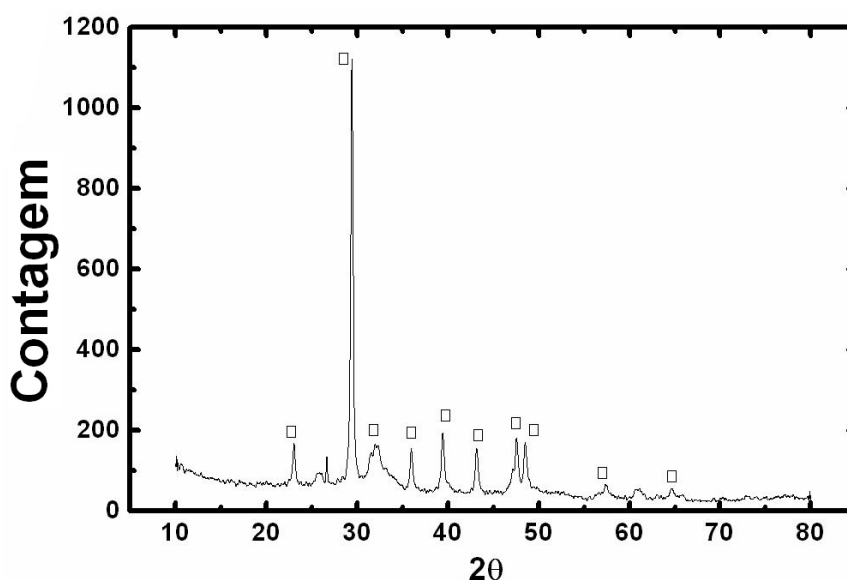


Figura 16 - Difratograma do RS-UASB mostrando a principal fase cristalina: calcita.

A análise cristalográfica indicou, como principal fase cristalina, o composto inorgânico calcita - CaCO_3 (62%), JCPDS PDF #05-0586. Também foram detectados pequenas quantidades de ortofosfato de ferro II e ferro III - $\text{KFe}_2(\text{PO}_4)_2$ (<1%), JCPDS PDF #42-0009. O grau de ajuste do refinamento (χ^2) foi de 1,20 com resíduos $R_p = 4.67$ e $R_{wp} = 3.12$. A calcita é composta de 40,04% de cálcio. Consequentemente, 25% de cálcio corresponde a 62,43% de CaCO_3 . Assim, o cálcio presente no RS-UASB é originado da calcita.

O ortofosfato de ferro II e ferro III é composto de 32,80% de Fe, 18,17% de P, e 11,47% de K. O ferro total do RS-UASB (0,12%) pode ser associado com a presença de $\text{KFe}_2(\text{PO}_4)_2$. Entretanto, as quantidades de fósforo e potássio totais deveriam ser muito pequenas (< 0,2%) se somente a estes fossem atribuídos a presença de ortofosfato. Assim, o potássio e o fósforo do RS-UASB devem estar presentes principalmente nas fases amorfas.

A Figura 17 mostra o espectro de infravermelho do RS-UASB. As bandas do carbonato (CO_3^{2-}) foram observadas em 713 (ν_4), 871-873, 1450-1425 (ν_3) e 2516 cm^{-1} . A banda detectada em 1792 cm^{-1} pode também ser atribuída aos grupos C=O dos íons carbonatos. Estas bandas evidenciam a presença da estrutura calcita. As bandas do fosfato (PO_4^{3-}) foram observadas em 604-564 (ν_1) e 1045 (ν_3) cm^{-1} . Estas fortes bandas evidenciam a presença do fosfato também na fase amorfa, pois sua quantidade é pequena na fase cristalina ($\text{KFe}_2(\text{PO}_4)_2$). A banda em 1639 cm^{-1} corresponde à presença da conformação fita β no grupo amida I (C-O ligação) de proteínas (CORTIJO et al., 1982). A forte banda detectada em 3400 cm^{-1} foi atribuída aos modos de estiramento do grupo hidroxila, enquanto que modos de estiramento do grupo C-H foram detectados na região entre 2800-3000 cm^{-1} . Estas bandas (OH/C-H) podem também estar associadas com fases amorfas orgânicas detectadas na análise de difração de raios-X.

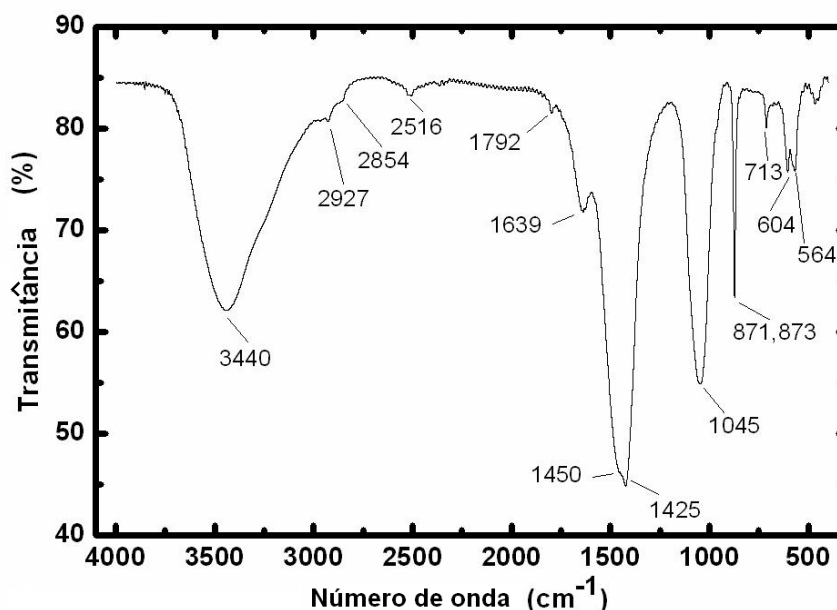


Figura 17 - Espectro infravermelho do RS-UASB mostrando as bandas associadas com íons carbonato e fosfato.

O RS-UASB apresentou uma umidade de 8,12%. Esta quantidade de umidade já é relatada em resíduos agro-industriais (WERTHER, 1995). A quantidade de cinzas determinada (63%) foi originada da perda de materiais voláteis e da decomposição térmica da calcita em 760°C, originando $\text{CaO}_{(s)}$ e $\text{CO}_{2(g)}$.

A Figura 18 mostra imagens de microscopia ótica (em diferentes ampliações) do pó do RS-UASB. Foram observadas partículas com diferentes formas e tamanhos (aproximadamente entre 5 e 400 μm). Uma grande quantidade de pequenas partículas de cor branca foi observada sobre a superfície de partículas maiores (Figuras 18a, 18b), em campo claro, sob iluminação episcópica. Estas pequenas partículas, quando observadas separadamente em polarização sob iluminação diascópica em posição cruzada de Nicols (Figuras 18c, 18d), revelaram uma estrutura cristalina com dimensões menores que 40 μm . O contraste observado nas imagens foi originado da interação da luz plano polarizada com um material birrefringente. A calcita é um material de birrefringência elevada. Assim, os pequenos cristais observados devem ser compostos de microcristais de calcita. As partículas maiores podem estar associadas com a presença de fases amorfas.

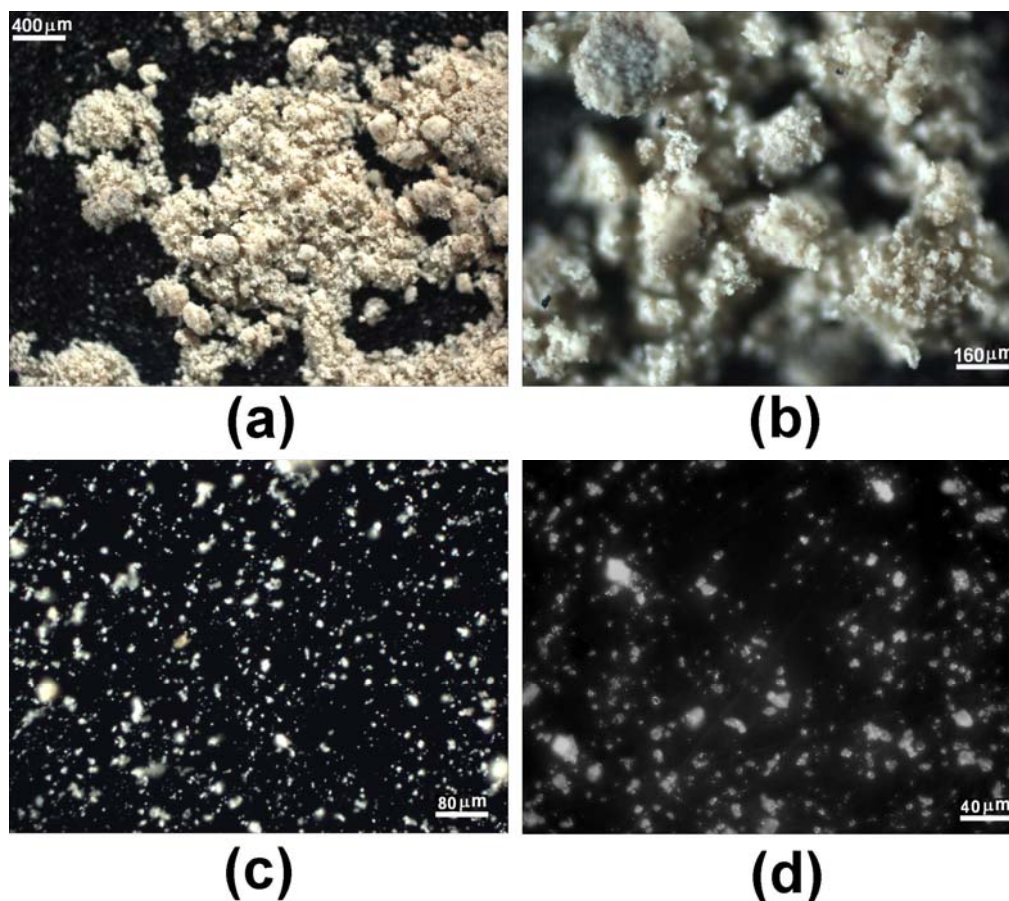


Figura 18 - Imagens de microscopia ótica mostrando o pó do RS-UASB em diferentes ampliações. Em microscopia de campo claro sob iluminação episcópica podem ser observadas pequenas partículas sobre a superfície de partículas maiores, nos aumentos de 40x (a) e 100x (b). Em microscopia de polarização sob iluminação diascópica, os cristais de calcita podem ser observados separadamente nas ampliações de 200x (c) e 400x (d).

O RS-UASB apresentou uma baixa densidade ($0,77 \text{ g cm}^{-3}$). Partículas com elevada dispersão (na forma e tamanho) se empacotam em pilhas aleatórias. Pilhas aleatórias são, geralmente, menos densas do que aquelas formadas de forma não-aleatória. Assim, uma elevada dispersão das partículas de pó RS-UASB teve efeito significativo sobre a sua baixa densidade.

4.2 Experimento em Laboratório

A análise de regressão polinomial mostra que houve variação do pH em função do tempo de incubação. Observou-se que, aos vinte e quatro 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 cinquenta e oito 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.

O RS-UASB em todos os períodos de incubação, e em todos os níveis de calcário (0, 1, 2, 3 e 4 Mg ha^{-1}), aumentou significativamente o pH do solo Pelotas (Figura 19). Este resultado está dentro do esperado, uma vez que o teor de Ca do RS-UASB é bastante elevado (25%) o que o torna eficiente em reduzir a acidez do solo.

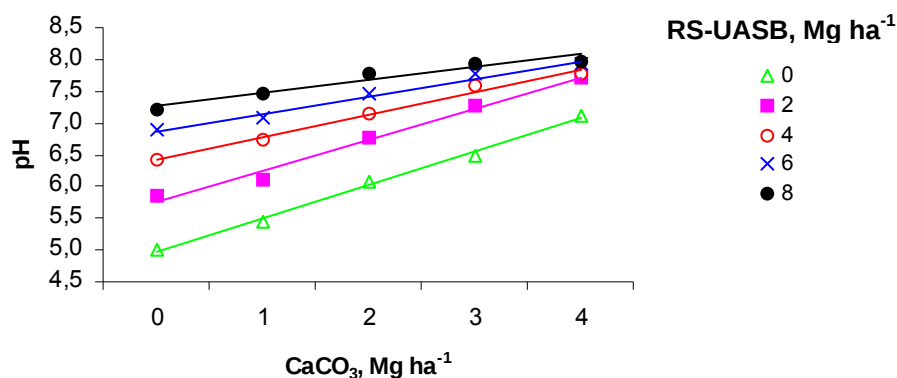


Figura 19 - Efeito das doses (Mg ha^{-1}) de calcário e de RS-UASB da parboilização do arroz sobre o pH do solo Pelotas. Média de 24, 58, e 88 dias de incubação.

A análise de regressão para níveis de lodo dentro do nível zero de calcário, indica pela equação que a aplicação de 2 Mg ha^{-1} de lodo ao solo aumentou o pH em 0,5 unidade (Figura 20). Essa figura mostra ainda, que o efeito do RS-UASB sobre o pH do solo foi positivo, aumentando-o de 5,2 (no nível zero de RS-UASB) para 7,4 no nível máximo da mesma (8 Mg ha^{-1}).

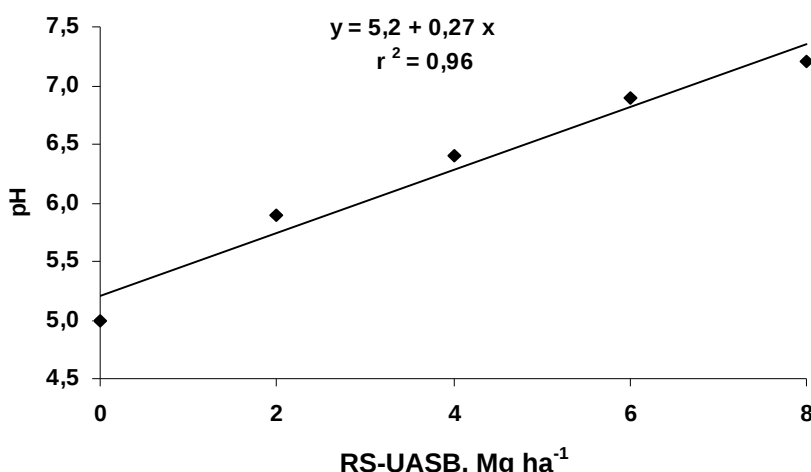


Figura 20 - Efeito das doses (Mg ha⁻¹) de CaCO₃ e de RS-UASB da parboilização do arroz sobre o pH do solo Pelotas. Média de 24, 58, e 88 dias de incubação.

A determinação do Valor de Neutralização (VN) ou equivalência em carbonato de cálcio (Eq. CaCO₃) do lodo foi de 55 % pelo mesmo método preconizado para corretivos de acidez do solo (TEDESCO et al., 1995).

Como todo o lodo utilizado 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 do lodo determinado por titulação (55 %) foi um tanto menor do valor real determinado por incubação (67,3 %), como mostra a equação da figura 21 que foi construída a partir dos dados estimados das doses de calcário necessárias para elevar o pH do solo a 6,5 para os níveis de RS-UASB equivalentes a 0, 2 e 4 Mg ha⁻¹.

Essa diferença provavelmente deve ser em decorrência dos dados experimentais utilizarem apenas três das cinco curvas de incubação (Figura 19), o que certamente acarretou desvios da reta. Não se utilizou as duas curvas superiores (6 e 8 Mg ha⁻¹ de RS-UASB) porque com essa quantidade de RS-UASB aplicada, os valores do pH no nível zero de CaCO₃ já foram superior a 6,5.

Pela equação mostrada na figura 21 conclui-se que, a cada tonelada de lodo seco da parboilização do arroz aplicada ao solo pelotas, reduz-se em 673 kg a quantidade de calcário necessária para elevar seu pH a 6,5.

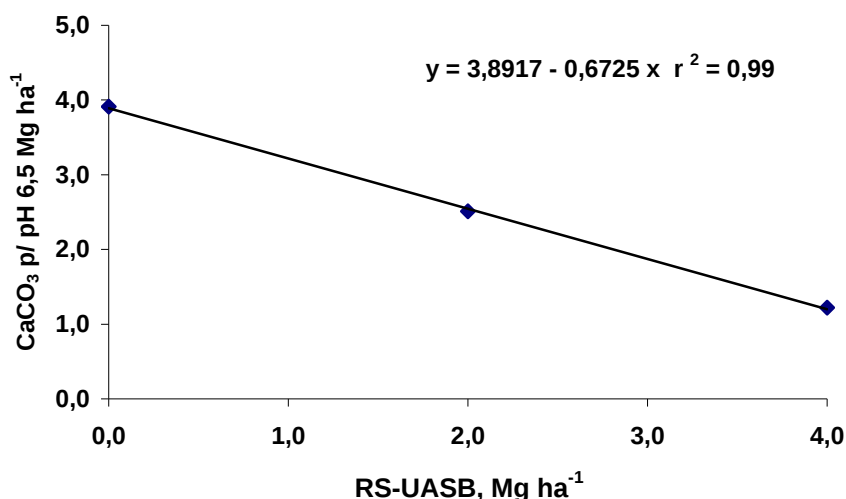


Figura 21- Quantidade de RS-UASB da parboilização do arroz que poderá substituir as doses de calcário necessárias para elevar o pH do solo Pelotas a 6,5.

4.3 Experimento em Casa de Vegetação

A análise de regressão para a produção de matéria seca em função dos níveis de RS-UASB em todos os tratamentos (Figura 22 e Apêndice 1) indica, pelas equações, que a adição do RS-UASB em doses equivalentes a 5,4 Mg ha⁻¹ ao solo, eleva a produção de matéria seca da parte aérea de aveia em 693 %, quando comparado com a da testemunha sem adubo e sem calcário (Tratamento 1, Figura 23) e, em 718 % quando comparado com a da testemunha sem adubo e com calcário (Tratamento 2, Figura 24). Nas doses equivalentes a 6,0 Mg ha⁻¹ eleva em 89 % quando comparado com a da testemunha com adubo e sem calcário (Tratamento 3, Figura 25) e em 53 % quando comparado com a da testemunha com adubo e com calcário (Tratamento 4, Figura 26).

Esses resultados indicam que o lodo seco da parboilização do arroz possui nutrientes que estão disponíveis para as plantas de aveia, sendo que o efeito como fonte de nutrientes foi bem maior do que como corretivo de acidez do solo.

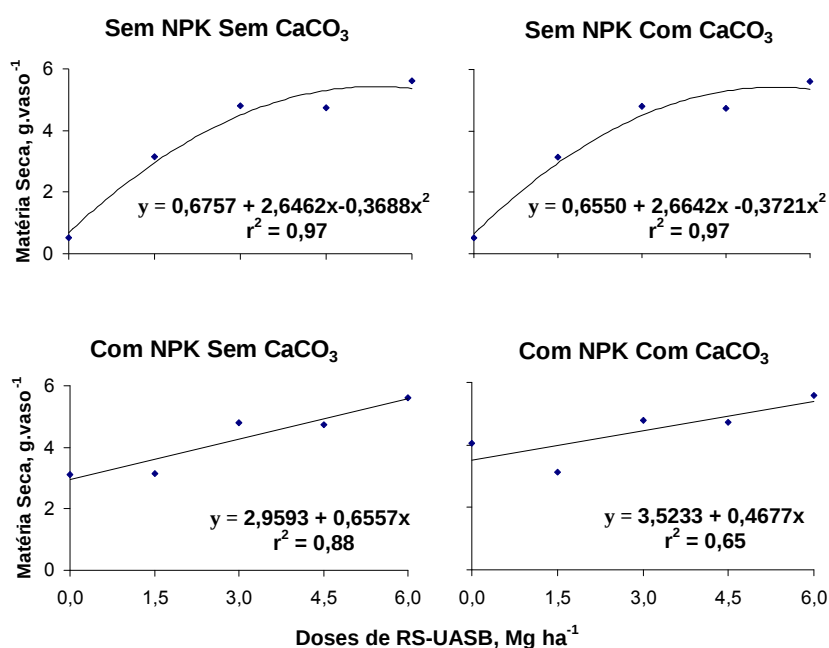


Figura 22 - Produção de matéria seca de aveia (g vaso^{-1}) cultivada em vasos num solo Planossolo Háplico Eutrófico Solódico, influenciada pela aplicação de doses (Mg ha^{-1}) de RS-UASB da parboilização do arroz, calagem e adubação mineral. Média de três repetições.

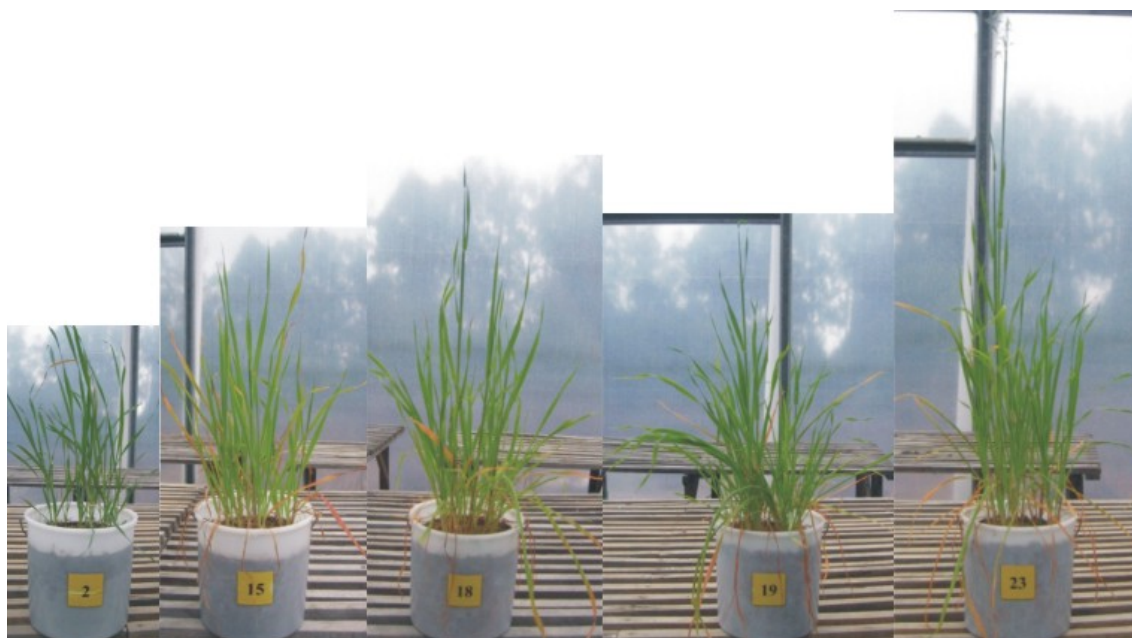


Figura 23 - Efeito da aplicação de doses equivalentes a 0 (testemunha sem NPK e sem CaCO_3 – tratamento 1); 1,5 ; 3,0 ; 4,5 e 6,0 Mg ha^{-1} de RS-UASB da parboilização do arroz sobre as plantas de aveia cultivadas em solo Planossolo Háplico Eutrófico Solódico.

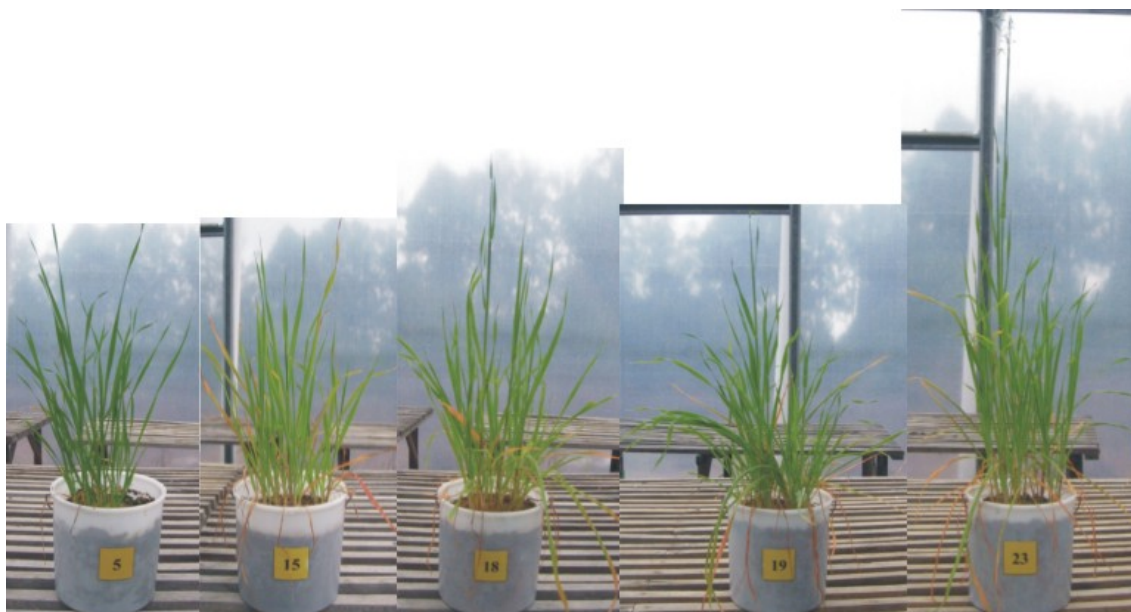


Figura 24 - Efeito da aplicação de doses equivalentes a 0 (testemunha sem NPK e com CaCO_3 – tratamento 2); 1,5 ; 3,0 ; 4,5 e 6,0 Mg ha^{-1} de RS-UASB da parboilização do arroz sobre as plantas de aveia cultivadas em solo Planossolo Háplico Eutrófico Solódico.

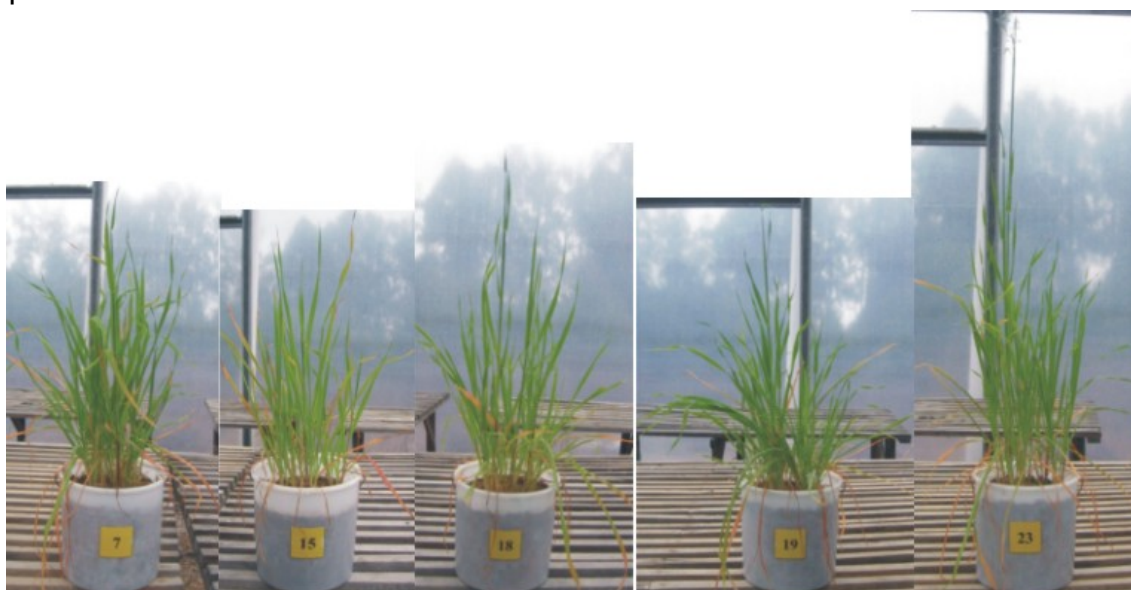


Figura 25 - Efeito da aplicação de doses equivalentes a 0 (testemunha com NPK e sem CaCO_3 – tratamento 3); 1,5 ; 3,0 ; 4,5 e 6,0 Mg ha^{-1} de RS-UASB da parboilização do arroz sobre as plantas de aveia cultivadas em solo Planossolo Háplico Eutrófico Solódico.

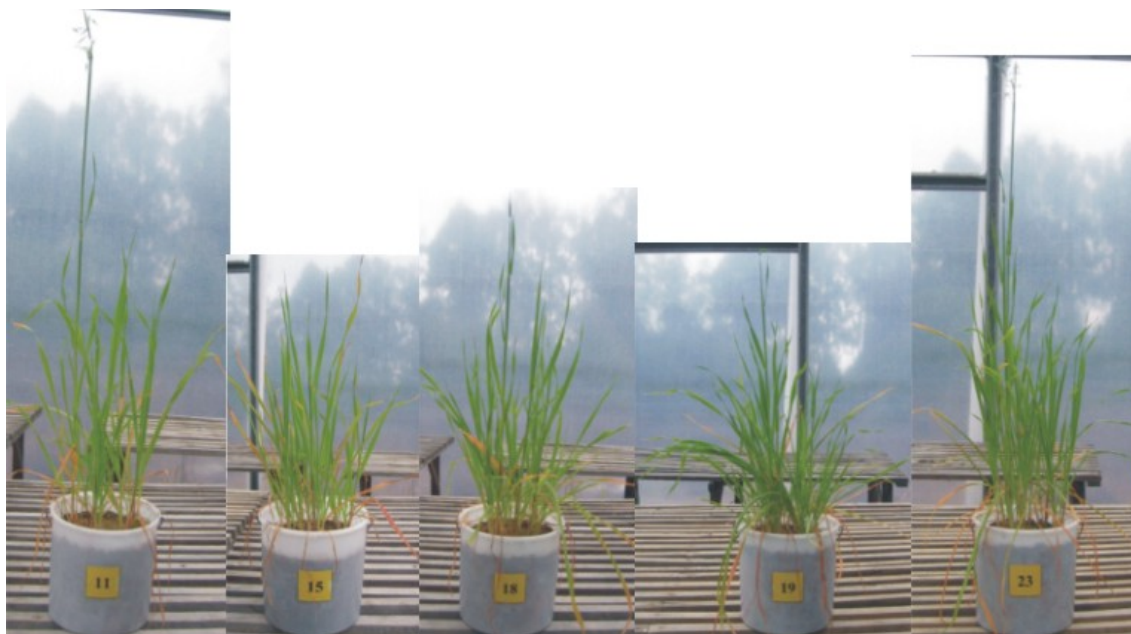


Figura 26 - Efeito da aplicação de doses equivalentes a 0 (testemunha com NPK e com CaCO_3 – tratamento 4); 1,5 ; 3,0 ; 4,5 e 6,0 Mg ha^{-1} de RS-UASB da parboilização do arroz sobre as plantas de aveia cultivadas em solo Planossolo Háplico Eutrófico Solódico.

Pelo Teste de Duncan, pode-se observar (Tabela 8), que a produção de matéria seca de aveia foi significativamente maior com a aplicação das três doses de RS-UASB (3,0; 4,5 e 6,0 Mg ha^{-1}) do que a testemunha, independentemente dos tratamentos calagem e adubação. Nesta tabela observa-se ainda que na dose 1,5 Mg ha^{-1} não houve diferença significativa na produção de matéria seca com a testemunha que recebeu adubação mineral, no entanto, mesmo assim, foi significativamente maior que a testemunha que recebeu apenas calcário e a que não recebeu nenhum tratamento. Esses resultados indicam que o lodo seco possui nutrientes minerais (N, P e K) que estão disponíveis para a planta.

Tabela 8 - Medidas de pH em água do solo, produção de matéria seca (g vaso^{-1}) e extração total (mg vaso^{-1}) de nitrogênio, fósforo e potássio pelas plantas de aveia cultivadas em vasos num solo Planossolo Háplico Eutrófico Solódico, influenciado pela aplicação de doses (Mg ha^{-1}) crescentes de RS-UASB da parboilização de arroz, calagem e adubação mineral. Médias de três repetições.*

Tratamentos	pH	Matéria Seca	N	P	K
		- g vaso^{-1} -	----- mg vaso^{-1} -----		
Solo	4,89 f	0,53 d	5,85 c	0,87 c	15,79 d
Solo + CaCO_3	7,41 a	0,51 d	4,72 c	0,91 c	13,21 d
Solo + NPK	4,66 f	3,11 c	31,45 b	11,98 b	55,78 bc
Solo + CaCO_3 + NPK	7,44 a	4,05 bc	54,83 a	20,08 a	96,87 a
Solo + $1,5 \text{ Mg ha}^{-1}$	5,37 e	3,14 c	27,59 b	8,46 b	43,56 c
RS-UASB					
Solo + $3,0 \text{ Mg ha}^{-1}$	5,76 d	4,79 ab	43,69 ab	12,83 b	62,23 bc
RS-UASB					
Solo + $4,5 \text{ Mg ha}^{-1}$	6,14 c	4,72 ab	48,48 a	19,86 a	75,47 ab
RS-UASB					
Solo + $6,0 \text{ Mg ha}^{-1}$	6,53 b	5,60 a	60,16 a	23,64 a	93,55 a
RS-UASB					
CV (%)	2,30	22,50	26,06	25,39	21,02

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

A Tabela 8 mostra também que o RS-UASB da parboilização do arroz em todos os níveis elevou significativamente o pH do solo medido em H_2O . As análises de regressão (Figura 27 e Apêndice 2) mostram que houve um aumento de 33% e de 38% no pH, tratamento 1 e 3 respectivamente, em função das doses crescentes de RS-UASB. Observa-se ainda que a calagem no tratamento 2 e 4 elevou significativamente o pH do solo (em torno de 51%) a níveis bastante altos ($\text{pH} = 7,4$) para o desenvolvimento ideal das plantas.

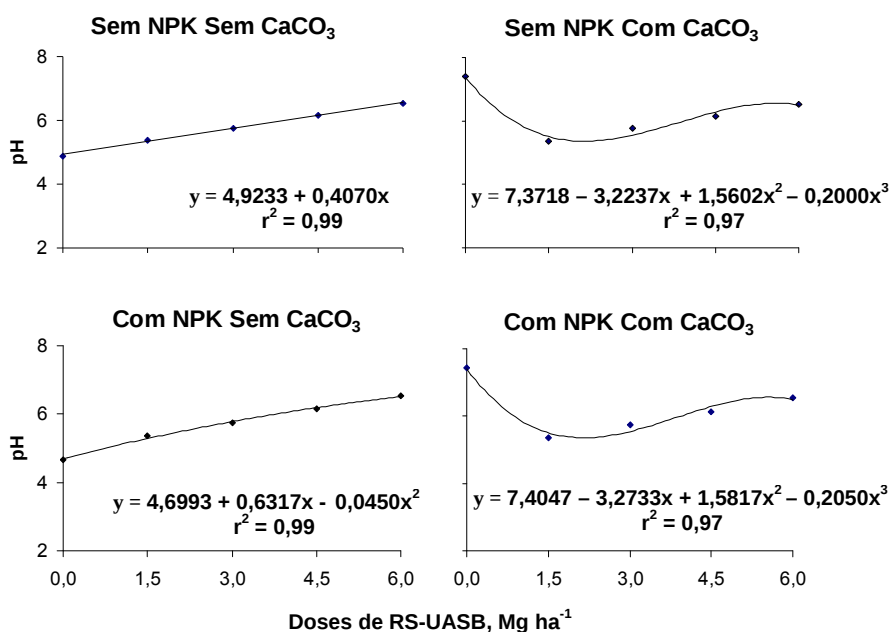


Figura 27 - Medidas de pH do solo Planossolo Háplico Eutrófico Solódico, influenciado pela aplicação de doses (Mg ha⁻¹) de RS-UASB da parboilização do arroz, calagem e adubação mineral. Média de três repetições.

4.3.1 Nitrogênio

Houve efeito significativo da adubação sobre o total de N, P e K extraído pelas plantas de aveia tanto na ausência como na presença do calcário, tratamentos 3 e 4 respectivamente. Isso era de se esperar, já que foi feita uma adubação mineral básica com esses três nutrientes. Também em todos os níveis de RS-UASB a absorção total de N, P e K foi significativamente maior que o tratamento 1 e 2 que não receberam adubação (Tabela 8). Isso indica que o RS-UASB possui níveis desses nutrientes que estão biodisponíveis para a cultura de aveia.

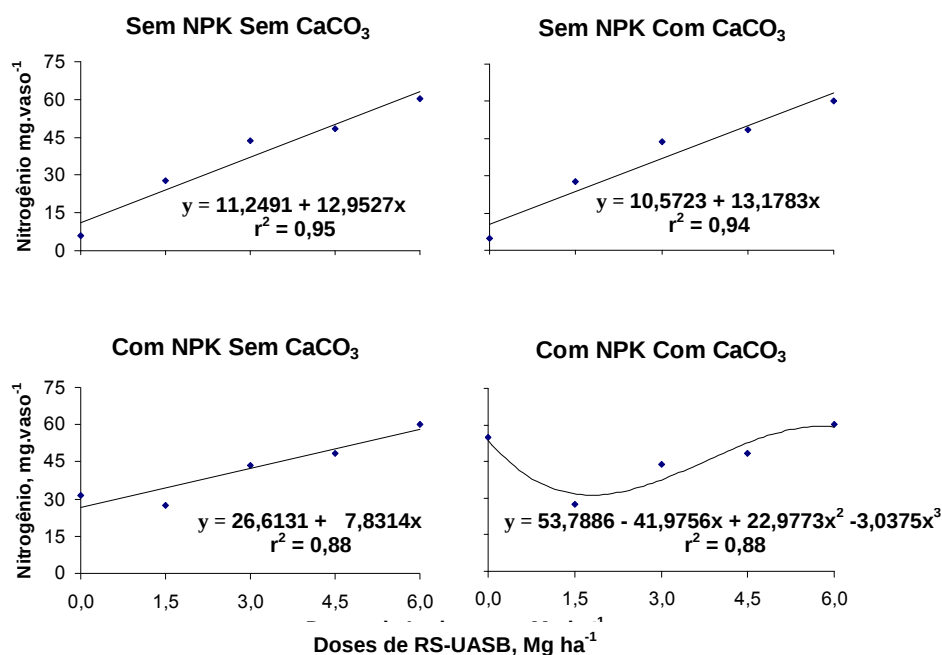


Figura 28 - Quantidade total de nitrogênio extraída (mg vaso^{-1}) pelas plantas de aveia cultivadas em vasos num solo Planossolo Háplico Eutrófico Solódico, influenciado pela aplicação de doses (Mg ha^{-1}) de RS-UASB da parboilização do arroz, calagem e adubação mineral. Média de três repetições.

Com a aplicação de doses crescentes de RS-UASB, houve um aumento significativo da absorção total de nitrogênio nos três tratamentos, sendo que no tratamento 1 (sem adubo e sem calcário), este aumento foi de 461%; no tratamento 2 (sem adubo e com calcário) foi de 499% e no tratamento 3 (com adubo e sem calcário) foi de 118%. No tratamento 4 (com adubo e com calcário), este aumento foi uma curva cúbica, indicando um pico máximo de absorção do elemento com dose de $5,8 \text{ Mg ha}^{-1}$ de RS-UASB (Figura 28 e Apêndice 3).

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 Al^{3+} e 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.

Como o teor de P do solo Planossolo Háplico Eutrófico Solódico utilizado no experimento é muito baixo (Tabela 8) segundo as tabelas de recomendação de adubação e de calagem para os estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina (CQFS / RS – SC, 2004), houve resposta significativa da adubação e das doses crescentes de lodo na absorção do elemento pelas plantas de aveia (Figura 29).

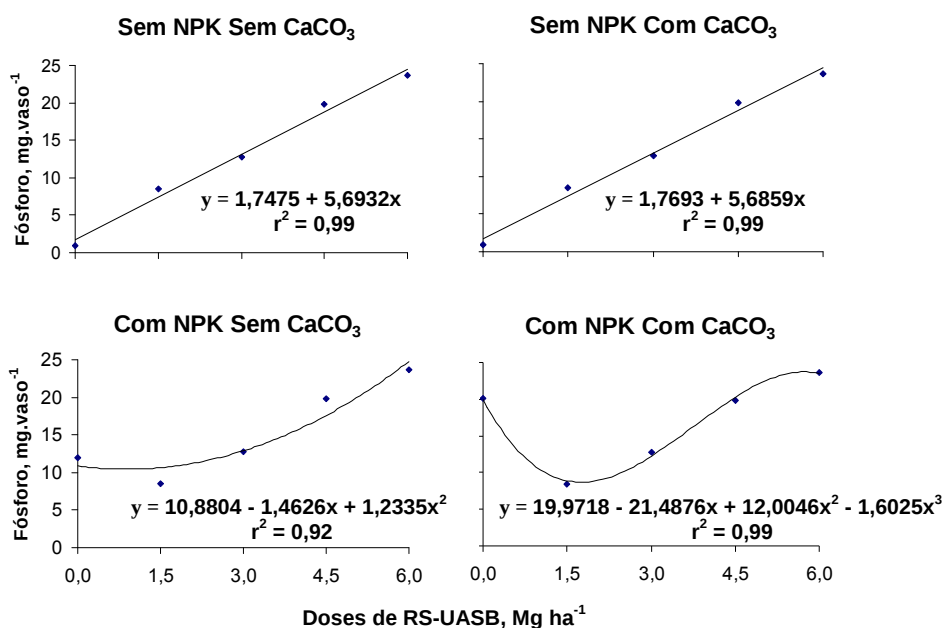


Figura 29 - Quantidade total de fósforo extraída (mg vaso^{-1}) pelas plantas de aveia cultivadas em vasos num solo Planossolo Háplico Eutrófico Solódico, influenciado pela aplicação de doses (Mg ha^{-1}) de RS-UASB da parboilização do arroz, calagem e adubação mineral. Média de três repetições.

A absorção total do P pelas plantas em função das doses de lodo foi altamente significativa ($R^2 = 0,99$) nos tratamentos 1 e 2, sendo este aumento respectivamente de 1303 % e 1285 % (Figura 29 e Apêndice 4), indicando que a grande quantidade de P presente no RS-UASB (4,2 % - Tabela 7) encontra-se disponível para as plantas.

No tratamento 3 também houve aumento significativo em função das doses crescentes do RS-UASB ($R^2 = 0,92$) sendo de 128 %, portanto bem menor do que os tratamentos 1 e 2, apesar do tratamento 3 receber adubação mineral de P. Isso ocorreu devido provavelmente ao baixo pH do solo ($\text{pH} = 4,7$) nesse tratamento, que deixou o P aplicado indisponível para as plantas de aveia. No tratamento 4 o P proveniente da adubação mineral em função da calagem ($\text{pH} = 7,4$) já estava disponível para a cultura.

No tratamento 4, assim como para o N o aumento na absorção de P foi uma curva cúbica, indicando um pico máximo de absorção do elemento com dose de $5,7 \text{ Mg ha}^{-1}$ de RS-UASB (Figura 29 e Apêndice 4).

Na tabela 8 se pode observar que houve uma diferença significativa na absorção total de P em todos os níveis de RS-UASB quando comparado com a testemunha que não recebeu adubação mesmo recebendo calcário. Isso ocorreu devido ao solo utilizado no experimento possuir um nível muito baixo de fósforo ($6,8 \text{ mg dm}^{-3}$ – Tabela 6).

4.3.3 Potássio

Assim como para o P, o teor de K do solo Planossolo Háplico Eutrófico Solódico utilizado no experimento é baixo (Tabela 6) segundo as tabelas de recomendação de adubação e de calagem para os estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina (CQFS / RS – SC, 2004), houve resposta significativa da adubação e das doses crescentes de RS-UASB na absorção do elemento pelas plantas de aveia (Figura 30). No entanto para o K o aumento observado não foi tão grande quanto ao P, porque proporcionalmente, seu nível no solo é mais alto e também porque não é tão dependente do pH quanto o P.

A absorção total do K pelas plantas em função das doses de RS-UASB foi significativa em todos os tratamentos, sendo que nos tratamentos 1, 2 e 3, este aumento foi respectivamente de 363 % , 404 % e 82 % (Figura 30 e Apêndice 5), indicando que a quantidade de K presente no RS-UASB (0,97 % - tabela 7) encontra-se disponível para as plantas.

No tratamento 4, assim como para o N e o P, o aumento na absorção de K foi uma curva cúbica, indicando um pico máximo de absorção do elemento com dose de $5,8 \text{ Mg ha}^{-1}$ de RS-UASB. Observa-se que para os três macros nutrientes primários, N, P e K o efeito das doses crescentes do RS-UASB da parboilização do arroz foi muito semelhante, indicando uma grande possibilidade de utilização deste material como fertilizante.

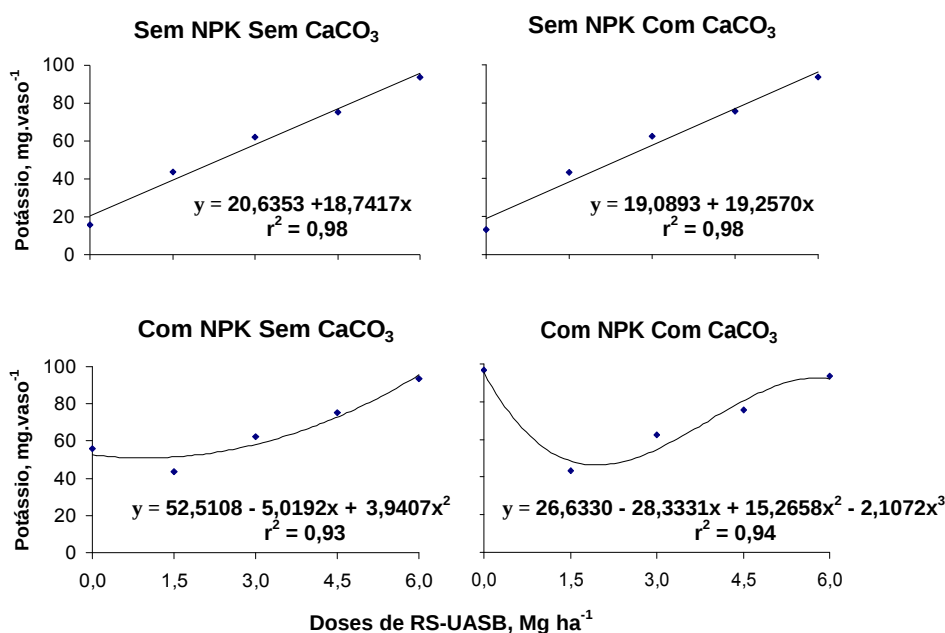


Figura 30 - Quantidade total de potássio extraída (mg vaso⁻¹) pelas plantas de aveia cultivadas em vasos num solo Planossolo Háplico Eutrófico Solódico, influenciado pela aplicação de doses (Mg ha⁻¹) de RS-UASB da parboilização do arroz, calagem e adubação mineral. Média de três repetições.

4.3.4 Cálcio

O teor de Ca trocável do solo Planossolo Háplico Eutrófico Solódico (Tabela 6) utilizado no experimento é considerado baixo (CQFS / RS - SC, 2004). A aplicação de doses crescentes de RS-UASB no tratamento 1, elevou significativamente a absorção do elemento pelas plantas de feijão em aproximadamente 1494 %, o que está de acordo com o esperado em decorrência do lodo possuir um alto teor de Ca (25 % - Tabela 7) proveniente do CaO utilizado no processo de precipitação química do fósforo, (Figura 31 e Apêndice 6). Neste tratamento o pico máximo de absorção do elemento estimado pela equação de regressão foi de uma dose correspondente a 6,9 Mg ha⁻¹ de RS-UASB.

Com a aplicação de doses crescentes de RS-UASB, houve também um aumento significativo da absorção total de Ca nos tratamentos 2 e 3 de respectivamente 315 % e de 224 %. No tratamento 4 este aumento foi uma curva cúbica, indicando um pico máximo de absorção do elemento com doses de 6,8 Mg ha⁻¹ de RS-UASB.

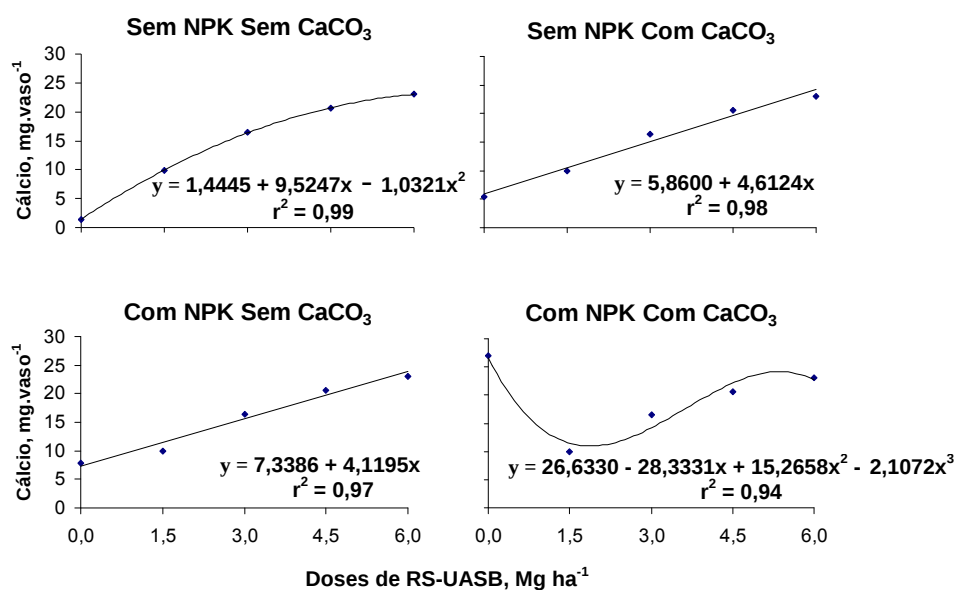


Figura 31 - Quantidade total de cálcio extraída (mg vaso⁻¹) pelas plantas de aveia cultivadas em vasos num solo Planossolo Háplico Eutrófico Solódico, influenciado pela aplicação de doses (Mg ha⁻¹) de RS-UASB da parboilização do arroz, calagem e adubação mineral. Média de três repetições.

Na tabela 9 pode-se observar que houve uma diferença significativa na absorção total de Ca em todos os níveis de RS-UASB quando comparado com a testemunha. Isso ocorreu devido ao solo utilizado no experimento possuir um nível baixo de cálcio (1,4 mg dm⁻³ – tabela 6) e o RS-UASB possuir um alto teor desse elemento, indicando também que o elemento encontra-se disponível no RS-UASB.

Tabela 9 - Extração total (mg vaso⁻¹) de cálcio, magnésio enxofre e sódio pelas plantas de aveia cultivadas em vasos num solo Planossolo Háplico Eutrófico Solódico, influenciado pela aplicação de doses (Mg ha⁻¹) crescentes de RS-UASB da parboilização de arroz, calagem e adubação mineral. Médias de três repetições.*

Tratamentos	Ca	Mg	S	Na
	----- mg vaso ⁻¹ -----			
Solo	1,4263 e	0,8833 d	1,4123 e	0,8047 e
Solo + CaCO ₃	5,3450 de	0,8933 d	1,3283 e	0,5573 e
Solo + NPK	7,8093 d	5,3640 bc	4,8200 d	2,3420 de
Solo + CaCO ₃ + NPK	27,0100 a	8,4950 a	6,5790 bcd	2,5300 de
Solo + 1,5 Mg ha ⁻¹ RS-UASB	9,9503 c	4,6790 c	5,3167 cd	5,3817 cd
Solo + 3,0 Mg ha ⁻¹ RS-UASB	16,4347 c	7,4417 ab	6,8373 bc	8,4093 c
Solo + 4,5 Mg ha ⁻¹ RS-UASB	20,6237 bc	8,7913 a	8,0293 ab	13,8630 b
Solo + 6,0 Mg ha ⁻¹ RS-UASB	23,0703 ab	9,7913 a	9,3590 a	17,6893 a
CV (%)	20,73	23,29	18,05	31,64

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

4.3.5 Magnésio

O teor de Mg trocável do solo Planossolo Háplico Eutrófico Solódico (Tabela 6) utilizado no experimento é considerado baixo ($0,5 \text{ cmol}_c\text{dm}^{-3}$), (CQFS / RS - SC, 2004). A aplicação de doses crescentes de lodo elevou significativamente a absorção do elemento pelas plantas de aveia em aproximadamente 977 % e 966 % nos tratamentos 1 e 2, respectivamente. Para ambos os tratamentos o pico máximo de absorção do elemento foi com dose correspondente a $6,3 \text{ Mg ha}^{-1}$ de RS-UASB (Figura 32 e Apêndices 7).

Na tabela 9 pode-se observar que houve uma diferença significativa na absorção total de Mg em todos os níveis de RS-UASB quando comparado com a testemunha que não recebeu adubação mesmo recebendo calcário.

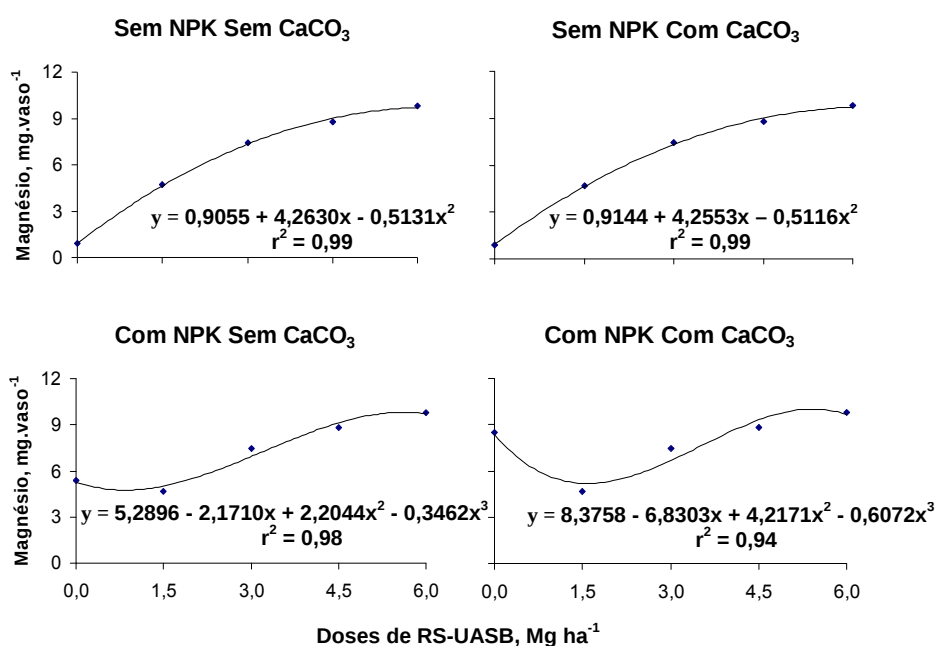


Figura 32 - Quantidade total de magnésio extraída (mg vaso^{-1}) pelas plantas de aveia cultivadas em vasos num solo Planossolo Háplico Eutrófico Solódico, influenciado pela aplicação de doses (Mg ha^{-1}) de RS-UASB da parboilização do arroz, calagem e adubação mineral. Média de três repetições.

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 SO_4^{2-} .

Pode-se observar que houve um aumento significativo na absorção do S pelas plantas de aveia em função das doses de RS-UASB nos tratamentos 1, 2, 3 e 4, sendo aproximadamente de 441 %, 466 %, 104 % e 53 %, respectivamente (Figura 33 e Apêndice 8).

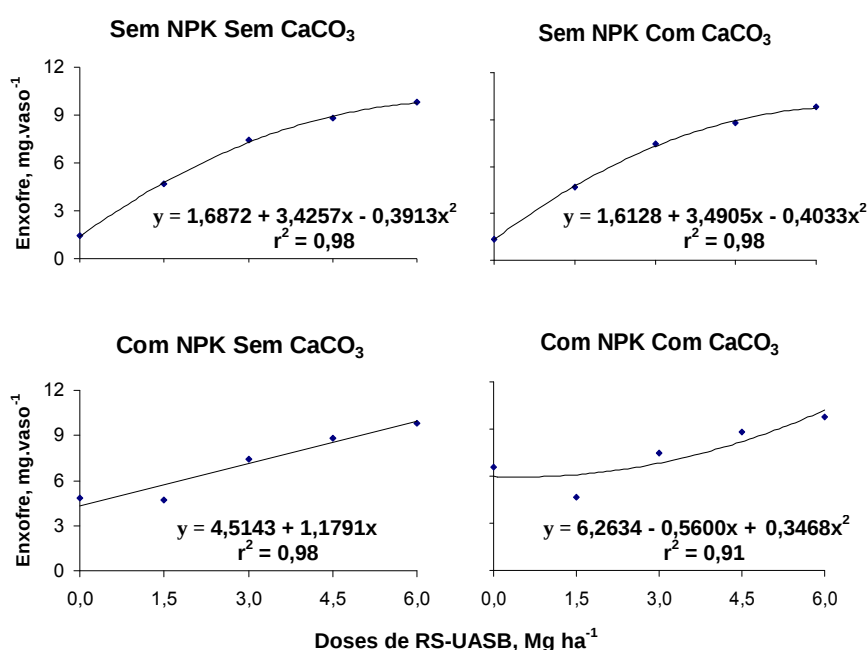


Figura 33 - Quantidade total de enxofre extraída (mg vaso^{-1}) pelas plantas de aveia cultivadas em vasos num solo Planossolo Háplico Eutrófico Solódico, influenciado pela aplicação de doses (Mg ha^{-1}) de RS-UASB da parboilização do arroz, calagem e adubação mineral. Média de três repetições.

Na tabela 9 pode-se observar que houve uma diferença significativa na absorção total de S em todos os níveis de RS-UASB quando comparado com a testemunha que não recebeu adubação mesmo recebendo calcário.

4.3.7 Sódio

Com a aplicação de doses crescentes de lodo, houve um aumento altamente significativo ($R^2 = 0,99$) da absorção total de Na em todos os tratamentos (1, 2, 3 e 4) sendo este aumento respectivamente de 2168 %, 2709 %, 921 % e 855 % (Figura 34 e Apêndice 9), indicando que a grande quantidade de Na presente no lodo (1,2 % - tabela 7) encontra-se disponível para as plantas.

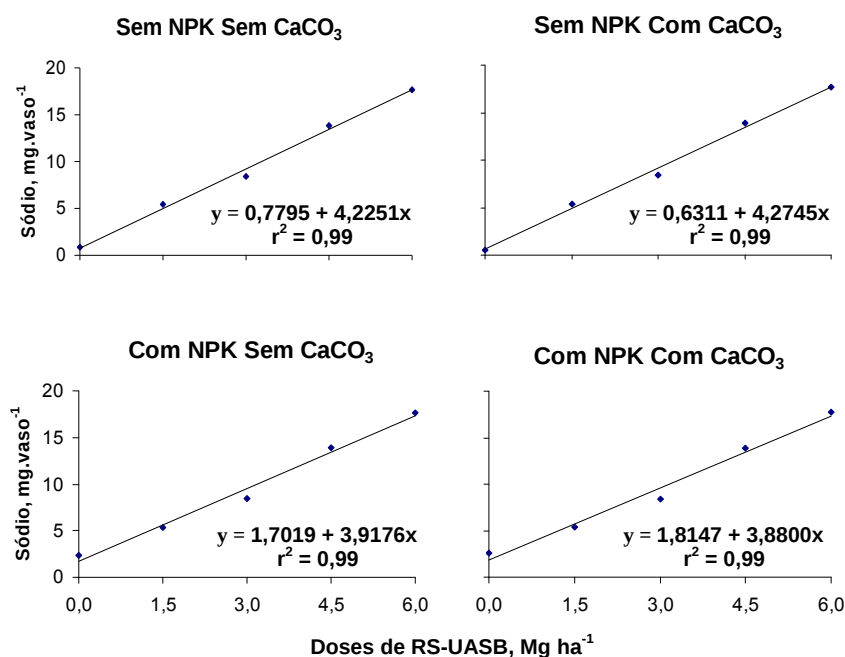


Figura 34 - Quantidade total de sódio extraída (mg vaso⁻¹) pelas plantas de aveia cultivadas em vasos num solo Planossolo Háplico Eutrófico Solódico, influenciado pela aplicação de doses (Mg ha⁻¹) de RS-UASB da parboilização do arroz, calagem e adubação mineral. Média de três repetições.

Assim como para o Ca, Mg e S, pode-se observar que houve para o Na, Tabela 9, uma diferença significativa na absorção total do elemento em todos os níveis de RS-UASB quando comparado com a testemunha que não recebeu adubação mesmo recebendo calcário.

4.3.8 Cobre e Zinco

Segundo a comissão de química e fertilidade do solo (CQFS / RS - SC, 2004), os níveis de Cu^{2+} ($1,2 \text{ mg dm}^{-3}$) e Zn ($1,0 \text{ mg dm}^{-3}$) no solo Planossolo Háplico Eutrófico Solódico utilizado no experimento são altos (Tabela 6), portanto era de se esperar que não houvesse efeito das doses de lodo sobre a absorção total desses elementos pelas plantas de aveia. No entanto houve um aumento significativo na absorção do Cu pelas plantas de aveia em função das doses de RS-UASB nos tratamentos 1, 2, 3 e 4, sendo aproximadamente de 290 %, 349 %, 101 % e 21 %, respectivamente (Figura 35 e Apêndice 10).

Para o Zn também houve um aumento significativo na absorção pelas plantas de aveia em função das doses de RS-UASB nos tratamentos 1, 2, 3 e 4, sendo aproximadamente de 189 %, 319 %, 92 % e 56 %, respectivamente (Figura 36 e Apêndice 11). Isso se deve provavelmente pelo melhor estado nutricional das plantas o que refletiu numa melhor produção de matéria seca nos tratamentos que receberam adubação química e doses de RS-UASB.

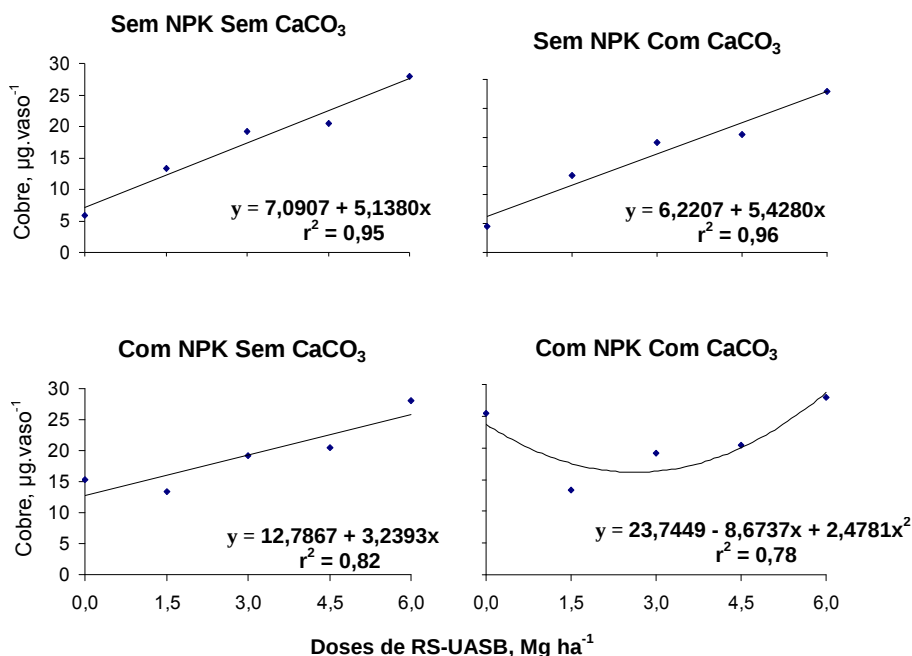


Figura 35 - Quantidade total de cobre extraída ($\mu\text{g vaso}^{-1}$) pelas plantas de aveia cultivadas em vasos num solo Planossolo Háplico Eutrófico Solódico, influenciado pela aplicação de doses (Mg ha^{-1}) de RS-UASB da parboilização do arroz, calagem e adubação mineral. Média de três repetições.

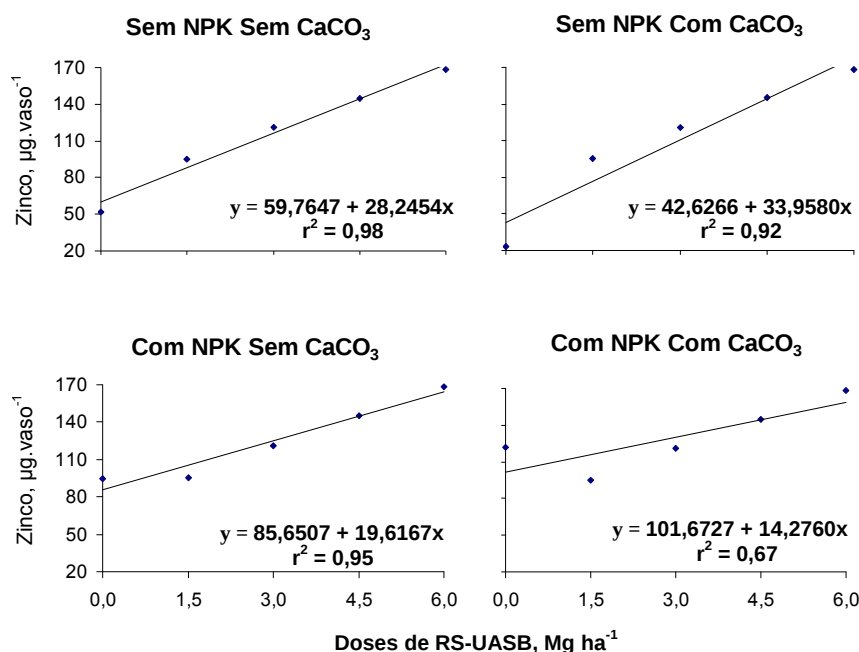


Figura 36 - Quantidade total de zinco extraída ($\mu\text{g vaso}^{-1}$) pelas plantas de aveia cultivadas em vasos num solo Planossolo Háplico Eutrófico Solódico, influenciado pela aplicação de doses (Mg ha^{-1}) de RS-UASB da parboilização do arroz, calagem e adubação mineral. Média de três repetições.

Na Tabela 10 pode-se observar que houve uma diferença significativa na absorção total de Cu e Zn em todos os níveis de RS-UASB quando comparado com a testemunha que não recebeu adubação mesmo recebendo calcário.

Tabela 10 - Extração total ($\mu\text{g vaso}^{-1}$) de cobre, zinco ferro manganês e alumínio pelas plantas de aveia cultivadas em vasos num solo Planossolo Háplico Eutrófico Solódico, influenciado pela aplicação de doses (Mg ha^{-1}) crescentes de RS-UASB da parboilização de arroz, calagem e adubação mineral. Médias de três repetições.*

Tratamentos	Cu	Zn	Fe	Mn	Al
	$\mu\text{g vaso}^{-1}$				
Solo	5,8933 e	51,7333 de	75,6567 d	258,3067 ef	47,9900 b
Solo + CaCO ₃	4,4433 e	23,1700 e	121,7700 d	118,7034 f	44,6500 b
Solo + NPK	15,3867 cd	94,8767 cd	620,5501 bc	1806,3333 a	28,7567 a
Solo + CaCO ₃ + NPK	25,3900 ab	121,5801 bc	1567,2601 a	452,2300 def	221,4500 a
Solo + 1,5 Mg ha^{-1} RS-UASB	13,3133 d	95,3567 cd	364,4300 cd	1020,9099 b	182,4233 a
Solo + 3,0 Mg ha^{-1} RS-UASB	19,1466 bcd	121,0267 bc	551,5233 bc	914,1567 bc	263,1233 a
Solo + 4,5 Mg ha^{-1} RS-UASB	20,4800 bc	145,0433 ab	507,7367 bc	685,6768 bcd	256,9200 a
Solo + 6,0 Mg ha^{-1} RS-UASB	28,0000 a	168,1167 a	747,8401 b	581,1800 cde	284,4700 a
CV (%)	21,80	23,97	25,51	729,69	31,01

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

4.3.9 Ferro - Manganês - Alumínio

Com a aplicação de doses crescentes de RS-UASB, houve um aumento significativo da absorção total de Fe nos tratamentos 1 e 2 de respectivamente 243 % e de 311 %. No tratamento 3 este aumento foi de 27 %. A maior absorção se deu no tratamento 4 (Figura 37 e Apêndice 12).

Assim como o Cu^{2+} e o Zn^{2+} , a disponibilidade (toxidez) de manganês para as plantas é altamente dependente do pH do solo, visto que a adsorção química às superfícies das partículas do solo e da matéria orgânica serem extremamente dependentes do pH, bem como o Mn^{2+} poder ser adsorvido eletrostaticamente às cargas negativas do solo e também formar óxidos de Mn^{4+} (MnO_2) bastante insolúveis, diminuindo sua disponibilidade para as plantas.

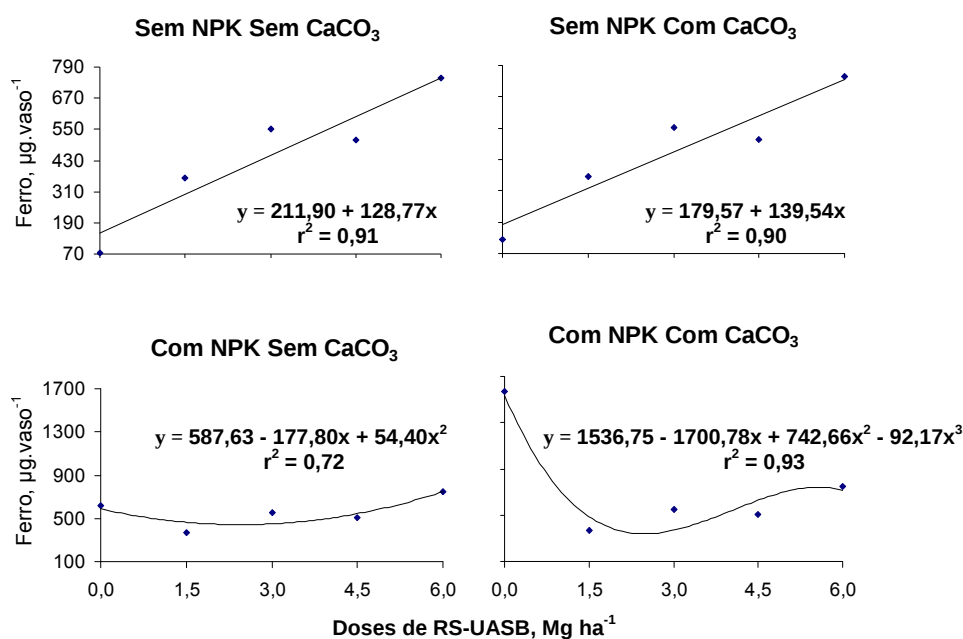


Figura 37 - Quantidade total de ferro extraída (µg vaso⁻¹) pelas plantas de aveia cultivadas em vasos num solo Planossolo Háplico Eutrófico Solódico, influenciado pela aplicação de doses (Mg ha⁻¹) de RS-UASB da parboilização do arroz, calagem e adubação mineral. Média de três repetições.

A absorção de Mn pelas plantas decresceu significativamente em função das doses de RS-UASB e principalmente da calagem, sendo este decréscimo muito maior em função da elevação do pH do solo com o aumento do nível do RS-UASB (Figura 38 e Apêndice 13).

Com a aplicação de doses crescentes de RS-UASB, houve um aumento significativo da absorção total de Al nos tratamentos 1 e 2 de respectivamente 401 % e de 430 %. Nos tratamentos 3 e 4 não houve efeito significativo das doses de RS-UASB (Figura 39 e Apêndice 14).

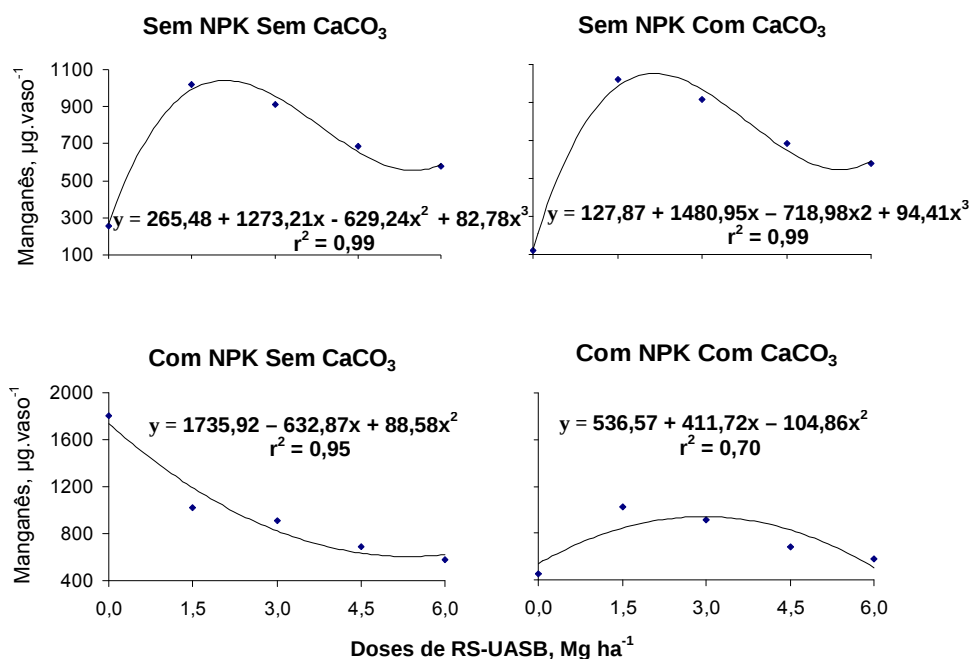


Figura 38 - Quantidade total de manganês extraída (µg vaso⁻¹) pelas plantas de aveia cultivadas em vasos num solo Planossolo Háplico Eutrófico Solódico, influenciado pela aplicação de doses (Mg ha⁻¹) de RS-UASB da parboilização do arroz, calagem e adubação mineral. Média de três repetições.

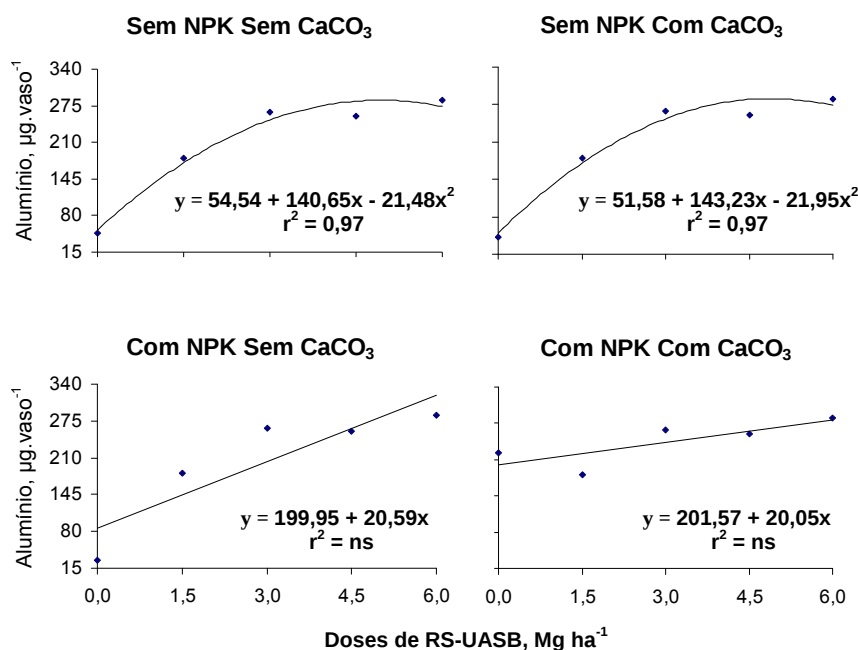


Figura 39 - Quantidade total de alumínio extraída (µg vaso⁻¹) pelas plantas de aveia cultivadas em vasos num solo Planossolo Háplico Eutrófico Solódico, influenciado pela aplicação de doses (Mg ha⁻¹) de RS-UASB da parboilização do arroz, calagem e adubação mineral. Média de três repetições.

4.3.10 Cromo - Níquel - Chumbo - Cádmio

A absorção de cromo e níquel pelas plantas de aveia, em todos os tratamentos e em todos os níveis de RS-UASB, foi não significativa (Tabela 11), indicando com isso que estes elementos no lodo não apresentam nenhum problema para as plantas (Figuras 40 e 41, Apêndices 15 e 16). Também a absorção de cádmio, em função das doses de RS-UASB, não apresentou diferença significativa em relação ao nível zero (testemunha) (Figuras 42 e Apêndice 15). Já para o chumbo apenas no tratamento que recebeu 3,0 Mg ha⁻¹ de RS-UASB houve aumento na absorção de Pb no entanto diminuiu nos níveis mais elevados (Figura 43 e Apêndice 18).

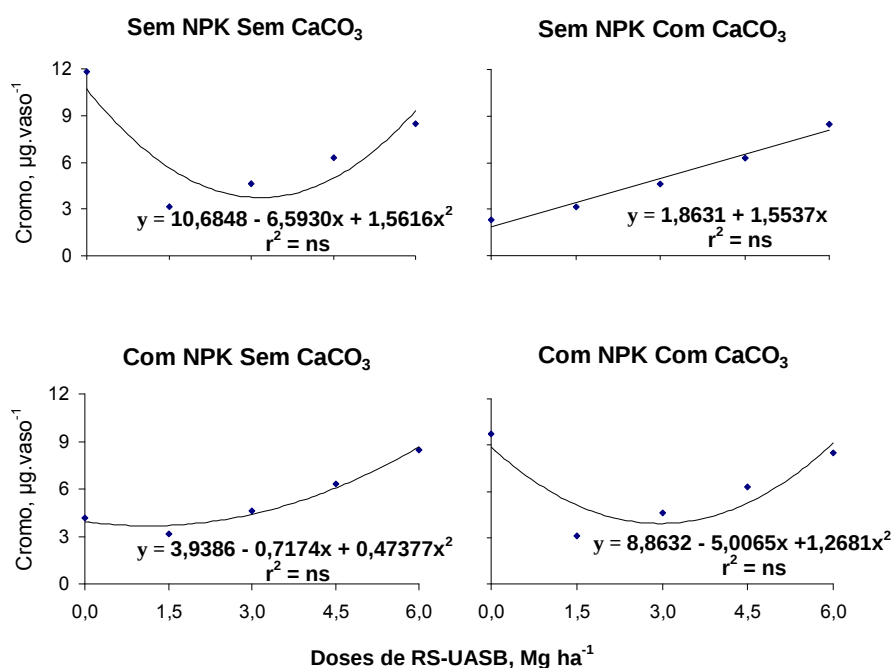


Figura 40 - Quantidade total de cromo extraída ($\mu\text{g vaso}^{-1}$) pelas plantas de aveia cultivadas em vasos num solo Planossolo Háplico Eutrófico Solódico, influenciado pela aplicação de doses (Mg ha^{-1}) de RS-UASB da parboilização do arroz, calagem e adubação mineral. Média de três repetições.

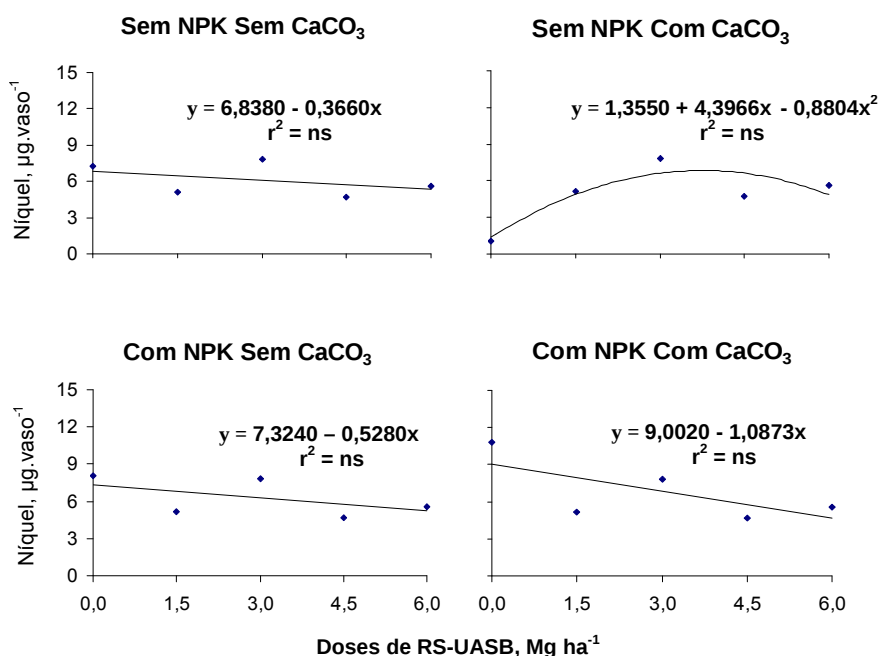


Figura 41 - Quantidade total de níquel extraída ($\mu\text{g vaso}^{-1}$) pelas plantas de aveia cultivadas em vasos num solo Planossolo Háplico Eutrófico Solódico, influenciado pela aplicação de doses (Mg ha^{-1}) de RS-UASB da parboilização do arroz, calagem e adubação mineral. Média de três repetições.

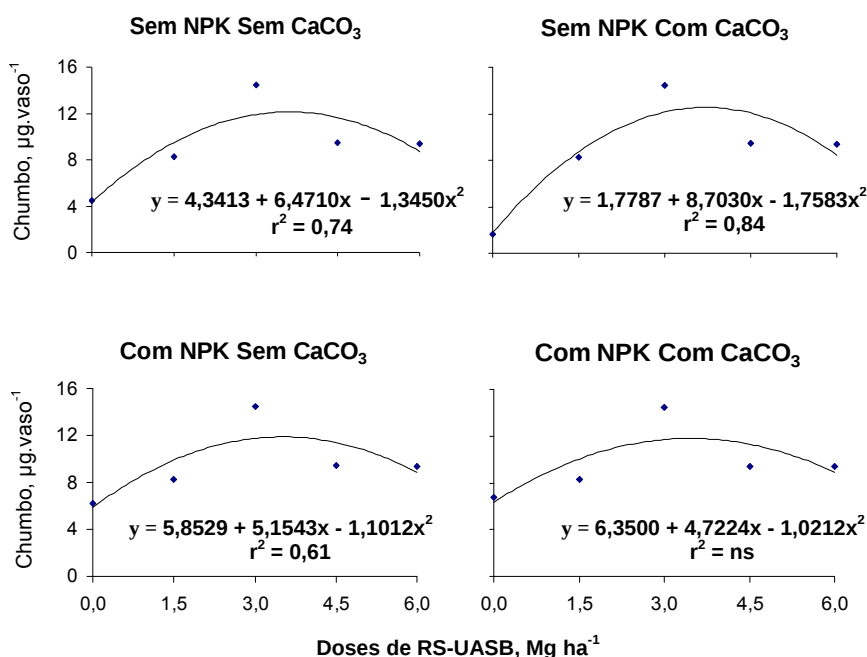


Figura 42 - Quantidade total de chumbo extraída ($\mu\text{g.vaso}^{-1}$) pelas plantas de aveia cultivadas em vasos num solo Planossolo Háplico Eutrófico Solódico, influenciado pela aplicação de doses (Mg ha^{-1}) de RS-UASB da parboilização do arroz, calagem e adubação mineral. Média de três repetições.

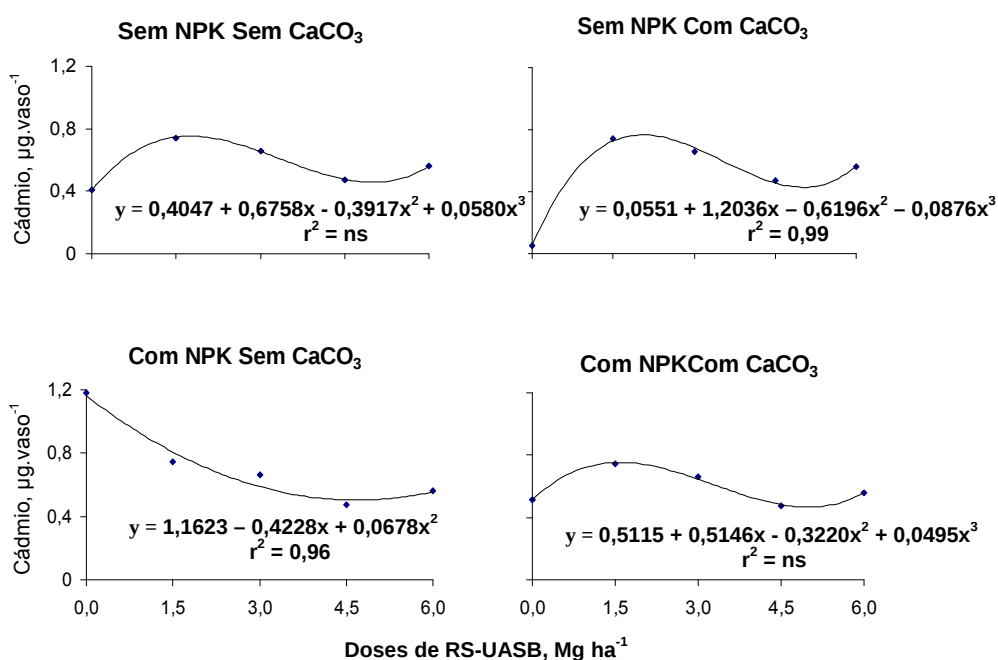


Figura 43 - Quantidade total de cádmio extraída ($\mu\text{g.vaso}^{-1}$) pelas plantas de aveia cultivadas em vasos num solo Planossolo Háplico Eutrófico Solódico, influenciado pela aplicação de doses (Mg ha^{-1}) de RS-UASB da parboilização do arroz, calagem e adubação mineral. Média de três repetições.

Tabela 11 - Extração total ($\mu\text{g vaso}^{-1}$) de cromo, níquel chumbo e cádmio pelas plantas de aveia cultivadas em vasos num solo Planossolo Háplico Eutrófico Solódico, influenciado pela aplicação de doses (Mg ha^{-1}) crescentes de RS-UASB da parboilização de arroz, calagem e adubação mineral. Médias de três repetições.

Tratamentos	Cr	Ni	Pb	Cd
	$\mu\text{g vaso}^{-1}$			
Solo	11,7967 a	7,2233 ab	4,5133 bc	0,4057 b
Solo + CaCO_3	2,3000 a	1,0200 b	1,6200 c	0,0510 c
Solo + NPK	4,1800 a	8,0333 a	6,2200 bc	1,1823 a
Solo + CaCO_3 + NPK	9,7400 a	10,8300 a	6,7800 bc	0,5140 b
Solo + $1,5 \text{ Mg ha}^{-1}$ RS-UASB	3,1400 a	5,1300 ab	8,2700 b	0,7430 b
Solo + $3,0 \text{ Mg ha}^{-1}$ RS-UASB	4,6153 a	7,8600 ab	14,4633 a	0,6603 b
Solo + $4,5 \text{ Mg ha}^{-1}$ RS-UASB	6,3167 a	4,7167 ab	9,4333 ab	0,4717 b
Solo + $6,0 \text{ Mg ha}^{-1}$ RS-UASB	8,4800 a	5,6000 ab	9,3867 ab	0,5600 b
CV (%)	103,05	57,17	42,06	34,64

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

O solo utilizado no experimento (Tabela 6) apresentava um muito baixo pH em água, um baixo teor de matéria orgânica, de cálcio, magnésio e de potássio. Considerando o teor de argila, o mesmo situa-se na classe 4, tendo portanto um teor de fósforo “extraível” muito baixo. Portanto, sendo este um solo pobre nestes elementos, era de se esperar que a adubação efetuada bem como a adição de RS-UASB viesse a aumentar a absorção destes nutrientes pelas plantas de aveia, principalmente N, P e K (CQFS-RS/SC, 2004).

Apesar de teores altos de cobre e zinco, no solo, as plantas de aveia absorveram em quantidades maiores nos tratamentos de adubação e com doses de RS-UASB do que na testemunha. Provavelmente, isto é em decorrência da maior disponibilidade desses nutrientes para as plantas devido ao aumento do pH do solo (CQFS-RS/SC, 2004).

Os teores de Hg, B não foram registrados, pois não teve-se a quantidade de matéria seca necessária para realizar a análise desses elementos.

5 CONCLUSÃO

O lodo obtido no processo de parboilização de arroz possui alto teor de compostos orgânicos, nitrogênio e fósforo. O processo de parboilização de arroz utiliza em média 1,12 L de água e gera 0,83 L de efluente por quilograma de arroz em casca processado. O total de 173 L de efluente processado no reator UASB gerou após seco em estufa à temperatura de 90°C, por cinco horas, 2,0 quilogramas de resíduo (RS-UASB). O mesmo apresentou um pH igual a 7,3, um valor de neutralização de 55% medido por titulação e de 67,3% medido por incubação.

Apresentou ainda um alto teor de Ca (25%), P (4,2%), Na (1,2%) e K (0,97%). O percentual de cristalinidade foi de 62%, sendo o principal composto a calcita. Sua densidade foi de 0,77 g cm⁻³. Exceto pelo fósforo, todos os elementos detectados estavam abaixo dos níveis máximos permitidos pela FEPAM-RS para descarte de efluentes.

A aplicação deste resíduo ao solo Planossolo elevou o pH do mesmo. As doses crescentes deste, até valores correspondentes a 64 Mg ha⁻¹, aumentaram a produção de matéria seca de aveia (*Avena sativa* L.), bem como a absorção total de N , P , K , Ca , Mg , Fe , Mn , Cu e Zn pelas plantas. A aplicação de lodo seco de parboilização de arroz ao solo tem potencial para ser usado na agricultura como fertilizante.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABIAP, *Associação Brasileira de Indústrias de Arroz Parboilizado*. <<http://www.abiap.com.br>>_Acesso em: 10 mar. 2008.

AGTE, V. V.; TARWADI, K. V.; CHIPLONKAR, S. A. Phytate degradation during traditional cooking: significance of the phytic acid profile in cereal-based vegetarian meals. *Journal of Food Composition and Analysis*, v.12, n.3, p.161-167, 1999.

AHMEDNA, M. *Granular activated carbon from agriculture by-products: Carbon properties and their relation to sugar decolorization potential*; PhD. Dissertation; Louisiana State University: Baton Rouge, Louisiana, 1998.

ALLOWAY, B.J., AYRES, D.C., *Chemical Principles of Environmental Pollution*. Blackie Academic & Professional, Londres, 1993.

AMATO, G. W., SILVEIRA, S. F.; *Parboilização do arroz no Brasil*. Boletim Técnico, 19. Porto Alegre: CIENTEC, 1991.

ANDREWS, J., BRIMBLECOMBE, P., JICKELLS, T. D., LISS, P. S.; *An Introduction to Environmental Chemistry*. Oxford: Ed. Blackwell Sciences Ltd., 1996.

AZAROFF, L. F. *Elements of X-Ray Crystallography*. New York: McGraw-Hill, 1968.

BACCAN, N.; ANDRADE, J. C.; GODINHO, O. E. S.; BARONE, J. S. *Química Analítica Quantitativa Elementar*. Campinas: Edgard Blucher, 1979.

BELITZ, H., GROSCH, W. *Química de los alimentos*. Zaragoza: Acribia, 1998.

BITENCOURT, B. *Arroz Parboilizado: conhecer para valorizar, 2006*. Disponível em: <http://www.nutrociencia.com.br/upload_files/arquivos/Bianca_Artigo3Arroz_Parb.doc> Acesso 22 jul. 2008.

BLACK, J. G. *Microbiologia: Fundamentos e Perspectivas*. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 2002.

BOSS, C. B., FREDEEN, K. J.; *Concepts, Instrumentation and Techniques in Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrometry*. 2th. Norwalk: Perkin-Elmer Corp., 1999.

BOUMANS, P. W. J. M. *Inductively coupled plasma emission spectroscopy*. New York: John Wiley & Sons. 1987. 548 p.

BRASIL, MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, SECRETARIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. *Normas de identidade, qualidade, embalagem e apresentação do arroz*. Brasília, v.8, n.20, p.1-25, 1988.

BUCHERL, W. *Introdução às técnicas microscópicas: compêndio para pesquisadores, estudantes e amadores*. 4 ed. São Paulo: Polígono, 1972.

CALLEGARO, M., TIRAPEQUI, J.; *Comparison of the nutritional value between brown rice and white rice*. Arq. Castroenterol; 33, 1996, p. 225-231.

CARDOSO N., F.; *Precipitação de Fosfato em Efluente da Parboilização de Arroz: Fundamentação Físico-Química*, Trabalho de Conclusão de Curso (Curso de Bacharelado e Licenciatura em Química) - Instituto de Química e Geociências, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2006.

COLAVITTI, F. Dossiê O que fazer com o lixo. *Revista Galileu*, São Paulo, Ed. Globo, n.143, p. 39-50, jun. 2003.

COMISSÃO QUÍMICA E FERTILIDADE DO SOLO- RS/SC. CQFS-RS/SC - *Manual de Adubação e de Calagem para os Estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina*. Porto Alegre, Sociedade Brasileira Ciência do Solo-Núcleo Regional Sul, 2004.

CORTIJO, M.; ALONSO, A.; GOMEZ-FERNANDEZ, J.; CHAPMAN, D. Intrinsic protein-lipid interactions. Infrared spectroscopic studies of gramicidin A, bacteriorhodopsin and Ca^{2+} -ATPase in biomembranes and reconstituted systems. *J. Mol. Biol.* 5 Jun. 1982, 157, p. 597-618.

COSTA, C. N.; CASTILHOS, D. D.; CASTILHO R. M. V.; KONRAD, E. E.; PASSIANOTO, C. C.; RODRIGUES, C. G.; *Revista Brasileira de Agrociência*, Pelotas, v.7, 189p, 2001.

CULLITY, B. D. *Elements of X-Ray Diffraction*. 3 th. Massachusetts: Addison-Wesley, 1998.

DA ROCHA, S. M. M. G.; RESTLE, J.; PILAUL, A.; DE FREITAS, F. K.; NEVES, F. P. Avaliação da mistura de cultivares de aveia preta (*Avena strigosa* Schreb) com azevém (*Lolium multiflorum* Lam.) sob pastejo. *Ciência Rural*, Santa Maria, v.36, n.3, p.910-915, mai-jun. 2006.

DE KNEGT, R. J.; BRINK, H. V. D. Improvement of the drying oven method for the Determination of the Moisture Content of Milk Powder. *Int. Dairy Journal*, 1998, 8, p. 733-738.

DOS SANTOS, M.; *Pós-Tratamento físico-químico e biológico de efluentes da parboilização do arroz tratados em reator UASB*. Dissertação. (Mestrado em Ciência e Tecnologia Agroindustrial) - Universidade Federal de Pelotas, 2003.

DOS SANTOS, A. B.; STONE, L. F.; VIEIRA, N. R. de A. *A Cultura do Arroz*. 2 ed. Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 2006, p. 556-587.

EWING, G. W. *Métodos Instrumentais de Análise Química*. São Paulo: Edgard Blucher L.T.D.A., 1989.

FAO – *Food and Agriculture Organization of the United Nations*. Rice around the Word, 2004.

FARIA, O. L. V.; *Remoção de Fósforo de Efluentes da Parboilização de Arroz por Absorção Biológica Estimulada em Reator Batelada Sequencial (RBS) Associada a Precipitação Química*. Tese. (Doutorado), Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2006.

FENNEMA, O. R.; *Introducción a la ciência de los alimentos*. Barcelona: Reverté S.A., 1982.

FRANKLIN, R. J.; *Full scale experience with anaerobic treatment of industrial wastewater*. Wat. Sci. Technol. 2001, 44, p.1-6.

FLOSS, E. L.; VERÁS, A. L.; FORCELINI, C. A; GOELLNER, C; GUTKOSKI, L. C.; GRANDO, M. F.; BOLLER, W. Programa de pesquisa de aveia da UPF: 30 anos de atividades – 1977-2007. *Revista Plantio Direto*. Disponível em: <<http://www.plantiodireto.com.br>>. Acesso em: 21 ago. 2008.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION, FAO – *Production Yerbook*, Rome, v.39, 1985.

GIANELLO, C.; BIASSANÍ, C. A.; BOHNEN, H.; VOLKWEISS, S. J. *Análises de Solo, Plantas e Outros Materiais*. Porto Alegre: Ed. UFRGS, 1995, p. 39-41; 89-105.

GOMES, A. da S.; MAGALHÃES JUNIOR, A. M. de. *Arroz Irrigado no Sul do Brasil*. 1 ed. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2004, p. 23-44.

HARRIS, D. C. *Análise Química Quantitativa*. 6 ed. Rio de Janeiro: LCT., 2005.

HAYAKAWA, K., TANAKA, K., NAKAMURA, T., ENDO, S., HOSHINO, T.; Quality characteristics of waxy hexaploid wheat (*Triticum aestivum* L.): Properties of starch gelatinization and retrogradation. *Cereal Chemistry*, St Paul, v.74, n.5, p. 576-580, 1997.

HELRICH, K. *Official methods of analysis*. 15 th. Arlington: Association of Official Analytical Chemists. 1298p, 1990.

HERMAN, B. E JACOBSEN, K. *Optical Microscopy for Biology*. New York: Wiley, 1990.

JACOBS, J.A., KILDUFF, T.F. *Engineering materials technology: structures, processing, properties & selection*. New Jersey: Prentice-Hall Inc, 1997.

JULIANO, B. O.; The rice caryopsis and its composition. In D.F. Houston, ed. *Rice chemistry and technology*. Am. Assoc. Cereal Chem., St Paul, 1972, p. 1674.

JULIANO, B.O., BECHTEL, D.B.; *The rice grain and its gross composition*. In B.O. Juliano, ed. *Rice chemistry and technology*, 2th. Am. Assoc. Cereal Chem., St Paul, 1985, p. 17-57.

JULIANO, B. O. Grain structure, composition and consumer's criteria for quality. In: JULIANO, B. O. *Rice human nutrition*. Rome: FAO, 1993. 162p. cap. 3.

KOETZ, P. R.; FARIA, O. L. V. *Remoção de Fósforo de Efluentes da Parboilização de Arroz por Absorção Biológica Estimulada em Reator RBS*. 23º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2005.

LERIPIO, A. A. *Gerenciamento de resíduos*. Disponível em: <<http://www.eps.ufsc.br/~lgqa/Coferecidos.html>>. Acesso em: 11 mai. 2007.

LETTINGA, G., VAN VELSEN, A. F. M., HOBMA, S. W., DE ZEEUW, W., KLAPWIJK, A.; *Use of upflow sludge blanket reactor concept for biological waste water treatment, especially for anaerobic treatment*. Biotechnol. Bioengineer, 1980, 22, 699-734.

MACMURRY, J. *Química Orgânica – Vol. 1*. São Paulo: Thomson, 2006.

MADISON. *American Society of Agronomy*: Soil Science Society of America, 1982. pt 2, p. 539-579.

MARTIN, A.; COOKE, G. D. *Health risks in eutrophic water supplies*. Lake Line. 1994, 14, p. 24-26.

MAYNARD, D.G., KALRA, Y.P.; Nitrate and exchangeable ammonium nitrogen. In: Carter, M.R., ed. *Soil sampling and methods of analysis*. Lewis Publishers, Ann Arbor, 1993, p. 25-38.

MERIAN, E. *Metals and their compounds in the environment, Occurrence, Analysis and Biological Relevance*. VCH Publishers: New York, 1991.

MEURER, E. J. *Fundamentos de Química do Solo*. Porto Alegre: Ed. Gênese, 2000, p.109-122.

MEYER, T.A.; VOLK, G.W. Effect of particle size of limestone on soil reaction, exchangeable cations, and plant growth. *Soil Science Society of America Journal*. 1952, 73, p.37-52.

MILLER J. B.; Rice: a high or low glycemic food?. *American Journal Clinical Nutrition*. 1992, 56, p.1034-1036.

MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO/COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO – MAPA/CONAB. *Arroz-Brasil: série histórica de produção, safras 1976/77 a 2006/07*. Brasília, 2007.

NAVES, M. M. V. *Características Químicas e Nutricionais do Arroz*. B. CEPPA, Curitiba, v. 25, n. 1, p. 51-60, jan./jun. 2007.

NATIONAL COMMISSION ON SCIENCE AND TECHNOLOGY – NCST. *Utilization and Recycling of Agricultural Wastes/By-products: A Country Report*. New Delhi, 1974.

NELSON, D. W.; SOMMERS, L. E.; Total carbon, organic carbon, and organic matter. In: Page, A. L.; Miller, R.H.; Keeney, D. R. (ed.) *Methods of soil analysis: chemical and microbiological properties*. Part 2, 2 th.; American Society of Agronomy e Soil Science Society of America: Madison, 1982, cap. 29, p. 539-579.

NIWEGLOWSKI, A. M. A.; *Indicadores de Qualidade da Água na Bacia Hidrográfica do Rio Toledo*. 237f. Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal) – Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Departamento de Fitotecnia e Fitossanitarismo, Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2006. Disponível em: <<http://dspace.c3sl.ufpr.br/dspace/bitstream/1884/6668/1/Indicadores>>. Acesso em: 20 abr. 2008.

PINHEIRO, N.; *A Química do Fósforo e o Ambiente*. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal de Pelotas, Brasil, 2004.

PLUTA, M. Principles and Basic Properties. *Advanced Light Microscopy*, Amsterdam: Elsevier, vol 1, 1988.

RIVERO-HUGUET, M.; HUERTAS, R.; FRANCINI, L.; VILA, L.; DARRE, E.; *Concentrations of As, Ca, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Hg, K, Mg, Mn, Mo, Na, Ni, Pb and Zn in Uruguayan Rice Determined by Atomic Absorption Spectrometry*. Atomic Spectroscopy, 2006, 27, p. 48-55.

RODHE, W. *Crystallization of eutrophication concepts in North Europe*. In: *Eutrophication, Causes, Consequences, Correctives*; National Academy of Sciences: Washington D.C., Standard Book Number 309-01700-9, 1969, p. 50-64.

SANTOS, I. M. B.; SILVA, F. G.; KOETZ, P. R.; ELIAS, M. C.; Resumo do I Simpósio Sul-Brasileiro de Arroz, Pelotas, Brasil, 2003, p. 555; 663.

SANTOS, I. M. B.; SILVA, F. G.; ZSCHORNACK, T.; CARDOSO N. F.; KOETZ, P. R.; *Influência do Tempo de Reação na Precipitação Físico-Química de Fósforo com CaCl₂.2H₂O em Efluente de Arroz Parboilizado*. Resumo do XII Congresso de iniciação Científica e V ENPOS, Pelotas, Brasil, 2003, 1 CD-ROM.

SAWYER, C. N.; MCCARTY, P. L.; PARKIN, G. F. *Chemistry for Environmental Engineering and Science*. 5th. McGraw-Hill: New York, 2003. SEDLAK, R.; *Phosphorus and nitrogen removal from municipal wastewater*. Lewis, New York, 1991.

SILVA, D. J.; QUEIROZ A. C.. *Análise de Alimentos (Métodos Químicos e Biológicos)*. 3 ed. Viçosa: UFV, 2002, 235 p.

SKOOG, D.A.; HOLLER, F.J.; NIEMAN, T.A.; *Principles of Instrumental Analysis*. 5th. New York: Saunders College, 2002, p. 216-218.

SMITH, V. H.; TILMAN, G. D.; NEKOLA, J.C. Eutrophication: impacts of excess nutrient inputs on freshwater, marine, and terrestrial ecosystems. *Environmental Pollution*. 1999, 100, p.179-196.

SUBRAMANIAN, V., DARKSHINAMURTHY, A.; *Nutrient losses during parboiling*. II Riso, 1977, 26, p. 337-340.

SWIFT, R. S. *Organic Matter Characterization*. In: *Methods of Soil Analysis Part 3*. Chemical Methods-SSSA Book Series n.5.; Soil Science Society of America and American Society of Agronomy: Madison, 1996, p. 1011-1069.

TAKADA, T.; NAKANO, K.; *Anal. Chim. Acta* 1979, p.107; 129.

TAKADA, T.; NAKANO, K.; *Spectrochim. Acta* 1981, 36B, p. 735.

TEDESCO, M. J.; GIANELLO, C.; BISSANÍ, C. A.; BOHNEN, H.; VOLKWEISS, S. J.; *Análise de solo plantas e outros materiais*. 2 ed. Porto Alegre: Editora da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1995, p. 39-41.

TORRES, M. A. A.; QUEIROZ, S. S. *Prevenção da anemia ferropriva em nível populacional: uma revisão da literatura dos últimos quinze anos*. Nutrire, v.19/20, p.145-164, 2000.

ZERNIKE, F. Phase contrast, a new method for the microscopic observation of transparent objects I. *Physica*, v. 9, p. 686, 1942

WERTHER, J.; OGADA, T.; BORODULYA, V. A; DIKALENKO, V. I.; Devolatilisation and combustion kinetic parameters of wet sewage sludge in a bubbling fluidized bed furnace. In: *Proceedings of the Institute of Energy's, 2nd*; International Conference on Combustion and Emission Control: London, UK, 4-5 December, 1995, p. 149-158.

<<http://www.agr.feis.unesp.br/ctl28082004.php>>. Acesso em: 12 set. 2008.

<<http://www.ibge.gov.br/home/estatística/indicadores/agropecuária/lspa/lspa09200405>>. Acesso em: 08 jul. 2007.

<<http://www.vivernocampo.com.br/agricultura/historiaarroz.htm>>. Acesso em: 15 Jun. 2007.

7 APÊNDICES

APÊNDICE 1 - Equações de regressão entre produção de matéria seca de aveia (g.vaso⁻¹), como variável dependente (y) das doses de RS-UASB da parboilização do arroz aplicadas (x), em Mg.ha⁻¹, num solo Planossolo Háplico Eutrófico Solódico.

Adubo	Calcário	Equações	R ²
Sem	Sem	$Y = 0,6757 + 2,6462x - 0,3688x^2$	0,97 **
Sem	Com	$Y = 0,6550 + 2,6642x - 0,3721x^2$	0,97 **
Com	Sem	$Y = 2,9593 + 0,6557x$	0,88 **
Com	Com	$Y = 3,5233 + 0,4677x$	0,65 **

APÊNDICE 2 - Equações de regressão entre medidas de pH, como variável dependente (y) das doses de RS-UASB da parboilização do arroz aplicadas (x), em Mg.ha⁻¹, num solo Planossolo Háplico Eutrófico Solódico.

Adubo	Calcário	Equações	R ²
Sem	Sem	$Y = 4,9233 + 0,4070x$	0,99 **
Sem	Com	$Y = 7,3718 - 3,2237x + 1,5602x^2 - 0,2000x^3$	0,97 **
Com	Sem	$Y = 4,6993 + 0,6317x - 0,0450x^2$	0,99 **
Com	Com	$Y = 7,4047 - 3,2733x + 1,5817x^2 - 0,2050x^3$	0,97 **

APÊNDICE 3 - Equações de regressão entre a quantidade de nitrogênio total extraída (mg.vaso⁻¹) pela parte aérea de plantas de aveia, como variável dependente (y) das doses de RS-UASB da parboilização do arroz aplicadas (x), em Mg.ha⁻¹, num solo Planossolo Háplico Eutrófico Solódico.

Adubo	Calcário	Equações	R ²
Sem	Sem	$Y = 11,2491 + 12,9527x$	0,95 **
Sem	Com	$Y = 10,5723 + 13,1783x$	0,94 **
Com	Sem	$Y = 26,6131 + 7,8314x$	0,88 **
Com	Com	$Y = 53,7886 - 41,9756x + 22,9773x^2 - 3,0375x^3$	0,88 **

APÊNDICE 4 - Equações de regressão entre a quantidade total de fósforo extraída (mg.vaso⁻¹), pela parte aérea de plantas de aveia, tendo como variável dependente (y) das doses de RS-UASB da parboilização do arroz aplicadas (x), em Mg.ha⁻¹, num solo Planossolo Háplico Eutrófico Solódico.

Adubo	Calcário	Equações	R ²
Sem	Sem	$Y = 1,7475 + 5,6932x$	0,99 **
Sem	Com	$Y = 1,7693 + 5,6859x$	0,99 **
Com	Sem	$Y = 10,8804 - 1,4626x + 1,2335x^2$	0,92 **
Com	Com	$Y = 19,9718 - 21,4876x + 12,0046x^2 - 1,6025x^3$	0,99 **

APÊNDICE 5 - Equações de regressão entre a quantidade de potássio extraída (mg.vaso⁻¹), pela parte aérea de plantas de aveia, tendo como variável dependente (y) das doses de RS-UASB da parboilização do arroz aplicadas (x), em Mg.ha⁻¹, num solo Planossolo Háplico Eutrófico Solódico.

Adubo	Calcário	Equações	R ²
Sem	Sem	$Y = 20,6353 + 18,7417x$	0,98 **
Sem	Com	$Y = 19,0893 + 19,2570x$	0,98 **
Com	Sem	$Y = 52,5108 - 5,0192x + 3,9407x^2$	0,93 **
Com	Com	$Y = 95,6178 - 84,8270x + 43,3757x^2 - 5,5942x^3$	0,94 **

APÊNDICE 6 - Equações de regressão entre quantidade de cálcio extraída (mg.vaso⁻¹), pela parte aérea de plantas de aveia, tendo como variável dependente (y) das doses de RS-UASB da parboilização do arroz aplicadas (x), em Mg.ha⁻¹, num solo Planossolo Háplico Eutrófico Solódico.

Adubo	Calcário	Equações	R ²
Sem	Sem	$Y = 1,4445 + 9,5247x - 1,0321x^2$	0,99 **
Sem	Com	$Y = 5,8600 + 4,6124x$	0,98 **
Com	Sem	$Y = 7,3386 + 4,1195x$	0,97 **
Com	Com	$Y = 26,6330 - 28,3331x + 15,2658x^2 - 2,1072x^3$	0,94 **

APÊNDICE 7 - Equações de regressão entre quantidade de magnésio extraída (mg.vaso⁻¹), pela parte aérea de plantas de aveia, tendo como variável dependente (y) das doses de RS-UASB da parboilização do arroz aplicadas (x), em Mg.ha⁻¹, num solo Planossolo Háplico Eutrófico Solódico.

Adubo	Calcário	Equações	R ²
Sem	Sem	$Y = 0,9055 + 4,2630x - 0,5131x^2$	0,99 **
Sem	Com	$Y = 0,9144 + 4,2553x - 0,5116x^2$	0,99 **
Com	Sem	$Y = 5,2896 - 2,1710x + 2,2044x^2 - 0,3462x^3$	0,98 **
Com	Com	$Y = 8,3758 - 6,8303x + 4,2171x^2 - 0,6072x^3$	0,94 **

APÊNDICE 8 - Equações de regressão entre quantidade de enxofre extraída (mg.vaso⁻¹), pela parte aérea de plantas de aveia, tendo como variável dependente (y) das doses de RS-UASB da parboilização do arroz aplicadas (x), em Mg.ha⁻¹, num solo Planossolo Háplico Eutrófico Solódico.

Adubo	Calcário	Equações	R ²
Sem	Sem	$Y = 1,6872 + 3,4257x - 0,3913x^2$	0,98 **
Sem	Com	$Y = 1,6128 + 3,4905x - 0,4033x^2$	0,98 **
Com	Sem	$Y = 4,5143 + 1,1791x$	0,98 **
Com	Com	$Y = 6,2634 - 0,5600x + 0,3468x^2$	0,91 **

APÊNDICE 9 - Equações de regressão entre quantidade extraída de sódio extraída (mg.vaso^{-1}), pela parte aérea de plantas de aveia, tendo como variável dependente (y) das doses de RS-UASB da parboilização do arroz aplicadas (x), em Mg.ha^{-1} , num solo Planossolo Háplico Eutrófico Solódico.

Adubo	Calcário	Equações	R ²
Sem	Sem	$Y = 0,7795 + 4,2251x$	0,99 **
Sem	Com	$Y = 0,6311 + 4,2745x$	0,99 **
Com	Sem	$Y = 1,7019 + 3,9176x$	0,99 **
Com	Com	$Y = 1,8147 + 3,8800x$	0,99 **

APÊNDICE 10 - Equações de regressão entre quantidade de cobre extraída ($\mu\text{g.vaso}^{-1}$), pela parte aérea de plantas de aveia, tendo como variável dependente (y) das doses de RS-UASB da parboilização do arroz aplicadas (x), em Mg.ha^{-1} , num solo Planossolo Háplico Eutrófico Solódico.

Adubo	Calcário	Equações	R ²
Sem	Sem	$Y = 7,0907 + 5,1380x$	0,95 **
Sem	Com	$Y = 6,2207 + 5,4280x$	0,96 **
Com	Sem	$Y = 12,7867 + 3,2393x$	0,82 **
Com	Com	$Y = 23,7449 - 8,6737x + 2,4781x^2$	0,78 **

APÊNDICE 11 - Equações de regressão entre quantidade de zinco extraída ($\mu\text{g.vaso}^{-1}$), pela parte aérea de plantas de aveia, tendo como variável dependente (y) das doses de RS-UASB da parboilização do arroz aplicadas (x), em Mg.ha^{-1} , num solo Planossolo Háplico Eutrófico Solódico.

Adubo	Calcário	Equações	R ²
Sem	Sem	$Y = 59,7647 + 28,2454x$	0,98 **
Sem	Com	$Y = 42,6266 + 33,9580x$	0,92 **
Com	Sem	$Y = 85,6507 + 19,6167x$	0,95 **
Com	Com	$Y = 101,6727 + 14,2760x$	0,67 **

APÊNDICE 12 - Equações de regressão entre quantidade de ferro extraída ($\mu\text{g.vaso}^{-1}$), pela parte aérea de plantas de aveia, tendo como variável dependente (y) das doses de RS-UASB da parboilização do arroz aplicadas (x), em Mg.ha^{-1} , num solo Planossolo Háplico Eutrófico Solódico.

Adubo	Calcário	Equações	R ²
Sem	Sem	$Y = 211,90 + 128,77x$	0,91 **
Sem	Com	$Y = 179,57 + 139,54x$	0,90 **
Com	Sem	$Y = 587,63 - 177,80x + 54,40x^2$	0,72 **
Com	Com	$Y = 1536,75 - 1700,78x + 742,66x^2 - 92,17x^3$	0,93 **

APÊNDICE 13 - Equações de regressão entre quantidade de manganês extraída ($\mu\text{g.vaso}^{-1}$), pela parte aérea de plantas de aveia, tendo como variável dependente (y) das doses de RS-UASB da parboilização do arroz aplicadas (x), em Mg.ha^{-1} , num solo Planossolo Háplico Eutrófico Solódico.

Adubo	Calcário	Equações	R ²
Sem	Sem	$Y = 265,48 + 1273,21x - 629,24x^2 + 82,78x^3$	0,99 **
Sem	Com	$Y = 127,87 + 1480,95x - 718,98x^2 + 94,41x^3$	0,99 **
Com	Sem	$Y = 1735,92 - 632,87x + 88,58x^2$	0,95 **
Com	Com	$Y = 536,57 + 411,72x - 104,86x^2$	0,70 **

APÊNDICE 14 - Equações de regressão entre quantidade de alumínio extraída ($\mu\text{g.vaso}^{-1}$), pela parte aérea de plantas de aveia, tendo como variável dependente (y) das doses de RS-UASB da parboilização do arroz aplicadas (x), em Mg.ha^{-1} , num solo Planossolo Háplico Eutrófico Solódico.

Adubo	Calcário	Equações	R ²
Sem	Sem	$Y = 54,54 + 140,65x - 21,48x^2$	0,97 **
Sem	Com	$Y = 51,58 + 143,23x - 21,95x^2$	0,97 **
Com	Sem	$Y = 199,95 + 20,59x$	ns **
Com	Com	$Y = 201,57 + 20,05x$	ns **

APÊNDICE 15 - Equações de regressão entre quantidade de cromo extraída ($\mu\text{g.vaso}^{-1}$), pela parte aérea de plantas de aveia, tendo como variável dependente (y) das doses de RS-UASB da parboilização do arroz aplicadas (x), em Mg.ha^{-1} , num solo Planossolo Háplico Eutrófico Solódico.

Adubo	Calcário	Equações	R ²
Sem	Sem	$Y = 10,6848 - 6,5930x + 1,5616x^2$	ns **
Sem	Com	$Y = 1,8631 + 1,5537x$	ns **
Com	Sem	$Y = 3,9386 - 0,7174x + 0,47377x^2$	ns **
Com	Com	$Y = 8,8632 - 5,0065x + 1,2681x^2$	ns **

APÊNDICE 16 - Equações de regressão entre quantidade de níquel extraída ($\mu\text{g.vaso}^{-1}$), pela parte aérea de plantas de aveia, tendo como variável dependente (y) das doses de RS-UASB da parboilização do arroz aplicadas (x), em Mg.ha^{-1} , num solo Planossolo Háplico Eutrófico Solódico.

Adubo	Calcário	Equações	R ²
Sem	Sem	$Y = 6,8380 - 0,3660x$	ns **
Sem	Com	$Y = 1,3550 + 4,3966x - 0,8804x^2$	ns **
Com	Sem	$Y = 7,3240 - 0,5280x$	ns **
Com	Com	$Y = 9,0020 - 1,0873x$	ns **

APÊNDICE 17 - Equações de regressão entre quantidade de chumbo extraída ($\mu\text{g.vaso}^{-1}$), pela parte aérea de plantas de aveia, tendo como variável dependente (y) das doses de RS-UASB da parboilização do arroz aplicadas (x), em Mg.ha^{-1} , num solo Planossolo Háplico Eutrófico Solódico.

Adubo	Calcário	Equações	R²
Sem	Sem	$Y = 4,3413 + 6,4710x - 1,3450x^2$	0,74 **
Sem	Com	$Y = 1,7787 + 8,7030x - 1,7583x^2$	0,84 **
Com	Sem	$Y = 5,8529 + 5,1543x - 1,1012x^2$	0,61 **
Com	Com	$Y = 6,3500 + 4,7224x - 1,0212x^2$	ns **

APÊNDICE 18 - Equações de regressão entre quantidade de cádmio extraída ($\mu\text{g.vaso}^{-1}$), pela parte aérea de plantas de aveia, tendo como variável dependente (y) das doses de RS-UASB da parboilização do arroz aplicadas (x), em Mg.ha^{-1} , num solo Planossolo Háplico Eutrófico Solódico.

Adubo	Calcário	Equações	R²
Sem	Sem	$Y = 0,4047 + 0,6758x - 0,3917x^2 + 0,0580x^3$	ns **
Sem	Com	$Y = 0,0551 + 1,2036x - 0,6196x^2 - 0,0876x^3$	0,99 **
Com	Sem	$Y = 1,1623 - 0,4228x + 0,0678x^2$	0,96 **
Com	Com	$Y = 0,5115 + 0,5146x - 0,3220x^2 + 0,0495x^3$	ns **