

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

**ELEMENTOS-TRAÇO EM SOLOS, ÁGUAS E PLANTAS DE ARROZ  
IRRIGADO DO RIO GRANDE DO SUL**

Christina Venzke Simões de Lima  
(Tese de Doutorado)

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

**ELEMENTOS-TRAÇO EM SOLOS, ÁGUAS E PLANTAS DE ARROZ  
IRRIGADO DO RIO GRANDE DO SUL**

**Christina Venzke Simões de Lima**

Bióloga (FURB)

Mestre em Ciência do Solo (UFRGS)

Tese apresentada como  
um dos requisitos para à obtenção  
do grau de Doutora em Ciência do Solo

Porto Alegre (RS) Brasil

Novembro de 2012

### **Ofereço**

Aos meus pais, Nivaldo e Beatriz, pelo amor e o incentivo que me motivaram a enfrentar todos os desafios da vida.

Ao meu esposo Leonardo, companheiro de todos os momentos e meu “filhastro” Pedro, por permitir amar e ser amado por uma mãe que não o gerou.

### **Dedico**

Ao meu bebê, Arthur, que mesmo ainda em meu ventre já me dá o incentivo de querer ser uma pessoa melhor.

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente, a Deus, por me proteger e me dar a fé para enfrentar qualquer obstáculo da vida.

Ao PPG Ciência do Solo – UFRGS, pela oportunidade concedida.

Ao CNPq, pela bolsa de estudos durante estes quatro anos de curso.

Ao meu orientador Egon José Meurer, pelo apoio em todos os momentos da minha estada em Porto Alegre, me orientando e sendo um grande amigo sempre.

A todos os professores do Departamento de Ciência do Solo, pelos conhecimentos transmitidos e pelos momentos de convívio.

Ao colega e amigo Felipe de Campos Carmona, por me ceder os solos utilizados em seu trabalho de tese para que eu pudesse quantificar os riscos das lavouras de arroz irrigado.

A professora Dra. Elina Caramão, professora de química ambiental, que abriu meus horizontes e me fez querer avaliar os riscos do ambiente orizícola.

A Dra. Madalena Boeni, por todo tempo dispensado e por estar sempre disposta a me auxiliar no espaço físico do IRGA

Ao IRGA, por ceder espaço para coletas de solos, águas e plantas da lavoura da área de experimentação. Em especial ao funcionário Gilmar, pela ajuda nas coletas.

Ao Dr. Eliseu Weber, do Instituto de Ecologia da UFRGS, pelo auxílio na seleção dos pontos amostrados, utilizando o programa Idrisi.

Aos membros da banca examinadora, Dr. Carlos Alberto Bissani, Dra. Cláudia das Neves Costa e Dra. Madalena Boeni, pelas críticas e sugestões de melhorias desta tese.

Aos funcionários da UFRGS, Antônio (Laboratório de Manejo), Seu José (Responsável pela casa-de-vegetação), Jader e Paulo (Secretários do Departamento de Solos) pela atenção dispensada, e principalmente ao Adão (Laboratório de Química e Fertilidade do Solo), que contribuiu diretamente na realização deste trabalho e me ensinou tudo que sei hoje para a obtenção desses dados.

A todos os colegas do PPG Ciência do Solo, pelos momentos de descontração e de grande aprendizado que passei ao lado de todos, em especial à Liane, Ângela, Fernanda, Paulinha, Joice, Emanuelle, Letícia Sequinato, Osmar, Amanda (pelo auxílio da leitura das amostras), Cecilia, entre tantos aqui não citados.

Ao colega Rogério Schmidt, pelo auxílio nas análises estatísticas e pela incansável ajuda em todos os momentos de dificuldade durante a realização deste trabalho.

À Rosele C. dos Santos, por me acompanhar diariamente nessa rotina louca em que vivemos, sendo uma amiga fiel, irmã, escudeira, enfim, uma leoa ao meu lado.

À Daniela B. P. Barbosa, pela nossa convivência durante muitos anos e bons momentos durante nossa estadia em Porto Alegre, sendo minha cúmplice e grande amiga.

Ao bolsista de Iniciação Científica, Fabrício Balerini, pela ajuda na manutenção dos experimentos, nas análises e principalmente pela amizade.

Ao colega e amigo Edicarlos Damacena de Souza, que apesar da distância sempre me auxilia com seu conhecimento ímpar.

À minha família toda, sem excluir ninguém, incluindo pais, irmão, sogros, cunhados, primos, tios, tias, que são seres maravilhosos e me enchem de luz diariamente.

A todos que direta ou indiretamente contribuíram para execução desse trabalho.

# ELEMENTOS-TRAÇO EM SOLOS, ÁGUAS E PLANTAS DE ARROZ IRRIGADO DO RIO GRANDE DO SUL<sup>1/\*</sup>

Autor: Christina Venzke Simões de Lima

Orientador: Prof. Dr. Egon José Meurer

## RESUMO

O Rio Grande do Sul é o maior produtor nacional de arroz irrigado por alagamento do Brasil. Algumas lavouras cultivam o arroz irrigado há mais de 100 anos. Nos cultivos são utilizados insumos agrícolas, muitos dos quais apresentam elementos-traço em sua composição. Esta pesquisa teve por objetivo quantificar os teores de Cd, de Cr e de Pb em águas, solos e plantas de arroz irrigado, em diferentes cenários do Estado. No Estudo 1, quantificou-se os teores desses elementos em 298 amostras de solos de lavouras irrigadas das Planícies Costeira Interna e Externa à Laguna dos Patos. No Estudo 2, foram quantificados os teores de Cd, Cr e Pb nas águas, nos solos e nas plantas de somente uma lavoura de arroz da Planície Costeira Interna. No Estudo 3, quantificou-se os elementos no arroz vendido nos estabelecimentos comerciais do RS. No Estudo 4, em casa-de-vegetação, foram adicionadas ao solo doses crescentes de Cd, Cr e Pb para avaliar a biodisponibilidade destes elementos em três variedades de arroz (IRGA-417, IRGA-424; Arize QM1010). As extrações dos elementos das amostras foram feitas pelo método USEPA 3050B. No Estudo 1, para as quantificações dos elementos, foi utilizado espectrofotômetro de absorção atômica com atomização eletrotérmica em forno de grafite (FAAS). Nos estudos 2, 3 e 4, a quantificação foi feita por ICP-OES. Nos estudos 1, 2 e 3, os elementos quantificados em solos, águas, plantas de lavouras e em amostras de grãos vendidos em estabelecimentos comerciais estavam dentro dos limites permitidos pela legislação, com exceção aos teores de Cd nas águas da lavoura de Cachoeirinha-RS. No Estudo 4, com o aumento das doses de Cd, Cr e Pb aplicados ao solo, houve incremento desses elementos nos tecidos das plantas de arroz, ocorrendo maior acúmulo nas raízes. A variedade Arize QM1010 foi a espécie que menos acumulou estes elementos em seus tecidos.

---

<sup>1/\*</sup> Tese de Doutorado em Ciência do Solo. Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. (126 p.) Novembro, 2012. Trabalho realizado com apoio financeiro do CNPq.

# TRACE ELEMENTS IN SOIL, WATER AND PLANTS OF IRRIGATED RICE FROM RIO GRANDE DO SUL<sup>1/\*</sup>

Autor: Christina Venzke Simões de Lima

Adviser: Dr. Egon José Meurer

## SUMMARY

The Rio Grande do Sul state is the largest producer of flooding rice in Brazil. In some fields flooded rice is cultivated for more than 100. In rice production are being utilized various inputs, many of which have trace elements in its composition. This study aimed to quantify the levels of Cd, Cr and Pb in water, soil and rice plants under different scenarios of the state. In Study 1 was determined the levels of these elements in 298 samples of soils, rice crops in Inner and Outer Coastal Plains to the Laguna dos Patos. In Study 2, was quantified the levels of Cd, Cr and Pb in waters, soils and plants of only one rice crop of the Inner Coastal Plain. In Study 3, we determined these elements in rice grains sold in markets retailers in RS. In Study 4, in green-house experiment, were added to the soil increasing concentration of Cd, Cr and Pb to evaluate the bioavailability of these elements in three rice varieties (-IRGA 417, IRGA-424; Arize QM1010). The extractions of the elements of the samples were made by USEPA Method 3050B. In Study 1, for quantification of elements was used atomic absorption spectroscopy with electrothermal atomization in graphite furnace (FAAS). In study 2, 3 and 4, the quantification was done by ICP-OES. In studies 1, 2 and 3, the elements in soils, waters, plants and in samples of grains rice sold in markets retailers were within the limits allowed by law, except for Cd levels in the waters of a rice crop at Cachoeirinha-RS. In Study 4, with increasing doses of Cd, Cr and CP applied to the soil, there was an increase of these elements in the tissues of rice plants, occurring higher accumulation in roots. The variety Arize QM1010 was the species that less accumulated these elements in their tissues.

---

<sup>1/\*</sup> Doctoral thesis in Soil Science. Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. (126 p.) November, 2012.

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO GERAL .....</b>	<b>1</b>
<b>2 ESTADO DO CONHECIMENTO ATUAL .....</b>	<b>3</b>
2.1 Aspectos históricos da preocupação ambiental .....	3
2.2 Perigo e risco ambiental .....	4
2.3 Identificação do perigo: os elementos-traço avaliados neste cenário .....	5
2.3.1 Cádmio (Cd) .....	5
2.3.2 Cromo (Cr) .....	8
2.3.3 Chumbo (Pb) .....	10
2.4 Identificação do perigo: elementos-traço em rochas fosfatadas e fertilizantes fosfatados .....	12
2.5 Identificação do perigo: elementos-traço em águas de irrigação .....	13
2.6 Identificação do perigo: elementos-traço em agroquímicos .....	14
2.7 Identificação do risco: A cultura do arroz irrigado por alagamento .....	16
2.8 Identificação do risco: Elementos-traço na cadeia alimentar .....	17
<b>3 ESTUDOS DESENVOLVIDOS .....</b>	<b>20</b>
<b>4 ESTUDO 1. ELEMENTOS-TRAÇO EM SOLOS DE LAVOURAS DE ARROZ IRRIGADO NAS PLANÍCIES COSTEIRAS À LAGUNA DOS PATOS DO RIO GRANDE DO SUL .....</b>	<b>21</b>
4.1 Justificativa e relevância .....	21
4.2 Hipótese do estudo .....	22
4.3 Objetivo do estudo .....	22
4.4 Material e métodos .....	23
4.4.1 Área de estudo .....	23
4.4.2 Solos amostrados .....	23
4.4.3 Atributos dos solos .....	23
4.4.4 Extração dos elementos-traço das amostras de solos .....	24
4.4.5 Quantificação dos elementos-traço nas amostras solo .....	25
4.5 Resultados e discussão .....	25
4.6 Conclusões .....	30
<b>5 ESTUDO 2. ELEMENTOS-TRAÇO NO SOLO, NAS ÁGUAS E NAS PLANTAS DE UMA LAVOURA DE ARROZ IRRIGADO NO MUNICÍPIO DE CACHOEIRINHA-RS .....</b>	<b>31</b>



5.1 Justificativa e relevância.....	31
5.2 Hipóteses do estudo.....	33
5.3 Objetivos do estudo.....	33
5.4 Material e métodos.....	34
5.4.1 Água da lavoura de arroz irrigado.....	34
5.4.2 Preparo da amostra de água.....	34
5.4.3 Análise química das águas.....	35
5.4.4 Solo da lavoura de arroz irrigado.....	35
5.4.5 Análise química do solo.....	35
5.4.6 Plantas de arroz da lavoura.....	38
5.5 Resultados e Discussão.....	38
5.5.1 Águas da lavoura.....	38
5.5.2 Solo da lavoura.....	42
5.5.3 Plantas de arroz da lavoura.....	44
5.6 Conclusões.....	45
<b>6 ESTUDO 3. QUANTIFICAÇÃO DE ELEMENTOS-TRAÇO EM ARROZ</b>	
<b>COMERCIALIZADO NO RIO GRANDE DO SUL.....</b>	<b>48</b>
6.1 Justificativa e relevância.....	48
6.2 Hipótese do estudo.....	49
6.3 Objetivo do estudo.....	50
6.4 Material e Métodos.....	50
6.4.1 Análise das amostras.....	50
6.5 Resultados e discussão.....	52
6.6 Conclusões.....	55
<b>7 ESTUDO 4. BIODISPONIBILIDADE DE ELEMENTOS-TRAÇO EM TRÊS</b>	
<b>VARIETADES DE ARROZ IRRIGADO.....</b>	<b>56</b>
7.1 Justificativa e relevância.....	56
7.2 Hipóteses do estudo.....	57
7.3 Objetivo do estudo.....	58
7.4 Material e métodos.....	58
7.4.1 Tratamentos e delineamento experimental.....	58
7.4.2 Instalação e condução do experimento.....	59
7.4.2.1 Solo.....	59
7.4.2.2 Espécie utilizada no experimento.....	60

7.4.2.2.1 Variedade IRGA - 417.....	60
7.4.2.2.2 Variedade IRGA – 424.....	60
7.4.2.2.3 Híbrido Arize QM1010 .....	60
7.4.3 Análise química dos tecidos das plantas .....	62
7.4.4 Acúmulo e translocação de Cd, Cr e Pb nas plantas de arroz.....	62
7.4.5 Análise estatística.....	63
7.5 Resultados e discussão.....	63
7.5.1 Biodisponibilidade de Cd, Cr e Pb nas variedades de arroz.....	63
7.5.2 Produção de matéria seca.....	77
7.5.3 Quantidades acumuladas de Cd, de Cr e de Pb nas plantas de arroz (IRGA-417, IRGA-424, Arize QM1010).....	80
7.6 Conclusões.....	84
<b>8. CONCLUSÕES GERAIS .....</b>	<b>85</b>
<b>9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>86</b>
<b>APÊNDICES .....</b>	<b>102</b>

## RELAÇÃO DE TABELAS

<b>Tabela 1.</b> Concentrações mínimas e máximas de Cd, Cr e Pb nas amostras coletadas nos 298 locais amostrados nos municípios localizados nas regiões das Planícies Costeiras Interna e Externa à Laguna dos Patos/RS, na camada de 0 - 20 cm de profundidade. ....	26
<b>Tabela 2.</b> Valores orientadores de Cd, Cr e Pb para solos (Resolução CONAMA 420/09). ....	27
<b>Tabela 3.</b> Valores de pH, CE e temperatura da água nos pontos de captação para irrigação, na lâmina de água e na água de drenagem para o Rio Gravataí. ....	36
<b>Tabela 4.</b> Concentrações de Cd, Cr e Pb dos pontos coletados na água de captação para irrigação, na lâmina de água e na água de drenagem para o Rio Gravataí. ....	40
<b>Tabela 5.</b> Limites máximos de tolerância para contaminantes inorgânicos (Cd, Cr e Pb) em águas superficiais em águas classificadas como Classe 3. Fonte: CONAMA 357/05 (2012). ....	40
<b>Tabela 6.</b> Atributos e concentrações de elementos-traço do Gleissolo coletado no município de Cachoeirinha-RS, na Estação Experimental do IRGA (camada de 0-20 cm de profundidade) ....	43
<b>Tabela 7.</b> Concentrações de Cd, de Cr e de Pb, em mg kg <sup>-1</sup> , nas raízes, nos colmos, nas folhas e nos grãos das plantas de arroz da lavoura de arroz irrigado do município de Cachoeirinha/RS. ....	46
<b>Tabela 8.</b> Concentrações aproximadas, mínimas e máximas, de elementos-traço nas folhas maduras para diversas espécies de plantas. ....	47
<b>Tabela 9.</b> Número de empresas de beneficiamento pela sub-divisão do IRGA – NATE,s – 2008. ....	51
<b>Tabela 10.</b> Código de identificação, municípios e regiões das marcas de arroz comerciais consumidas no Estado do RS selecionadas para quantificação de Cd, Cr e Pb. ....	52
<b>Tabela 11.</b> Concentrações de Cd, Pb e Cr em amostras de diferentes marcas comerciais de arroz consumidas no Estado do RS. ....	53

<b>Tabela 12.</b> Limites máximos de tolerância para contaminantes inorgânicos (Cd, Cr e Pb) em grãos de arroz. Fonte: ANVISA (1965) E CODEX ALIMENTARIUS (1995) .....	54
<b>Tabela 13.</b> Elementos-traço determinados no Gleissolo coletado no município de Cachoeirinha-RS, na Estação Experimental do Arroz (IRGA) (camada de 0 - 20 cm de profundidade) .....	59
<b>Tabela 14.</b> Atributos do Gleissolo coletado no município de Cachoeirinha-RS, na Estação Experimental do Arroz (IRGA) (camada de 0 - 20 cm de profundidade).....	60
<b>Tabela 15.</b> Quantidades de nitrogênio, fósforo e potássio, adicionadas aos vasos da espécie de arroz, em todas as variedadeses (IRGA-417; IRGA-424; Arize QM1010).....	61
<b>Tabela 16.</b> Valores de pH e CE nos tratamentos das variedades IRGA-417, IRGA-424 e Arize QM1010, com doses crescentes de Cd, de Pb e de Cr aplicadas no Gleissolo no momento da coleta das plantas .....	73
<b>Tabela 17.</b> Matéria seca dos grãos, da parte aérea e das raízes das plantas de arroz submetidas a doses crescentes de Cd, Cr e Pb no solo.....	79
<b>Tabela 18.</b> Quantidades de Cd, Pb e Cr acumuladas nos grãos, na parte aérea e nas raízes das plantas de arroz – variedade IRGA- 417 .....	81
<b>Tabela 19.</b> V Quantidades de Cd, Pb e Cr acumuladas nos grãos, na parte aérea e nas raízes das plantas de arroz – variedade IRGA- 424 .....	82
<b>Tabela 20.</b> Quantidades de Cd, Pb e Cr acumuladas nos grãos, na parte aérea e nas raízes das plantas de arroz – variedade Arize QM1010 .....	83

## RELAÇÃO DE FIGURAS

- Figura 1.** Toxicologia do cádmio: esquema toxicocinético. Fonte: Ramirez (2002). .....8
- Figura 2.** Locais amostrados para a quantificação dos teores de Cd, Cr e Pb nas Planícies Costeiras do RS (298 amostras).....24
- Figura 3.** Pontos de captação de água (Rio Gravataí) para lavoura de arroz irrigado no Instituto Rio Grandense do Arroz (IRGA). Fonte: Lima, C.V.S. (2010). .....37
- Figura 4.** Área de coleta das plantas de arroz irrigado e da lâmina de água no Instituto Rio Grandense do Arroz (IRGA). Fonte: Lima, C.V.S. (2010). .....37
- Figura 5.** Pontos de coleta da água de drenagem da lavoura de arroz irrigado no Instituto Rio Grandense do Arroz (IRGA). Fonte: Lima, C.V.S. (2010) .....37
- Figura 6.** Áreas subdivididas para coleta das plantas de arroz (raízes, colmo, folhas e grãos), localizadas no Instituto Rio-Grandense de Arroz (IRGA), no município de Cachoeirinha-RS (Imagem: Google Earth, 2012). .....38
- Figura 7.** Percentual de análises de elementos-traço acima da Classe 3 do CONAMA 357/05. Fonte: FEPAM (2012). .....41
- Figura 8.** Relação entre as doses de Cd aplicadas no Gleissolo e o teor nos grãos, na parte aérea e nas raízes das plantas de arroz da cultivar IRGA-417, em  $\text{mg kg}^{-1}$ . .....65
- Figura 9.** Relação entre as doses de Pb aplicadas no Gleissolo e o teor nos grãos, na parte aérea e nas raízes das plantas de arroz da cultivar IRGA-417, em  $\text{mg kg}^{-1}$ . .....66
- Figura 10.** Relação entre as doses de Cr aplicadas no Gleissolo e o teor nos grãos, na parte aérea e nas raízes das plantas de arroz da cultivar IRGA-417, em  $\text{mg kg}^{-1}$ . .....67
- Figura 11.** Relação entre as doses de Cd aplicadas no Gleissolo e o teor nos grãos, na parte aérea e nas raízes das plantas de arroz da cultivar IRGA-424, em  $\text{mg kg}^{-1}$ . .....69
- Figura 12.** Relação entre as doses de Pb aplicadas no Gleissolo e o teor nos grãos, na parte aérea e nas raízes das plantas de arroz da cultivar IRGA-424, em  $\text{mg kg}^{-1}$ . .....70

<b>Figura 13.</b> Relação entre as doses de Cr aplicadas no Gleissolo e o teor nos grãos, na parte aérea e nas raízes das plantas de arroz da cultivar IRGA-424, em mg kg <sup>-1</sup> .....	71
<b>Figura 14.</b> Relação entre as doses de Cd aplicadas no Gleissolo e o teor nos grãos, na parte aérea e nas raízes das plantas de arroz da variedade arize QM1010, em mg kg <sup>-1</sup> .....	72
<b>Figura 15.</b> Relação entre as doses de Pb aplicadas no Gleissolo e o teor nos grãos, na parte aérea e nas raízes das plantas de arroz da variedade arize QM1010, em mg kg <sup>-1</sup> .....	72
<b>Figura 16.</b> Relação entre as doses de Cr aplicadas no Gleissolo e o teor nos grãos, na parte aérea e nas raízes das plantas de arroz da variedade arize QM1010, em mg kg <sup>-1</sup> .....	73
<b>Figura 17.</b> Vista do experimento com tratamentos de doses crescentes de Cd, de Pb e de Cr aplicados no Gleissolo e cultivado com plantas de arroz (Variedades IRGA-417, IRGA-424 e Arize QM1010), em casa-de-vegetação..	78

## RELAÇÃO DE APÊNDICES

<b>APÊNDICE 1.</b> Atributos selecionados dos solos de lavouras de arroz irrigado no município de Torres/RS na camada de 0-20 cm de profundidade .....	103
<b>APÊNDICE 2.</b> Atributos selecionados dos solos de lavouras de arroz irrigado no município de Santo Antônio da Patrulha/RS na camada de 0 - 20 cm de profundidade .....	104
<b>APÊNDICE 3.</b> Atributos selecionados dos solos de lavouras de arroz irrigado no município de Capivari do Sul/RS na camada de 0 - 20 cm de profundidade. ....	105
<b>APÊNDICE 4.</b> Atributos selecionados dos solos de lavouras de arroz irrigado no município de Osório/RS na camada de 0 - 20 cm de profundidade.....	106
<b>APÊNDICE 5.</b> Atributos selecionados dos solos de lavouras de arroz irrigado no município de Viamão/RS na camada de 0 - 20 cm de profundidade .....	107
<b>APÊNDICE 6.</b> Atributos selecionados dos solos de lavouras de arroz irrigado no município de Palmares do Sul/RS na camada de 0 - 20 cm de profundidade .....	108
<b>APÊNDICE 7.</b> Atributos selecionados dos solos de lavouras de arroz irrigado no município de Mostardas/RS na camada de 0 - 20 cm de profundidade.....	109
<b>APÊNDICE 8.</b> Atributos selecionados dos solos de lavouras de arroz irrigado no município de São José do Norte/RS na camada de 0 - 20 cm de profundidade .....	111
<b>APÊNDICE 9.</b> Atributos selecionados dos solos de lavouras de arroz irrigado no município de Tavares/RS na camada de 0 - 20 cm de profundidade .....	112
<b>APÊNDICE 10.</b> Atributos selecionados dos solos de lavouras de arroz irrigado no município de Barra do Ribeiro/RS na camada de 0 - 20 cm de profundidade .....	113
<b>APÊNDICE 11.</b> Atributos selecionados dos solos de lavouras de arroz irrigado no município de Tapes/RS na camada de 0 - 20 cm de profundidade .....	114
<b>APÊNDICE 12.</b> Atributos selecionados dos solos de lavouras de arroz irrigado no município de Camaquã/RS na camada de 0 - 20 cm de profundidade.....	115
<b>APÊNDICE 13.</b> Atributos selecionados dos solos de lavouras de arroz irrigado no município de Arambaré/RS na camada de 0 - 20 cm de profundidade.....	116
<b>APÊNDICE 14.</b> Atributos selecionados dos solos de lavouras de arroz irrigado no município de São Lourenço do Sul/RS na camada de 0 - 20 cm de profundidade .....	117

<b>APÊNDICE 15.</b> Atributos selecionados dos solos de lavouras de arroz irrigado no município de Pelotas/RS na camada de 0 - 20 cm de profundidade .....	118
<b>APÊNDICE 16.</b> Atributos selecionados dos solos de lavouras de arroz irrigado no município de Capão do Leão/RS na camada de 0 - 20 cm de profundidade .....	119
<b>APÊNDICE 17.</b> Atributos selecionados dos solos de lavouras de arroz irrigado no município de Rio Grande/RS na camada de 0 – 20 cm de .....	120
<b>APÊNDICE 18.</b> Método de extração ácida 3050B – EPA.....	121
<b>APÊNDICE 19.</b> Protocolo de análise de elementos-traço em águas, realizado pelo Laboratório de Química Analítica da FEEVALE.....	122
<b>APÊNDICE 20.</b> Teores de Cd, de Cr e de Pb em diferentes fertilizantes fosfatados, digeridos pelo método nítrico-perclórico (Tedesco et al., 1995) e quantificados por ICP-OES (mg kg <sup>-1</sup> ).....	126



## 1 INTRODUÇÃO GERAL

O arroz é o alimento básico de, aproximadamente, três bilhões de pessoas e, segundo estimativas, até 2050, haverá uma demanda para atender ao dobro desta população. Este cereal é um dos alimentos com melhor balanceamento nutricional e é uma cultura que se adapta a diferentes condições de solo e clima, podendo ser considerado a espécie que apresenta maior potencial para o combate a fome no mundo. No entanto, para o cultivo do arroz são utilizados insumos agrícolas, os quais podem apresentar diversos elementos-traço em sua composição. A presença destes elementos, nos solos, águas das lavouras e principalmente nos grãos de arroz, os quais são ingeridos pelo indivíduo, podem trazer sérios problemas à população e ao ambiente como um todo.

No Rio Grande do Sul, a área cultivada com arroz é de cerca de um milhão de hectares, com produtividade média de aproximadamente 7.000 kg ha<sup>-1</sup>, sendo considerado o maior produtor nacional, responsável por aproximadamente 60% da produção orizícola do Brasil. Algumas regiões orizícolas do Estado cultivam o arroz irrigado por mais de um século, como as regiões das Planícies Costeiras, que compreendem 128.760 hectares de cultivo. Estas lavouras nunca foram monitoradas quanto à presença de elementos-traço devido a não disposição direta de resíduos contaminados por estes elementos. Desta forma, este trabalho teve como objetivo principal quantificar alguns elementos-traço considerados tóxicos ao homem e ao ambiente, com a finalidade de identificar se há riscos para a população.

Os estudos que serão apresentados fecham o ciclo da quantificação dos elementos-traço no cenário de lavouras de arroz irrigado do RS, englobando todos os compartimentos da lavoura, bem como a observação da dinâmica dos elementos-traço em diferentes variedades de arroz com o

possível aumento das concentrações destes elementos no ambiente ao longo dos anos.

## 2 ESTADO DO CONHECIMENTO ATUAL

### 2.1 Aspectos históricos da preocupação ambiental mundial

A identificação dos aspectos e impactos ambientais deve considerar aqueles referentes às emissões atmosféricas, o lançamento de resíduos químicos em corpos de água, a contaminação do solo, entre outros. Conforme o Artigo 1º da Resolução nº 01/86 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), impacto ambiental pode ser definido como:

*“Qualquer alteração das propriedades físicas, químicas e biológicas do meio ambiente, causada por qualquer forma de matéria ou energia resultante das atividades humanas que, direta ou indiretamente, afetam a saúde, a segurança e o bem-estar da população; as atividades sociais e econômicas; a biota e a qualidade dos recursos ambientais.”*

A disseminação do movimento ambientalista ocorreu definitivamente no século XX, com a Conferência Científica da ONU sobre a Conservação e Utilização de Recursos, em 1949, e com a Conferência sobre Biosfera, realizada em Paris, em 1968. No entanto, o ponto chave para a acentuada busca da qualidade do ambiente e/ou da prevenção ou remediação de áreas mundiais com potenciais de riscos poluentes foi a Conferência de Estocolmo, em 1972, que teve por objetivo conscientizar os países sobre a importância da conservação ambiental como fator fundamental para a manutenção da espécie humana (Borges e Tachibana, 2005).

Na década de 80, surgiram as primeiras políticas públicas direcionadas diretamente à preservação do solo. Este recurso passou então a ser visto como um componente primordial do ecossistema a ser preservado e

não apenas como um recurso de proteção indireta por normativas para o gerenciamento da qualidade do ar e da água. Em 1981, foram criados o Sistema Nacional do Meio Ambiente (SISNAMA) e seu órgão consultivo e deliberativo, o CONAMA. A competência destes órgãos foi estabelecer normas e padrões nacionais de controle da poluição ambiental. A primeira normativa do CONAMA relacionada diretamente à regulamentação da entrada de resíduos potencialmente contaminantes do solo, datada de 2002, referia-se à disposição final dos resíduos sólidos urbanos. No ano de 2009, foi criada a Resolução nº 420 que “dispõe sobre critérios e valores orientadores de qualidade do solo quanto à presença de substâncias químicas e estabelece diretrizes para o gerenciamento ambiental de áreas contaminadas por essas substâncias em decorrência de atividades antrópicas.” (CONAMA, 2009).

A partir de então, a preocupação com o ambiente se tornou importante para que se pudesse falar em crescimento econômico atrelado à proteção ambiental, levando a sociedade, por instrumentos de gestão ambiental desenvolvidos, a estabelecer políticas para controlar as interferências das atividades humanas sobre o ambiente.

## **2.2 Perigo e risco ambiental**

O artigo 6º da RESOLUÇÃO nº 420/2009 do CONAMA (2009) define perigo e risco como:

*“Perigo: Situação em que estejam ameaçadas a vida humana, o meio ambiente ou o patrimônio público e privado, em razão da presença de agentes tóxicos, patogênicos, reativos, corrosivos ou inflamáveis no solo ou em águas subterrâneas ou em instalações, equipamentos e construções abandonadas, em desuso ou não controladas; Risco é a probabilidade de ocorrência de efeito(s) adverso(s) em receptores expostos a contaminantes.”*

O risco pode ser aceitável no momento em que foi reduzido a um nível que possa ser aceito pela organização, tomando em atenção as suas obrigações legais. Assim, o risco depende das medidas de prevenção e de proteção que tenham sido aplicadas, constituindo a relação entre o perigo e as

medidas de prevenção e proteção adotadas para controlar o mesmo. Prevenção é dispor antecipadamente, impedir que aconteça ou, como define a legislação em vigor, é a ação de evitar ou diminuir os riscos. O termo proteção constitui a tomada de medidas possíveis tendentes a reduzir as consequências de um acontecimento (USEPA, 1998). Os eventos de risco são incidentes ou acontecimentos que ameaçam o status e podem ocorrer naturalmente ou pela ação antrópica. Os métodos convencionais para identificar os riscos são baseados em objetivos, em cenários, listagem de risco ou gráficos (Kolluru,1996).

A existência de um perigo potencial tem embutido um risco, enquanto um risco só existe a partir de um fenômeno, seja potencial ou consumado (Shinar et al, 1991; Viana, 2000). O manejo e a conservação dos recursos, assim como os impactos, perigos e riscos ao ambiente, estão diretamente relacionados, estando a relação população-ambiente no próprio âmago da problemática em torno dos perigos.

## **2.3 Identificação do perigo: os elementos-traço avaliados neste cenário**

### **2.3.1 Cádmio (Cd)**

As concentrações naturais de Cd no solo são geralmente baixas, estando avaliadas em 0,15 a 0,2 mg kg<sup>-1</sup>. Ocorre em rochas magmáticas e sedimentares e possui densidade de 8,65 g cm<sup>-3</sup> (Kabata-Pendias e Pendias, 2001).

As concentrações de Cd, consideradas valores de referência da qualidade dos solos, são inferiores a 0,05 mg kg<sup>-1</sup>, mas permite-se, pela Resolução da CONAMA 420/09, que solos agrícolas apresentem até 3 mg kg<sup>-1</sup> (CONAMA, 2009).

O Cd, por não ser um elemento que se encontre em estado puro na natureza, é, principalmente, um subproduto da produção do Zn, seguindo os níveis de produção do mesmo. Nos minérios, o Cd e o Zn são encontrados em uma relação de 1:100 a 1:1000, respectivamente (Oliveira, 2002). Portanto, altas concentrações de Cd são encontradas, normalmente, junto às áreas de

depósitos de minérios de Zn, Pb e Cu, tendo sido registrados valores de mais de 100 mg kg<sup>-1</sup> (Vilar, 2002).

No solo, a biodisponibilidade do Cd está diretamente ligada às propriedades do solo, das quais sobressaem-se principalmente o pH, os teores de argila, matéria orgânica, CTC e óxidos. O efeito do pH na adsorção de Cd tem sido muito estudado, mostrando que o pH da solução do solo tem forte influência na adsorção de Cd em solos altamente intemperizados, aumentando a adsorção com a elevação do pH (Alloway, 1993; Kabata-Pendias e Pendias, 2001). Portanto, o destino do Cd, bem como de outros elementos, no solo depende de vários processos que ocorrem no meio, tais como a dissolução, absorção, complexação, migração, precipitação, complexação orgânica e absorção pelas plantas (Kabata-Pendias e Pendias, 2001).

A seletividade de minerais de argila e óxidos em solos por metais divalentes geralmente segue a ordem Pb > Cu > Zn > Ni > Cd, podendo ocorrer diferenças entre minerais e com variações do pH. O Cd é considerado hidrossolúvel e apresenta maior mobilidade nos solos, o que o torna mais biodisponível, tendendo à bioacumulação (Cardoso e Chasin, 2001). Embora considerado por alguns autores como altamente móvel (Alloway, 1993), resultados de pesquisa para avaliar sua mobilidade no perfil do solo têm sido contraditórios, deixando claro que o mesmo procede dependendo das condições intrínsecas do solo (Amaral Sobrinho et al., 1998; Adriano, 2001).

As fontes de Cd nos solos podem ser tanto naturais como antrópicas. Os processos naturais que contribuem para o aparecimento de metais pesados nos solos podem ser por intemperismo das rochas (Alloway, 1993; Guilherme et al., 2005), erosões, desastres naturais (inundações, terremotos, maremotos, vendavais) e atividades vulcânicas (Alloway, 1993; Vilar, 2002).

As fontes antrópicas são resultantes das atividades de mineração e fusão do Cd e Zn; produção, consumo e disposição de produtos que utilizam o Cd em sua composição; aplicação de lodos de esgoto em solos; poluição atmosférica; baterias e queima de combustíveis fósseis bem como, resíduos de outros processos (Camargo et al., 2001). Os fertilizantes fosfatados também são um bom exemplo passível de contaminação. Embora a concentração de

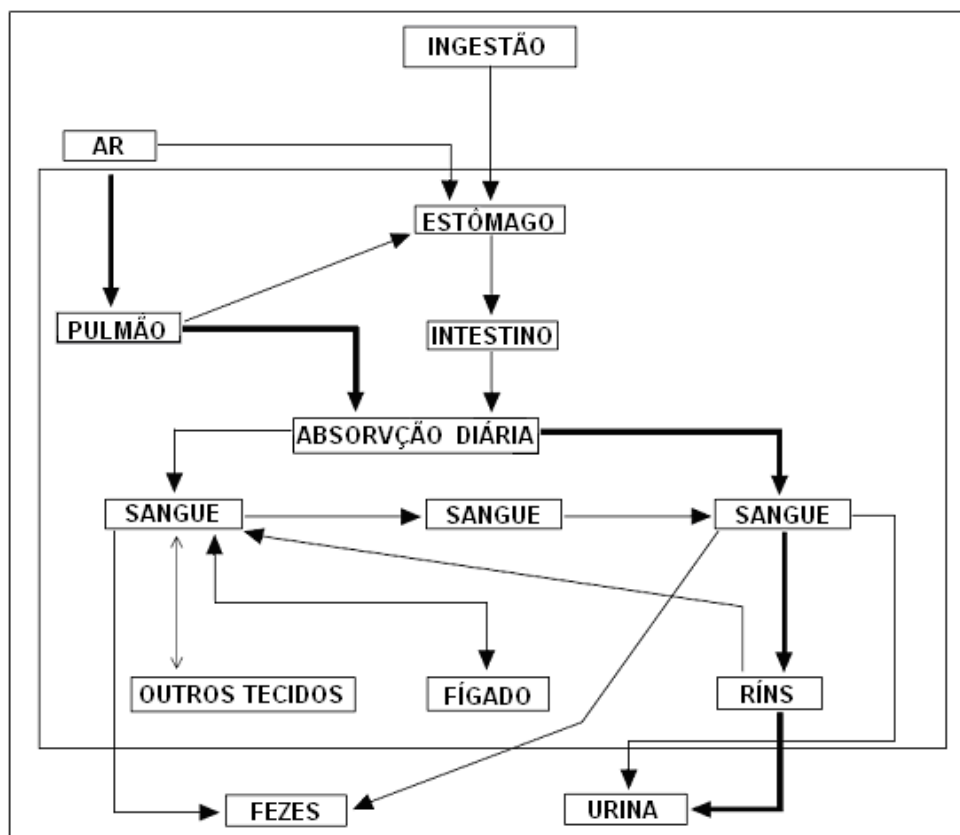
Cd nestes fertilizantes seja variável, o uso contínuo resulta na elevação dos níveis de Cd nos solos agrícolas (Garbisu e Alkorta, 2001).

No organismo humano, existem duas vias principais de entrada: pela via pulmonar e pela ingestão de alimentos e/ou água contaminados (via oral), sendo a concentração e a possibilidade de difusão do Cd dos pulmões até o sangue determinadas pelo tamanho e pela solubilidade das partículas inaladas ou ingeridas (Sá, 1999). A absorção de Cd por via oral é menor em comparação à absorção por inalação, e situa-se em torno de 1 a 5% do total do cádmio ingerido (Ramirez, 2002), ocorrendo principalmente pela ingestão de alimentos e/ou águas contaminados.

Quando ocorre a ingestão de altas doses de Cd, há saturação dos sítios de ligação do íon metálico com a proteína e os íons metálicos não complexados atravessam a mucosa intestinal, passando para a corrente sanguínea. O Cd é transportado pelo sangue aos diversos tecidos, de forma livre ou ligados aos constituintes sanguíneos, como hemácias e proteínas plasmáticas. O equilíbrio de distribuição é atingido rapidamente nos tecidos mais irrigados e lentamente nos órgãos pouco irrigados (Oga, 2003).

Outras alterações descritas com a entrada do Cd são o aumento na atividade osteoclástica (reabsorção óssea) e a redução da atividade osteoblástica (formação óssea), onde os íons de  $\text{Ca}^{+2}$  dos ossos são substituídos por íons de  $\text{Cd}^{+2}$  em virtude de possuírem a mesma carga e exatamente o mesmo tamanho; os mecanismos de ação do cádmio sobre as células ósseas não são claros, embora efeitos sobre a comunicação célula-célula via citocinas ou outros mensageiros sejam postulados (Sá, 1999).

Na Figura 1, é apresentado um esquema referente à ingestão, absorção, distribuição e excreção do cádmio, de acordo com Ramirez (2002). Segundo este autor, no sangue encontra-se aproximadamente 0,06% do conteúdo total de  $\text{Cd}^{2+}$  do organismo, sendo rapidamente transportado para os demais órgãos.



**Figura 1.** Toxicologia do cádmio: esquema toxicocinético. Fonte: Ramirez (2002).

A toxicidade é a capacidade apresentada por uma substância química de produzir um efeito nocivo quando interage com um organismo vivo, e depende da dose, do sistema biológico, da via de administração, frequência e duração da exposição (Góes, 1997).

### 2.3.2 Cromo (Cr)

O cromo é obtido a partir do minério cromita ( $\text{FeCr}_2\text{O}_4$ ), amplamente distribuído na superfície terrestre. O cromo é considerado um metal pesado devido sua densidade ser aproximadamente  $7,14 \text{ g cm}^{-3}$ . (Kabata-Pendias e Pendias, 2001).

A forma trivalente Cr(III) é a mais estável e é a mais comum na natureza (Castilhos et al., 2001). Está presente no ar, em alimentos e no sistema biológico, sendo essencial ao homem. No solo, o destino do Cr é dependente da especiação do metal, que se dá em função do potencial redox e do pH do solo. Na maioria dos solos, há predomínio de compostos de Cr(III)



devido à rápida redução de Cr(VI) (solúvel) para Cr(III) (insolúvel). O Cr(III) forma compostos de baixa solubilidade e reatividade, resultando em baixa mobilidade no ambiente e baixa toxicidade para os organismos vivos. Sob condições oxidantes, o Cr(IV) pode estar presente no solo na forma de íon cromato ou cromato ácido, formas relativamente solúveis, móveis e tóxicas para os organismos vivos (Kabata-Pendias e Pendias, 2001, Castilhos et al., 2001).

O Cr(VI) pode ser extremamente tóxico aos seres vivos. Trebien (1994), em sua revisão de literatura, cita vários exemplos dessa toxicidade. Concentrações inferiores a  $0,1 \mu\text{g kg}^{-1}$  podem afetar negativamente algumas fermentações. Teores de  $0,2 \text{ mg L}^{-1}$  podem retardar o crescimento de peixes e inferiores a  $5 \text{ mg kg}^{-1}$  de solo podem retardar o crescimento de batata, fumo e soja. A adição de uma quantidade de  $0,05 \text{ mg kg}^{-1}$  de Cr(VI) à solução nutritiva e de  $5 \text{ mg kg}^{-1}$  ao solo causaram injúrias às plantas de soja, caracterizando fitotoxicidade.

A toxicidade do Cr depende da espécie química e seus efeitos estão associados à forma química e exposição. Mas todas as formas de Cr podem ser tóxicas em grandes concentrações, sendo a hexavalente a mais tóxica do que a trivalente e a tetravalente (Kabata-Pendias e Pendias, 2001; Merlino, 2010).

A presença do Cr nos corpos hídricos causa impactos desfavoráveis, afetando a saúde da população humana que consome a água e se alimenta de peixes que se desenvolvem nestes locais. A bioacumulação em humanos pode apresentar efeitos imediatos, efeitos crônicos pela acumulação por longos períodos de tempo e, ainda mais preocupante, conseqüências genéticas para gerações futuras (Jordão et al., 1999).

Uma das principais vias da contaminação dos seres vivos pelo elemento cromo é, indubitavelmente, o consumo de água contaminada. No organismo humano, a absorção do Cr(VI) ocorre principalmente por inalação. Dependendo do tamanho da partícula, de sua solubilidade e sua forma química, aproximadamente 50% do cromo será absorvido. As principais vias de absorção do Cr são os pulmões, o trato gastrointestinal e a pele (Sá, 1999). A toxidez aguda pode ocorrer com apenas uma única dose, após contato oral, nasal ou dermal. Praticamente todos os compostos de Cr(VI) apresentam

grande poder mutagênico, devido seu acesso direto às células e, por ser um grande oxidante, sendo assim, carcinogênicos para os órgãos respiratórios humanos. Para a vida aquática, a toxicidade do cromo varia com a temperatura, pH, espécie, estado de oxidação e a concentração de oxigênio (Alcântara et al., 2000).

O Cr é capaz de atravessar membranas celulares e é absorvido por inalação ou por via oral na forma hexavalente, enquanto que a forma trivalente é pouco absorvida e dificilmente atravessa membranas celulares. A intoxicação pelo Cr(VI) está associada a complicações gastrointestinais, lesão renal, dano hepático e do sistema nervoso central, bronquite asmática e dermatite alérgica em casos agudos. Intoxicações crônicas estão associadas à irritação gastrointestinal, úlcera gastroduodenal, hepatite, conjuntivite, dermatite eczematosa, rinite, faringite, perfuração do septo nasal, bronquite crônica, câncer pulmonar, alterações do sangue e possível nefrotoxicidade (Galvão e Corey, 1987). A dose diária de exposição via oral a partir da qual o elemento passa a ser nocivo à saúde é dada como  $0,1 \text{ mg kg}^{-1}\text{dia}^{-1}$  para o Cr(VI) e  $1,00 \text{ mg kg}^{-1}\text{dia}^{-1}$  para o Cr(III). Esta diferença de toxicidade pode ser justificada pelo fato do Cr(VI) penetrar através da membrana celular com muita facilidade e ser um agente oxidante muito forte, podendo até mesmo interagir com constituintes da célula, inclusive material genético (Nascentes, 2006). A presença das diferentes formas de Cr, em altas concentrações, nas águas, no solo e no ar, é prejudicial ao ambiente e a saúde dos seres vivos (Cunha e Machado, 2004).

### **2.3.3 Chumbo (Pb)**

O chumbo é um elemento com densidade de  $11,35 \text{ g cm}^{-3}$  (Smith et al., 1995) e o menos móvel dos metais pesados, ocorrendo normalmente em todos os solos, variando de 1 a  $200 \text{ mg kg}^{-1}$ , sendo que em geral os solos apresentam menos que  $20 \text{ mg kg}^{-1}$  de Pb extraído por DTPA-TEA (Wallace e Wallace, 1994).

O Pb geralmente ocorre como  $\text{Pb}^{2+}$  (Kabata-Pendias e Pendias, 2001), formando complexos estáveis com ligantes inorgânicos e orgânicos (ácidos húmicos e fúlvicos) presentes em solos e sistemas aquáticos. O Pb solúvel reage com carbonatos, sulfetos, sulfatos, e fosfatos para formar compostos de baixa solubilidade (Smith et al., 1995). O mesmo também se

encontra associado aos minerais de argila, aos óxidos de Mn e aos hidróxidos de Fe e Al, ou concentrado aos carbonatos de Ca. Sua disponibilidade é regulada pelo pH, portanto, a calagem diminui a absorção de Pb (Berton, 1992), precipitando o Pb como hidróxido, fosfato, ou carbonato, formando complexos orgânicos. O elemento se torna móvel quando ocorre a formação de complexos quelatos solúveis com a matéria orgânica (Kabata-Pendias e Pendias, 2001). Este elemento tende a se acumular superficialmente no solo, diminuindo sua concentração ao longo do perfil, logo a zona de contaminação se encontra confinada na superfície (Zeitouni, 2007). Em solos com alto teor de matéria orgânica, em pH 6 a 8, o Pb pode formar complexos insolúveis. Com menos matéria orgânica na mesma faixa de pH, pode formar precipitados de óxidos, carbonatos ou fosfatos. Em pH 4 a 6, os complexos orgânicos de Pb se tornam mais solúveis e podem lixiviar (Smith et al., 1995).

O Pb pode ser introduzido no organismo através da inalação (ar atmosférico), ingestão (água, alimentos e solos contaminados) e por via dérmica. Os compostos de chumbo lipossolúveis e projéteis de chumbo quando alojados na pele e nos músculos permitem a absorção do elemento (Sá, 1999). Existem duas classes de compostos de Pb: os inorgânicos, que são os formados por sais e óxidos de Pb, e os orgânicos, que são o Pb tetraetila e o Pb tetrametila. Uma vez absorvidos, todos os compostos inorgânicos atuam no organismo da mesma forma (Leite, 2011).

A toxicidade do Pb resulta, principalmente, de sua interferência no funcionamento das membranas celulares e enzimas, formando complexos estáveis com ligantes contendo enxofre, fósforo, nitrogênio ou oxigênio (grupamentos  $-SH$ ,  $-H_2PO_3$ ,  $-NH_2$ ,  $-OH$ ), que funcionam como doadores de elétrons.

A excreção do Pb do organismo ocorre em três fases: uma rápida, correspondendo ao Pb que não se fixou ao organismo; outra lenta, representando a fração do metal que é facilmente liberado dos componentes corporais (tecidos moles) e uma terceira, muito lenta, geralmente anos após as duas fases anteriores, que corresponde à excreção do Pb ligado ao tecido ósseo (Leite, 2011).

## **2.4 Identificação do perigo: elementos-traço em rochas fosfatadas e fertilizantes fosfatados**

As fontes de fósforo mais utilizadas na adubação de cultivos agrícolas são os fosfatos solúveis em água, tais como os superfosfatos simples e triplo e os fosfatos de amônio. Existem outros fertilizantes disponíveis menos utilizados, tais como os fosfatos naturais, os termosfosfatos e os fosfatos parcialmente acidulados. Algumas características dos adubos fosfatados, como solubilidade, teor, granulometria e elementos acompanhantes do fósforo, determinam o maior ou menor aproveitamento do nutriente pelas plantas (Moreira et al., 1997).

Os fertilizantes fosfatados são manufaturados de rochas fosfáticas e, de acordo com sua origem, podem conter vários metais pesados em sua composição. A expressão metais pesados, comumente utilizada, não necessariamente apresenta a melhor definição para os elementos, podendo também ser referida como "metais traço", "elementos-traços", "metais tóxicos", entre outros (Adriano, 2001; Kabata-Pendias e Mukherjee, 2007). Elementos-traço referem-se àqueles elementos que ocorrem naturalmente no solo ou por ação antrópica em níveis de parte por milhão, ou seja, em teores traços. Estes elementos-traço podem ser tóxicos, como Pb, Cd, Hg, As, Ti e U e elementos que são biologicamente essenciais como Co, Cu Mn, Se e Zn (Alloway, 1993).

A preocupação com os elementos-traço provenientes de fertilizantes minerais tradicionais ou de fontes alternativas, como lodos de tratamento biológico e demais resíduos industriais, relaciona-se, sobretudo, com a adubação de plantas empregadas diretamente na alimentação humana, como hortaliças e grãos (Alcarde e Rodella, 2003). Essa preocupação leva em consideração elementos essenciais, como Fe, Cu, Zn e Mn, mas principalmente os elementos não essenciais às plantas como o Pb, Cr e Cd, que oferecem risco à saúde humana (ATSDR, 2012). Langenbach e Sarpa (1985) avaliaram a concentração de Cd em onze fosfatos nacionais e observaram que eles continham menos que  $2,0 \text{ mg kg}^{-1}$  de Cd. Esses autores concluíram que essa baixa concentração nos fertilizantes fosfatados não oferecia risco para as plantas, animais e microrganismos do solo. No entanto, em estudos mais atuais (Alcarde e Rodella, 2003; Guilherme e Marchi, 2007; Bizarro, 2008) encontraram concentrações altas de elementos-traço em

fertilizantes fosfatados comercializados no Brasil. Gabe e Rodella (1999) determinaram na rocha fosfatada Catalão 4 mg kg<sup>-1</sup> de Cd, 19 mg kg<sup>-1</sup> de Cr e 58 mg kg<sup>-1</sup> de Pb, enquanto o concentrado apatítico fino Araxá contém 7 mg kg<sup>-1</sup> de Cd, 44 mg kg<sup>-1</sup> de Cr e 127 mg kg<sup>-1</sup> de Pb. Amaral Sobrinho et al. (1992) apresentam faixas típicas de elementos-traço em fertilizantes fosfatados como sendo 0,1–170 mg kg<sup>-1</sup> de Cd, 7–225 mg kg<sup>-1</sup> de Pb, 7–38 mg kg<sup>-1</sup> de Ni, 1–300 mg kg<sup>-1</sup> de Cu e 50–1450 mg kg<sup>-1</sup> de Zn.

O conhecimento da concentração dos elementos-traço em rochas fosfatadas e fertilizantes é de grande importância, especialmente em condições de agricultura intensiva e em solos tropicais, onde o uso de fertilizantes e corretivos agrícolas é intenso.

## **2.5 Identificação do perigo: elementos-traço em águas de irrigação**

A qualidade da água refere-se às características físicas, químicas e biológicas da mesma (Merten e Minella, 2002). Estas características são influenciadas por fenômenos naturais e da atuação antrópica, podendo-se afirmar que a qualidade da água em uma determinada propriedade agrícola está relacionada, principalmente, com o uso e da ocupação do solo na bacia hidrográfica a que ela pertence. Desta forma, a qualidade da água pode ser considerada perfeitamente adequada a certo tipo de solo ou cultura, mas inadequada para outros.

Uma das primeiras preocupações para o planejamento da prática de irrigação é obter informações suficientes sobre a fonte de água disponível na propriedade. Para a irrigação, deve-se ter água em quantidade e qualidade suficientes para atender às necessidades do cultivo a ser explorado. A água pode ser suficiente em quantidade para atender a demanda, mas pode ser de baixa qualidade e imprópria para o uso em irrigação.

Tradicionalmente, a qualidade microbiológica da água, para fins de abastecimento, era o principal fator a ser analisado. Porém, isto tem sido mudado atualmente, sendo que a importância da "qualidade química" tem aumentado com a evolução do conhecimento sobre os danos causados pela exposição às substâncias químicas. De acordo com Reinfelder et al. (1998), o acúmulo de elementos-traço nos ecossistemas aquáticos tem despertado

interesse sob vários aspectos, principalmente em relação ao destino e aos possíveis efeitos desses contaminantes, sua ciclagem biogeoquímica e sua distribuição na cadeia alimentar.

Com o intuito de se determinar os níveis de contaminação, os órgãos ambientais estabelecem limites máximos de concentrações desses elementos para que não ocorram danos aos organismos e à saúde pública. No Brasil, a resolução N 357, de 17 de março de 2005 do CONAMA “Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências” (CONAMA, 2005).

O transporte e a distribuição de elementos-traço dependem do somatório das características do lago ou reservatório e da natureza química dos contaminantes. Dois dos maiores desastres ecológicos com elementos-traço conhecidos ocorreram na baía de Minamata e na parte central do Japão, durante as décadas de 1940 e 1960. O Mal de Minamata (atinge o sistema nervoso central, os rins e outros órgãos) afetou cerca de 1.700 pessoas, além de gatos e ratos que se alimentaram de peixes e mariscos contaminados com mercúrio. A Doença de Itai-itai, que causava dor intensa nos ossos, daí o nome itai-itai que, em Japonês, quer dizer "dói-dói", foi provocada pelo cádmio concentrado nos grãos de arroz cultivado por inundação, onde a água de irrigação estava contaminada por cádmio, proveniente de uma jazida de zinco e chumbo (Baird, 1999).

## **2.6 Identificação do perigo: elementos-traço em agroquímicos**

Até meados da década de 60 a tecnologia agrícola no Brasil ainda era bastante rudimentar (Martine, 1991). Com o aumento da densidade populacional e, conseqüentemente do consumo alimentar, houve uma grande expansão agrícola. Devido a este fato, surgiu a necessidade de eliminar o máximo possível de plantas invasoras ou mesmo pragas instaladas nas lavouras agrícolas e, um incremento do uso de agroquímicos foi aplicado às culturas para a obtenção de maior produtividade (Veiga, 1991).

A intensificação tecnológica que culminou na chamada “Revolução Verde” tinha por objetivo aumentar substancialmente a produção de alimentos que, segundo seus precursores, solucionaria o problema da desnutrição

presente na maioria dos países, por meio da substituição dos moldes de produção locais ou tradicionais por um conjunto bem mais homogêneo de práticas tecnológicas (Oliveira, 2006). No entanto, após a revolução verde, observaram-se profundas mudanças no manejo da agricultura, bem como seus impactos sobre o ambiente (Moreira et al., 2002).

Entre 2001 e 2008 a venda de agroquímicos no país teve um aumento de US\$ 2 bilhões para mais US\$ 7 bilhões, quando alcançou a posição de maior consumidor mundial de agroquímicos. Foram 986,5 mil toneladas de agroquímicos aplicados. Em 2009 ampliaram-se ainda mais o consumo e passou para mais de 1 milhão de toneladas, representando 5,2 kg de agroquímico por habitante (Londres, 2011).

O principal objetivo do uso de agroquímicos nas lavouras é o controle de patógenos e pragas. Entretanto, a utilização dos agroquímicos pode causar degradação química do solo, como resultado da acumulação de elementos tóxicos e, ou, compostos em níveis indesejáveis (Núñez et al., 1999). Desta forma, o acúmulo dos elementos-traço nos solos agrícolas é frequentemente causado pelo uso repetido e excessivo de fertilizantes, agroquímicos e resíduos orgânicos. Gimeno-García et al. (1996) avaliaram a presença de elementos-traço como impurezas de fertilizantes e pesticidas aplicados aos solos agrícolas, tendo encontrado que as adições mais significativas foram de Mn, Zn, Co e Pb.

A contaminação humana e ambiental por agroquímicos não é um problema simples, muito em parte pela diversidade de determinantes (de ordens social, econômica e cultural) que o permeiam. O modelo clássico da análise de riscos, que inclui etapas como a identificação do perigo, caracterização do risco, avaliação dose-resposta, comunicação e gerenciamento de riscos (que no campo se traduz primordialmente na identificação de fontes, quantificação da "carga" de agentes a que as populações estão expostas e a determinação da exposição/contaminação destas populações, através de diversos indicadores, conforme anteriormente discutido) apresenta-se incompleto para uma análise mais aprofundada deste problema (USEPA, 1998).

## **2.7 Identificação do risco: a cultura do arroz irrigado por alagamento**

O arroz é um dos cereais mais produzidos, consumidos e cultivados em todos os continentes (Azambuja et al., 2004). O Brasil é o nono maior produtor mundial e colheu 11,26 milhões de toneladas na safra 2009/2010 (MAPA, 2012). Dentro do sistema de alimentação mundial, o arroz ocupa posição preponderante sendo que mais de três bilhões da população mundial dependem do arroz como alimento básico. Anualmente, são cultivados cerca de 150 milhões de hectares de arroz, produzindo 590 milhões de toneladas, sendo que mais de 75% desta produção é oriunda do sistema de cultivo irrigado (Embrapa, 2006b).

O Estado do Rio Grande do Sul é o maior produtor de arroz do Brasil, sendo responsável por aproximadamente 54% da produção nacional de arroz irrigado, fato que destaca essa cultura no cenário agrícola do País (IRGA, 2006). O cultivo do arroz irrigado por alagamento é o sistema predominante, contribuindo com aproximadamente 2/3 da produção total de arroz nacional. Nesta região, a produtividade das lavouras vem aumentando substancialmente nos últimos anos, atingindo na safra 2007/08, valores de 6.860 kg ha<sup>-1</sup> no Rio Grande do Sul e de 7.500 kg ha<sup>-1</sup> em Santa Catarina (CONAB, 2008), resultado, essencialmente, da alteração do manejo do solo e da cultura, onde a adubação passou a exercer um papel importante (Genro Jr. et al., 2007; Schoenfeld et al., 2007).

No Rio Grande do Sul, a área cultivada com arroz é de cerca de um milhão de hectares com produtividade média de aproximadamente 7.000 kg ha<sup>-1</sup> (IRGA, 2010). Esta produção está distribuída em seis regiões produtoras: Fronteira Oeste, Campanha, Depressão Central, Planície Costeira Interna, Planície Costeira Externa e Zona Sul (Gonçalves, 2007). A quase totalidade desta área é irrigada, sendo utilizado o sistema de submersão do solo. No Estado do Rio Grande do Sul, na safra 2009/10, predominou o cultivo mínimo com semeadura direta (63,7 % da área), seguido dos sistemas convencional (25,6 % da área) e pré-germinado (10,7 %), segundo o levantamento do Instituto Rio Grandense do Arroz (IRGA, 2010). Do total de água utilizada num hectare para produção de arroz, no sistema convencional, 40 a 50% é usado na evapotranspiração do cultivo, sendo que os restantes 50 a 60%



representam um uso não consuntivo, o qual retorna ao ciclo hidrológico de forma mais lenta, pela percolação e fluxo sub-superficial, ou de forma mais rápida, pela a água de drenagem, que ocorre pelo excesso de água durante a irrigação (escoamento sobre as taipas) ou pela drenagem da lâmina residual, realizada antes da colheita (Gonçalves, 2007).

O arroz é a cultura com maior potencial de aumento de produção e responde pelo suprimento de 20% das calorias consumidas na alimentação mundial (IRGA, 2010). Devido a esse aumento de produção, ocorre a necessidade do aumento da aplicação de fertilizantes (Bizarro, 2008). A utilização de fosfato natural vem sendo uma recomendação crescente considerando a disponibilidade do fósforo no sistema. Consta-se que houve um aumento da quantidade de fertilizantes utilizada na cultura do arroz nos últimos anos no RS (IRGA, 2010).

A fertilidade dos solos das regiões tropicais é bastante limitada pela baixa disponibilidade natural de fósforo. Além disso, a indisponibilização de boa parte do fósforo fornecido na adubação, devido aos fenômenos de sorção do P em reações com componentes do solo, faz com que a aplicação de maiores quantidades de fosfatos seja necessária para viabilizar o uso agrícola destes solos (Resende, 2004). Em suma, para prevenir a deficiência deste nutriente é necessária a aplicação de grande quantidade de fósforo devido à capacidade do solo em reter o elemento em formas pouco solúveis, não prontamente disponíveis às plantas.

## **2.8 Identificação do risco: elementos- traço na cadeia alimentar**

Os elementos-traço podem ser enquadrados em uma classe que possuem características bioacumulativas, ou seja, são resíduos que se acumulam nos tecidos vivos ao longo da cadeia alimentar. O caminho dos elementos-traço dentro de uma cadeia alimentar apresenta uma rota crescente de acúmulo nos tecidos dos organismos. Sendo assim, o consumidor do topo da cadeia sempre apresentará um índice maior de um elemento que esteja contaminando um ecossistema. A transferência de elementos-traço dos solos às plantas é dependente de três fatores: da quantidade total de elementos disponíveis na solução (fator quantidade), da atividade dos íons na solução do solo (fator intensidade) e da taxa de transferência do elemento da fase sólida

às fases líquidas e às raízes da planta (Brümmer et al., 1986). As plantas absorvem os cátions livres em solução porque as células das raízes apresentam um potencial negativo ao longo da membrana celular, favorecendo a absorção de espécies catiônicas. Já os cátions complexados apresentam menores cargas positivas ou até mesmo cargas negativas (Sposito, 1989), sendo menos absorvidos pelas plantas.

Diversos fatores podem interferir na absorção e/ou distribuição de elementos-traço na planta, como o estágio de desenvolvimento que a mesma se encontra, o tempo de exposição ao elemento e a própria espécie química do elemento. Nesse contexto, as espécies ou variedades de uma mesma espécie vegetal, expostas a uma concentração similar destes elementos, podem diferir na absorção e/ou distribuição interna dos elementos-traço na planta (Kabata-Pendias e Pendias, 2001; Soares, 2005). Outros fatores do solo como pH, matéria orgânica, concentração do metal, presença de ânions, textura, umidade, aeração e potencial redutor do solo, também afetam na absorção e translocação dos elementos-traço na planta (Alloway, 1993; Kabata-Pendias e Pendias, 2001).

Os elementos-traço não são biodegradáveis e apresentam, geralmente, mais de um estado de oxidação. Esses diferentes estados de oxidação determinam sua mobilidade, biodisponibilidade e toxicidade. Segundo Bridges (1991), de um modo geral, o tempo de permanência de alguns elementos-traço em solos é de 75 e 380 anos para o Cd, 500 a 1000 anos para o Hg e os mais fortemente adsorvidos são As, Cu, Pb, Se e Zn, que têm tempo de residência de 1000 a 3000 anos. Esses elementos ainda podem ser bioacumulados, ou seja, podem ser acumulados nos seres vivos. Elementos-traço podem interagir de maneira diferente com os organismos, levando os seres vivos a disfunções mais simples ou também ocasionar graves danos que podem levar à morte (Ramirez, 2002). Disfunções orgânicas, como alterações enzimáticas, podem ocorrer. As enzimas são responsáveis por controlar a velocidade das reações metabólicas no corpo humano. Elas, na presença dos elementos-traço, não agem normalmente devido à afinidade dos radicais SH (sulfidrilas) pelos metais. A disfunção das mesmas então pode levar o indivíduo à morte. As populações estão expostas aos poluentes de várias maneiras. Isso pode acontecer pelo consumo de alimentos, de água, por via inalatória,

dérmica, etc. (Sá, 1999). É importante frisar que as concentrações dos poluentes são magnificadas nos vegetais e animais, constituindo a chamada biomagnificação (bioconcentração ou bioacumulação).

### 3 ESTUDOS DESENVOLVIDOS

Os estudos apresentados referem-se à quantificação de elementos-traço em lavouras de arroz irrigado. O cenário desta quantificação dos elementos-traço limita-se às lavouras de arroz irrigado das Planícies Costeiras, Externa e Interna, à Laguna dos Patos do Estado do Rio Grande do Sul, com exceção aos grãos (Estudo 3) que são produzidos em diferentes regiões do Estado, sendo que:

a) as análises dos solos (Estudo 1) foram feitas com amostras das regiões das Planícies Costeiras Interna e Externa à Laguna dos Patos;

b) as amostras de lâmina de água, da água de captação e de drenagem, bem como o solo e as plantas das lavouras de arroz (Estudo 2), foram coletadas no Instituto Rio-Grandense de Arroz, em Cachoeirinha, RS (Planície Costeira Interna à Laguna dos Patos);

c) as amostras dos grãos analisados no Estudo 3 são “marcas” populares de arroz produzidas e comercializadas no estado do Rio Grande do Sul e;

d) o solo coletado e as cultivares (variedade IRGA-417, variedade IRGA-424 e o híbrido Arize QM1010) semeadas no Estudo 4 são cultivadas no Estado do RS e foram fornecidas pelo Instituto Rio-Grandense do Arroz, Cachoeirinha, RS.

Em suma, é importante salientar que todas as amostras avaliadas nesta tese são provenientes do Estado do Rio Grande do Sul.

## **4. ESTUDO 1 - ELEMENTOS-TRAÇO EM SOLOS DE LAVOURAS DE ARROZ IRRIGADO NAS PLANÍCIES COSTEIRAS À LAGUNA DOS PATOS DO RIO GRANDE DO SUL**

### **4.1 Justificativa e relevância**

Os elementos-traço se encontram distribuídos por toda a natureza. Nos solos, estes elementos são originários do material de origem ou de minerais de origem secundária, precipitados com outros compostos, adsorvidos em sítios de troca e dissolvidos na solução do solo. Nas últimas décadas, as atividades antrópicas têm aumentado, substancialmente, a concentração de elementos-traço em diversos ecossistemas (Kabata-Pendias e Pendias, 2001).

O acúmulo de elementos-traço em solos agrícolas é motivo de preocupação quanto à segurança ambiental e alimentar. Esses elementos podem expressar seu potencial poluente diretamente nos organismos do solo, pela sua disponibilidade às plantas em níveis fitotóxicos, além da possibilidade de transferência para a cadeia alimentar, por meio das próprias plantas, ou pela contaminação das águas de superfície e subsuperfície (Alloway, 1993; Kabata-Pendias e Pendias, 2001; Soares et al., 2005).

Na agricultura, a aplicação de insumos agrícolas em solos e em culturas é prática rotineira. Os principais objetivos do uso desses insumos são o aumento do suprimento de nutrientes (fertilizantes), a correção do pH do solo (corretivos) e a proteção das lavouras pelo controle de doenças, pragas e ervas daninhas (pesticidas) (Ramalho et al., 1998). No entanto, no decorrer de muitos anos de cultivos a constante aplicação destes insumos, pode resultar no acúmulo de contaminantes nos solos e, conseqüentemente, nos grãos.

O acúmulo de elementos-traço deve-se ao fato de que estes elementos estão geralmente presentes como produtos secundários na produção dos insumos. No caso dos fertilizantes fosfatados, a matéria-prima para a obtenção dos fertilizantes são as rochas fosfáticas, que apresentam em sua composição, além do fósforo, diversas impurezas, dentre elas elementos-traço, em variadas concentrações (Prochnow et al., 2001) e não são necessários ao crescimento de plantas. Vários trabalhos relatam a presença de elementos-traço em fertilizantes e corretivos de acidez de solos (Campos et al., 2005; Mendes et al., 2006; Guilherme e Marchi, 2007; Bizarro; 2008).

A ênfase deste estudo é a quantificação total de elementos-traço nos solos das Planícies Costeiras Interna e Externa à Laguna dos Patos do Estado do RS, resultando da utilização de insumos agrícolas na cultura do arroz irrigado por alagamento. Os solos analisados são utilizados há muitos anos para o cultivo orizícola; há lavouras com mais de 100 anos de cultivo, tendo o registro mais antigo do cultivo do arroz no ano de 1829, em Torres, Litoral Norte do RS (Guindani, 2007).

Não existem informações sobre as concentrações de elementos-traço em solos cultivados com o arroz no estado do Rio Grande do Sul. Portanto, há a necessidade de um estudo de quantificação destes elementos nos solos, com a finalidade de identificar possíveis acúmulos de elementos-traço nestas áreas e avaliar, desta forma, a necessidade ou não de uma investigação mais específica.

#### **4.2 Hipótese do estudo**

Os solos cultivados com arroz nas Planícies Costeiras, Interna e Externa, à Laguna dos Patos do Rio Grande do Sul, com aplicação de insumos agrícolas há muitas décadas, têm concentrações de Cd, Pb e Cr acima dos limites seguros para a saúde humana.

#### **4.3 Objetivo do estudo**

O objetivo foi determinar as concentrações de Cd, Pb e Cr em amostras de solos cultivados com arroz irrigado das Planícies Costeira Externa e Interna à Laguna dos Patos do Rio Grande do Sul.

## **4.4 Material e métodos**

### **4.4.1 Área de estudo**

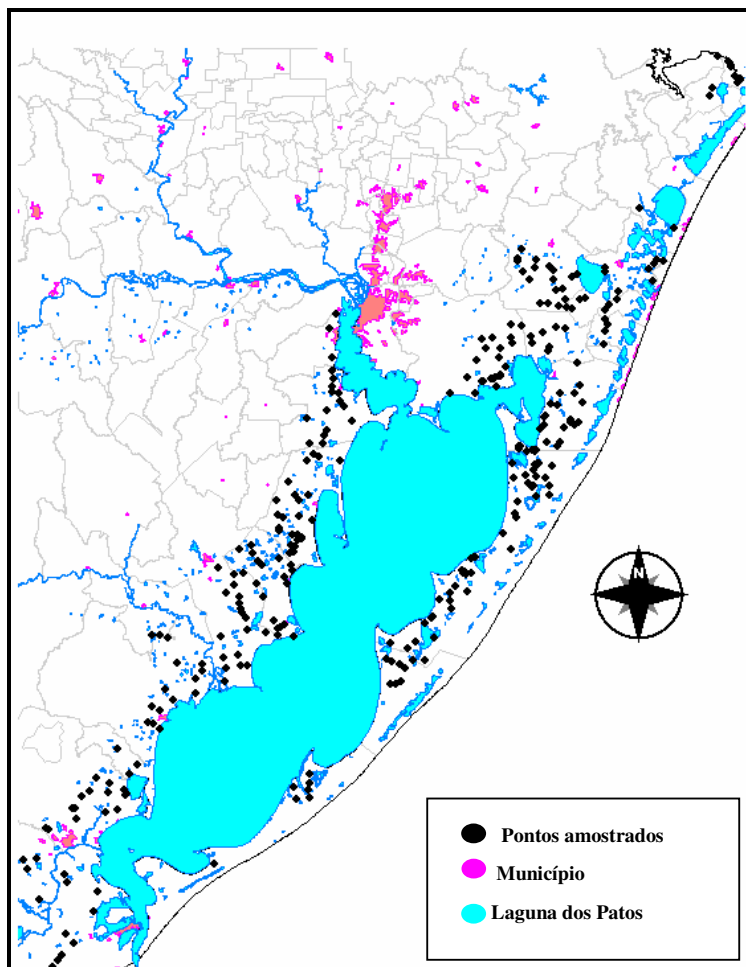
A área do estudo abrange as Planície Costeira Interna (PCI) e a Planície Costeira Externa (PCE) à Laguna dos Patos. Os municípios com maior representatividade no cultivo do arroz nessas planícies são Tapes, Arambaré, Camaquã, Pelotas, Rio Grande, Mostardas, Viamão, Palmares do Sul, Santo Antônio da Patrulha, Osório e Torres (APÊNDICES 1 a 17). O corpo lagunar tem como limite o Lago Guaíba a norte-nordeste e o Oceano Atlântico a sudeste, ao qual se conecta pelo Canal de Rio Grande.

### **4.4.2 Solos amostrados**

As amostras de solos da região das Planícies Costeiras Interna e Externa à Laguna dos Patos foram coletadas por Carmona (2011) para confeccionar mapas da salinidade dos solos da região costeira à Laguna dos Patos. Das 766 amostras coletadas, foram selecionadas 298 amostras utilizando-se o programa IDRISI, software de sistema de informação geográfica, desenvolvido pelo Centro de Ecologia – Laboratório de Geoprocessamento da UFRGS (IDRISI TAIGA -2009). A localização das 298 amostras selecionadas para a quantificação dos elementos-traço Cd, Cr e Pb pode ser visualizada na Figura 2.

### **4.4.3 Atributos dos solos**

As amostras foram coletadas na camada superficial dos solos (0 - 20 cm), seguindo o método de coletas de amostras de solos da Embrapa (1995). Cada amostra foi composta por três sub-amostras. Em cada local, foi coletada, também, uma amostra de solo testemunha, nunca cultivado. Após a coleta, as amostras foram secas ao ar e tamisadas em peneira com malha de 4 mm. Atributos selecionados dos solos foram determinados no Laboratório de Solos da Faculdade de Agronomia, da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, conforme metodologia descrita em Tedesco et al. (1995) e estão apresentados nos APÊNDICES 1 a 17.



**Figura 2.** Locais amostrados para a quantificação dos teores de Cd, Cr e Pb em solos das Planícies Costeiras do RS (298 amostras).

#### 4.4.4 Extração dos elementos-traço das amostras de solos

As amostras foram trituradas, em gral de ágata, até passar inteiramente por uma peneira descartável de náilon de 0,15 mm de malha.

O CONAMA, em sua normativa de dezembro de 2009 realizou um avanço ao estabelecer os métodos 3050 e 3051 do EPA, e suas atualizações, como métodos padrão para a obtenção dos teores de metais em solos do Brasil. Por estas razões, os teores totais de Cd, de Cr e de Pb foram determinados pelo método USEPA 3050B (USEPA, 1996), em consonância com a recomendação da resolução vigente no país (CONAMA, 2009). Utilizou-se 1 g de material que foi digerido com 10 mL de HNO<sub>3</sub> diluído (1:1), em bloco digestor aberto, por 15 minutos a 95±5°C. As amostras foram resfriadas e após



adicionou-se 5 mL de HNO<sub>3</sub> concentrado e novamente foram levadas ao bloco digestor para aquecimento a 95±5°C por mais 2 horas. Após resfriadas, adicionou-se 2 mL de água deionizada e 3 mL de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> a 30% (enquanto houve fervura adicionou-se H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> de 1 em 1 mL até completar 10 mL). A seguir, as amostras foram novamente colocadas no bloco digestor por mais 2 horas a 95±5°C. Por fim, as amostras foram resfriadas e avolumadas em balões volumétricos de 100 mL com água deionizada. As alíquotas foram filtradas em papel filtro nº JP 42 e armazenadas para posterior quantificação. Nesta metodologia, o HCl não foi adicionado, pois, segundo o método da USEPA 3050B, se a leitura das amostras é feita pelo espectrofotômetro de absorção atômica com atomização eletrotérmica em forno de grafite não há necessidade da adição do ácido (APÊNDICE 18).

#### **4.4.5 Quantificação dos elementos-traço nas amostras solo**

A quantificação dos teores de Cd, Cr e Pb nos extratos das amostras dos solos foi feita por espectrofotômetro de absorção atômica com atomização eletrotérmica em forno de grafite Zeenit 600, da marca Analytikjena (Alemanha). Todas as análises foram feitas em triplicata e em cada bateria de análise colocou-se uma amostra de solo referência, com teor do metal já conhecido e, também, uma amostra em branco para controle.

#### **4.5 Resultados e discussão**

As concentrações de Cd, Cr e Pb determinadas nas amostras dos solos pesquisados são apresentadas na Tabela 1.

Segundo Fadigas et al. (2006), para se avaliar a extensão da contaminação de uma área é preciso comparar os teores do elemento-traço encontrado no solo em estudo com aqueles determinado em condições naturais ou com valores de referência de qualidade do solo.

Em alguns municípios, as concentrações encontradas nas testemunhas apresentaram-se abaixo do limite de detecção do aparelho e/ou inferiores aos teores encontrados nos locais coletados nos solos das lavouras de arroz (Tabela 1). Estes dados indicam que os insumos que vem sendo aplicados na cultura do arroz, ao longo dos anos, podem estar aumentando as

concentrações de elementos-traço nestes solos. No entanto, como esta comparação não se apresentou como uma regra, a melhor maneira de comparar os resultados foi utilizando os valores de referências de qualidade (VRQ) para os elementos estudados. Até o momento no Estado do Rio Grande do Sul não há valores orientadores para elementos-traço em solos e, desta forma, a comparação dos teores encontrados foi feita pelos valores orientadores inseridos na Resolução do Conama nº 420 do ano de 2009 (Tabela 2).

**Tabela 1.** Concentrações mínimas e máximas de Cd, Cr e Pb nas amostras de solos coletadas nos 298 locais amostrados nos municípios localizados nas regiões das Planícies Costeiras Interna e Externa à Laguna dos Patos/RS, na camada de 0 - 20 cm de profundidade.

Município	Cd	Cr	Pb
	-----mg kg <sup>-1</sup> -----		
Torres	0,01-0,37 (0,01)*	2,91-11,93 (2,32)*	2,81-8,00 (4,65)*
Santo Antônio da Patrulha	0,01-0,09 (0,03)*	0,37-9,56 (0,37)*	<LD-8,30 (0,77)*
Capivari do Sul	0,01-0,20 (<LD)*	1,74-6,46 (<LD)*	0,56-5,45 (<LD)*
Osório	0,01-0,13 (<LD)*	0,94-5,61 (2,06)*	0,78-8,65 (0,78)*
Viamão	0,01-0,10 (<LD)*	0,00-8,39 (<LD)*	<LD-6,95 (<LD)*
Palmares do Sul	<LD-0,12 (<LD)*	<LD-15,80 (<LD)*	<LD-43,66(<LD)*
Mostardas	0,01-0,17 (0,03)*	1,84-6,49 (2,38)*	0,87-4,98 (1,64)*
São José do Norte	0,01-0,07 (<LD)*	2,04-4,44 (2,39)*	1,97-3,82 (0,67)*
Tavares	<0,01-0,06 (<LD)*	2,46-3,71 (<LD)*	1,03-4,80 (<LD)*
Barra do Ribeiro	<LD-0,17 (<LD)*	<LD-11,37 (<LD)*	<LD-4,65 (<LD)*
Tapes	<LD-0,13 (0,01)*	1,3-25,13 (2,86)*	0,93-8,41 (1,86)*
Camaquã	<LD-0,11 (0,02)*	2,14-22,36 (2,14)*	1,95-6,77 (2,43)*
Arambaré	0,01-0,06 (0,02)*	2,34-8,80 (1,96)*	1,17-5,90 (1,80)*
São Lourenço do Sul	<LD-0,17 (0,02)*	<LD-0,17 (1,88)*	<LD-4,65 (0,41)*
Pelotas	0,02-0,15 (0,02)*	1,45-8,7 (1,45)*	0,32-5,55 (0,32)*
Capão do Leão	0,05-0,06 (0,03)*	0,06-7,92 (3,11)*	3,57-4,51 (2,24)*
Rio Grande	0,02-0,07 (<LD)*	2,45-7,5 (<LD)*	1,52-5,58 (<LD)*

( )\* Concentrações apresentadas entre parênteses referem-se aos teores quantificados nas amostras testemunhas. Limite de detecção do aparelho (LD) para Cd, Cr e Pb: <0,01 mg kg<sup>-1</sup>

**Tabela 2.** Valores orientadores para os teores de Cd, Cr e Pb para solos (Resolução CONAMA 420/09)

Substâncias	Referência de Qualidade (VRQ)	Prevenção (VP)	Investigação		
			Agrícola PMax	Residencial	Industrial
-----mg kg <sup>-1</sup> -----					
Cádmio (Cd)	<0,5	1,3	3	8	20
Cromo (Cr)	40	75	150	300	400
Chumbo Pb)	17	72	180	390	900

<sup>(1)</sup> Para comparar os valores orientadores, utilizar as recomendações dos métodos 3050B ou 3051A da USEPA-SW-846 ou outro procedimento equivalente, para digestão ácida de amostras de solos na determinação das substâncias inorgânicas por técnicas espectrométricas.

Conforme a Resolução 420/09 do Conama (2009), os teores de Cd, Cr e Pb em todos os municípios amostrados são menores do que os teores permissíveis para áreas agrícolas (Tabela 1).

A Resolução nº 420/2009 do Conama infere o valor de referência de qualidade do solo (VRQ) como a concentração de determinada substância que define a qualidade natural do solo, sendo determinado com base em interpretação estatística de análises físico-químicas de amostras de diversos tipos de solos. Este parâmetro deve ser utilizado como referência nas ações de prevenção da poluição do solo. Segundo o Art. 15º desta mesma resolução, as concentrações de substâncias químicas no solo resultantes da aplicação ou disposição de resíduos e efluentes não poderão ultrapassar os respectivos valores de prevenção (VPs) (Tabela 2). VP pode ser melhor definido como a concentração do valor limite de determinada substância no solo, tal que ele seja capaz de sustentar as suas funções principais. Na mesma resolução, o artigo 3º destaca que a proteção do solo deve ser realizada de maneira preventiva, a fim de garantir a manutenção da sua funcionalidade ou, de maneira corretiva, visando restaurar sua qualidade ou recuperá-la de forma compatível com os usos previstos.

A obtenção de valores de referência de elementos-traço, embora incipiente no Brasil, já está estabelecida em países como Estados Unidos, Alemanha, França e, principalmente, na Holanda, que desenvolvem

respeitáveis políticas ambientais para proteção do solo e das águas subterrâneas, por meio de suas agências de proteção ambiental.

Na Europa, a partir do conceito de multifuncionalidade do solo, estabelecido em 1987, por meio da promulgação da Lei de Proteção do Solo (Soil Protection Act) pelo Governo Federal Holandês, o Ministério de Planejamento Territorial e Meio Ambiente da Holanda (VROM), em atendimento a essa lei, publicou em 1994 a proposta de valores de qualidade do solo e da água subterrânea. Esta lei foi referência para a criação de valores orientadores pela CETESB (2005) e CONAMA (2009), órgãos de proteção ambiental do estado de São Paulo e do Brasil, respectivamente.

O maior problema apresentado no estabelecimento destes valores orientadores do CONAMA/2009, até o presente momento, é que não são levados em consideração os atributos dos solos avaliados, ou seja, não levam em consideração o teor de argila, a CTC, o teor de matéria orgânica, a presença de óxidos, entre outros atributos de cada região estudada. Esta deficiência de dados torna muito incompleto e suscetível os valores orientadores, pois sabe-se da diferença de solos mais argilosos e arenosos quanto à adsorção dos elementos-traço nos solos (Alloway, 1993).

A ocorrência natural de elementos-traço em solos depende, principalmente, do material de origem sobre o qual o solo foi formado, dos processos de formação, da composição e proporção dos componentes de sua fase sólida (Alloway, 1993). A relação do solo com o material de origem é bastante evidenciada quando o primeiro é formado "in situ" sobre a rocha, tornando-se menos expressiva nos solos originados sobre materiais previamente intemperizados. Solos com origem em rochas básicas, naturalmente mais ricos em elementos-traço, apresentam maiores teores desses elementos, quando comparados com aqueles formados sobre granitos, gnaisses, arenitos e siltitos (Fadigas et al., 2002). Segundo Streck et al. (2008), os solos das Planícies Costeiras, analisados neste estudo, estão situados em cotas baixas, apresentam limites inferior a 40 metros de altitude e são formados por materiais inconsolidados (areia, silte e argilas). Caracterizam-se por ser a província geomorfológica mais jovem do RS. Estas características corroboram com as baixas concentrações encontradas nos solos estudados neste trabalho.

Poucos são os estudos de quantificação de elementos-traço em áreas agrícolas no Brasil. Fernandes et al. (2006), avaliaram a presença dos elementos Cd, Pb, Cu, Cr, Fe, Mn, Mo, Ni e Zn, em solos agrícolas, água de irrigação e alguns vegetais, provenientes de áreas olerícolas do Estado de Minas Gerais. A maior parte das amostras de solo apresentou baixos teores totais de elementos-traço, não indicando acumulação desses elementos nos solos estudados.

Em estudos de teores naturais de elementos-traço em solos brasileiros, realizados por Fadigas et al. (2006), dentre eles solos originados predominantemente de sedimentos terciários e quaternários, apresentaram valores de referência de 0,3 a 1,0 mg Cd kg<sup>-1</sup>, de 19 a 65 mg Cr kg<sup>-1</sup> e de 3 a 40 mg Pb kg<sup>-1</sup> de solo. No Japão, foram coletadas 20 amostras de solos de lavouras de arroz, na região de Aomori e, 33 elementos foram determinados por análise por ativação de nêutrons e por ICP-AES. Os teores mínimos e máximos de Cd, Pb e Cr foram de 0.16 – 0.53 mg Cd kg<sup>-1</sup>, 9.2 – 44 mg Cr kg<sup>-1</sup> e 16 – 80 mg Pb kg<sup>-1</sup> de solo, respectivamente (Tsukada et al., 2007). Os teores de Cd nos solos, em ambos os estudos, estão próximos às concentrações de Cd encontradas neste estudo, demonstrando, portanto, a baixa concentração deste elemento nos solos. As concentrações naturais de Cd no solo são geralmente baixas, estando avaliadas em 0,15 – 0,2 mg kg<sup>-1</sup> (Souza et al., 1998). Os teores de Cr e de Pb quantificados nas lavouras das planícies costeiras do RS foram inferiores aos teores encontrados por estes autores.

É necessário considerar que, embora as concentrações de Cd, de Cr e de Pb estejam abaixo dos valores de referência, indicando que os solos não estão contaminados, os solos das regiões das Planícies Costeiras apresentam características físicas e químicas que tornam estes elementos mais biodisponíveis para as plantas. Nas Planícies Costeiras Interna e Externa cerca de 90% dos solos têm menos de 25% de argila. A baixa porcentagem de argila nos solos cultivados com arroz irrigado se relaciona com os baixos teores de matéria orgânica (IRGA, 2010). No caso de solos arenosos, onde os teores de argila, óxidos, matéria orgânica e CTC são baixos, os elementos-traço apresentam-se principalmente na forma trocável ou mesmo solúveis.

Desta forma, a dinâmica dos elementos-traço em solos pode variar com as propriedades químicas, físicas e biológicas, o que afeta a fitodisponibilidade destes elementos. A fitodisponibilidade é determinada pela interação com os colóides e os componentes dos solos, bem como com a duração do contato com a superfície dos elementos. Isso indica que o crescimento de plantas em diferentes solos, com a mesma concentração total do elemento-traço, pode variar em suas respostas fitotóxicas, devido às diferenças entre solos na sua capacidade sortiva (Kabata-Pendias e Pendias, 2001).

Em geral, os valores da legislação que indicam a necessidade de intervenção ou de investigação das áreas suspeitas de contaminação consideram os teores totais dos elementos-traço nos solos. Alguns autores questionam a validade de usar teores totais para fins regulatórios, tendo em vista que, na maioria dos casos de contaminação e avaliação de risco, o que realmente interessa é a fração biodisponível (Borges Junior et al., 2008). No entanto, não há um método universal para avaliar a biodisponibilidade dos elementos-traço, de modo que a fração disponível pode ser muito diferente quando se considera a absorção por planta (Marques et al., 2002). Diante disso, os autores consideram que os teores totais continuarão sendo considerados para fins regulatórios.

#### **4.6 Conclusões**

Os solos das Planícies Costeiras apresentam concentrações inferiores às indicadas na legislação vigente no Brasil quanto aos valores orientadores de elementos-traço nos solos. Estes resultados não confirmam a hipótese deste estudo que, com aplicações sucessivas de insumos agrícolas nestes solos as concentrações dos elementos-traço estariam acima das consideradas como seguras para fins agrícolas.

## **5. ESTUDO 2 - ELEMENTOS-TRAÇO NO SOLO, NAS ÁGUAS E NAS PLANTAS DE UMA LAVOURA DE ARROZ IRRIGADO NO MUNICÍPIO DE CACHOEIRINHA-RS**

### **5.1 Justificativa e relevância**

Há uma crescente preocupação com a contaminação de elementos-traço em solos, águas e atmosfera. A poluição destes compartimentos é atribuída a fatores naturais e antrópicos, sendo este último o maior responsável, uma vez que as atividades humanas geram diariamente inúmeros subprodutos nas diversas atividades de produção. As atividades agrícolas empregam grandes quantidades de agroquímicos e fertilizantes com os objetivos de proteger as culturas contra pragas e aumentar a produção de grãos (Kabata-Pendias e Pendias, 2001). No entanto, estes insumos podem conter impurezas em suas formulações, como por exemplo, os elementos-traço Cd, Cr, Mo, Pb, U, V, Zn presentes nos fertilizantes, e os elementos-traço Cu, As, Hg, Pb, Mn, Zn presentes nos agroquímicos (Lemes, 2001). Os elementos-traço não são degradáveis e podem permanecer no solo por um longo tempo. Eles têm o potencial de serem transferidos para as culturas e afetam a população pela entrada na cadeia alimentar (Baker e Brooks, 1989).

A agricultura irrigada consome cerca de 70% da água derivada de rios, lagos e aquíferos (Christofidis, 2008). A qualidade da água refere-se às suas características físicas, químicas e biológicas, que são resultantes de fenômenos naturais e da atuação do homem, podendo-se afirmar que a qualidade da água em uma determinada propriedade agrícola é função, principalmente, do uso e da ocupação do solo na bacia hidrográfica a que ela pertence.

A adequação da água para irrigação depende de sua qualidade e também das condições de uso, assim, a mesma qualidade de água pode ser considerada perfeitamente adequada a certo tipo de solo ou cultura, mas inadequada para outros (Merten e Minella, 2002).

A orizicultura é muito dependente da qualidade da água de irrigação. A importância da qualidade da água de irrigação está mais diretamente associada à salinidade e à toxicidade. A toxicidade decorre da absorção pelas plantas de certos íons nocivos, devido à contaminação das águas, que tem se agravado consideravelmente com o avanço da civilização, acarretando vários problemas ambientais, dentre esses, a grande liberação de elementos-traço para os rios (Jordão et al., 1999). Esses elementos podem expressar seu potencial poluente diretamente nos organismos do solo, pela disponibilidade às plantas em níveis fitotóxicos, além da possibilidade de transferência para a cadeia alimentar (Kabata-Pendias e Pendias, 2001; Soares et al., 2005).

Um exemplo bastante marcante de contaminação por Cd em plantas de arroz consumidas com alimentos ocorreu no Japão, na região do Jintsu Vale do Rio, onde o arroz era irrigado com a água de um rio contaminado por cádmio procedente das operações de mineração e de fundição de zinco, localizadas a montante do rio. Centenas de pessoas contraíram uma doença degenerativa dos ossos chamada Itai – Itai (dói – dói, traduzido para português), que recebeu este nome por causa da dor aguda nas articulações. Nesta doença, os íons de  $\text{Ca}^{+2}$  dos ossos são substituídos por íons de  $\text{Cd}^{+2}$ , em virtude de possuírem a mesma carga e exatamente o mesmo tamanho (Baird, 1999).

A importância da preservação dos solos e recursos hídricos tem levado à necessidade de monitorar e controlar a contaminação destes ambientes e os elementos-traço estão entre os contaminantes mais tóxicos e persistentes do ambiente aquático. Portanto, suas fontes, transporte e destino precisam ser avaliados.

Diante do exposto, é importante um estudo que avalie as concentrações de elementos-traço nos diferentes compartimentos da lavoura de arroz irrigado por alagamento de Cachoeirinha-RS, visto que o cultivo de arroz é feito há muito anos e nunca houve a quantificação destes elementos nesta área.



## 5.2 Hipóteses do estudo

Devido ao longo período de cultivo de arroz irrigado por alagamento na área da lavoura de Cachoeirinha-RS, as hipóteses deste estudo são:

- a) os teores de Cd, Cr e Pb no solo e no ponto de captação de água da lavoura de arroz irrigado estão acima dos teores permitidos por legislação;
- b) há um aumento nas concentrações de Cd, Cr e Pb na lâmina de água em relação à água de captação;
- c) as plantas absorvem o Cd, o Cr e o Pb e translocam para os grãos;
- d) a água de drenagem apresenta altas concentrações de Cd, Cr e Pb.

## 5.3 Objetivos do estudo

Os objetivos deste estudo são:

- a) quantificar as concentrações de Cd, Cr e Pb no solo utilizado para o cultivo de arroz irrigado;
- b) quantificar as concentrações de Cd, Cr e Pb no ponto de captação de água utilizada na irrigação da lavoura de arroz;
- b) quantificar as concentrações de Cd, Cr e Pb na lâmina de água da lavoura de arroz irrigado;
- c) quantificar as concentrações de Cd, Cr e Pb nas raízes, colmo, folhas e grãos das plantas de arroz cultivadas na lavoura em estudo;
- d) quantificar as concentrações de Cd, Cr e Pb na água de drenagem, que foi utilizada na irrigação da lavoura de arroz.

## 5.4 Material e métodos

### 5.4.1 Água da lavoura de arroz irrigado

O estudo foi realizado na Estação Experimental do Instituto Rio Grandense do Arroz (IRGA), no município de Cachoeirinha – RS. Para atingir os objetivos propostos, foram coletadas amostras de água em três pontos de captação para irrigação no Rio Gravataí (Figura 3), seis pontos aleatórios da lâmina de água da lavoura (Figura 4) e seis pontos da água de drenagem ao

longo da saída para o Rio Gravataí (Figura 5). No momento da coleta, foram determinados os valores de pH, de condutividade elétrica e a temperatura da água nos pontos amostrados (Tabela 3).

As amostras foram coletadas em frascos com capacidade para armazenar 500 mL de amostra e foi acrescentado, com conta gotas, ácido nítrico P.A. até a amostra se tornar extremamente ácida (medida com fitas de pH), para a conservação e posterior pré-tratamento.

As amostras foram conservadas em caixa de isopor com gelo para serem levadas ao laboratório. Os seguintes cuidados foram tomados no momento da coleta: a) não tocar na parte interna da tampa e do frasco; b) não colocar a tampa no chão ou sobre outra superfície; c) não falar, tossir ou espirrar próximo ao frasco de coleta; d) não encher o frasco até o gargalo, deixar cerca de 2 a 3 centímetros para homogeneização da amostra; e) fechar o frasco imediatamente após a acidificação; f) acondicionar adequadamente os frascos na caixa térmica com gelo; g) encaminhar as amostras ao laboratório no menor tempo possível para acondicionar em refrigeração.

#### **5.4.2 Preparo da amostra de água**

Com auxílio de uma proveta graduada, transferiu-se 50 mL da amostra homogeneizada (ou um volume adequado) para um béquer de 250 mL (ou de volume adequado) e adicionou-se 1 mL de ácido nítrico ( $\text{HNO}_3$ ) concentrado. Após, foi preciso aquecer, lentamente, em chapa de aquecimento (sem ferver) e reduzir o volume até, aproximadamente, 15 mL (foi retirado do aquecimento antes que ocorresse a precipitação); Em seguida, a amostra foi resfriada e acrescentou-se mais 1 mL de ácido nítrico ( $\text{HNO}_3$ ) concentrado (ou proporcional a metade do volume correspondente a 4% em relação ao volume de amostra), cobriu-se com vidro de relógio e aqueceu-se novamente em chapa de aquecimento, para ocorrer refluxo da amostra. A digestão está completa quando houver condensação nas paredes do béquer (o ácido escorre em fios) e a solução estiver clara ou levemente colorida, sem turbidez; Após, retirou-se as amostras da chapa, aguardou-se o resfriamento e filtrou-se a amostra, transferindo para balão volumétrico de 50 mL (ou de volume adequado), lavando o vidro de relógio, as paredes do béquer e o funil com

água Milli-Q, recolhendo-os no balão. Por fim, completou--se o volume com água Milli-Q.

#### **5.4.3 Análise química das águas**

As análises das águas foram realizadas seguindo o procedimento técnico da Central Analítica da FEEVALE, que visa determinar a concentração de metais em águas e efluentes por espectrometria de absorção atômica de chama (APÊNDICE 19). Este procedimento segue as recomendações do Standard Methods for Examination of Water and Wastewater (APHA, 1998).

#### **5.4.4 Solo da lavoura de arroz irrigado**

As amostras foram coletadas na camada superficial dos solos (0-20 cm), seguindo o método de coletas de amostras de solos da Embrapa (1995).

O solo encontra-se na área de abrangência do Instituto Rio-Grandense de Arroz Irrigado, no município de Cachoeirinha/RS. O solo no local é classificado como Gleissolo Háptico Distrófico típico (Embrapa, 2006a).

#### **5.4.5 Análise química do solo**

Após a coleta, as amostras foram secas ao ar e tamisadas em peneira com malha de 4 mm. Atributos selecionados dos solos foram determinados no Laboratório de Análise de Solos da Faculdade de Agronomia, da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, conforme metodologia descrita em Tedesco et al. (1995).

A determinação dos teores de Cd, Cr e Pb nas amostras de solo foi feita por digestão ácida USEPA 3050B (USEPA, 1996), como pode ser observado na metodologia do Capítulo II. A quantificação dos teores de Cd, Cr e Pb nos extratos foi feita por ICP-OES, no Laboratório de Solos da Faculdade de Agronomia, da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

**Tabela 3.** Valores de pH, condutividade elétrica (CE) e temperatura da água nos pontos de captação para irrigação, na lâmina de água e na água de drenagem para o Rio Gravataí.

Pontos coletados	pH (água)	CE dS m <sup>-1</sup>	Temperatura °C
Água de captação (Rio Gravataí)			
P1AC	8,1	1,16	21
P2AC	8,1	1,16	21
P3AC	8,2	1,13	22
Lâmina de água			
P1AL	7,1	0,94	23
P2AL	6,8	0,98	23
P3AL	6,9	0,88	24
P4AL	7,5	1,02	23
P5AL	7,5	1,04	24
P6AL	7,4	0,97	22
Água de drenagem			
P1AD	7,6	0,98	23
P2AD	7,3	0,88	23
P3AD	7,4	0,85	24
P4AD	7,2	0,85	23
P5AD	7,1	0,89	23
P6AD	7,5	0,84	23

Legenda dos pontos: P1AC: Ponto 1 de coleta de água de captação do rio; P2AC: Ponto 2 de coleta de água de captação do rio; P3AC: Ponto 3 de coleta de água de captação do rio; P1AL: Ponto 1 de coleta da lâmina de água; P2AL: Ponto 2 de coleta da lâmina de água; P3AL: Ponto 3 de coleta da lâmina de água; P4AL: Ponto 4 de coleta da lâmina de água; P5AL: Ponto 5 de coleta da lâmina de água; P6AL: Ponto 6 de coleta da lâmina de água. P1AD: Ponto 1 de coleta de água de Drenagem Geral das Lavouras; P2AD: Ponto 2 de coleta de água de Drenagem Geral das Lavouras; P3AD: de coleta de água de Drenagem Geral das Lavouras; P4AD: Ponto 4 de coleta de água de Drenagem Geral das Lavouras; P5AD: Ponto 5 de coleta de água de Drenagem Geral das Lavouras; P6AD: Ponto 6 de coleta de água de Drenagem Geral das Lavouras.



**Figura 3.** Pontos de captação de água (Rio Gravataí) para lavoura de arroz irrigado no Instituto Rio Grandense do Arroz (IRGA).



**Figura 4.** Área de coleta das plantas de arroz irrigado e da lâmina de água no Instituto Rio Grandense do Arroz (IRGA).



**Figura 5.** Pontos de coleta da água de drenagem da lavoura de arroz irrigado no Instituto Rio Grandense do Arroz (IRGA).

### 5.4.6 Plantas de arroz da lavoura

O local da lavoura para coleta das plantas foi dividido em seis áreas (Figura 6), onde foram coletadas três plantas (raiz, colmo, folhas e grãos) em cada área, classificando-as, desta forma, como subamostras.



**Figura 6.** Áreas subdivididas para coleta das plantas de arroz (raízes, colmo, folhas e grãos), localizadas no Instituto Rio-Grandense de Arroz (Irga), no município de Cachoeirinha-RS (Imagem: Google Earth, 2012).

As plantas foram coletadas no estágio de maturação, logo após o enchimento de grãos.

A determinação dos teores de Cd, Cr e Pb nos tecidos das plantas foi feita por digestão ácida USEPA 3050B (USEPA, 1996). A quantificação dos teores de Cd, Cr e Pb nos extratos foi feita por ICP-OES, no Laboratório de Solos da Faculdade de Agronomia, da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

## 5.5 Resultados e discussão

### 5.5.1 Águas da lavoura

A quantificação das concentrações de Cd, Cr e Pb nas águas da lavoura encontram-se na Tabela 4.



Para o Pb e Cr, as concentrações permaneceram abaixo do limite de detecção do aparelho (Pb  $<0,02 \text{ mg L}^{-1}$  e Cr  $<0,004 \text{ mg L}^{-1}$ ), indicando a baixa concentração destes elementos neste compartimento (Tabela 4). Esta baixa concentração encontrada indica que a água de irrigação desta lavoura não oferece risco quanto a entrada de Cr e de Pb nos solos e para a absorção pelas plantas. Segundo a Resolução do CONAMA nº 357/05, publicada em 18/03/2005, que revoga a Resolução CONAMA nº 20/86, os padrões de Pb e Cr total estão mais restritivos. As concentrações dos elementos-traço, nesta resolução, são definidas pela classe em que a água está inserida. A lavoura de arroz irrigado da Estação Experimental de arroz (Irga), enquadra-se na Classe 3 das águas doces. Esta classe de água é destinada: a) ao abastecimento para consumo humano, após tratamento convencional ou avançado; b) à irrigação de culturas arbóreas, cerealíferas e forrageiras; c) à pesca amadora; d) à recreação de contato secundário e; e) à dessedentação de animais. Para a Classe 3, as concentrações de Cd, Cr e Pb encontram-se na Tabela 5.

Os resultados para Cr e Pb encontrados nesta pesquisa corroboram com os dados do relatório de índice de qualidade de água e de teores de elementos-traço (referente ao período de 1992-2011) em diferentes pontos do Rio Gravataí divulgado pela Fepam (FEPAM, 2012). Este relatório da FEPAM mostra que as concentrações de elementos-traço, na maioria das análises, também, não ultrapassaram aos teores permitidos para a Classe 3, minimizando os problemas para as captações de água (Figura 7). É destacado ainda, nas conclusões do relatório, que estão ocorrendo melhorias na qualidade das águas no ponto de amostragem de Cachoeirinha, onde foram coletadas as amostras de água de captação da lavoura em estudo. A melhoria na qualidade se deve provavelmente à operação de duas Estações de Tratamento de Esgotos – ETEs implantadas pela CORSAN em Gravataí (Parque dos Anjos) e em Cachoeirinha.

**Tabela 4.** Concentrações de Cd, Cr e Pb dos pontos coletados na água de captação para irrigação, na lâmina de água e na água de drenagem para o Rio Gravataí.

Pontos de coleta	Cd	Pb	Cr
	-----mg L <sup>-1</sup> -----		
P1AC	0,09	<LD	<LD
P2AC	0,07	<LD	<LD
P3AC	0,18	<LD	<LD
P1AL	0,07	<LD	<LD
P2AL	0,02	<LD	<LD
P3AL	0,13	<LD	<LD
P4AL	0,07	<LD	<LD
P5AL	0,02	<LD	<LD
P6AL	0,16	<LD	<LD
P1AD	0,11	<LD	<LD
P2AD	0,11	<LD	<LD
P3AD	0,18	<LD	<LD
P4AD	0,07	<LD	<LD
P5AD	0,16	<LD	<LD
P6AD	0,07	<LD	<LD

Média de três determinações.

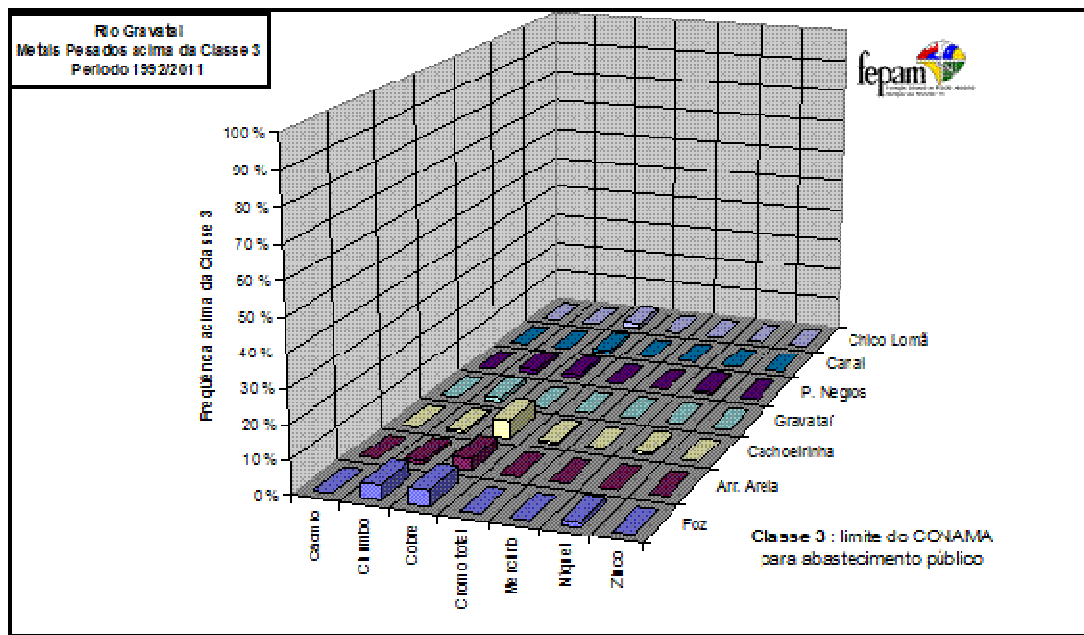
Limite de Detecção do aparelho (LD): Cd <0,002 mg L<sup>-1</sup>, Pb <0,02 mg L<sup>-1</sup>, Cr <0,004 mg L<sup>-1</sup>

Legenda dos pontos: P1AC: Ponto 1 de coleta de água de captação do rio; P2AC: Ponto 2 de coleta de água de captação do rio; P3AC: Ponto 3 de coleta de água de captação do rio; P1AL: Ponto 1 de coleta da lâmina de água; P2AL: Ponto 2 de coleta da lâmina de água; P3AL: Ponto 3 de coleta da lâmina de água; P4AL: Ponto 4 de coleta da lâmina de água; P5AL: Ponto 5 de coleta da lâmina de água; P6AL: Ponto 6 de coleta da lâmina de água. P1AD: Ponto 1 de coleta de água de Drenagem Geral das Lavouras; P2AD: Ponto 2 de coleta de água de Drenagem Geral das Lavouras; P3AD: de coleta de água de Drenagem Geral das Lavouras; P4AD: Ponto 4 de coleta de água de Drenagem Geral das Lavouras; P5AD: Ponto 5 de coleta de água de Drenagem Geral das Lavouras; P6AD: Ponto 6 de coleta de água de Drenagem Geral das Lavouras.

**Tabela 5.** Limites máximos de tolerância para contaminantes inorgânicos (Cd, Cr e Pb) em águas superficiais em águas classificadas como Classe 3. Fonte: CONAMA 357/05 (2012).

Órgão regulamentador	Cd	Cr	Pb
	-----mg L <sup>-1</sup> -----		
CONAMA 357/05	0,01	0,05	0,033





**Figura 7.** Percentual de análises de elementos-traço acima da Classe 3 do CONAMA 357/05. Fonte: FEPAM (2012).

Para o elemento Cd, todos os pontos coletados enquadram-se acima dos teores permissíveis pelo CONAMA (Tabela 5). Entre os elementos-traço, o Cd e o Zn apresentam maior mobilização, migrando para maiores profundidades em solo ou para a coluna de água em ambientes aquáticos (Machado et al., 2004). O Cd, por somente existir em água no estágio de oxidação  $+2$ , não apresenta grande influência pelo potencial de oxi-redução da água (Callahan et al., 1979). O Cd na forma iônica aparenta ser a forma mais tóxica e se constitui na forma prevalente em ambientes aquáticos de baixa salinidade (Machado et al., 2004).

Furtado et al. (2000) avaliando as concentrações de elementos-traço em amostras da Bacia hidrográfica do Rio D'uma, em Santa Catarina, encontraram altos teores de Cd nas águas com influência da cultura de arroz. Estas altas concentrações também foram detectadas nos locais onde ocorre a captação de água para o abastecimento da cidade de Imbituba/SC. Na lavoura de Cachoeirinha, avaliada neste estudo, as concentrações de Cd na água de captação também foram altas. Outros trabalhos de Furtado e Santos (1994), em amostras de sedimentos de corrente da região sul de Santa Catarina,

constataram a presença de teores significativos de Cr, Cd, Co, Zn, Hg e Ni em área de rizicultura.

Neste estudo, em que as concentrações de Cd encontradas nas águas estão acima dos limites da legislação, não significa que o cultivo teve influência nestas concentrações, visto que a água de captação apresentava altos teores do elemento e a água de drenagem apresentou os mesmos níveis de concentração, não tendo alterações dentro da lavoura.

Determinar as concentrações no sistema solo-água-planta da área em estudo é importante, visto que na lavoura avaliada foram detectadas concentrações de Cd maiores do que às permitidas pela legislação e, desta forma, faz-se necessário avaliar se houve contaminação dos solos e/ou absorção pelas plantas. As águas subterrâneas possivelmente não apresentam risco significativo devido às características deste solo. Os solos cultivados com arroz irrigado no Rio Grande do Sul apresentam drenagem naturalmente deficiente, decorrente de alta densidade, baixa porosidade total, alta relação micro/macroporos, presença de camada subsuperficial com baixa permeabilidade e de relevo plano a suave ondulado (EMBRAPA, 2009). A drenagem deficiente está relacionada não apenas à topografia plana, mas principalmente à ocorrência de horizontes argilosos, que, por apresentarem uma condutividade hidráulica muito baixa, dificultam a percolação da água no perfil. Estas características, normalmente desfavoráveis para outros cultivos, tornam-se adequadas para o cultivo do arroz irrigado, facilitando a manutenção de uma lâmina de água sobre a superfície do solo (Rauber, 2004).

### **5.5.2 Solo da lavoura**

Os atributos e as concentrações totais de Cd, Cr e Pb nas amostras do Gleissolo (Embrapa, 2006a), são apresentadas na Tabela 6.

Como pode ser observado, as concentrações de Cd e Cr estão dentro dos valores de referência de qualidade (VRQ) utilizados pela Resolução do CONAMA (2009) (Tabela 2), utilizada como comparação. A concentração de Pb apresentou-se acima do VRQ, no entanto, o teor encontrado não apresenta necessidade de investigação, considerando os solos agrícolas, em que é necessário a investigação somente em teores superiores a  $180 \text{ mg kg}^{-1}$ , como visto na Tabela 2 .

**Tabela 6.** Atributos e concentrações de elementos-traço em amostra do Gleissolo coletado no município de Cachoeirinha-RS, na Estação Experimental do IRGA (camada de 0-20 cm de profundidade).

Argila	pH (H <sub>2</sub> O)	P	K	M.O.	Al troçável	Ca troçável	Mg troçável	CTC (pH 7,0)	Cd	Cr	Pb
g kg <sup>-1</sup>		mg dm <sup>-3</sup>		g kg <sup>-1</sup>	-----cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> -----				-----mg kg <sup>-1</sup> -----		
120	6,4	32	41	19,1	0,1	2,1	1,2	9,1	<0,02	9,6	18,0

Resultados expressos no material seco a 45°C.

Média de três determinações.

Extração ácida EPA 3050b/ICP-OES

Limite de Detecção do aparelho (LD): Cd <0,02 mg kg<sup>-1</sup>, Pb <0,2 mg kg<sup>-1</sup>, Cr <0,04mg kg<sup>-1</sup>

As concentrações de Cd no solo são originalmente baixas e encontram-se na faixa de 0,15 – 0,2 mg kg<sup>-1</sup> (Souza et al., 1998). O Pb é o menos móvel dos elementos-traço, ocorrendo normalmente em todos os solos, variando de 1 a 200 mg kg<sup>-1</sup>, sendo que em geral os solos apresentam menos que 20 mg kg<sup>-1</sup> de Pb extraído por DTPA-TEA (Wallace e Wallace, 1994). O teor médio de Cr nos solos varia de 100 e 300 mg kg<sup>-1</sup> (Galvão e Corey, 1987). Portanto, as concentrações de Cd, Cr e Pb quantificadas no solo da lavoura de arroz irrigado da Estação Experimental do IRGA podem ser consideradas originárias do próprio material de origem do solo. A hipótese de que as concentrações destes elementos, principalmente de Cr e de Pb, sejam naturais deve-se ao fato de que a entrada destes elementos não ocorreu pela água de irrigação, onde os teores foram muito baixos e não apresentaram risco à lavoura (Tabela 4). Do mesmo modo, as concentrações encontradas estão na faixa de normalidade de elementos-traço provenientes do material de origem, conforme observado na literatura citada.

Esta concentração natural do elemento-traço no solo é influenciada pelo material de origem, porém não reflete unicamente este fator, e sim resulta da ação conjunta dos fatores e processos de formação do solo (Biondi, 2010). Apesar de incipiente, alguns grupos de pesquisa do Brasil, na última década, direcionaram suas pesquisas à obtenção de teores naturais de elementos-traço nos solos, com o objetivo de regionalizar os valores orientadores para estes elementos (Campos et al., 2003; Oliveira e Costa, 2004; Fadigas et al., 2006; Pierangeli et al., 2009; Caires, 2009; Biondi, 2010).

Na Grã-Bretanha, um estudo de longa duração, aplicando fertilizantes nos solos contendo Cd em sua composição, não mostrou qualquer acúmulo de Cd no solo (Richards et al., 1998). Da mesma forma, em estudos realizados em campo durante 15 anos na Suécia, o efeito do Cd adicionado via fertilizantes fosfatados foi menor em relação à variação causada por fatores não controlados na pesquisa, como por exemplo, a precipitação atmosférica de Cd (Ribeirinho, 2010). Estudando a região sudoeste do Estado de Goiás, em especial a micro-bacia do Rio Doce, que é produtora de grãos, Lima et al. (2010) também tiveram como objetivo a avaliação de elementos-traço (Zn, Cu, Cr, Mn, Fe, Ni, Cd, Pb e Al) em águas e sedimento, devido ao fato da região em estudo não apresentar dados referentes à contaminação por elementos-traço. Dentre os elementos analisados, somente Al e Fe foram detectados nas amostras de água e Mn, Al e Fe, para o sedimento.

No entanto, uma vez no ambiente, os elementos-traço tendem a se acumular, resultando no aumento de seus níveis. No solo, os elementos-traço, geralmente, encontram-se na camada de 0 – 20 cm de profundidade, que é a mais utilizada para fins agrícolas. Esta situação se agrava quando a quantidade do elemento-traço acumulada excede a capacidade de retenção do solo, tornando-os facilmente absorvidos pelas plantas (Webb et al., 2001).

### **5.5.3 Plantas de arroz da lavoura**

As plantas de arroz, o terceiro compartimento analisado nesta lavoura, assim como as águas e o solo, apresentaram baixas concentrações em seus diferentes tecidos (Tabela 7). Para Cd, de uma maneira geral, as concentrações encontraram-se abaixo do limite de detecção do aparelho de ICP-OES ( $<0,02 \text{ mg kg}^{-1}$ ). Os teores que foram detectados apresentaram-se baixos ( $0,15$  a  $0,60 \text{ mg kg}^{-1}$ ), não oferecendo fitotoxicidade às plantas e, nos grãos em concentrações inferiores às permitidas pela legislação (CODEX ALIMENTARIUS, 1995; ANVISA, 1965) (Capítulo IV, Tabela 12).

Para Cr e Pb, não houve translocação para os grãos, onde os teores não foram detectados pelo aparelho (Tabela 7).

Em estudos de fitotoxicidade, utilizando diversas plantas, Kabata-Pendias e Pendias (2001) indicaram concentrações mínimas e máximas de

elementos-traço na parte aérea das plantas (Tabela 8). Considerando estas concentrações, os teores de Cd, Cr e Pb encontrados nas partes aéreas das plantas de arroz desta lavoura em estudo (Tabela 7) possivelmente não apresentam fitotoxicidade.

Diferentemente do resultado em que não houve a contaminação do solo, obtido neste estudo, na Espanha foi feito um experimento, por Madejón et al. (2011), em que cultivaram diferentes culturas comestíveis em um solo com o nível de contaminação alto por elementos-traço. Houve diferenças no acúmulo dos elementos-traço entre as culturas, mas nenhum excedeu concentrações legais em partes comestíveis e os fatores de transferência solo-planta foram baixos para todos os elementos e culturas. Neste cenário, observou-se que mesmo em condições de contaminação do solo, muitas vezes, a transferência para as plantas não ocorre de forma expressiva, não oferecendo risco ao ambiente e ao consumo dos elementos-traço via alimentos contaminados.

A transferência de elementos-traço dos solos às plantas é dependente de três fatores: da quantidade total de elementos disponíveis na solução (fator quantidade), da atividade dos íons na solução do solo (fator intensidade) e da taxa de transferência do elemento da fase sólida às fases líquidas e às raízes da planta (Brüemmer et al., 1986). Esta afirmação corrobora com os dados encontrados neste estudo, onde as concentrações de Cd, Cr e Pb dos solos e das plantas foram baixas, indicando que se a concentração total do solo não é expressiva, a fração biodisponível às plantas se torna ainda menor, não havendo altas concentrações na planta.

## **5.6 Conclusões**

Contrariando as hipóteses deste estudo, as concentrações de Cd, Cr e Pb nos solos foram baixas, permanecendo dentro dos valores de referência de qualidade utilizados pelo órgão regulamentador CONAMA 420/09.

Nas águas da lavoura as concentrações de Cd, desde a entrada (água de captação) à saída (água de drenagem) foram maiores que as indicadas pelo CONAMA 357/05, no entanto não houve um aumento nas concentrações da lâmina de água em relação à água de captação, indicando que o cultivo de arroz não interferiu nos teores deste elemento. A concentração

dos elementos Cr e Pb estiveram abaixo do limite de detecção do aparelho de ICP-OES.

Nas plantas, as concentrações de Cd, de Cr e de Pb nos grãos não foram detectadas pelo aparelho de ICP-OES e/ou se mantiveram abaixo dos limites permissíveis pela Anvisa (1965).

**Tabela 7.** Concentrações de Cd, de Cr e de Pb nas raízes, nos colmos, nas folhas e nos grãos das plantas de arroz da lavoura de arroz irrigado do município de Cachoeirinha/RS.

Partes da planta de arroz	Cd	Pb		Cr
		mg kg <sup>-1</sup>		
		Área 1		
Raiz	<LD	8,00		16,70
Colmo	<LD	0,75		0,95
Folhas	0,60	<LD		2,40
Grãos	<LD	<LD		<LD
		Área 2		
Raiz	<LD	6,55		14,75
Colmo	<LD	0,85		2,00
Folhas	0,20	<LD		1,05
Grãos	<LD	<LD		<LD
		Área 3		
Raiz	<LD	8,10		15,45
Colmo	<LD	0,75		1,00
Folhas	0,60	0,00		2,50
Grãos	0,15	0,15		<LD
		Área 4		
Raiz	0,20	7,30		15,80
Colmo	<LD	5,90		1,40
Folhas	<LD	<LD		2,60
Grãos	<LD	<LD		<LD
		Área 5		
Raiz	<LD	5,65		12,15
Colmo	<LD	<LD		0,65
Folhas	0,15	<LD		1,20
Grãos	<LD	<LD		<LD
		Área 6		
Raiz	<LD	7,40		13,35
Colmo	<LD	0,75		0,85
Folhas	<LD	1,40		7,45
Grãos	<LD	<LD		<LD

Média de três determinações.

Extração ácida EPA 3050b/ICP-OES

Limite de Detecção do aparelho (LD): Cd <0,02 mg kg<sup>-1</sup>, Pb <0,2 mg kg<sup>-1</sup>, Cr <0,04mg kg<sup>-1</sup>

**Tabela 8.** Concentrações aproximadas, mínimas e máximas, de elementos-traço em folhas maduras para diversas espécies de plantas (Fonte: Kabata-Pendias e Pendias, 2001).

Elemento	Concentração normal	Concentração excessiva ou tóxica	Tolerância de algumas plantas
	-----mg kg <sup>-1</sup> -----		
Cd	0,01 – 0,2	5 – 30	0,05 – 0,5
Cr	0,1 – 0,5	5 – 30	2
Pb	5 – 10	30 – 300	0,5 – 10

## 6. ESTUDO 3 - QUANTIFICAÇÃO DE ELEMENTOS-TRAÇO EM ARROZ COMERCIALIZADO NO RIO GRANDE DO SUL

### 6.1 Justificativa e relevância

O arroz é o responsável por 20% da fonte da energia alimentar da população mundial, enquanto o trigo fornece 19% e o milho 5% (FAO, 2012). Segundo o IRGA (2010), o arroz é o alimento básico de aproximadamente três bilhões da população mundial. O consumo brasileiro de arroz varia de aproximadamente 52,5 a 75 kg hab<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> (Embrapa, 2009; FAO, 2012), tendo-se como base o arroz em casca. Apesar de ser inferior ao consumo mundial médio por habitante (84,8 kg hab<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>), este valor é considerado alto, se comparado com o consumo per capita dos países desenvolvidos (16,7 kg hab<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>) (Embrapa, 2009).

Este cereal é, portanto, um alimento importante para a população mundial e, em função disso, aspectos relacionados à sua produção e consumo devem ser continuamente monitorados e avaliados para que a sua qualidade nutricional seja garantida. Segundo estudos de Rubio et al. (1994), o arroz pode acumular naturalmente elementos-traço em sua biomassa, não sendo de forma homogênea e, normalmente, apresentando maior acúmulo nas raízes, o que diminui o risco da entrada destes elementos na cadeia alimentar. A este respeito, vários autores têm mostrado que, em gramíneas, o Cd acumula-se mais nas raízes do que na parte aérea (Adriano, 2001). No entanto, os teores de elementos-traço nos tecidos das plantas dependem do pH do solo, da natureza do metal, do teor de matéria orgânica e da capacidade do solo em reter cátions (McBride, 1995; Kabata-Pendias e Pendias, 2001).



Ainda que existam muitas incertezas sobre a especificidade dos mecanismos de absorção dos elementos-traço, sobretudo daqueles não essenciais, geralmente o teor e o acúmulo dos elementos, nos tecidos da planta ocorrem em função da sua disponibilidade na solução do solo, e os teores nas raízes e na parte aérea aumentam com o incremento da concentração de elementos na solução do solo (Gussarsson et al., 1995). Com relação à entrada dos elementos-traço na cadeia alimentar, Chaney e Oliver (1996) afirmam que as plantas podem ser o meio de transferência de contaminantes do solo para níveis mais altos na cadeia trófica, como também são barreiras importantes para essa transferência. As plantas restringem a absorção da maioria dos elementos-traço do solo, de forma que os seres humanos e os animais não se encontram, de maneira geral, ameaçados pela presença desses contaminantes no solo.

A quantificação dos teores de elementos-traço presentes em solos e disponíveis às plantas, principalmente em grãos, é fundamental na análise do risco de determinado ambiente. Portanto, há necessidade de se ampliar as pesquisas sobre a presença de elementos-traço na produção vegetal, principalmente nos grãos, por plantas cultivadas em solos com potencial de contaminação.

Em conformidade à literatura citada anteriormente e aos dois estudos (Estudo 1 e 2) preliminares a este, onde as concentrações de elementos-traço em solos, águas e grãos do arroz irrigado foram baixas, surgiu o interesse de analisar os grãos de arroz já prontos para o consumo, ou seja, analisar o arroz encontrado em estabelecimentos comerciais, com o intuito de confirmar ou não a segurança alimentar do consumo de arroz no Estado do Rio Grande do Sul.

## **6.2 Hipótese do estudo**

As concentrações de Cd, Cr e Pb nos grãos de arroz comercializados no Estado do Rio Grande do Sul estão acima do permitido pela legislação vigente.

### **6.3 Objetivo do estudo**

Para sustentar a hipótese, o objetivo deste estudo foi quantificar as concentrações de Cd, Cr e Pb em amostras de arroz, de diferentes empresas de beneficiamento do Rio Grande do Sul, comercializadas no Estado.

### **6.4 Material e Métodos**

Na literatura, são citados aproximadamente 256 empresas de beneficiamento de arroz no Estado do Rio Grande do Sul (Tabela 9), abrangendo todas as regiões orizícolas do Estado (Ayres et al., 2011).

Destas empresas de beneficiamento, foram selecionadas 12 (doze) amostras de arroz polido, 12 (doze) amostras de arroz parboilizado e três amostras de arroz integral (Tabela 10), englobando amostras de todas as regiões de cultivo orizícola do Estado do RS. As amostras são de diferentes marcas e lotes e, foram adquiridas no comércio de cidades da Região Metropolitana de Porto Alegre - Rio Grande do Sul.

#### **6.4.1 Análise das amostras**

Primeiramente, as amostras de grãos de arroz foram trituradas até passar inteiramente por uma peneira descartável de náilon de 0,15 mm. Para trituração, utilizou-se gral de ágata.

Os teores totais de Cd, Cr e Pb nas amostras foram determinados pelo método USEPA 3050B (USEPA, 1996). Este método foi selecionado por estar regulamentado na legislação brasileira nas instruções normativas da Resolução 420 do CONAMA (2009).

A determinação dos teores de Cd, Cr e Pb, nos extratos das amostras de arroz, foi feita por espectrometria de emissão atômica por plasma acoplado indutivamente (ICP-OES), da Faculdade de Agronomia, da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Todas as análises foram feitas em triplicata. Em cada bateria de análise uma amostra em branco foi analisada, para fins de controle.

**Tabela 9.** Número de empresas de beneficiamento pela sub-divisão do IRGA – NATE,s – 2008 (Ayres et al., 2011).

Posição	NATE's*	Número de empresas de beneficiamento
1º	Pelotas	28
2º	São Borja	21
2º	Santo Antonio da Patrulha	21
3º	Guaíba	18
4º	Santa Maria	16
5º	Restinga Seca	13
6º	Uruguaiana	11
7º	Cachoeira do Sul	10
8º	Itaqui	8
8º	Camaquã	8
8º	General Câmara	8
9º	São Pedro do Sul	7
9º	Viamão	7
10º	Bagé	6
10º	Dom Pedrito	6
10º	São Gabriel	6
10º	Agudo	6
10º	Candelária	6
10º	Palmares do Sul	6
11º	Rio Pardo	5
11º	Tapes	5
12º	São Sepé	4
13º	Rosário do Sul	3
13º	Alegrete	3
13º	Santo Antonio das Missões	3
13º	São Lourenço do Sul	3
13º	Rio Grande	3
14º	Cacequi	2
14º	Santana do Livramento	2
14º	São Vicente do Sul	2
14º	Mostardas	2
14º	Arroio Grande	2
14º	Santa Vitoria do Palmar	2
15º	Caçapava do Sul	1
15º	Formigueiro	1
15º	Jaguarão	1
	Total	256

\*Núcleos de Assistência Técnica e Extensão Rural (NATE's)

**Tabela 10.** Código de identificação, municípios e regiões das marcas de arroz comerciais consumidas no Estado do RS selecionadas para quantificação de Cd, Cr e Pb.

Código de identificação	Município do RS	Região orizícola
AC1	Pelotas	Sul
AC2	Palmares do Sul	Planície Costeira Externa
AC3	Camaquã	Planície Costeira Interna
AC4	São Gabriel	Campanha
AC5	Alegrete	Fronteira Oeste
AC6	Cachoeira do Sul	Depressão Central
AC7	São Borja	Fronteira Oeste
AC8	Viamão	Planície Costeira Interna
AC9	Santo Antônio da Patrulha	Planície Costeira Externa
AC10	Arroio Grande	Sul
AC11	Rosário do Sul	Campanha
AC12	Agudo	Depressão Central
PC1	Camaquã	Planície Costeira Interna
PC2	Pelotas	Sul
PC3	Santo Antônio da Patrulha	Planície Costeira Externa
PC4	Sentinela do Sul	Planície Costeira Interna
PC5	Itaqui	Fronteira Oeste
PC6	São Borja	Fronteira Oeste
PC7	Viamão	Planície Costeira Interna
PC8	Uruguaiana	Fronteira Oeste
PC9	Arroio Grande	Sul
PC10	Palmares do Sul	Planície Costeira Externa
PC11	Cachoeira do Sul	Depressão Central
PC12	Rosário do Sul	Campanha
IC1	Pelotas	Sul
IC2	Camaquã	Planície Costeira Interna
IC3	Eldorado do Sul	Planície Costeira Interna

AC – Arroz Polido

PC – Arroz Parboilizado

IC – Arroz Integral

## 6.5 Resultados e discussão

Como já mencionado anteriormente, os elementos-traço, além da entrada no ambiente por ação antrópica, ocorrem naturalmente nos solos e alguns elementos, tais como o cádmio (Cd), o chumbo (Pb), o arsênio (As) e selênio (Se), entre outros, exercem efeitos deletérios sobre vários componentes da biosfera, (Alloway, 1993; Kabata-Pendias e Pendias, 2001). Na maioria das vezes, esses elementos estão presentes nos solos em concentrações ou formas que não oferecem risco para o ambiente, como foi verificado nos Capítulos II e III. A Tabela 11 apresenta as concentrações encontradas nas marcas de arroz comercial consumidas no Estado do RS.

**Tabela 11.** Concentrações de Cd, Pb e Cr em amostras de diferentes marcas comerciais de arroz consumidas no Estado do RS.

Código de Identificação	Cd	Pb	Cr
AC1	<0,02	<0,2	<0,04
AC2	<0,02	<0,2	<0,04
AC3	<0,02	<0,2	<0,04
AC4	<0,02	<0,2	<0,04
AC5	<0,02	<0,2	<0,04
AC6	<0,02	<0,2	<0,04
AC7	<0,02	<0,2	<0,04
AC8	<0,02	<0,2	<0,04
AC9	<0,02	<0,2	<0,04
AC10	<0,02	<0,2	<0,04
AC11	<0,02	<0,2	<0,04
AC12	<0,02	<0,2	<0,04
PC1	<0,02	<0,2	<0,04
PC2	<0,02	<0,2	<0,04
PC3	<0,02	<0,2	<0,04
PC4	<0,02	<0,2	<0,04
PC5	<0,02	<0,2	<0,04
PC6	<0,02	<0,2	<0,04
PC7	<0,02	<0,2	<0,04
PC8	<0,02	<0,2	<0,04
PC9	<0,02	<0,2	<0,04
PC10	<0,02	<0,2	<0,04
PC11	<0,02	<0,2	<0,04
PC12	<0,02	<0,2	<0,04
IC1	<0,02	<0,2	<0,04
IC2	<0,02	<0,2	<0,04
IC3	<0,02	<0,2	<0,04

Média de três determinações.

Extração ácida EPA 3050b/ICP-OES.

Limite de Detecção do aparelho (LD): Cd <0,02 mg kg<sup>-1</sup>, Pb <0,2 mg kg<sup>-1</sup>, Cr <0,04mg kg<sup>-1</sup>

Confirmando a hipótese inicial, os teores de Cd, Cr e Pb das marcas de arroz analisadas encontram-se em concentrações inferiores às descritas na legislação, que está apresentada na Tabela 12.

Em 1998, a Anvisa publicou a portaria número 685, de atualização de limites máximos de tolerância para contaminantes inorgânicos, para novas modalidades de alimentos. Nesta portaria, cereais em geral e o arroz não foram incluídos. No entanto, o parágrafo único desta portaria esclarece que, em casos dos alimentos não contemplados no presente regulamento, permanecem vigentes os limites máximos de tolerância para contaminantes inorgânicos já

previstos na legislação nacional, ou seja, no Decreto n. 55871, de 1965 (ANVISA, 1965).

**Tabela 12.** Limites máximos de tolerância para contaminantes inorgânicos (Cd, Cr e Pb) em grãos de arroz. Fonte: ANVISA (1965) E CODEX ALIMENTARIUS (1995).

Órgão regulamentador	Cd	Cr	Pb
	-----mg kg <sup>-1</sup> -----		
Anvisa (1965)	1,00	0,1	0,5
Codex Alimentarius	0,4	0,1	0,2

Na busca de discussão para este estudo, poucos trabalhos de quantificação de elementos-traço em arroz comercial no Brasil foram encontrados na literatura. No Rio Grande do Sul, em estudo feito por Poletti (2012), avaliando teores de elementos-traço em arroz, as concentrações dos elementos Cd e Pb encontradas no estudo permaneceram abaixo dos limites de detecção do aparelho (ICP-OES) e, conseqüentemente abaixo dos limites máximos permitidos (ANVISA, 1965; CODEX ALIMENTARIUS, 1995), corroborando com este estudo. Na China, que apresenta sistema similar de cultivo do Rio Grande do Sul, a lavoura irrigada, mais de 10% do arroz produzido está contaminado por elementos-traço decorrentes da poluição e da rápida industrialização do país. Essa é a conclusão de um relatório publicado na edição da revista *New Century*, que menciona o Cd como um dos elementos encontrados no arroz chinês (Folha de São Paulo, 2011). As substâncias químicas, muitas vezes liberadas pela atividade da mineração, se espalham pelo ar e pela água, poluindo grandes extensões das terras chinesas.

Em análise de 25 amostras de arroz, disponíveis no mercado jamaicano, feita por Antoine et al. (2012), foram analisados 36 elementos essenciais, não essenciais e tóxicos, utilizando as técnicas de FAAS, ICP-OES, INAA e TXRF. As concentrações médias de Cd no arroz branco e integral foram de <0,080 mg kg<sup>-1</sup>. Para Cr, a média das concentrações no arroz branco e integral foram de 0,080 mg kg<sup>-1</sup> e 0,157 mg kg<sup>-1</sup>, respectivamente. Os seres humanos necessitam de Cr em quantidades vestigiais. Seus mecanismos no corpo não são bem definidos, mas o Cr é conhecido por aumentar a ação da insulina e pode atuar no armazenamento de proteínas, hidratos de carbono e

gorduras. O Cr está presente em níveis muito baixos em alimentos e as taxas de absorção no organismo humano são baixas, entre 0,4% e 2,5% (Antoine et al., 2012).

No Japão, amostras de arroz de grãos foram coletadas em 20 locais na região de Aomori e, as concentrações de 25 elementos no arroz polido foram determinadas por ICP-OES. Os teores mínimos e máximos de Cd encontrados nas amostras foram de 0,01-0,1 mg Cd kg<sup>-1</sup> grão e de < 0,001 mg kg<sup>-1</sup> para Cr e Pb (Tsukada et al., 2007).

As concentrações dos elementos-traço variam nos diferentes tecidos da planta e, em geral, os grãos contêm concentração menor do que as partes vegetativas da planta (Berton, 2000). Isto pôde ser observado em estudo de Silva et al. (2007), onde as plantas de arroz, em solos contaminados, restringiram a transferência de Cd e Pb do solo para o grão do arroz. Outro estudo em que os teores de Cd, Cr e Pb, nos grãos de arroz se mantiveram abaixo dos limites permissíveis pelas normas (ANVISA, 1965; CODEX ALIMENTARIUS, 1995) foi realizado por Moraes (2009), no qual foi simulada a entrada dos elementos-traço no solo pela adição de diferentes doses e tipos de fertilizantes. Estes cenários de ambientes contaminados diferem dos solos das plantações de arroz do Estado do RS, os quais foram avaliados nas Planícies Costeiras Interna e Externa à Laguna dos Patos em concentrações baixas, não apresentando risco de contaminação.

A partir dos dados levantados das lavouras das Planícies Costeiras do Rio Grande do Sul, bem como dos grãos de arroz comercializados das regiões produtoras do Estado, afirma-se que não ocorre uma preocupação alarmante quanto aos teores de elementos-traço nestes compartimentos. No entanto, é importante que ocorra, em estudos futuros, a avaliação dos demais solos das regiões orizícolas do Estado, com o intuito de alertar ou tranquilizar, dependendo dos resultados, a população consumidora de arroz.

## 6.6 Conclusões

Contrariando a hipótese deste estudo, as concentrações destes elementos-traço em amostras de arroz pronto para consumo, vendido em estabelecimentos comerciais no RS, encontram-se dentro dos limites aceitáveis das legislações e não representam risco à saúde humana.

## **7. ESTUDO 4 - BIODISPONIBILIDADE DE ELEMENTOS-TRAÇO EM TRÊS VARIEDADES DE ARROZ IRRIGADO**

### **7.1 Justificativa e relevância**

Em solos agrícolas, as principais fontes da entrada de elementos-traço no solo provêm de agroquímicos, de lodos, de resíduos industriais e de fertilizantes fosfatados (Alloway e Ayres, 1997). Esses elementos podem expressar seu potencial poluente diretamente nos organismos do solo, pela disponibilidade às plantas em níveis fitotóxicos, além da possibilidade de transferência para a cadeia alimentar, por meio das próprias plantas ou pela contaminação das águas de superfície e subsuperfície (Kabata-Pendias e Pendias, 2001; Soares et al., 2005).

A mobilidade e retenção de elementos-traço no solo dependem das complexas interações com a fase sólida, tanto orgânica quanto inorgânica (Alloway, 1993; Kabata-Pendias e Pendias, 2001; Chaves, 2008), que envolvem reações de adsorção/dessorção, precipitação/dissolução, complexação e oxirredução (Kabata-Pendias e Pendias, 2001; Adriano, 2001). Em caso de solos alagados, a inundação promove alterações químicas e biológicas que resultam, entre outras transformações, no aumento da disponibilidade de nutrientes e contaminantes na solução do solo (Hernández e Meurer, 2000; Silva et al., 2003).

Vários autores afirmam que espécies vegetais diferem quanto à capacidade de absorção e acúmulo de elementos-traço (Santos et al., 1999). Existem diferenças, também, entre as cultivares de uma mesma espécie de planta nos níveis de acúmulo de elementos-traço na parte aérea (Kabata-Pendias e Pendias, 2001). Uma proposta importante para a minimização do acúmulo de alguns elementos tóxicos nas plantas é encontrar diferentes cultivares de uma planta com menor capacidade de transportar o elemento-



traço para os grãos. A absorção pelas plantas, em um solo com diversos elementos-traço, pode ser diferente da verificada com elementos isolados, em razão das diversas interações entres esses, que podem ser independentes, antagonistas ou sinérgicas, e as respostas das espécies ao excesso de elementos-traço deve ser diferenciada, em consequência da especiação desses elementos no solo (Barceló e Poschenrieder, 1992).

Em geral as quantidades de elementos-traço nas plantas decrescem na ordem de raízes > caules > folhas > frutos > sementes (Blum, 1997). Desta forma, as concentrações dos elementos-traço variam nos diferentes tecidos da planta e, em geral, os grãos contêm concentrações menores do que as partes vegetativas da planta (Berton, 2000).

São poucos os estudos relacionados ao índice de translocação dos elementos-traço para as sementes, mesmo em gramíneas, espécies amplamente estudadas em ambientes contaminados (Paiva et al., 2002). Portanto, faz-se necessário encerrar o estudo dos potenciais riscos da presença de Cd, Cr e Pb nas lavouras de arroz das Planícies Costeiras com uma simulação de aplicação de elementos-traço para diferentes variedades de arroz, com o fim de avaliar a resposta das plantas a estes elementos.

## **7.2 Hipóteses do estudo**

São estabelecidas as seguintes hipóteses:

a) com a aplicação de doses crescentes de Cd, Cr e Pb, há um aumento das concentrações destes elementos na parte aérea das variedades de arroz;

b) a variedade que acumular esses elementos nos grãos em quantidades menores do que as indicadas na legislação ambiental é a mais apropriada para o consumo humano.

## **7.3 Objetivo do estudo**

O objetivo deste estudo foi quantificar as concentrações de Cd, Cr e Pb nas raízes, parte aérea e grãos das três variedades de arroz e relacioná-las com as quantidades de Cd, Cr e Pb aplicadas no solo.

## **7.4 Material e métodos**

### **7.4.1 Tratamentos e delineamento experimental**

O experimento foi conduzido em casa-de-vegetação, na Faculdade de Agronomia da Universidade do Rio Grande do Sul, de dezembro de 2010 a março de 2011, em delineamento inteiramente casualizado, com três repetições por tratamento. Os tratamentos consistiram de quatro doses de cádmio (Cd): 0; 1; 2 e 4 mg de Cd kg<sup>-1</sup> de solo, quatro doses de cromo (Cr): 0; 27,70; 55,40 e 110,80 mg de Cr kg<sup>-1</sup> de solo e quatro doses de chumbo (Pb): 0; 5,10; 10,20 e 20,40 mg de Pb kg<sup>-1</sup> de solo. Os elementos-traço foram aplicados na forma de sais inorgânicos, usando como fonte de Cd o nitrato de cádmio (Cd(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> · 4H<sub>2</sub>O), como fonte de Cr, o cloreto de cromo (CrCl<sub>3</sub> · 6H<sub>2</sub>O) e como fonte de chumbo, o acetato de chumbo ((CH<sub>3</sub>COO)<sub>2</sub>Pb). Os sais, em solução, foram misturados individualmente e homogeneizados ao solo contido em vasos de 15 litros com 14 kg de solo.

As quantidades de Cd, Cr e Pb adicionadas aos solos foram definidas utilizando-se como referência os teores encontrados dos respectivos elementos, por extração nítrico-perclórica, no fertilizante fosfatado superfosfato triplo importado (Marrocos) que foi analisado em estudo preliminar (APÊNDICE 20). As quatro doses foram determinadas da seguinte maneira: testemunha (dose 0); aplicação da metade do teor encontrado no fertilizante (dose 1); aplicação do teor exato determinado no fertilizante (dose 3); aplicação do dobro da concentração encontrada no fertilizante (dose 4). As concentrações de Cd, de Cr e de Pb foram determinadas em mg do elemento por quilo do fertilizante.

### **7.4.2 Instalação e condução do experimento**

#### **7.4.2.1 Solo**

O solo utilizado para estudo foi coletado na área de abrangência da Estação Experimental do Instituto Rio-Grandense do Arroz, no município de Cachoeirinha/RS, onde há aproximadamente dez anos não é mais utilizado para cultivo de arroz. O solo é classificado como Gleissolo Háplico Distrófico típico (Embrapa, 2006a). As amostras foram coletadas da camada superficial (0 - 20 cm). A escolha do solo foi baseada no tempo em que o mesmo está sem

aplicação de fertilizantes e outros insumos e, desta forma, possibilitando a melhor avaliação de resposta das plantas aos elementos que foram aplicados. O gleissolo coletado na área, mesmo não sendo mais utilizado para fins agrícolas, apresentou concentrações de Cd, Cr e Pb (Tabela 13).

**Tabela 13.** Concentrações de elementos-traço no Gleissolo coletado no município de Cachoeirinha-RS, na Estação Experimental do Arroz (IRGA) (camada de 0 - 20 cm de profundidade).

Elementos-traço	Concentração*
	mg kg <sup>-1</sup>
Cádmio (Cd)	<0,2
Cromo (Cr)	8,0
Chumbo (Pb)	14,0

\*Resultados expressos no material seco a 45°C.  
Média de duas determinações.  
Extração ácida EPA 3050b/ICP-OES

Após coleta, o solo foi seco ao ar e tamisado em peneira com malha de 4 mm. Os atributos do solo foram determinados no Laboratório de Análises de Solos da Faculdade de Agronomia, da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, conforme metodologia descrita em Tedesco et al. (1995) e são apresentados na Tabela 14. Após análise físico-química, o solo foi corrigido e fertilizado conforme recomendações da Sociedade Brasileira de Arroz Irrigado (Sosbai, 2010).

**Tabela 14.** Atributos do Gleissolo coletado no município de Cachoeirinha-RS, na Estação Experimental do Arroz (IRGA) (camada de 0 - 20 cm de profundidade).

Argila	pH (H <sub>2</sub> O)	P	K	M.O.	Al trocável	Ca trocável	Mg trocável	CTC (pH a 7,0)
g kg <sup>-1</sup>		...mg dm <sup>-3</sup> ...		g kg <sup>-1</sup>	-----cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> -----			
130	5,4	12	35	19	0,3	2,0	0,9	9,2

### **7.4.2.2 Espécie utilizada no experimento**

A espécie utilizada no experimento é o arroz (*Oriza sativa* L.), sendo três variedades escolhidas: a variedade IRGA-417, a IRGA-424 e o híbrido Arize QM1010.

#### **7.4.2.2.1 Variedade IRGA - 417**

Esta variedade tem como características morfológicas o porte baixo; folhas curtas, eretas e pilosas; panículas parcialmente protegidas pela folha bandeira; grãos longos, finos e pilosos. Possui vigor inicial alto e resistência ao acamamento. A variedade IRGA-417 tem poder de adaptação em todas as zonas orizícolas do RS, excetuando áreas sujeitas a temperaturas baixas do Litoral Sul e Campanha.

#### **7.4.2.2.2 Variedade IRGA – 424**

A variedade IRGA-424 tem como características morfológicas o porte baixo; folhas curtas, eretas e pilosas; panículas protegidas pela folha bandeira; grãos longos, finos e pilosos. Possui vigor inicial baixo, resistência ao acamamento e capacidade de perfilhamento alta. A variedade IRGA-424 tem poder de adaptação em todas as regiões de cultivo de arroz irrigado no Rio Grande do Sul, segundo o Zoneamento Agrícola do Ministério da Agricultura.

#### **7.4.2.2.3 Híbrido Arize QM1010**

Esta variedade híbrida tem destaque para o crescimento rápido, além de uma boa capacidade de perfilhamento.

Entre as variedades híbridas promissoras, a variedade Arize QM1010 tem mostrado alto potencial de rendimento nas diferentes regiões orizícolas do Estado do Rio Grande do Sul.

Antes da semeadura das espécies, aplicou-se nitrogênio, fósforo e potássio ao solo contido nos vasos nas doses constantes da Tabela 15 de acordo com as recomendações da Sociedade Brasileira do Arroz Irrigado – Sosbai (2010).

**Tabela 15.** Quantidades equivalentes de nitrogênio, fósforo e potássio adicionadas aos vasos da espécie de arroz, em todas as variedades (IRGA-417; IRGA-424; Arize QM1010).

Espécie	Dose do nutriente (mg kg <sup>-1</sup> )		
	N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O
Arroz	20	30	40

Foram semeadas 10 sementes por vaso, no dia 14 de dezembro de 2010, com início da germinação no dia 20. O desbaste foi realizado no dia 24 de dezembro de 2010, deixando três plantas por vaso.

Aos 40 dias após a semeadura, foram aplicados, novamente, ao solo, 80 e 40 mg kg<sup>-1</sup> equivalentes de N e K, respectivamente, para complementação das necessidades nutricionais da espécie.

A irrigação dos vasos foi realizada no mesmo momento do desbaste, aos 7 dias após a germinação, e manteve-se com aproximadamente 5 cm de lâmina de água.

As plantas foram cultivadas até a maturação, onde cada variedade já tenha produzido os grãos, ou seja, 130 dias de condução do experimento.

As plantas foram coletadas por corte, dividindo-as em grãos, parte aérea (colmos e folhas) e raízes. Após a coleta das plantas, as raízes, parte aérea e grãos foram secos em estufa com ventilação forçada de ar a 65° C, até peso constante. Após a secagem, as raízes e parte aérea foram pesadas e moídas em moinho de facas, de aço inoxidável, tipo Wiley. Os grãos foram moídos em gral de ágata para não ocorrer perdas de amostra. O processo de limpeza das raízes para posterior análise teve os seguintes cuidados: as raízes foram removidas e lavadas em água corrente e em solução de hipoclorito de sódio 1% (v/v), em seguida em solução de HCl 0,1 mol L<sup>-1</sup> por um minuto e enxaguadas em água deionizada, para remoção de resíduos e de solo.

### 7.4.3 Análise química dos tecidos das plantas

A determinação dos teores de Cd, Cr e Pb nos tecidos das plantas foi feita por digestão ácida USEPA 3050B (USEPA, 1996), como pode ser observado na metodologia do Estudo 1. A quantificação dos teores de Cd, Cr e Pb nos extratos de digestão foi realizada por Espectrometria de emissão óptica

por plasma acoplado indutivamente (ICP-OES), na Faculdade de Agronomia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

#### **7.4.4 Acúmulo e translocação de Cd, Cr e Pb nas plantas de arroz**

Foram calculadas as quantidades totais de Cd, Cr e Pb acumuladas nos tecidos das plantas e o acúmulo do Cd, Cr e Pb em cada parte da planta. As quantidades acumuladas nos grãos foram calculada da seguinte forma:

$$\mathbf{QAG = Concentração\ de\ Cd/Cr/Pb\ no\ G\ x\ MS / 1000}$$

Onde:

QAG = Quantidade acumulada de Cd, Cr e Pb nos grãos ( $\text{mg vaso}^{-1}$ )

G= Grãos

MS = peso do total de grãos por vaso ( $\text{g vaso}^{-1}$ )

Quantidade acumulada na parte aérea:

$$\mathbf{QAPA = Concentração\ de\ Cd/Cr/Pb\ na\ PA\ x\ MS / 1000}$$

Onde:

QAPA = Quantidade acumulada de Cd, Cr e Pb na parte aérea ( $\text{mg vaso}^{-1}$ )

PA= Parte aérea

MS = Matéria seca produzida por vaso ( $\text{g vaso}^{-1}$ )

Quantidade acumulada nas raízes:

$$\mathbf{QAR = Concentração\ de\ Cd/Cr/Pb\ na\ R\ x\ MS / 1000}$$

Onde:

QAR = Quantidade acumulada de Cd, Cr e Pb nas raízes ( $\text{mg vaso}^{-1}$ )

R= Raiz

MS = Matéria seca produzida por vaso ( $\text{g vaso}^{-1}$ )

E, a quantidade acumulada total na planta:

**QAT: QAG + QAPA + QAR**

#### **7.4.5 Análise estatística**

Para a relação entre as doses aplicadas no solo e as concentrações de Cd, Cr e Pb nos tecidos das plantas, os resultados foram submetidos à análise de regressão, utilizando o programa Assistat 7.6 beta que descreveu as interações entre os parâmetros avaliados.

Os dados de matéria seca e quantidade acumulada foram submetidos à análise de variância (ANOVA) e as médias comparadas pelo teste Duncan ao nível de 5% de probabilidade. As análises foram executadas pelo software Assistat, versão 7.6 beta (Silva e Azevedo, 2002).

### **7.5 Resultados e discussão**

#### **7.5.1 Biodisponibilidade de Cd, Cr e Pb nas três variedades de arroz**

O solo contaminado refere-se ao solo que apresenta concentrações de determinada espécie química superiores aos teores encontrados em condições naturais deste solo (Alloway, 1993). O conhecimento das quantidades totais e a biodisponibilidade do elemento no solo são fatores essenciais no diagnóstico da contaminação e da definição de estratégias de remediação.

A biodisponibilidade é a forma na qual um elemento pode ser absorvido por um organismo vivo, podendo ou não causar uma resposta fisiológica ou toxicológica adversa (Hamelink et al., 1994). Segundo Alloway (1993), as plantas usam mecanismos de tolerância aos elementos-traço, dentre os quais destacam-se: a) a absorção seletiva de íons; b) a diminuição da permeabilidade da membrana; c) a imobilização do íon nas raízes, folhagens e sementes; d) a remoção de íons do metabolismo por deposição em formas fixas ou insolúveis; e) alterações nos padrões metabólicos; f) adaptação para substituição de um elemento tóxico por outro elemento em uma enzima

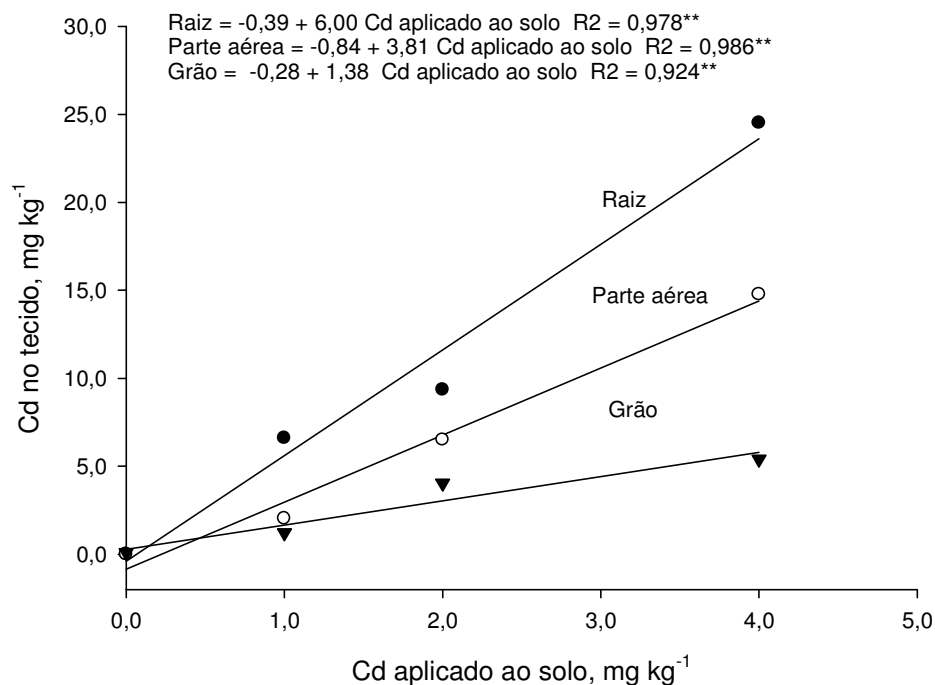
fisiológica e; g) eliminações dos íons das plantas em função das exceções das raízes.

Na cultivar IRGA-417 houve uma relação significativa para a concentração de cádmio no solo e a concentração na planta, como pode ser observado na Figura 8. As raízes foram a parte da planta que mais acumularam este elemento, alcançando 34,23 mg Cd kg raiz<sup>-1</sup>. Já na parte aérea o acúmulo foi menor, atingindo o teor máximo de 11,40 mg Cd kg parte aérea<sup>-1</sup>. A translocação do cádmio para o grão foi ainda menor, atingindo 5,40 mg Cd kg grão<sup>-1</sup>.

O cádmio é um elemento não essencial para os processos metabólicos da planta (Leita et al., 1996). Acredita-se que os íons metálicos tóxicos entram na célula através dos sistemas de absorção utilizados por íons metálicos fisiologicamente importantes, como o Cu e o Zn (Sanità di Toppi e Gabbrielli, 1999). As plantas absorvem os cátions livres em solução porque as células das raízes apresentam um potencial negativo ao longo da membrana celular, favorecendo a absorção de espécies catiônicas. Já os cátions complexados apresentam menores cargas positivas ou até mesmo cargas negativas (Sposito, 1989), sendo menos absorvidos pelas plantas.

A seletividade de minerais de argila e óxidos em solos por elementos-traço divalentes geralmente seguem a ordem Pb > Cu > Zn > Ni > Cd, podendo ocorrer diferenças entre minerais e com variações do pH. O Cd apresenta maior mobilidade nos solos, o que o torna mais biodisponível, tendendo à bioacumulação (Cardoso e Chasin, 2001). Embora considerado por alguns autores como altamente móvel (Kabata-Pendias e Pendias, 2001), resultados de pesquisa para avaliar sua mobilidade no perfil do solo têm sido contraditórios, deixando claro que o mesmo procede dependendo das condições intrínsecas do solo (Adriano, 2001; Amaral Sobrinho et al., 1998).





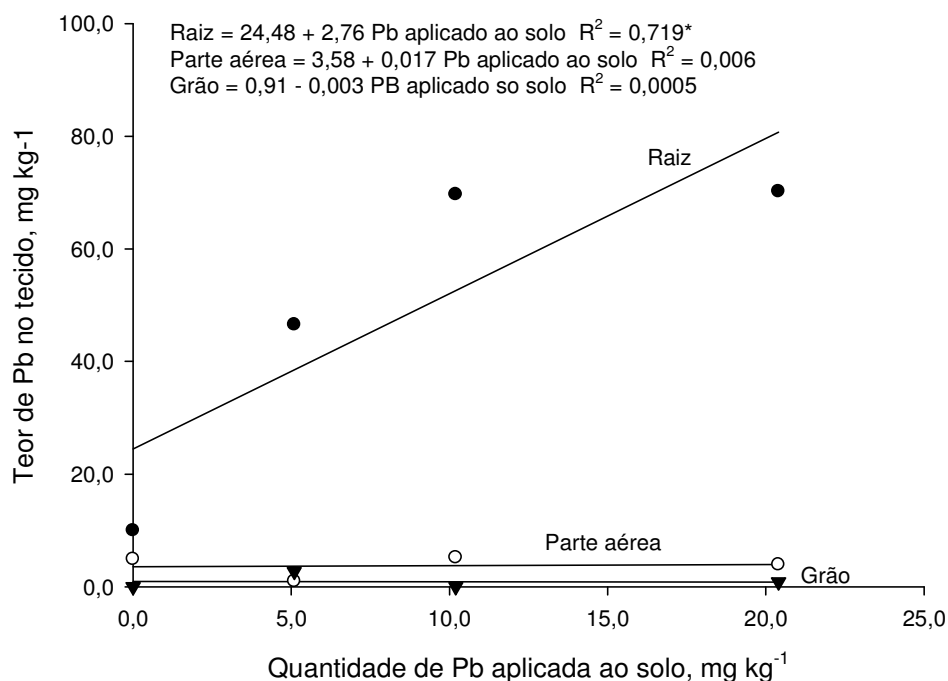
**Figura 8.** Relação entre as doses de Cd aplicadas no Gleissolo e o teor nos grãos, na parte aérea e nas raízes das plantas de arroz da cultivar IRGA-417, em mg kg<sup>-1</sup>.

Em estudos de Oliveira et al. (2005), foram aplicadas doses de 0, 20, 40 e 80 t de Cd ha<sup>-1</sup> e as concentrações de Cd nas folhas, grãos e raízes do arroz, cultivado em um Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA) e um Argissolo Vermelho - Amarelo (PVA), sob condições de casa-de-vegetação, de um modo geral, aumentaram com o incremento das doses. No solo PVA, que apresentou os maiores teores de Cd nas raízes, o Cd transferido das raízes para a parte aérea acumulou-se, principalmente nas folhas, tendo sido pequena a translocação para as sementes. Já no caso do solo LVA, onde o teor de Cd das folhas foi muito menor do que no solo PV, os teores de Cd nos grãos foram similares aos das folhas.

Mesmo que as maiores concentrações de Cd tenham sido encontradas nas raízes da variedade IRGA-417 (Figura 8), o teor nos grãos, de 5,40 mg Cd kg grão<sup>-1</sup> (Figura 8), é considerado altamente tóxico. Os órgãos regulamentadores como a CODEX ALIMENTARIUS (2012) e a ANVISA (1965) adotam como teores máximos permitidos de Cd, em grãos de arroz, 0,4 e 1,0 mg Cd kg grão<sup>-1</sup>, respectivamente. Os elementos-traço podem ser

enquadrados em uma classe que possuem características bioacumulativas, ou seja, são resíduos que se acumulam nos tecidos vivos ao longo da cadeia alimentar. Os elementos-traço podem interagir de maneira diferente com os organismos, levando os seres vivos a disfunções mais simples ou também ocasionar graves danos que podem levar à morte. Disfunções orgânicas como alterações enzimáticas podem ocorrer. As enzimas são responsáveis por controlar a velocidade das reações metabólicas no corpo humano. Elas, na presença dos elementos-traço, não agem normalmente devido à afinidade dos radicais SH (sulfidrilas) por esses elementos. A disfunção das mesmas então pode levar o indivíduo à morte (Oga, 2003).

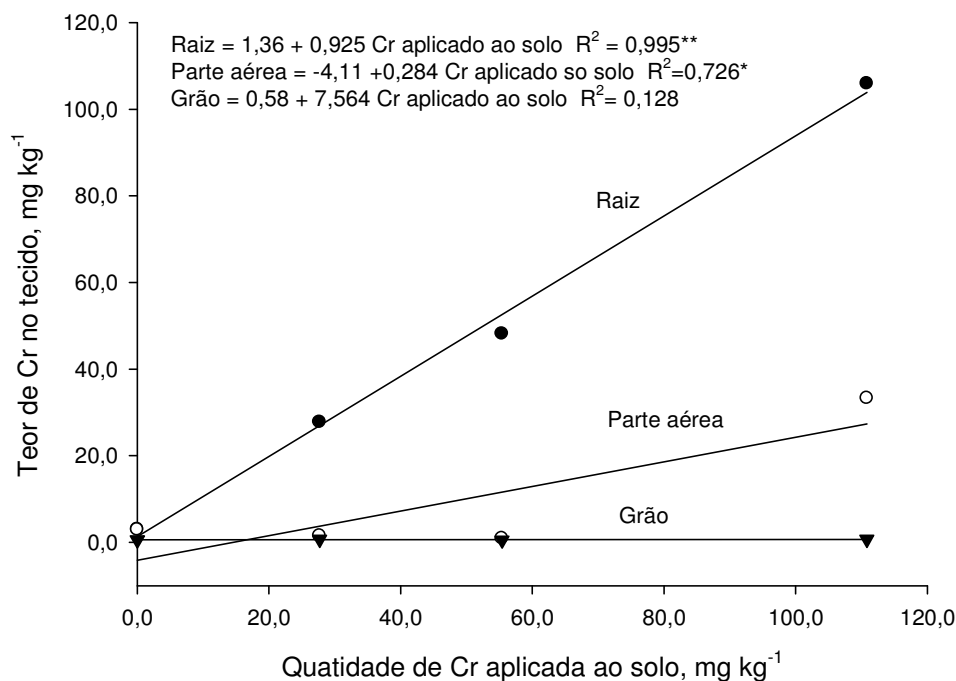
Para o elemento chumbo (Pb), houve somente relação significativa entre o teor de Pb no solo e o teor de Pb nas raízes ( $70,20 \text{ mg Pb kg raízes}^{-1}$ ). Para a parte aérea ( $3,90 \text{ mg kg}^{-1}$ ) e grãos ( $0,83 \text{ mg kg}^{-1}$ ) não houve diferença (Figura 9).



**Figura 9.** Relação entre as doses de Pb aplicadas no Gleissolo e o teor nos grãos, na parte aérea e nas raízes das plantas de arroz da cultivar IRGA-417, em  $\text{mg kg}^{-1}$ .

Na Figura 10 observa-se que houve relação entre o Cr do solo e o Cr encontrado nas raízes ( $105,90 \text{ mg kg}^{-1}$ ) e na parte aérea ( $33,27 \text{ mg kg}^{-1}$ ),

sendo as raízes a parte da planta que mais acumulou o Cr. Nos grãos ( $0,70 \text{ mg kg}^{-1}$ ) não houve relação, no entanto, o teor de Cr encontrado apresentou-se acima dos limites permissíveis para grãos pela CODEX ALIMENTARIUS (1995) E ANVISA (1965) (Tabela 12).



**Figura 10.** Relação entre as doses de Cr aplicadas no Gleissolo e o teor nos grãos, na parte aérea e nas raízes das plantas de arroz da cultivar IRGA-417, em  $\text{mg kg}^{-1}$ .

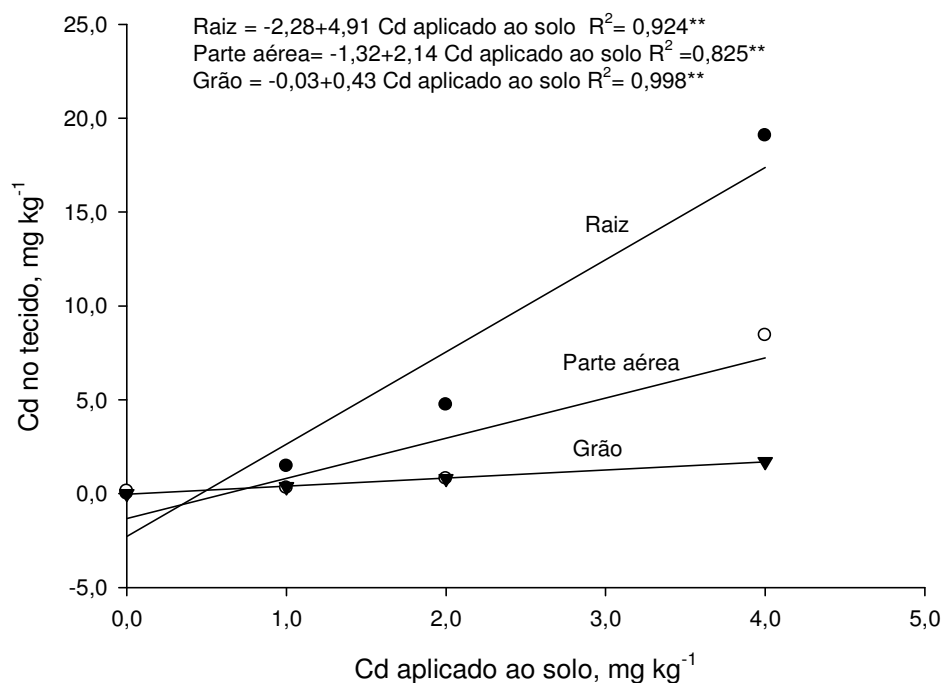
Os resultados da relação entre as doses de Cd, Cr e de Pb no solo e a concentração nas diferentes partes da planta corroboram a afirmação de Gussarsson et al. (1995) de que, mesmo existindo muitas incertezas sobre a especificidade dos mecanismos de absorção dos elementos-traço, geralmente o teor e o acúmulo do elemento nos tecidos dependem de sua disponibilidade na solução do solo e que os teores nas raízes e na parte aérea aumentam com o aumento da concentração dos elementos-traço na solução do solo.

Este acúmulo de Pb nas raízes pode estar relacionado com a imobilização desse elemento por polímeros orgânicos insolúveis presentes no tecido. As raízes constituem a estrutura da planta mais envolvida na absorção

de contaminantes, devido ao seu contato direto com o solo e, portanto, as maiores concentrações de elementos-traço são, também, encontradas nesta parte da planta. Em condições naturais do solo, sem aplicação de Pb, as concentrações desse elemento nas folhas das plantas são muito baixas, podendo variar de um a três  $\text{mg kg}^{-1}$ , enquanto que nas raízes esses valores podem ser mais altos (Kabata-Pendias e Pendias, 2001). A regulação da absorção de elementos-traço na rizosfera, o acúmulo desses nas raízes, preservando sua integridade e funções primárias, e a baixa translocação para a parte aérea são considerados mecanismos pelos quais o sistema radicular pode contribuir para a tolerância de espécies vegetais aos elementos-traço. O Pb pertence ao grupo dos elementos que são absorvidos pelas raízes, mas são pouco translocados para a parte aérea, enquanto o Cd, o Zn, o Ni, o B e o Mn não têm sua migração impedida para qualquer parte da planta (Costa et al., 2004.)

A dinâmica diferenciada de Cd no solo em relação ao Cr e Pb pode, em parte, ser explicada pela configuração eletrônica desses elementos, na qual as camadas externas de Cr e Pb possuem elétrons desemparelhados, facilitando as ligações e o compartilhamento de elétrons. Além do mais, os espaços vazios nas orbitais desses dois elementos permitem a formação de complexos, o que não é verificado no Cd (Costa et al., 2009). Estudos envolvendo a influência da força iônica da solução de equilíbrio na adsorção de Cd e Pb retrataram que o Pb é adsorvido predominantemente como complexo de esfera interna, não fazendo parte do complexo de troca e que a adsorção de Cd é típica de reações nas quais há a predominância de formação de complexos de esfera externa (Costa et al., 2009; Pierangeli et al., 2009).

Na cultivar IRGA-424 houve relação significativa entre o teor de Cd no solo e os teores nas raízes ( $19,07 \text{ mg kg}^{-1}$ ), parte aérea ( $8,43 \text{ mg kg}^{-1}$ ) e grãos ( $1,70 \text{ mg kg}^{-1}$ ) (Figura 11). Como observado na cultivar IRGA-417, também, houve o maior acúmulo nas raízes das plantas (Figura 8).



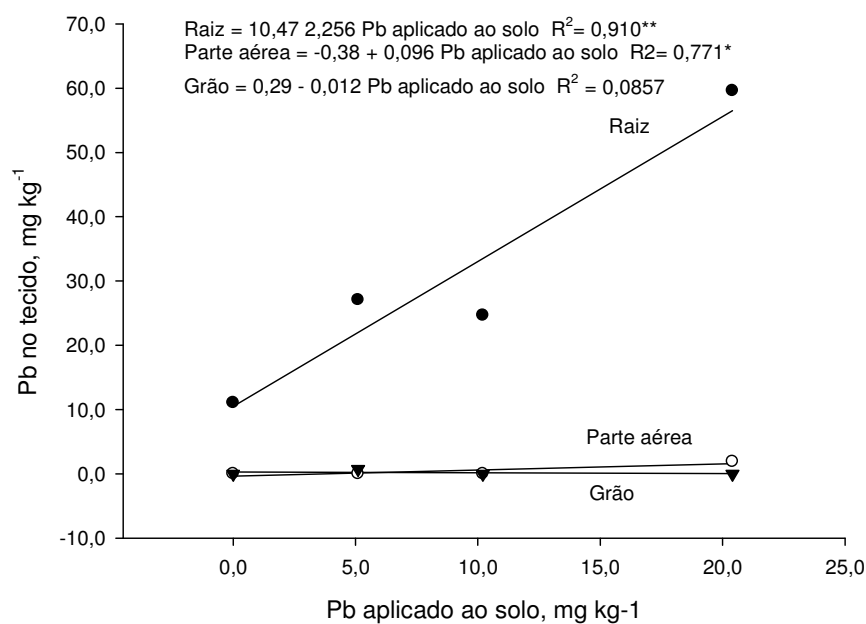
**Figura 11.** Relação entre as doses de Cd aplicadas no Gleissolo e o teor nos grãos, na parte aérea e nas raízes das plantas de arroz da cultivar IRGA-424, em mg kg<sup>-1</sup>.

Para o Pb (Figura 12) e o Cr (Figura 13), a maior concentração destes elementos foi encontrada nas raízes das plantas (59,63 e 88,23 mg kg<sup>-1</sup>, respectivamente). Não houve relação entre o teor de Pb e Cr no solo e na parte aérea e grãos (Figuras 12 e 13).

Tack et.al. (2006) afirmam que os eventos de umedecimento e secagem alteram os estados de hidratação, oxidação e cristalinidade dos óxidos de Fe e Mn do solo, podendo adsorver mais fortemente ou liberar os metais-traço. O Cr(III) possui maior afinidade pela superfície de troca do que os cátions divalentes, diminuindo a sua adsorção com a adição de fosfatos e com a elevação do pH (Bartlett, 1991).

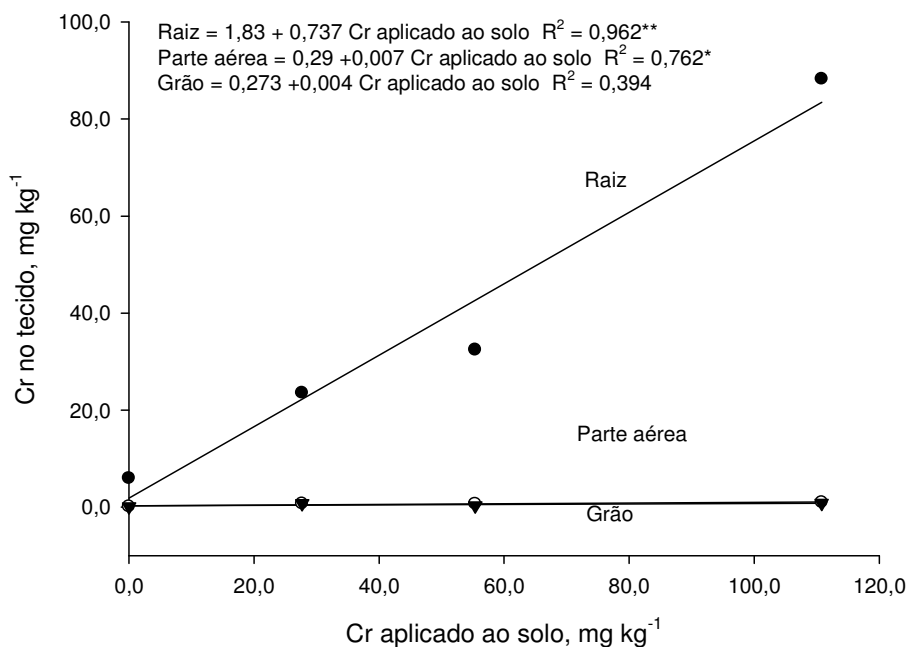
Como já mencionado, os elementos Pb e Cr apresentam baixa mobilidade, acumulando-se na superfície dos solos, enquanto Zn, Mn, Ni e, principalmente, Cd são relativamente mais móveis, apresentando maior risco de contaminação (Sheppard e Thibault, 1992). Costa (2005), avaliando a mobilidade de Cd, Cu, Pb, Ni e Zn em experimento, em casa-de-vegetação, com a adição dos elementos-traço na forma de sais inorgânicos, como

realizado neste estudo, concluiu que o Cd é mais móvel no perfil, podendo constituir risco ambiental, principalmente em solos com pouca matéria orgânica, baixos teores de óxidos de ferro e predomínio de minerais silicatados de baixa atividade. Estudo relativo a modelos de interações de Cr, Pb e Cu em solos aponta que o efeito combinado da alta carga e baixo raio do Cr torna-o mais susceptível a formar mais ligações com a matriz do solo, quando comparado aos outros elementos-traço avaliados, justificando sua baixa mobilidade (Bianchin, 2011; Merdy et al., 2009).



**Figura 12.** Relação entre as doses de Pb aplicadas no Gleissolo e o teor nos grãos, na parte aérea e nas raízes das plantas de arroz da cultivar IRGA-424, em mg kg<sup>-1</sup>.

Na variedade híbrida Arize QM1010, os resultados foram similares aos obtidos nas cultivares IRGA-417 e IRGA-424. Observando a figura 14, percebe-se que, nesta, também, a maior concentração do Cd foi encontrado nas raízes das plantas (11,33 mg kg<sup>-1</sup>), seguida pela parte aérea (5,00 mg kg<sup>-1</sup>) e grãos (1,27 mg kg<sup>-1</sup>).

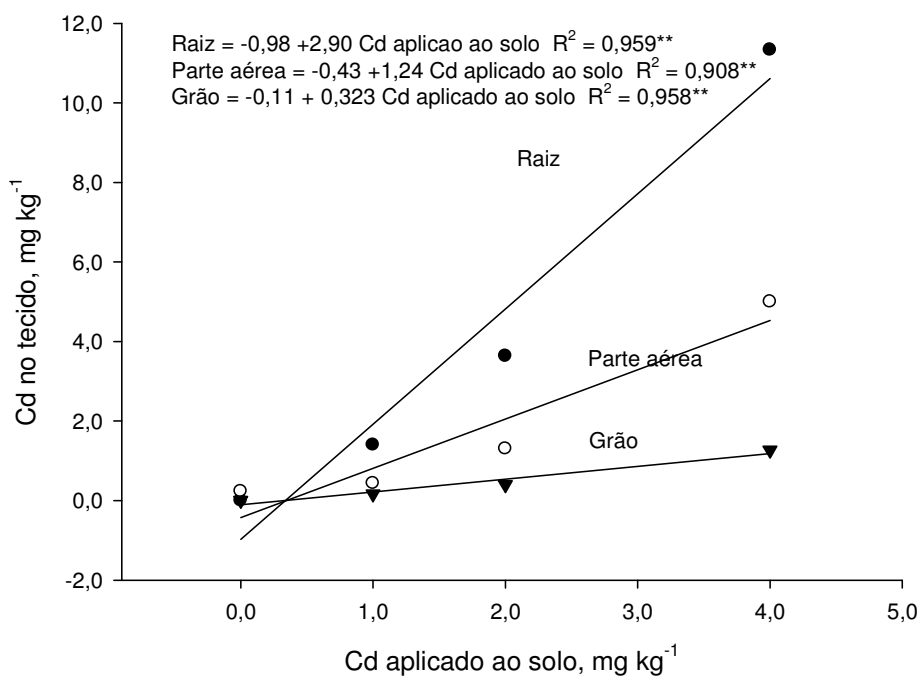


**Figura 13.** Relação entre as doses de Cr aplicadas no Gleissolo e o teor nos grãos, na parte aérea e nas raízes das plantas de arroz da cultivar IRGA-424, em  $\text{mg kg}^{-1}$ .

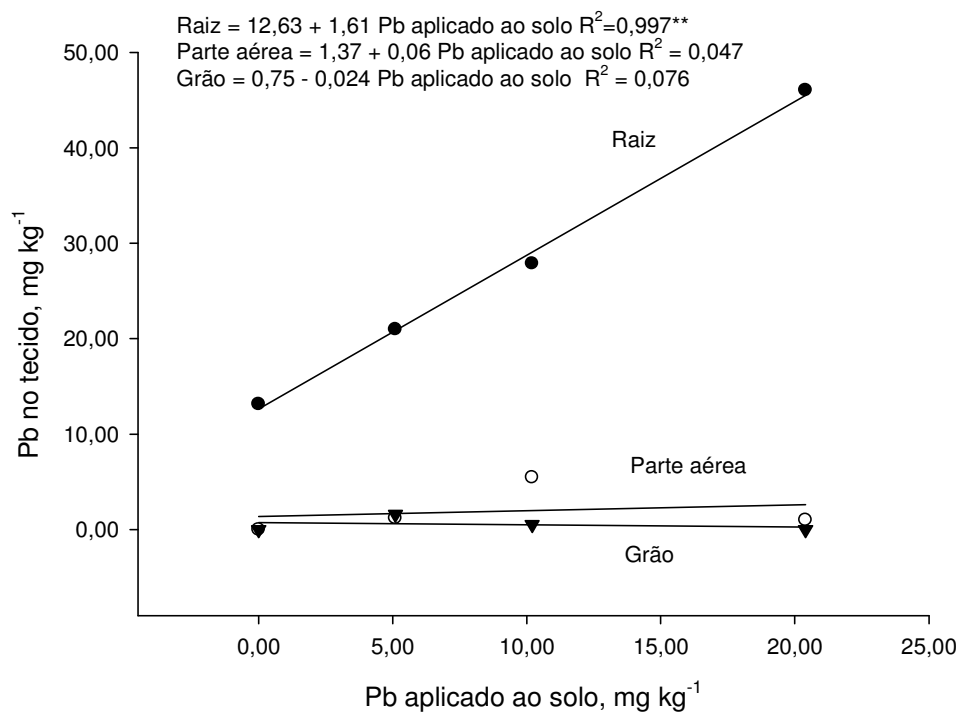
Na variedade Arize QM1010 houve relação entre o teor de Pb no solo e o acúmulo de Pb nas raízes ( $46,03 \text{ mg kg}^{-1}$ ) e parte aérea ( $1,00 \text{ mg kg}^{-1}$ ). Como antes, o maior acúmulo ocorreu na raiz da planta (Figura 15).

Para o Cr, houve relação entre o teor de Cr no solo e seu teor nas raízes ( $79,47 \text{ mg kg}^{-1}$ ) das plantas. As concentrações de Cr encontradas na parte aérea ( $1,00 \text{ mg kg}^{-1}$ ) e nos grãos ( $0,50 \text{ mg kg}^{-1}$ ) não foram significativas (Figura 16).

Em todas as variedades (IRGA-417, IRGA-424 e Arize QM1010) seguiu-se uma relação similar, onde a maior concentração dos elementos se deu nas raízes, seguindo pela parte aérea e grãos. No entanto, a variedade Arize QM1010 foi a espécie que menos acumulou estes elementos em seus tecidos.

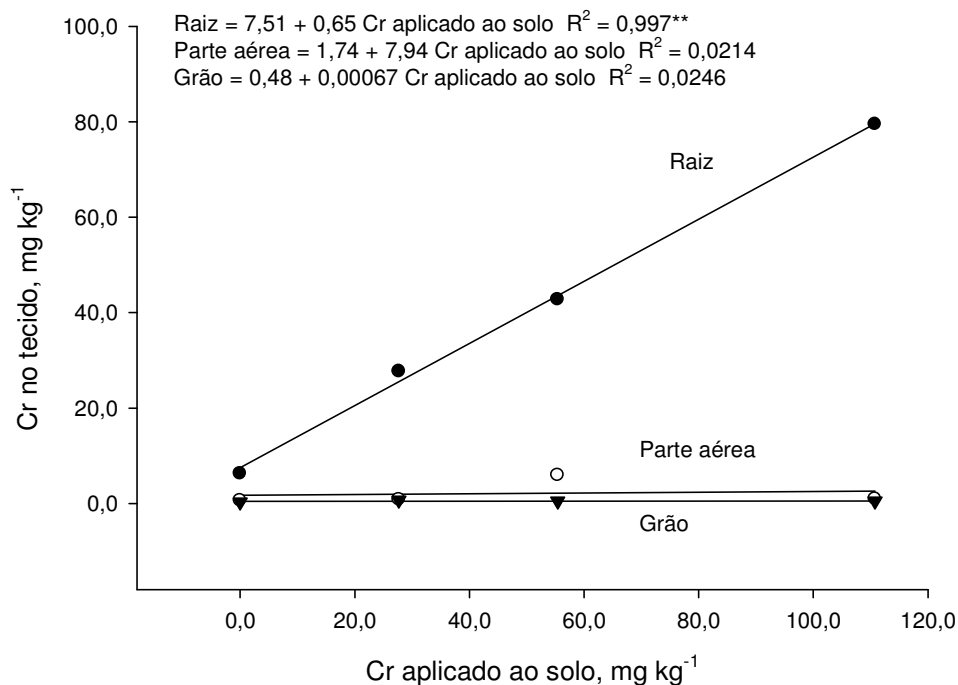


**Figura 14.** Relação entre as doses de Cd aplicadas no Gleissolo e o teor nos grãos, na parte aérea e nas raízes das plantas de arroz da variedade arize QM1010, em mg kg<sup>-1</sup>.



**Figura 15.** Relação entre as doses de Pb aplicadas no Gleissolo e o teor nos grãos, na parte aérea e nas raízes das plantas de arroz da variedade arize QM1010, em mg kg<sup>-1</sup>.





**Figura 16.** Relação entre as doses de Cr aplicadas no Gleissolo e o teor nos grãos, na parte aérea e nas raízes das plantas de arroz da variedade arize QM1010, em mg kg<sup>-1</sup>.

Todas as variedades apresentaram nos grãos teores de Cd, de Cr e de Pb, na maior dose aplicada ao Gleissolo, maiores ao permitido na legislação vigente (ANVISA, 1965), o que torna-se preocupante, pois, sabe-se que estes elementos são acumulativos no ambiente e que aplicações sucessivas poderiam ocasionar a translocação para os grãos das plantas. Os elementos-traço, quando aplicados aos solos, podem se acumular e persistir por longos períodos de tempo e podem, além de fitotóxicos, ser prejudiciais a processos microbianos vitais na ciclagem de nutrientes (McGrath et al., 1994).

Mesmo em solos com altos teores totais de elementos tóxicos, sua absorção pelas plantas é, muitas vezes, pouco afetada, devido ao poder tamponante do solo, formando quelatos com vários elementos. Essa propriedade do solo, porém, é variável nos inúmeros tipos de solo, sendo maior em solos mais ricos em oxi-hidróxidos de ferro e de alumínio e em matéria orgânica, e menor em solos arenosos, os quais liberam mais facilmente o que lhes é adicionado (Sposito, 1989).

Normalmente, em solos contaminados simultaneamente por vários elementos, como foi feito neste estudo, a competição entre eles pode influenciar a sua mobilidade e biodisponibilidade (McBride, 1994). Como o Pb é menos móvel que o Cd, provavelmente não houve competição entre estes elementos. Isto pode ser comprovado pela relação encontrada entre as doses aplicadas de Cd e as raízes das variedades (Figuras 8, 11 e 14), que indica que quanto maior a disponibilidade do elemento, maior a acumulação nas raízes. A maior parte do Pb ficou retida nas raízes, sendo pouco translocado para a parte aérea, fato este já bastante estudado e que tem sido comprovado a baixa translocação do Pb para a parte aérea.

Em estudos de Pierangeli et al. (2007), quando a aplicação foi multielementar, composta por Cd, Cu e Pb, houve redução na adsorção dos três elementos, sendo esta mais intensa para o Cd. Em estudo de adsorção competitiva com Cr, Ni, Cu, Zn, Cd e Pb foi constatado que quase todos os elementos-traço foram adsorvidos pelo solo em concentrações mais baixas, ocupando uma porcentagem proporcional relativa à sua concentração molar na solução. Contudo, quando a concentração aumentou, alguns competidores mais fortes, como Cr, Cu e Pb, mantiveram sua forte afinidade com a superfície adsorvedora, enquanto outros competidores mais fracos, como Ni, Zn e Cd, foram deslocados, reduzindo, portanto, suas quantidades adsorvidas (Fontes e Gomes, 2003). Isso vem confirmar que a afinidade dos solos é maior para Pb, conforme amplamente relatado na literatura (Alloway, 1993; Abreu, 1998; Kabata-Pendias e Pendias, 2001; Silva, 2006; Costa, 2009). Serrano et al. (2005) observaram que a presença simultânea de Cd e Pb resultou na redução de sorção dos elementos, aumentando a biodisponibilidade, toxicidade e lixiviação destes elementos. Fontes e Gomes (2003) afirmaram que a competição entre cátions metálicos pelos sítios de adsorção levou a menor retenção de Ni, Zn e Cd e a maior adsorção de Cr, Cu e Pb.

Além da competição, outros fatores como a concentração do elemento-traço, o pH, a força iônica, a CTC, os constituintes orgânicos e inorgânicos e o potencial redox também contribuem para a sua retenção no solo (Kabata-Pendias e Pendias, 2001). A ação combinada desses fatores resulta em maior ou menor impacto ambiental devido à presença desses elementos nos solos. Os processos de oxirredução e o pH são fatores

importantes nas mudanças de solubilidade dos elementos-traço adsorvidos na superfície de óxidos de Fe e Mn, que são fases do solo passíveis de redução, podendo ser liberados ao ocorrerem mudanças no potencial redox, tornando-se, por isso, perigosos nessas condições redutoras (Pardo et al., 1990).

No entanto, quando um solo ácido é inundado, normalmente o pH diminui durante os primeiros dias, atinge um mínimo e então aumenta e se estabiliza em valores próximos ao neutro algumas semanas mais tarde. Os valores de pH do Gleissolo, em todas as variedades e doses dos elementos aplicados ao solo, permaneceram alcalinos (Tabela 16).

**Tabela 16.** Valores de pH e CE nos tratamentos das variedades IRGA-417, IRGA-424 e Arize QM1010, com doses crescentes de Cd, de Pb e de Cr aplicadas no Gleissolo no momento da coleta das plantas.

Doses mg kg <sup>-1</sup>	IRGA-417		IRGA -424		Arize QM1010	
	pH (H <sub>2</sub> O)	CE dSm <sup>-1</sup>	pH (H <sub>2</sub> O)	CE dSm <sup>-1</sup>	pH (H <sub>2</sub> O)	CE dSm <sup>-1</sup>
Dose 0	7,7	0,26	7,5	0,23	8,2	0,24
Dose 1	7,4	0,29	7,9	0,24	7,6	0,24
Dose 2	8,2	0,27	8,2	0,24	8,0	0,25
Dose 3	8,1	0,34	8,0	0,25	7,5	0,25

Os elementos-traço têm sua solubilidade reduzida com o aumento do pH (Alloway, 1993). Em solos ricos em óxidos de ferro, como muitos dos solos brasileiros, é de se esperar uma maior redução em sua solubilidade com o estabelecimento do ambiente redutor em decorrência da inundação (Nunez et al., 1999). Os teores de NH<sup>4+</sup>, K<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup> e Mg<sup>2+</sup> tendem a aumentar na solução do solo com o tempo de inundação, conforme observaram Moraes e Freire (1974), seguindo um tipo de curva similar ao que se espera na solubilização do Mn<sup>2+</sup> e do Fe<sup>2+</sup>. Como consequência, o arroz irrigado passa a ter maior disponibilidade daqueles nutrientes, os quais poderão gerar competição com outros íons, entre os quais o Cd<sup>2+</sup>, o Pb<sup>2+</sup> e o Cr(III). No entanto, Kabata-Pendias e Adriano (1995) consideram que em ambiente de redução os óxidos de Fe e Mn se tornam mais solúveis, liberando os elementos-traço a eles adsorvidos. O As, o Se e o Cr são elementos que mudam seu estado de oxidação com a mudança do potencial redox do solo, alterando sua

especiação, mobilidade, solubilidade e toxicidade. O Pb, Cu, Zn e Ni, apesar de não mudarem seu estado de oxidação com a mudança do potencial redox do solo, podem apresentar forte associação com óxidos de Fe e Mn, que são susceptíveis a mudança de seu estado de oxidação. (Kabata-Pendias e Adriano, 1995).

Smith e Huyck (1999) e Kabata-Pendias e Mukherjee (2007) descreveram a mobilidade dos elementos-traço sob diferentes condições ambientais. Embora seja um pouco difícil de prever mobilidade do elemento-traço em solos e outros compartimentos terrestres, os autores referiram a capacidade de um elemento em mover-se com os fluidos, após dissolução em ambientes superficiais. Em ambientes de redução, as seguintes condições e comportamento de elementos traço foram distinguidos: 1) a redução na ausência de pH ácido sulfídrico, > 5: (a) muito móvel - nenhum, (b) móvel - Cd, Cu, Fe, Mn, Pb, Sr, e Zn, e (c) um pouco e pouco móvel - todos os outros elementos-traço. 2) a redução com sulfureto de hidrogênio, a pH > 5: (a) muito móvel - nenhum, (b) móvel - Mn e Sr, e (c) a pouco móvel imóvel - todos os outros elementos.

Neste estudo, em um cenário de casa-de-vegetação, com um ambiente alagado e em sistema fechado, a biodisponibilidade dos elementos aumentou com o incremento das doses. Os elementos-traço, com o aumento das doses, se tornaram preocupantes por apresentarem o aumento nas concentrações de Cd, de Cr e de Pb nos grãos das três variedades, teores estes acima dos permitidos pela legislação vigente (ANVISA, 1965) (Tabela 12). Nas variedades IRGA-417 e IRGA-424, o Cr nos grãos das plantas apresentam-se acima do limite permitido na legislação desde a testemunha (dose 0), ou seja, somente com o elemento presente naturalmente no solo (0,57 e 1,07 mg kg<sup>-1</sup>, respectivamente). Na variedade Arize QM1010, na testemunha (dose 0) o teor é baixo, no entanto, logo na dose 1 (metade do teor encontrado em fertilizantes fosfatados) esta concentração passa de 0,30 para 4,60 mg kg<sup>-1</sup>. (Figura 16).

Embora as maiores concentrações do Cr, neste cenário, tenham sido encontradas nas raízes das variedades, os teores encontrados nos grãos diferem dos resultados encontrados na literatura. Assim como para o Pb, para o Cr observa-se que nos vegetais a maior parte desse elemento é retida nas

raízes e somente uma pequena parcela é transportada para as partes superiores da planta, sendo improvável a sua bioacumulação proveniente do solo nessas partes (Kabata-Pendias e Pendias, 2001).

### **7.5.2 Produção de matéria seca**

Os efeitos visíveis da exposição a altas doses de elementos-traço são, em geral, descritos como redução severa do crescimento, clorose e atrofia foliar. Além desses, relata-se, ainda, para o caso do Cd, o enrolamento das folhas (Benavides et al., 2005). A necrose e a clorose foliar são descritas como sintomas de toxidez de Zn e Cd e, freqüentemente, indicam distúrbios na nutrição mineral, como deficiência de Fe e redução da absorção e transporte de água e de vários elementos (Ca, Mg, K e Mn) pelas plantas (Kabata-Pendias e Pendias, 2001; Benavides et al., 2005).

Visivelmente, as variedades IRGA-417, IRGA-424 e Arize QM1010 não apresentaram sintomas de fitotoxicidade nos tratamentos contendo Cd, Cr e Pb. As plantas tiveram um crescimento similar às testemunhas, com um desenvolvimento reprodutivo normal, podendo ser observado na Figura 17.

A matéria seca da parte aérea das variedades IRGA-424 e Arize QM1010, com o incremento das doses de Cd, Cr e Pb, não apresentaram diferenças significativas, indicando que as doses dos elementos-traço não interferiram no crescimento das mesmas (Tabela 17). Para a variedade IRGA-417, houve uma redução na parte aérea da planta (Tabela 17).

Nas raízes, somente a variedade Arize QM1010 (Tabela 17) apresentou uma redução de matéria seca na maior dose aplicada, no entanto não interferiu no crescimento da parte aérea e produção de grãos.

Outros trabalhos, com a aplicação de elementos-traço ao solo, também, apresentaram resultados similares aos encontrados neste estudo. Nogueira (2012), avaliando doses crescentes de Cd aplicados em solo cultivado com arroz, não observou redução de matéria seca da parte aérea das plantas. Li et al. (2005), adicionando Cd em solos cultivados com arroz, observou que não houve redução das raízes, parte aérea e grãos da planta. Zeitouni (2003), em experimento realizado em casa-de-vegetação, aplicando doses crescentes de Cd, Pb, Cu, Ni e Zn em diferentes espécies vegetais, também, não verificou diferença significativa na produção de matéria seca da

parte aérea em nenhum dos tratamentos (dose 0: sem adição dos elementos, dose 1: 0,75; 6,25; 20; 8,75 e 62,50 mg kg<sup>-1</sup> de Cd, Pb, Cu, Ni e Zn, respectivamente e; dose 2: composta pelo dobro das quantidades aplicadas na dose 1).



A) Vista do Experimento em casa-de-vegetação. B) Formação da panícula (Fase reprodutiva)

**Figura 17.** Vista do experimento com tratamentos de doses crescentes de Cd, de Pb e de Cr aplicados no Gleissolo e cultivado com plantas de arroz (Variedades IRGA-417, IRGA-424 e Arize QM1010), em casa-de-vegetação.

Para Taiz e Zeiger (2009), quando não ocorre a redução na produção de matéria seca, pode-se considerar que há tolerância da espécie ao contaminante, conseguida pelas diferentes adaptações bioquímicas que permitem a planta tolerar altas concentrações desses elementos. Essa tolerância pode ser conseguida pela redução do transporte através da membrana, exclusão, formação de peptídeos ricos em grupos tiólicos (fitoquelatinas e metalotioneínas), quelação por ácidos orgânicos e aminoácidos e principalmente a compartimentalização de metal em estruturas subcelulares, como vacúolos (Fernandes, 2007).

**Tabela 17.** Matéria seca dos grãos, da parte aérea e das raízes das plantas de arroz submetidas a doses crescentes de Cd, Cr e Pb no solo.

Doses aplicadas	Grãos	Parte aérea	Raízes
	-----g vaso <sup>-1</sup> -----		
Variedade IRGA-417			
Dose 0	62,52a	116,97a	121,51a
Dose 1	53,08ab	100,64ab	98,85a
Dose 2	45,33b	90,40b	87,23a
Dose 3	46,00b	85,10b	74,47a
Variedade IRGA-424			
Dose 0	63,77a	131,84a	108,70a
Dose 1	63,90a	115,44a	93,76a
Dose 2	64,67a	106,11a	126,17a
Dose 3	62,00a	116,93a	78,83a
Variedade Arize QM1010			
Dose 0	72,26a	120,78a	179,00a
Dose 1	64,61a	111,20a	155,66a
Dose 2	76,17a	114,23a	172,83a
Dose 3	78,03a	121,07a	80,39b

Entre doses, médias seguidas pela mesma letra não diferem significativamente entre si pelo teste de Duncan ( $p < 0,05$ ).

Para os elementos Pb e Cr, os quais são mais fortemente adsorvidos nas partículas do solo e apresentam baixa mobilidade, os resultados da não interferência na produção de matéria seca são facilmente entendidos. No entanto, o Cd, pela sua mobilidade no solo e nos tecidos das plantas e, aplicado em doses crescentes no solo, por suposição, deveria ter ocasionado a redução na matéria seca dos tecidos das variedades. Oliveira et al. (2005) também obtiveram resultado semelhante quando avaliaram o efeito do Cd no crescimento do arroz, onde as altas doses de Cd aplicadas no solo não mostraram efeito na produção de matéria seca.

As espécies agem de modo diferenciado em relação à contaminação do solo por Cd, variando de espécies tolerantes a muito sensíveis a esse elemento (Kabata-Pendias e Pendias, 2001). Os níveis críticos de Cd variam de acordo com a espécie vegetal.

Em estudos feitos por Carneiro et al. (2002) com diferentes espécies sob solo contaminado com diferentes elementos-traço, a *Pffafia* sp. apresentou alta tolerância à contaminação do solo com Cd e Zn e cresceu satisfatoriamente em solo contendo até 90 mg kg<sup>-1</sup> de Cd. Já, as espécies *Sida*

*glaziovii*, *Bidens pilosa*, *Rhynchelytrum repens*, *Cenchrus echinatus* e *Nicandra physaloides* foram extremamente sensíveis à contaminação do solo com Cd e Zn (Carneiro et al., 2002). Em estudo feito por Lima (2008), aplicando doses crescentes de Cd no solo e avaliando a resposta do nabo forrageiro e aveia preta a este elemento, houve a redução da matéria seca das raízes e parte aérea das duas espécies vegetais. Normalmente, o Cd inibe o crescimento da maioria das plantas, tanto da raiz como da parte aérea, sendo, no entanto as raízes geralmente mais sensíveis à sua presença (Vilar, 2002).

No entanto, a regulação da absorção dos elementos-traço na rizosfera, o acúmulo desses nas raízes, desde que preservada sua integridade e funções primárias e, a baixa translocação para a parte aérea são considerados mecanismos pelos quais o sistema radicular pode contribuir para a tolerância de espécies a diferentes elementos-traço (Alloway, 1993; Kabata-Pendias e Pendias, 2001).

### **7.5.3 Quantidades acumuladas de Cd, de Cr e de Pb nas plantas de arroz (IRGA-417, IRGA-424, Arize QM1010)**

De uma maneira geral, o aumento das doses de Cd no Gleissolo incrementou seu acúmulo nas raízes, nos grãos e na parte aérea das três variedades (Tabelas 19, 20 e 21). A variedade que mais acumulou Cd em seus tecidos foi a IRGA-417 em que, na maior dose de Cd aplicada ao solo, encontrou-se 0,25 mg de Cd nos grãos, 1,01 mg na parte aérea e 2,26 mg nas raízes. A acumulação nos grãos pode entrar na cadeia alimentar, tornando-se um grande risco para a população (Kabata-Pendias e Pendias, 2001).

Para o Pb e o Cr, nas três variedades, as doses destes elementos aplicados ao solo não resultaram em incrementos significativos nas quantidades acumuladas da parte aérea e grãos (Tabelas 20, 21 e 22). Nas raízes, entretanto, as quantidades de Cd, Pb e Cr adicionadas ao Gleissolo aumentaram significativamente o acúmulo destes elementos nas três variedades.

Resultados similares, onde o maior acúmulo dos elementos-traço foi nas raízes pode ser encontrado em Silva et al. (2007), os quais avaliaram a absorção e a capacidade de translocação de Cd, Cu, Fe, Mn, Pb e Zn de um



solo contaminado para grãos de soja e arroz, em casa-de-vegetação. Concluíram que o arroz acumulou, em geral, mais Cd, Cu, Fe, Mn e Pb nas raízes que na parte aérea. As raízes de arroz limitaram a translocação de Cd, Cu, Fe, Mn e Pb para a parte aérea e para os grãos. Dwivedi et al. (2007), na Índia, cultivaram arroz em um solo com cinza produzida durante a combustão do carvão denominada “Fly-ash”, que contém elementos tóxicos, tais como Cr, Pb, Hg, Ni, V, As e Ba. Neste experimento o acúmulo dos elementos, nas plantas de arroz, seguiu a seguinte ordem: Fe> Si> Mn> Zn> Ni> Cu> Cd> As, em todas as partes da planta.

**Tabela 18.** Quantidades de Cd, Pb e Cr acumuladas nos grãos, na parte aérea e nas raízes das plantas de arroz – variedade IRGA- 417.

Doses aplicadas	-----mg vaso <sup>-1</sup> -----		
	Cd	Pb	Cr
		Grãos	
Dose 0	0,01c	-*	0,04a
Dose 1	0,07bc	-*	0,04a
Dose 2	0,18ab	-*	0,02b
Dose 3	0,25a	0,04a	0,03a
		Parte aérea	
Dose 0	0,02b	0,18a	0,11ab
Dose 1	0,20b	0,10a	0,15a
Dose 2	0,59ab	0,50a	0,08b
Dose 3	1,01a	0,36a	0,07b
		Raízes	
Dose 0	-*	1,08b	0,33c
Dose 1	0,35bc	2,91ab	2,84bc
Dose 2	1,23b	5,89a	3,45b
Dose 3	2,26a	5,07a	7,39a

\*A concentração do elemento não foi detectada pelo aparelho ICP-OES, portanto não pode ser calculada a quantidade acumulada na planta.

Entre doses, médias seguidas pela mesma letra não diferem significativamente entre si pelo teste de Duncan ( $p < 0,05$ ).

Em estudos feitos recentemente por Majewska e Kurek (2011), avaliando a acumulação de Cd no centeio, foram observados que a concentração de Cd imobilizada pela biomassa das plantas aumentou com o aumento da concentração de Cd no meio e foi sempre maior nas raízes do que na parte aérea.

**Tabela 19.** Quantidades de Cd, Pb e Cr acumuladas nos grãos, na parte aérea e nas raízes das plantas de arroz – variedade IRGA- 424.

Doses aplicadas	-----mg vaso <sup>-1</sup> -----		
	Cd	Pb	Cr
		Grãos	
Dose 0	-	*	0,01a
Dose 1	0,02c	0,05a	0,05a
Dose 2	0,05b	*	0,02a
Dose 3	0,11a	*	0,05a
		Parte aérea	
Dose 0	0,02b	*	0,11a
Dose 1	0,03b	*	0,08a
Dose 2	0,08b	*	0,07a
Dose 3	0,99a	0,25a	0,12a
		Raízes	
Dose 0	*	1,20b	0,64b
Dose 1	0,13b	2,51ab	2,20ab
Dose 2	0,53b	2,98ab	3,85ab
Dose 3	1,44a	4,58a	7,31a

A concentração do elemento não foi detectada pelo aparelho ICP-OES, portanto não pode ser calculada a quantidade acumulada na planta.

Entre doses, médias seguidas pela mesma letra não diferem significativamente entre si pelo teste de Duncan ( $p < 0,05$ ).

Segundo Grant e Sheppard (2008), alguns trabalhos demonstraram que na utilização de adubos fosfatados com baixa concentração de Cd a aplicação desses fertilizantes não resultou em aumentos de Cd no solo. Por exemplo, em estudos a longo prazo, nos Estados Unidos, a aplicação de fertilizantes que continham menos de 5 mg kg<sup>-1</sup> de Cd não aumentou a concentração no solo (Mortvedt, 1987) e, portanto, não houve o acúmulo nos tecidos das plantas. É importante ressaltar que a maior dose de Cd aplicada no solo, neste estudo, foi de 4 mg kg<sup>-1</sup> e o acúmulo na parte aérea e grãos das variedades de arroz foi baixo. Camargo et al. (2000), avaliando a adubação fosfatada e elementos-traço em latossolo cultivado com arroz de sequeiro, concluiu que os adubos fosfatados não contribuíram de modo relevante para o aumento do teor dos elementos no solo e na planta. Malavolta (1994) afirmou que os elementos-traço tóxicos, contidos nos adubos comerciais, principalmente fosfatados, usados nas doses adequadas, não aumentam os teores destes elementos nos solos e nas plantas a níveis indesejáveis em curto, médio e longo prazos.

**Tabela 20.** Quantidades de Cd, Pb e Cr acumuladas nos grãos, na parte aérea e nas raízes das plantas de arroz – variedade Arize QM1010.

Doses aplicadas	Cd	Pb	Cr
	-----mg vaso <sup>-1</sup> -----		
		Grãos	
Dose 0	*	*	0,02a
Dose 1	0,01b	0,10a	0,30a
Dose 2	0,03b	0,04a	0,04a
Dose 3	0,10a	-	0,04a
		Parte aérea	
Dose 0	0,03b	*	0,08 <sup>a</sup>
Dose 1	0,05b	0,11a	0,10a
Dose 2	0,14b	0,69a	0,72a
Dose 3	0,59a	0,13a	0,12a
		Raízes	
Dose 0	*	2,35c	1,13c
Dose 1	0,20c	3,60bc	5,17b
Dose 2	0,61b	7,77a	7,36a
Dose 3	0,91a	3,73b	5,32b

\* A concentração do elemento não foi detectada pelo aparelho ICP-OES, portanto não pode ser calculada a quantidade acumulada na planta.

Entre doses, médias seguidas pela mesma letra não diferem significativamente entre si pelo teste de Duncan ( $p < 0,05$ ).

Os resultados encontrados neste estudo corroboram com grande parte da literatura, onde afirmam que, o acúmulo dos elementos-traço também está relacionado com a capacidade da espécie em tolerar a presença desses elementos. Assim, em espécies tolerantes a presença de elementos-traço, geralmente, ocorre acúmulo dos elementos na raiz, havendo pouca translocação para a parte aérea (McGrath, 1994).

Segundo McBride (1994), elementos-traço absorvidos na forma catiônica, como Zn, Cu, Cr, Pb e Mn, translocam pouco para a parte aérea. O Cd no interior da planta torna-se relativamente móvel (Hernandez e Cooke, 1997). Trabalhos realizados por Hoffmann et al. (2004) mostraram que as concentrações de Cd na biomassa da parte aérea de arroz (*Oryza sativa*), em Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA) e Argissolo Vermelho - Amarelo (PVA), foram inferiores as encontradas nas raízes, confirmando que a raiz atuou como um filtro para retenção deste elemento.

Na Espanha, um estudo cultivando diferentes culturas comestíveis em um solo contaminado por elementos-traço, os fatores de transferência solo-planta foram uniformemente baixos para todos os elementos e culturas (Madejón et al., 2011). Percebe-se que espécies ou variedades de uma mesma espécie vegetal expostas a uma concentração similar de elementos-traço podem diferir na absorção e/ou na distribuição interna dos mesmos na planta. Isso pode resultar em diferenças na capacidade de retenção do elemento absorvido nas raízes e/ou na variação na carga no xilema (Kabata-Pendias e Pendias, 2001).

## **7.6 Conclusões**

Confirmando a hipótese inicial, com o aumento das doses aplicadas no solo houve o incremento das concentrações dos elementos na parte aérea das plantas. Todas as variedades apresentaram nos grãos teores de Cd, Cr e Pb, na maior dose aplicada ao Gleissolo, concentrações maiores do que o permitido na legislação vigente (ANVISA, 1965). No entanto, a variedade híbrida Arize QM1010 foi a espécie que menos acumulou estes elementos em seus tecidos.

## **8 CONCLUSÕES GERAIS**

Os solos, as águas e as plantas das lavouras de arroz irrigado, coletados e avaliados neste estudo, de uma maneira geral, não oferecem risco ao ambiente, apresentando concentrações de Cd, Cr e Pb em limites inferiores às indicadas na legislação vigente no Brasil (principalmente nos grãos). Esta conclusão deve-se ao fato que os elementos-traço, por não serem biodegradáveis, podem se acumular nos tecidos vivos ao longo da cadeia alimentar, chegando ao ser humano principalmente por meio da alimentação. Desta forma, com baixas concentrações nos grãos das plantas de arroz, o risco de ingestão dos elementos-traço se torna reduzido.

O estudo em que o solo foi contaminado, em casa-de-vegetação, apresentou concentrações significativas de Cd, Cr e Pb nas plantas estudadas, no entanto, todas as variedades de arroz (IRGA-417, IRGA-424 e Arize QM1010) apresentaram maior acúmulo de Cd, Cr e Pb nas raízes, apresentando baixo índice de translocação (IT) para os grãos.

Estes resultados não confirmam a hipótese que, com aplicações sucessivas de insumos agrícolas nestes compartimentos, as concentrações dos elementos-traço estariam acima das consideradas como seguras para fins agrícolas.

## 9 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABREU, C. A. de et al. Distribuição de chumbo no perfil de solo avaliada pelas soluções de DTPA e Mehlich-3. **Bragantia**, Campinas, v. 57, n. 1, p. 182-195, 1998.

ADRIANO, D. C. **Trace elements in terrestrial environments: biogeochemistry, bioavailability, and risks of metals**. 2nd ed. New York: Springer Verlag, 2001.

ALCÂNTARA, M. A. K. et al. Comportamento do crômio no ambiente. **Revista de Ciências Médicas**, Juiz de Fora, v. 2, n. 1, p. 83-125, 2000.

ALCARDE, J. C.; RODELLA, A. A. Qualidade e legislação de fertilizantes e corretivos. In: CURI, N. et al. **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2003. v. 3, p. 291-334.

ALLOWAY, B. J. **Heavy metals in soils**. New York: John Wiley & Sons, 1993. 339 p.

ALLOWAY, B. J.; AYRES, D. C. Chemical principles of environmental pollution, 2nd ed. Glasgow: Blackie Academic and Professional, 1997. p. 10-30.

AMARAL SOBRINHO, N. M. B. et al. Metais pesados em alguns fertilizantes e corretivos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 16, p. 271-276, 1992.

AMARAL SOBRINHO, N. M. B.; VELLOSO, A. C. X.; OLIVEIRA, C. Mobilidade de metais pesados em solo tratado com resíduo siderúrgico ácido. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 22, n. 2, p. 345-353, 1998.

ANGHINONI, I. et al. **Fertilidade dos solos cultivados com arroz irrigado no Rio Grande do Sul**. Cachoeirinha: IRGA. EEA. Divisão de Pesquisa, 2004. 51 p. (Boletim técnico).

ANTOINE, J. M. R. et al. Dietary intake of minerals and trace elements in rice on the Jamaican market. **Journal of Food Composition and Analysis**, San Diego, v. 26, p. 111-121, 2012.

ANVISA - AGÊNCIA NACIONAL DE VIGILÂNCIA SANITÁRIA. **Decreto nº 55871, de 26 de março de 1965**. Disponível em: <

[http://www.anvisa.gov.br/legis/decretos/55871\\_65.htm](http://www.anvisa.gov.br/legis/decretos/55871_65.htm)>. Acesso em: 10 out. 2012.

ANVISA - AGÊNCIA NACIONAL DE VIGILÂNCIA SANITÁRIA. **Nota técnica sobre livre comércio de agrotóxicos e impactos à saúde humana.** Disponível em: <[http://www.pronaf.gov.br/dater/arquivos/livre\\_comercio\\_agrotoxicos.pdf](http://www.pronaf.gov.br/dater/arquivos/livre_comercio_agrotoxicos.pdf)>. Acesso em: 12 jan. 2009.

APHA – AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION. **Standard methods for the examination of water and wastewater.** 20th ed. [S.I.], 1998.

ARROZ cultivado na China contém metais pesados, diz relatório. **Folha de São Paulo**, São Paulo, 16 fev. 2011. Ambiente. Disponível em: <<http://www1.folha.uol.com.br/ambiente/876457-arroz-cultivado-na-china-contem-metais-pesados-diz-relatorio.shtml>>. Acesso em: 10 out. 2012.

ATSDR - AGENCY FOR TOXIC SUBSTANCES AND DISEASE CONTROL. **CERCLA priority list of hazardous substances.** Disponível em: <<http://www.atsdr.cdc.gov/clist.html>>. Acesso em: 21 set. 2012.

AZAMBUJA, I. H. V. et al. Aspectos socioeconômicos da produção de arroz. In: GOMES, A. S.; MAGALHAES Jr., A. M. **Arroz irrigado no Sul do Brasil.** Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2004. p. 23-44.

AYRES, A. J. S. et al. **Indústria arrozeira no Rio Grande do Sul:** notas sobre a localização da atividade e a estrutura produtiva. Disponível em: <[www.pucrs.br/eventos/eeg/trabalhos/54.doc](http://www.pucrs.br/eventos/eeg/trabalhos/54.doc)>. Acesso em: 12 mar. 2011.

BAIRD, C. Environmental chemistry. 2nd ed. New York: W. H. Freeman and Company, 1999. 557 p.

BAKER, A. J. M.; BROOKS, R. R. Terrestrial higher plants which hyper accumulate metallic elements-a review of their distribution, ecology and phytochemistry. **Biorecovery**, Berkhamsted, v. 1, p. 81-86, 1989.

BARCELÓ, J.; POSCHENRIEDER, C. Phytoremediation: principles and perspectives. **Contributions to Science**, Catalonia, v. 2, n. 3, p. 333-344, 2003.

BARTLETT, R. J.; KIMBLE, J. M. Behavior of chromium in soils: 11: hexavalent forms. **Journal Environmental Quality**, Madison, v. 5, n. 4, p. 383-386, 1976.

BARTLETT, R. J. Chromium cycling in soils: links, gaps, and methods. **Environmental Health Perspectives**, Research Triangle Park, v. 92, p. 17-24, 1991.

BENAVIDES, M. P.; GALLEGOS, S. M.; TOMARO, M. L. Cadmium toxicity in plants. **Brazilian Journal Plant Physiology**, Campos dos Goytacazes, v. 17, p. 21-34, 2005.

BERTON, R. S. Fertilizantes e poluição. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE FERTILIDADE DO SOLO E NUTRIÇÃO DE PLANTAS, 20., Piracicaba, 1992. **Anais...** Piracicaba: Fundação Cargill, 1992. p. 299-313.

BERTON, R. S. Riscos de contaminação do agroecossistema com metais pesados. In: BETTIOL, W.; CAMARGO, O. A. (Ed.). **Impacto ambiental do uso agrícola do lodo de esgoto**. Jaguariúna, SP: Embrapa Meio Ambiente, 2000. p. 260.

BIANCHIN, L. **Atributos químicos e especiação de cromo em solo com aplicação de resíduos de curtume e carbonífero em experimento de campo**. 2011. 127 f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

BIONDI, C. M. **Teores naturais de metais pesados nos solos de referência do Estado de Pernambuco**. 2010. 70 f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, 2010.

BIZARRO, V. G. et al. Teor de cádmio em fertilizantes fosfatados comercializados no Brasil. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 38, n. 1, p. 247-250, 2008.

BLUM, W. Cadmium uptake by higher plants. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON THE BIOGEOCHEMISTRY OF TRACE ELEMENTS, 4., 1997, Berkeley. **Proceedings of extended abstracts...** Berkeley: University of California, 1997. p. 109-110.

BORGES, F. H.; TACHIBANA, W. K. A evolução da preocupação ambiental e seus reflexos no ambiente dos negócios: uma abordagem histórica. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 25., 2005, Porto Alegre. **Anais...** Porto Alegre: Associação Brasileira de Engenharia de Produção, 2005. 1 CD-ROM.

BORGES JUNIOR, M. et al. Valores de referência local e avaliação da contaminação por zinco em solos adjacentes a áreas mineradas no município de Vazante-MG. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, p. 2883-2893, 2008. Número especial.

BRIDGES, E. M. The soil and their vulnerability to chemical pollution. In: INTERNATIONAL WORKSHOP ON MAPPING OF SOIL AND TERRAIN VULNERABILITY TO SPECIFIED CHEMICAL COMPOUNDS IN EUROPE AT SCALE OF 1:5 M, 1991, Wageningen. **Proceedings...** Wageningen, 1991. p. 125-135.

BRÜMMER, G.; GERTH, J.; HERMS, U. Heavy metal species, mobility and availability in soils. **Zeitschrift fuer Pflanzenernaehr und Bodenkd**, Weinheim, v. 149, p. 382-398, 1986.



CAIRES, S. M. **Determinação dos teores naturais de metais pesados em solos do Estado de Minas Gerais como subsídio ao estabelecimento de Valores de Referência de Qualidade.** 2009. 304 f. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2009.

CALLAHAN, M. A. et al. Water related environmental face of 129 priority pollutants. Washington: Environmental Protection Agency, 1979. v. 1.

CAMARGO, M. S. de et al. Adubação fosfatada e metais pesados em latossolo cultivado com arroz. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 57, n. 3, p. 513-518, 2000.

CAMARGO, O. A.; ALLEONI, L. R. F.; CASAGRANDE, J. C. Reações dos micronutrientes e elementos tóxicos no solo. In: FERREIRA, M. E. et al. **Micronutrientes e elementos tóxicos na agricultura.** Jaboticabal: Legis Summa, 2001. p. 89-124.

CAMPOS, M. L. et al. Baseline Concentration of Heavy Metals in Brazilian Latosols. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, Philadelphia, v. 34, p. 547-557, 2003.

CAMPOS, M. L. et al. Determinação de cádmio, cobre, cromo, níquel, chumbo e zinco em fosfatos de rocha. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 40, n. 4, p. 361-367, 2005.

CARDOSO, P. F. **Resposta de linhagens de arroz à exposição ao cádmio.** 2000. 55 f. Dissertação (Mestrado) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, ESALQ, Piracicaba, 2000.

CARDOSO, L. M. N.; CHASIN, A. A. M. **Ecotoxicologia do cádmio e seus compostos.** Salvador: CRA, 2011. 22 p. (Cadernos de referência ambiental, 6).

CARMONA, F. de C. **Salinidade da água e do solo e sua influência sobre o arroz irrigado.** 2011. 131 f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

CARNEIRO, M. A. C.; SIQUEIRA, J. O.; MOREIRA, F. M. de S. Comportamento de espécies herbáceas em misturas de solo com diferentes graus de contaminação com metais pesados. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 37, n. 11, p. 1629-1638, 2002.

CASTILHOS, D. D. et al. Acúmulo de cromo e seus efeitos na fixação biológica de nitrogênio e absorção de nutrientes de soja. **Revista Brasileira de Agrociência**, Pelotas, v. 7, n. 2, 2001.

CETESB - COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL. **Relatório de estabelecimento de valores orientadores para solos e águas subterrâneas no Estado de São Paulo.** Disponível em: <<http://www.cetesb.sp.gov.br>>. Acesso em: 16 out. 2012.

CHANEY, R. L.; OLIVER, D. P. Sources, potential adverse effects and remediation of agriculture soil contaminants. In: NAIDU, R. (Ed.). **Contaminants and the soil environment in the Australasia-Pacific region**. Dordrecht: Kluwer Academic Publishersp, 1996. p. 323-359.

CHAVES, E. V. **Absorção de metais pesados de solos contaminados do aterro sanitário e pólo industrial de Manaus pelas espécies de plantas Senna multijuga, Schizolobium amazonicum E Caesalpinia echinata**. 2008. 79 f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós Graduação em Biotecnologia, Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2008.

CHRISTOFIDIS, D. Água, irrigação e segurança alimentar. **Revista Item**, Brasília, n. 77, p. 16-21, 2008.

CODEX ALIMENTARIUS. **Norma Geral para Aditivos Alimentares (GSFA) – CAC/STAN 192-1995 (última revisão)**. Disponível em: <<http://www.codexalimentarius.net/gsfaonline/index.html?lang=en>>. Acesso em: 13 out. 2012.

CONAB - COMPANHIA BRASILEIRA DE ABASTECIMENTO. **6º levantamento de grãos 2007/2008**. Disponível em: <[www.conab.gov.br/conabweb/download/safra/estudo\\_safra.pdf](http://www.conab.gov.br/conabweb/download/safra/estudo_safra.pdf)>. Acesso em: 11 fev. 2011.

CONAMA - CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE – IBAMA. **Decreto nº 88.351, de 1º de junho de 1983**. Disponível em: <<http://www2.camara.leg.br/legin/fed/decret/1980-1987/decreto-88351-1-junho-1983-438446-publicacaooriginal-1-pe.html>>. Acesso em: 12 out. 2012.

CONAMA - CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE – IBAMA. **Resolução n. 357, de 17 de março de 2005**. Disponível em: <[http://www.cetesb.sp.gov.br/agua/praias/res\\_conama\\_357\\_05.pdf](http://www.cetesb.sp.gov.br/agua/praias/res_conama_357_05.pdf)>. Acesso em: 12 out. 2012.

CONAMA - CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. **Resolução CONAMA Nº 420/2009**. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=620>>. Acesso em: 14 set. 2012.

COSTA, A. C. S. da et al. Acúmulo de Zn, Fe e Pb em plantas de crisântemo após cultivo em substrato contendo doses de resíduo industrial de galvanoplastia. **Acta Scientiarum Agronomy**, Maringá, v. 26, p. 407-411, 2004.

COSTA, C. N. **Biodisponibilidade de metais pesados em solos do Rio Grande do Sul**. 2005. 78 f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

COSTA, E. T. de S. et al. Caracterização de subproduto da indústria de alumínio e seu uso na retenção de cádmio e chumbo em sistemas monoelementares. **Química Nova**, São Paulo, v. 32, n. 4, p. 868-874, 2009.

COTRIM, A. R. **Metais pesados na agricultura, conseqüências das elevadas concentrações de mercúrio, cádmio e chumbo no solo**. 1994. 48 f. Dissertação (Mestrado) - Instituto de Química, UNICAMP, Campinas, 1994.

EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 2. ed. Brasília: Embrapa Produção de Informação, 2006a. 306 p.

EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. SNLCS. **Procedimentos normativos de levantamentos pedológicos**. Brasília: EMBRAPA-SPI, 1995. 101 p.

EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Cultivo de arroz em terras altas**. 2006b. Disponível em <<http://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/FontesHTML/Arroz/ArrozTerrasAltas/mercado.htm>>. Acesso em: 09 set. 2012.

EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Cultivo do arroz irrigado no Brasil**. Embrapa Clima Temperado, 2009. Disponível em: <<http://www.cpact.embrapa.br/sistemas/arroz/>>. Acesso em: 09 set. 2012.

EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Consumo, mercado e comercialização do Arroz no Brasil**. Disponível em: <<http://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/FontesHTML/Arroz/ArrozIrrigadoBrasil/cap18.htm>>. Acesso em: 11 out. 2012.

FADIGAS, F.S. et al. Concentrações naturais de metais pesados em algumas classes de solos brasileiros. **Bragantia**, Campinas, v. 61, n. 2, p. 151-159, 2002.

FADIGAS, F. S. et al. Proposição de valores de referência para a concentração natural de metais pesados em solos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 10, p. 699-705, 2006.

FAO - FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. Food Balance Sheet. **Food and Agriculture Organization of the United Nations Statistical Databases (FAOSTAT)**. Rome: FAO, 2001. Disponível em: <<http://www.fao.org>>. Acesso em: 10 ago. 2012.

FEPAM - FUNDAÇÃO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE-RS. **Relatório Pró-Guaíba – Rede de Monitoramento Ambiental**. Disponível em: <[http://www.fepam.rs.gov.br/qualidade/qualidade\\_gravatai/gravatai.asp](http://www.fepam.rs.gov.br/qualidade/qualidade_gravatai/gravatai.asp)>. Acesso em: 23 out. 2012.

FERNANDES, R. B. A. et al. Avaliação da concentração de metais pesados em áreas olerícolas no Estado de Minas Gerais. **Revista Brasileira de**

**Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 11, n. 1, p. 81–93, 2007.

FERREIRA, A. S. et al. Alterações de atributos químicos e biológicos de solo e rendimento de milho e soja pela utilização de resíduos de curtume e carbonífero. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 27, n. 4, p. 755-763, 2003.

FONTES, M. P. F.; GOMES, P. C. Simultaneous competitive adsorption of heavy metals by the mineral matrix of tropical soils. **Applied Geochemistry**, Oxford, v. 18, p. 795-804, 2003.

FURTADO, S. M. de A.; SANTOS, E. dos. Caracterização de metais pesados na área da Estiva dos Pregos, SC. **Geosul**, Florianópolis, v. 9, n. 17, p. 50-61, 1994.

FURTADO, S. M. A.; SCHEIBE, L. F.; LOPES, L. J. Rizicultura e poluição por metais pesados na bacia hidrográfica do Rio D'uma – SC. **Revista Geografia**, Rio Claro, v. 25, n. 1, p. 5-22, 2000.

GALVÃO, L. A. C.; COREY, G. **Cromo**. Ciudad de México: Centro Panamericano de Ecología Humana y Salud. Organización Mundial de la Salud, 1987.

GARBISU, C.; ALKORTA, I. Phytoextraction: a cost effective plant-based technology for the removal of metals from the environment. **Bioresource Technology**, Oxford, v. 77, p. 229-236, 2001.

GENRO JR., S. A. et al. Eficácia das atuais recomendações de adubação para o arroz irrigado no Rio Grande do Sul. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO ARROZ IRRIGADO, 5., 2007, Pelotas. **Anais...** Pelotas: SOSBAI, 2007. v. 1, p. 624-626.

GIMENO-GARCÍA, E.; ANDREU, V.; BOLUDA, R. Heavy metals incidence in the application of inorganic fertilizers and pesticides to rice farming soils. **Environmental Pollution**, Kidlington, v. 92, n. 1, p. 19-25, 1996.

GOES, R. C. **Toxicologia industrial**: um guia prático para prevenção e primeiros socorros. Rio de Janeiro: Revinter, 1997. 53 p.

GONÇALVES, G. K. **Disponibilidade de fósforo em solos reduzidos**. 2007.188 f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.

GUILHERME, L. R. G. et al. Elementos-traço em solos e sistemas aquáticos. **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2005. v. 4, p. 345-390.

GUILHERME, L. R. G.; MARCHI, G. **Metais em fertilizantes inorgânicos: Avaliação de risco à saúde após a aplicação**. São Paulo: ANDA, 2007. 154 p.

GUINDANI, R. H. P. **Dris para avaliação do estado nutricional do arroz irrigado no Rio Grande do Sul**. 2007. 92 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.

GUSSARSSON, M.; ADALSTEINSSON, P. J.; ASP, H. Cadmium and copper interactions on the accumulation and distribution of Cd and Cu in birch (*Betula pendula* Roth) seedlings. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 171, p. 185-187, 1995.

HAMELINK, J. L. et al. **Bioavailability**: physical, chemical and biological interactions. Boca Raton: CRC Press, 1994.

HERNÁNDEZ, J.; MEURER, E. J. Disponibilidade de fósforo em seis solos do Uruguai afetada pela variação temporal das condições de oxirredução. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 24, p. 19-26, 2000.

IRGA - INSTITUTO RIO GRANDENSE DO ARROZ. **Censo da lavoura de arroz irrigado do Rio Grande do Sul – safra 2004/5**. Porto Alegre, 2006. 122 p.

IRGA - INSTITUTO RIO GRANDENSE DO ARROZ. **Relatório final de colheita de arroz irrigado no RS**. Porto Alegre, 2010. Disponível em: <<http://www.irga.rs.gov.br/arquivos/20100714165306.pdf>>. Acesso em: 21 set. 2011.

JORDÃO, C. P. et al. Contaminação por cromo de águas de rios provenientes de curtumes em Minas Gerais. **Química Nova**, São Paulo, v. 22, n. 1, p. 47, 1999.

KABATA-PENDIAS A.; ADRIANO D. Trace metals. In: RECHCIGL, J. E. (Ed.). Soil amendments and environmental quality. Agriculture and environment series. Boca Raton: CRC Press, 1995. p. 139–167.

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

KABATA-PENDIAS, A.; MUKHERJEE, A. B. **Trace elements from soil to human**. NewYork: Springer-Verlag, 2007.

KOLLURU, R. Risk assessment and management: a unified approach. In: KOLLURU, R. et al. **Risk assessment and management handbook**: for environmental, health and safety professionals. Boston, Massachusetts: McGraw Hill, 1996. .

LANGENBACH, T.; SARPA, M. Teor de cádmio nos fertilizantes fosfatados brasileiros. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 9, p. 179-181, 1985.

LEITA, L. et al. Analysis of intercellular cadmium forms in roots and leaves of bush bean. **Journal Plant Nutrition**, Filadélfia, v. 19, n. 3-4, p. 527-533, 1996.

LEITE, E. M. A. **Exposição ocupacional ao chumbo e seus compostos**. 2006. Disponível em: <[www.farmacia.ufmg.br/lato/downloads/](http://www.farmacia.ufmg.br/lato/downloads/Apchumbo2006.doc)Apchumbo2006.doc>. Acesso em: 25 mar. 2011.

LEMES, M. J. L. **Avaliação de metais e elementos-traços em águas e sedimentos das bacias hidrográficas dos rios Mogi-Guaçu e Pardo, SP**. 2001. 248 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001.

LI, Z. et al. Bioavailability of Cd in a soil–rice system in China: soil type versus genotype effects. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 271, p.165–173, 2005.

LIMA, C. V. S de et al. Avaliação da ocorrência de agroquímicos nas diferentes estruturas da planta de arroz (*Oryza sativa* L.). **Revista de Estudos Ambientais**, Blumenau, v. 7, p. 91-102, 2005.

LIMA, C. E P. **A produção de mapas de vulnerabilidade de solos e aquíferos à contaminação por metais pesados para o Estado de Minas Gerais**. 2006. 104 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2006.

LIMA, C. V. S. de. **Potencial de fitoextração do nabo forrageiro e da aveia preta em argissolo contaminado por cádmio**. 2008. 52 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.

LIMA, A. M. et al. Análise do teor de metais oriundos de atividades agrícolas em águas superficiais e sedimento da micro-bacia do rio doce, Sudoeste do Estado de Goiás. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE QUÍMICA: AGROINDÚSTRIA, QUALIDADE DE VIDA E BIOMAS BRASILEIROS, 50., 2010, Cuiabá. [**Anais...**] Cuiabá, 2010.

LONDRES, F. **Agrotóxicos no Brasil – um guia para ação em defesa da vida**. Rio de Janeiro: Assessoria e Serviços a Projetos em Agricultura Alternativa, 2011. 190 p.

LOSI, M. E.; AMRHEIN, C.; FRANKENBERGER, W. T. Environmental biochemistry of chromium. **Reviews of Environmental Contamination and Toxicology**, New York, v. 135, p. 91-121, 1994.

MACHADO, S. L. et al. Diagnóstico da contaminação por metais pesados em Santo Amaro-BA. **Revista de Engenharia Sanitária e Ambiental**, Rio de Janeiro, v. 9, n. 2, p. 140-155, 2004.

MADEJÓN, P. et al. Traditional agricultural practices enable sustainable remediation of highly polluted soils in Southern Spain for cultivation of food

crops. **Journal of Environmental Management**, London, v. 92, p. 1828-1836, 2011.

MAJEWSKA, M.; KUREK, E. Effect of Cd concentration in growth media on Secale cerealeroots and Cd interaction with rhizosphere microorganisms originating from different parts of the grain. **European Journal of Soil Biology**, Montrouge, v. 47, p. 95-101, 2011.

MALAVOLTA, E. **Fertilizantes e seu impacto ambiental**: micronutrientes e metais pesados, mitos, mistificações e fatos. São Paulo: ProduQuímica, 1994. 153 p.

MAPA – MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO. **Arroz**. 2012. Disponível em: <<http://www.agricultura.gov.br/vegetal/culturas/arroz>>. Acesso em: 28 nov. 2012.

MARQUES, J. J. G. S. M.; CURI, N.; SCHULZE, D. G. Trace elements in Cerrado soils. In: ALVAREZ, V. H. (Ed.). **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2002. v. 2, p. 103-142.

MARQUES, L. F. **Fitoextração de chumbo por girassol, vetiver, trigo mourisco, jureminha e mamona em áreas contaminadas**. 2009. 48 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Universidade Federal da Paraíba, Areia, 2009.

MARTINE, G. A trajetória da modernização agrícola: a quem beneficia? **Lua Nova**, São Paulo, n. 23, p. 7-37, 1991.

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

McGRATH, S. P.; CHAUDRI, A. M.; GILLER, K. E. **Lon-term effects of land application of sewage sludge: Soils, microorganisms and plants**. In: WORLD CONGRESS OF SOIL SCIENCE, 15., 1994, Acapulco. **Proceedings...** Acapulco, 1994. p. 517-533.

MELO, É. E. C. de; NASCIMENTO, C. W. A. do; SANTOS, A. C. Q. Solubilidade, fracionamento e fitoextração de metais pesados após aplicação de agentes quelantes. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 30, p. 1051-1060, 2006.

MENDES, A. M. S. et al. Bioavailability of cadmium and lead in soil amended with phosphorus fertilizers. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 63, n. 4, p. 328-332, 2006.

MERDY, P.; GHARBI, L. T.; LUCAS, Y. Pb, Cu and Cr interactions with soil: sorption experiments and modeling. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, Amsterdam, v. 347, p. 192-199, 2009.

MERLINO, L. C. S. **Bário, cádmio, cromo e chumbo em plantas de milho e em latossolo que recebeu lodo de esgoto por onze anos consecutivos.** 2010. 107 f. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade do Estado de São Paulo, Jaboticabal, 2010.

MERTEN, G. H.; MINELLA, J. P. Qualidade da água em bacias hidrográficas rurais: um desafio atual para a sobrevivência futura. **Revista Agroecologia e Desenvolvimento Rural Sustentável**, Porto Alegre, v. 3, n. 4, p. 33-38, 2002.

MORAES, J. F. V.; FREIRE, C. J. S. Variação do pH, da condutividade elétrica e da disponibilidade dos nutrientes nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio e magnésio, em quatro solos submetidos a inundação. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 9, n. 9, p. 35-43, 1974.

MORAES, M. F. **Micronutrientes e metais pesados tóxicos:** do fertilizante ao produto agrícola. 2009. 108 f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Ciências – Área: Energia Nuclear na Agricultura e no Ambiente, Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2009.

MORAL, R. et al. Effects of chromium on the nutrient element content and morphology of tomato. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v. 18, n. 4, p. 815-822, 1995.

MOREIRA, J. C. et al. Avaliação integrada do impacto do uso de agrotóxicos sobre a saúde humana em uma comunidade agrícola de Nova Friburgo, RJ. **Ciência & Saúde Coletiva**, Rio de Janeiro, v. 7, n. 2, p. 299-311, 2002.

MOREIRA, A. et al. Avaliação da disponibilidade do fósforo no solo por métodos isotópico, químicos e biológico. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 54, n. 1-2, 1997.

NASCENTES, R. **Estudo da mobilidade de metais pesados em um solo residual compactado.** 2006. 181 f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2006.

NOGUEIRA, T. A. R. Disponibilidade **de Cd em Latossolos e sua transferência e toxicidade para as culturas de alface, arroz e feijão.** 2012. 158 f. Tese (Doutorado) - Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2012.

NÚÑEZ J. E. V. et al. Conseqüências de diferentes sistemas de preparo do solo sobre a contaminação do solo, sedimentos e água por metais pesados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 23, p. 981-990, 1999.

OGA, S. **Fundamentos de toxicologia.** 2. ed. São Paulo: Atheneu, 2003. p. 415-420.

OLIVEIRA, R. de. **Avaliação do movimento de cádmio, chumbo e zinco em solo tratado com resíduo-calcário.** 2002. 94 f. Dissertação (Mestrado) –



Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas, Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2002.

OLIVEIRA, C. de et al. Efeitos da aplicação do lodo de esgoto enriquecido com cádmio e zinco na cultura do arroz. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 29, n. 1, p. 109-116, 2005.

OLIVEIRA, T. S.; COSTA; L. M. Metais pesados em solos de uma topolitossequencia do Triângulo Mineiro. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, p. 785-796, 2004.

OLIVEIRA, L. A. G. de. **Determinação de resíduos de agrotóxicos organoclorados em laranja por dispersão de matriz em fase sólida (MSPD)**. 2006. 103 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Mestrado em Ecologia e Produção Sustentável da Universidade Católica de Goiás, Goiânia, 2006.

PAIVA, H. N. de et al. Índice de translocação de nutrientes em mudas de cedro (*Cedrela fissilis* Vell.) e de Ipê-roxo (*Tabebuia impetiginosa* (Mart.) Standl.) submetidas a doses crescentes de cádmio, níquel e chumbo. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 26, p. 467-473, 2002.

PERES, F.; MOREIRA, J. C. Saúde e ambiente em sua relação com o consumo de agrotóxicos em um pólo agrícola do Estado do Rio de Janeiro, Brasil. **Caderno de Saúde Pública**, Rio de Janeiro, v. 23, n. 4, p. 612-621, 2007.

PIERANGELI, M. A. P. et al. Comportamento sortivo, individual e competitivo, de metais pesados em Latossolos com mineralogia contrastante. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 31, n. 4, p. 819-826, 2007.

PIERANGELI, M. A. P. et al. Teores de As, Pb, Cd e Hg e fertilidade de solos da Região do Vale do Alto Guaporé, Sudoeste do Estado de Mato Grosso. **Acta Amazonica**, Manaus, v. 39, p. 59-67, 2009.

POLETTI, J. **Quantificação de elementos-traço em arroz**. 2012. 38 f. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) - Curso de Química Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Química, Porto Alegre, 2012.

PROCHNOW, L. I. et al. Identification of compounds present in single superphosphates produced from brazilian phpsphate rocks using sem, edx, and x-ray techniques. **Soil Science**, Baltimore, v. 166, n. 5, p. 336-344, 2001.

RAMALHO, J. F. G. P. et al. **Acumulação de metais pesados pelo uso de insumos agrícolas na microbacia de Caetes, Paty do Alferes, RJ**. Rio de Janeiro: EMBRAPA-CNPS, 1998. 22 p. (EMBRAPA-CNPS. Boletim de Pesquisa, 5).

RAMIREZ, A. Toxicologia do cádmio: conceitos atuais para avaliar exposição ambiental e ocupacional com indicadores biológicos. **Anales de la Facultad de Medicina**, Lima, v. 63, n. 1, p. 51-64, 2002.

RAUBER, A. L. **Ordenamento territorial**: a cultura do arroz irrigado no município de Rio Pardo, RS, Brasil. 2004. 140 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento Regional, Universidade de Santa Cruz do Sul, Santa Cruz do Sul, 2004.

REINFELDER, J. R. et al. Trace element trophic transfer in aquatic organisms: a critique of the kinetic model approach. **Science of the Total Environment**, Amsterdam, v. 219, p. 117-135, 1998.

RESENDE, A. V. **Fontes e modos de aplicação de fósforo para o milho em solo cultivado da região do Cerrado**. 2004. 169 f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas, Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2004.

RIBEIRINHO, V. S. **Transferência do cádmio ( $^{111}\text{Cd}$ ) de fertilizantes para plantas de arroz**. 2010. 75 f. Dissertação (Mestrado) – Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2010.

RICHARDS, I. R.; CLAYTON, C. J.; REEVE, A. J. K. Effects of long-term fertilizer phosphorus application on soil and crop phosphorus and cadmium contents. **Journal of Agricultural Science**, Cambridge, v. 131, p. 187-195, 1998.

RUBIO, M. I. et al. Cadmium and Nickel accumulation in Rice plants, effects on mineral nutrition and possible interactions of abscisic acids. **Plant Growth Regulation**, Dordrecht, v. 14, p. 51-157, 1994.

**SÁ, P. G. da S.** Contaminação do ambiente marinho por metais pesados e suas implicações sobre comunidades de pescadores artesanais. **1999. 274 f. Tese (Doutorado) - Escola Nacional de Saúde Pública, Fundação Oswaldo Cruz, 1999.**

SANITÀ DI TOPPI, L.; GABBRIELLI, R. Response to cadmium in higher plants. **Environmental and Experimental Botany**, Amsterdam, v. 41, p. 105-130, 1999.

SANTOS, I. C. dos et al. Teores de metais pesados, K e Na, no substrato, em função de doses de composto orgânico de lixo urbano e de cultivares de alface. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 29, n. 3, p. 415-421, 1999.

SCHOENFELD, R. et al. Estratégia de adubação para incremento de produtividade do arroz irrigado no Rio Grande do Sul. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO ARROZ IRRIGADO, 5., 2007, Pelotas. **Anais...** Pelotas: SOSBAI, 2007. v. 1, p. 555-557.

SERRANO, J. L. A diferença risco/perigo. **NEJ**, Itajaí, v. 14, n. 2, p. 233-250, 2009.

SHINAR, D.; GURION, B.; FLASCHER, O. M. The perceptual determinants of workplace hazards. In: HUMAN FACTORS AND ERGONOMICS SOCIETY ANNUAL MEETING, 35., 1991, San Francisco. **Proceedings...** San Francisco, 1991. v. 2, p. 1095-1099.

SILVA, F. A. S.; AZEVEDO, C. A. V. Versão do programa computacional Assistat para o sistema operacional Windows. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, Campina Grande, v. 4, n. 1, p. 71-78, 2002.

SILVA, L. S. da et al. Alterações nos teores de nutrientes em dois solos alagados, com e sem plantas de arroz. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 33, n. 3, p. 487-490. 2003.

SILVA, M. L. de S. **Avaliação do comportamento de elementos traço essenciais e não essenciais em solo contaminado sob o cultivo de plantas**. 2006. 113 f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Área de Concentração: Solos e Nutrição de Plantas, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, ESALQ, USP, Piracicaba, 2006.

SILVA, M. L. de S.; VITTI, G. C.; TREVIZAM, A. R. Concentração de metais pesados em grãos de plantas cultivadas em solo com diferentes níveis de contaminação. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 42, n. 4, p. 527-535, 2007.

SMITH, L. A. et al. **Remedial options for metals-contaminated sites**. Boca Raton: CRC Press, 1995. p. 17-33.

SMITH K. S.; HUYCK, H. L. O. An overview of the abundance, relative mobility, bioavailability, and human toxicity of metals. **Review Economic Geology**, Littleton, v. 6, p. 29-70, 1999.

SOARES, C. R. F. S. et al. Fitotoxidez de cádmio para *Eucalyptus maculata* e *E. urophylla* em solução nutritiva. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 29, p. 175-183, 2005.

SOUZA, S. N. et al. Avaliação de parâmetros referentes ao cádmio como contaminante do lodo de esgoto aplicado num Latossolo Vermelho Escuro. In: SEMINÁRIO SOBRE GERENCIAMENTO DE BIODISSÓLIDOS DO MERCOSUL, 1., 1998, Curitiba. **Anais...** Curitiba: Sanepar/Abes, 1998.

SOSBAI - SOCIEDADE BRASILEIRA DO ARROZ IRRIGADO. **Arroz irrigado - recomendações técnicas da pesquisa para o Sul do Brasil**. Santa Maria: SOSBAI, 2010. 188 p.

SPOSITO, G. **The chemistry of soils**. California: Academic Press, 1989. 277 p.

STRECK, E. V. et al. **Solos do Rio Grande do Sul**. 2. ed. rev. e ampl. Porto Alegre: EMATER/RS, 2008. 222 p.

TACK, F. M. G. et al. Soil solution Cd, Cu and Zn concentrations as affected by short-time drying or wetting: The role of hydrous oxides of Fe and Mn. **Geoderma**, Amsterdam, v. 137, p. 83–89, 2006.

TEDESCO, M. J. et al. **Análise de solos, plantas e outros materiais**. Porto Alegre: UFRGS. Departamento de Solos, 1995. 174 p.

TREBIEN, D. O. P. **Influência dos teores de matéria orgânica, óxidos de manganês facilmente reduzíveis e umidade na oxidação de cromo no solo**. 1994. 81 f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1994.

TSUKADA, H. et al. Concentrations of major and trace elements in polished Rice and paddy soils collected in Aomori, Japan. **Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry**, Lousanne, v. 273, n. 1, p. 199–203, 2007.

USEPA - ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **General guidance for risk management programs (40 CFR part 68)**. [S.l.], 1998.

USEPA. **Method 3050 B**. 1996. Disponível em: <<http://www.epa.gov/wastes/hazard/testmethods/sw846/pdfs/3050b.pdf>>. Acesso em: 20 mar. 2010.

VEIGA, J. E. da. **O desenvolvimento agrícola: uma visão histórica**. São Paulo: Edusp/Hucitec, 1991. 21 p.

VIANA, D. de B. **Avaliação de riscos ambientais em áreas contaminadas: uma proposta metodológica**. 2010. 162 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia em Planejamento Energético, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010.

VILAR, T. B. **Efeito da turfa na descontaminação de solos com cádmio recorrendo a plantações de sorgo**. 2002. 54 f. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) - Licenciatura em Engenharia do Ambiente, Instituto Superior técnico, Lisboa, 2002.

WALLACE, G. A.; WALLACE, A. Lead and other potentially toxic heavy metals in soil. **Communication in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 25, p. 137-141, 1994.

WEBB, J. et al. The impact of modern farming practices on soil fertility and quality in England and Wales. **Journal of Agricultural Science**, Cambridge, v. 137, p. 127- 138, 2001.

ZEITOUNI, C. F. **Eficiência de espécies vegetais como fitoextratoras de cádmio, chumbo, cobre, níquel e zinco de um Latossolo Vermelho**

**Amarelo distrófico.** 2003. 91 f. Dissertação (Mestrado) - Instituto Agronômico, Campinas, 2003.

ZEITOUNI, C. F. et al. Fitoextração de cádmio e zinco de um Latossolo vermelho-amarelo contaminado com metais pesados. **Bragantia**, Campinas v 66, n. 4, p. 649-657, 2007.

## **APÊNCICES**

**APÊNDICE 1.** Atributos selecionados dos solos de lavouras de arroz irrigado no município de Torres/RS na camada de 0-20 cm de profundidade.

Ponto	Ordem dos solos	pH	MO	P	K	Na	Ca	Mg	H+Al	CTC	CE	Cd	Cr	Pb
			%	-----mg dm <sup>-3</sup> -----			-----cmolc dm <sup>-3</sup> -----			dS m <sup>-1</sup>	-----mg kg <sup>-1</sup> -----			
1	CAMBISSOLO	5,0	2,0	3,4	111,00	92,00	6,54	4,89	10,40	22,50	1,00	0,05	2,81	3,83
2	CAMBISSOLO	5,5	1,2	3,1	86,00	133,00	6,69	3,47	6,80	17,70	1,00	0,37	4,89	2,91
3	GLEISSOLO	5,8	1,3	7,0	84,00	125,00	5,43	3,08	5,70	15,00	1,00	0,00	0,00	0,00
4	GLEISSOLO	3,8	2,3	1,7	115,00	182,00	2,20	2,47	40,80	46,50	2,30	0,12	8,00	7,72
5	GLEISSOLO	4,4	6,3	5,1	111,00	164,00	5,20	5,01	14,60	25,80	2,50	0,00	0,00	0,00
6	GLEISSOLO	4,8	3,3	4,2	69,00	141,00	4,00	3,20	12,30	20,30	1,70	0,26	5,31	11,93
7	CAMBISSOLO	5,0	2,5	8,2	67,00	66,00	4,84	2,62	11,30	19,20	0,80	0,03	2,81	3,63
8	CAMBISSOLO	4,4	2,5	8,6	12,00	16,00	0,90	0,55	9,50	11,10	1,00	0,02	4,39	2,71
9	CAMBISSOLO*	5,2	2,3	9,4	17,00	18,00	2,15	1,18	7,40	10,80	0,70	0,01	2,32	4,65

\*Solo testemunha

**APÊNDICE 2.** Atributos seleccionados dos solos de lavouras de arroz irrigado no município de Santo Antônio da Patrulha/RS na camada de 0 - 20 cm de profundidade.

Ponto	Ordem dos solos	pH	MO	P	K	Na	Ca	Mg	H+Al	CTC	CE	Cd	Cr	Pb
			%	-----mg dm <sup>-3</sup> -----			-----cmolc dm <sup>-3</sup> -----			dS m <sup>-1</sup>	-----mg kg <sup>-1</sup> -----			
10	PLANOSSOLO	4,6	1,8	26,6	29,00	2,00	0,83	0,54	8,00	9,50	1,30	0,01	3,31	3,22
11	PLANOSSOLO	5,2	1,2	6,8	16,00	39,00	4,32	0,97	4,40	9,90	0,90	0,03	3,40	4,42
12	PLANOSSOLO	5,3	1,7	14,7	182,00	33,00	5,73	2,11	5,70	14,20	0,90	0,03	5,71	6,30
13	PLANOSSOLO	5,7	1,4	8,9	98,00	43,00	4,56	2,13	4,40	11,60	0,40	0,03	1,90	3,01
14	PLANOSSOLO	6,4	2,5	224,2	417,00	56,00	12,08	2,84	4,10	20,30	1,40	0,04	2,57	3,56
15	PLANOSSOLO	4,4	2,7	8,1	2,00	10,00	0,17	0,14	10,40	10,70	0,80	0,03	0,83	3,34
16	PLANOSSOLO	4,8	2,9	8,9	106,00	62,00	2,97	2,02	11,30	16,80	0,80	0,02	2,92	3,79
17	PLANOSSOLO*	5,1	1,8	48,0	13,00	10,00	1,36	0,64	5,70	7,80	0,70	0,03	0,37	0,77
18	PLANOSSOLO	4,6	4,4	11,1	144,00	39,00	3,29	3,01	22,40	29,30	1,10	0,09	4,48	9,56
19	PLANOSSOLO	5,4	1,4	41,9	61,00	10,00	2,00	1,20	4,40	7,80	0,70	0,02	4,64	3,53
20	PLANOSSOLO	5,0	1,2	9,7	10,00	6,00	1,55	0,98	4,80	7,40	0,80	0,03	5,63	3,80
21	PLANOSSOLO	5,4	3,2	15,6	63,00	8,00	1,31	0,88	7,40	9,80	1,00	0,02	3,57	3,94
22	PLANOSSOLO	4,8	3,3	7,3	77,00	14,00	0,72	0,70	8,80	10,40	1,00	0,01	2,60	3,37
23	PLANOSSOLO	5,5	1,8	78,4	190,00	14,00	1,49	1,00	4,80	7,90	1,20	0,05	0,00	0,39
24	PLANOSSOLO	5,4	1,6	8,7	144,00	18,00	1,97	1,49	4,80	8,70	0,80	0,00	1,47	1,86
25	PLANOSSOLO	5,0	1,4	9,9	13,00	6,00	0,68	0,55	5,70	7,00	0,70	0,03	1,19	2,81
26	PLANOSSOLO	4,8	2,4	10,9	17,00	33,00	1,68	1,49	8,80	12,10	1,10	0,03	6,31	5,63

\*Solo testemunha



**APÊNDICE 3.** Atributos selecionados dos solos de lavouras de arroz irrigado no município de Capivari do Sul/RS na camada de 0 - 20 cm de profundidade.

Ponto	Ordem dos solos	pH	MO	P	K	Na	Ca	Mg	H+Al	CTC	CE	Cd	Cr	Pb
			%	-----mg dm <sup>-3</sup> -----			-----cmolc dm <sup>-3</sup> -----			dS m <sup>-1</sup>	-----mg kg <sup>-1</sup> -----			
27	PLANOSSOLO	5,1	1,4	19,1	61,00	52,00	4,76	2,50	4,80	12,50	1,00	0,01	0,56	1,74
28	PLANOSSOLO	5,2	1,4	10,6	64,00	229,00	14,29	4,69	4,10	24,20	5,70	0,01	1,20	2,06
29	PLANOSSOLO	4,7	1,6	5,0	20,00	8,00	0,69	0,25	9,50	10,60	0,60	0,02	1,25	3,05
30	PLANOSSOLO	4,5	1,2	8,5	82,00	25,00	0,85	0,63	8,80	10,60	0,90	0,02	1,95	3,25
31	PLINTOSSOLO	5,5	1,8	76,6	92,00	35,00	3,28	1,22	4,80	9,70	1,10	0,02	2,27	3,39
32	PLINTOSSOLO*	6,1	1,6	38,1	98,00	97,00	3,34	2,32	3,40	9,80	0,90	<LD	<LD	<LD
33	PLANOSSOLO	5,4	0,7	6,5	2,00	15,00	0,55	0,33	3,70	4,70	0,30	0,07	4,95	4,58
34	PLANOSSOLO	4,8	2,0	11,2	31,00	87,00	2,05	0,97	7,40	10,90	1,00	0,20	5,45	6,46
35	PLANOSSOLO	5,2	2,3	17,4	67,00	8,00	0,43	0,35	8,80	9,70	0,50	0,06	3,34	4,16

\*Solo testemunha

(LD) Limite de detecção do aparelho para Cd, Cr e Pb: <0,01 mg kg<sup>-1</sup>

**APÊNDICE 4.** Atributos selecionados dos solos de lavouras de arroz irrigado no município de Osório/RS na camada de 0 - 20 cm de profundidade.

Ponto	Ordem dos solos	pH	MO	P	K	Na	Ca	Mg	H+Al	CTC	CE	Cd	Cr	Pb
			%	-----mg dm <sup>-3</sup> -----			-----cmolc dm <sup>-3</sup> -----			dS m <sup>-1</sup>	-----mg kg <sup>-1</sup> -----			
36	PLANOSSOLO	4,7	4,0	15,2	23,00	21,00	1,77	0,97	17,30	20,20	1,50	0,04	2,84	2,88
37	PLANOSSOLO	4,7	1,8	10,5	31,00	45,00	2,11	1,25	9,50	13,20	1,00	0,02	2,80	1,80
38	PLANOSSOLO	5,0	1,3	22,6	25,00	23,00	1,66	0,43	3,70	6,00	0,70	0,03	4,17	1,78
39	PLANOSSOLO	5,1	1,9	15,6	27,00	19,00	2,13	1,00	6,20	9,50	0,90	0,04	4,30	1,78
40	PLANOSSOLO	5,7	0,9	26,8	56,00	2,00	1,08	0,85	3,70	5,80	0,40	0,01	0,94	1,20
41	PLANOSSOLO	5,3	5,4	6,3	63,00	63,00	6,73	4,91	14,60	26,70	0,80	0,13	5,61	8,65
42	PLANOSSOLO	5,6	1,4	3,7	8,00	12,00	0,41	0,37	6,80	7,60	0,40	0,00	2,06	0,78
43	PLANOSSOLO	5,8	2,0	6,2	2,00	10,00	0,47	0,44	5,70	6,70	0,70	0,01	2,01	2,44
44	PLANOSSOLO*	5,5	2,2	11,5	146,00	6,00	0,49	0,48	8,80	10,10	0,90	<LD	0,78	2,06
45	NEOSSOLO	5,1	2,7	4,8	35,00	2,00	0,38	0,44	11,30	12,20	0,90	0,07	4,61	8,07
46	PLANOSSOLO	5,0	4,6	9,9	8,00	23,00	0,49	0,52	17,30	18,50	0,60	0,04	4,19	3,72
47	NEOSSOLO	4,3	1,4	2,6	15,00	37,00	1,00	0,99	8,00	10,20	1,40	0,04	3,38	4,12
48	GLEISSOLO	6,5	2,1	2,6	202,00	301,00	7,73	6,94	2,90	19,40	2,00	0,01	4,13	7,89
49	GLEISSOLO	4,6	8,7	14,4	29,00	111,00	4,69	2,72	17,30	25,30	2,90	0,02	1,80	2,80
50	GLEISSOLO	5,4	2,9	10,5	82,00	137,00	5,20	3,26	5,20	14,50	5,30	0,01	1,27	2,34
51	NEOSSOLO	4,8	4,4	36,5	51,00	39,00	1,56	0,64	15,90	18,40	1,70	0,04	4,09	3,50
52	PLANOSSOLO	5,0	3,2	10,8	88,00	18,00	0,97	0,64	9,50	11,50	1,10	0,06	4,45	3,57
53	NEOSSOLO	4,8	2,1	11,2	6,00	8,00	0,23	0,30	12,30	12,90	0,70	0,01	0,79	1,69
54	PLANOSSOLO	4,9	2,0	8,5	6,00	25,00	0,95	0,61	8,80	10,40	1,00	0,01	1,48	2,40
55	GLEISSOLO	5,2	11,3	9,5	83,00	57,00	8,69	6,02	12,30	27,50	2,60	0,06	1,26	2,06
56	GLEISSOLO	5,1	4,5	18,3	83,00	102,00	9,84	6,47	14,60	31,60	0,90	0,01	0,79	1,69

\*Solo testemunha

**APÊNDICE 5.** Atributos selecionados dos solos de lavouras de arroz irrigado no município de Viamão/RS na camada de 0 - 20 cm de profundidade.

Ponto	Ordem dos solos	pH	MO	P	K	Na	Ca	Mg	H+Al	CTC	CE	Cd	Cr	Pb
			%	-----mg dm <sup>-3</sup> -----			-----cmolc dm <sup>-3</sup> -----			dS m <sup>-1</sup>	-----mg kg <sup>-1</sup> -----			
57	PLANOSSOLO	5,7	1,8	25,0	114,00	215,68	1,63	1,47	5,20	9,58	2,80	0,04	2,26	2,86
58	PLANOSSOLO	6,5	1,7	18,2	109,00	378,75	2,36	1,76	2,40	8,48	5,20	0,02	2,60	2,95
59	PLANOSSOLO	5,7	2,3	23,2	68,00	136,77	2,19	1,41	5,20	9,62	2,30	0,02	2,70	5,22
60	PLANOSSOLO	6,2	1,2	85,7	92,00	457,65	2,29	1,64	2,90	9,04	7,40	0,00	1,28	3,53
61	PLANOSSOLO	6,4	1,1	38,3	76,00	122,74	2,71	1,70	2,20	7,37	2,60	0,02	2,95	2,76
62	PLANOSSOLO	6,9	0,8	31,2	42,00	42,08	1,84	1,04	1,90	5,06	1,20	0,01	2,78	2,92
63	PLANOSSOLO	6,7	0,9	27,2	70,00	157,81	2,13	2,11	2,00	7,16	3,00	0,03	3,03	2,29
64	PLANOSSOLO	5,0	1,5	11,7	54,00	142,03	1,49	0,87	4,10	7,17	3,00	0,00	0,00	0,00
65	PLANOSSOLO	5,0	1,8	12,1	59,00	257,76	1,76	1,91	5,70	10,65	3,50	0,04	2,98	2,65
66	PLANOSSOLO	5,1	2,7	5,4	68,00	80,66	2,25	1,51	9,50	13,83	1,40	0,05	3,80	3,00
67	PLANOSSOLO	3,9	4,6	6,4	44,00	52,60	1,57	0,73	18,90	21,54	5,70	0,07	4,42	3,17
68	PLANOSSOLO	5,4	1,6	22,5	72,00	57,86	3,86	1,97	4,80	11,08	2,30	0,05	1,33	3,26
69	PLANOSSOLO	5,2	1,4	14,0	46,00	170,09	2,79	1,45	5,20	10,34	5,00	0,10	4,48	3,10
70	PLANOSSOLO*	4,7	1,7	14,6	50,00	38,58	1,77	1,11	6,80	9,95	1,80	<LD	<LD	<LD
71	PLANOSSOLO	4,8	2,7	13,4	98,00	45,59	1,47	1,12	13,40	16,46	2,00	0,02	2,30	2,38
72	PLANOSSOLO	5,7	1,6	17,3	55,00	42,08	2,75	1,45	7,40	11,91	1,70	0,04	3,53	4,06
73	PLANOSSOLO	4,7	2,7	15,5	52,00	14,03	0,64	0,28	12,30	13,44	0,90	0,03	3,51	5,85
74	PLANOSSOLO	5,0	2,0	12,8	41,00	25,00	7,68	2,84	10,40	21,10	2,00	0,00	0,73	1,90
75	PLANOSSOLO	4,8	1,1	5,9	27,00	31,00	2,45	1,54	5,20	9,40	0,90	0,02	2,33	6,35
76	PLANOSSOLO	4,7	1,6	8,2	66,00	86,00	8,88	6,17	8,80	24,30	1,10	0,02	3,67	4,41
77	PLANOSSOLO	4,7	1,8	7,9	33,00	34,00	2,87	2,09	8,00	13,20	1,00	0,07	6,95	6,63
78	PLANOSSOLO	5,2	1,4	8,1	53,00	101,00	4,25	3,92	5,20	14,00	1,00	0,00	3,38	8,39
79	PLANOSSOLO	4,9	8,5	48,4	94,00	44,00	10,73	3,69	22,40	37,30	1,40	0,00	3,52	3,78
80	PLANOSSOLO	4,8	1,9	6,5	55,00	80,00	5,18	3,55	8,80	18,00	0,80	0,05	2,96	3,40
81	PLANOSSOLO	4,7	1,4	11,4	35,00	55,00	3,28	2,15	6,20	12,00	1,00	0,05	6,08	5,16
82	PLANOSSOLO	5,3	1,6	12,3	100,00	48,00	4,02	2,38	4,80	11,70	0,90	0,01	3,95	4,41
83	PLANOSSOLO	5,2	1,3	6,0	16,00	6,00	1,05	0,58	5,70	7,40	0,60	0,04	2,45	2,89

\*Solo testemunha

**APÊNDICE 6.** Atributos selecionados dos solos de lavouras de arroz irrigado no município de Palmares do Sul/RS na camada de 0 - 20 cm de profundidade.

Ponto	Ordem dos solos	pH	MO	P	K	Na	Ca	Mg	H+Al	CTC	CE	Cd	Cr	Pb
			%	-----mg dm <sup>-3</sup> -----			-----cmolc dm <sup>-3</sup> -----			dS m <sup>-1</sup>	-----mgkg <sup>-1</sup> -----			
84	PLINTOSSOLO	4,9	2,2	4,9	67,00	131,00	3,67	4,54	11,30	20,30	1,30	0,12	43,66	15,80
85	PLANOSSOLO	6,5	2,1	13,2	211,00	150,00	6,43	2,76	3,70	14,10	2,00	0,11	3,22	5,61
86	PLANOSSOLO	5,2	1,5	19,7	131,00	195,00	4,25	4,04	7,40	16,90	24,80	0,09	5,32	6,15
87	PLANOSSOLO	5,1	1,1	9,9	35,00	146,00	2,18	1,68	5,70	10,30	2,10	0,07	3,15	3,09
88	PLANOSSOLO	5,0	0,7	12,5	56,00	43,00	1,26	1,32	5,20	8,10	0,70	0,02	3,65	3,84
89	PLANOSSOLO	4,8	1,3	8,5	29,00	102,00	1,49	1,28	5,20	8,50	1,30	0,05	3,11	3,73
90	PLINTOSSOLO	4,9	0,9	7,3	13,00	25,00	0,46	0,54	7,40	8,50	0,70	0,05	2,00	2,52
91	PLANOSSOLO	5,0	1,4	19,7	77,00	21,00	0,74	0,79	7,40	9,20	3,60	0,06	3,43	3,54
92	PLANOSSOLO	5,4	1,1	16,8	52,00	35,00	1,44	1,17	5,20	8,10	0,70	0,09	2,46	1,94
93	PLANOSSOLO	5,3	0,9	34,4	117,00	43,00	0,74	0,88	5,20	7,40	1,20	0,00	0,00	0,00
94	PLANOSSOLO*	5,4	1,2	4,5	17,00	18,00	0,77	0,88	5,70	7,50	0,40	0,01	1,41	1,96
95	PLANOSSOLO	4,2	2,0	32,6	186,00	1783,00	3,36	4,26	8,80	24,60	25,90	<LD	<LD	<LD
96	PLANOSSOLO	5,0	1,0	16,5	61,00	186,00	1,44	1,38	4,80	8,60	2,40	0,04	2,42	2,97
97	PLANOSSOLO	4,7	2,3	22,1	63,00	139,00	1,13	1,72	11,30	14,90	2,80	0,03	2,26	3,16
98	PLANOSSOLO	4,9	1,3	21,7	79,00	102,00	1,69	2,58	6,80	11,70	1,50	0,00	0,00	0,00
99	PLANOSSOLO	5,3	1,8	9,8	79,00	188,00	3,13	3,08	6,20	13,40	2,00	0,02	3,94	3,43
100	PLANOSSOLO	4,6	3,0	17,6	161,00	1225,00	2,02	2,88	9,50	20,20	16,30	0,00	0,00	0,00
101	PLANOSSOLO	4,9	1,8	47,7	186,00	211,00	3,13	2,79	7,40	14,70	3,60	0,06	4,11	4,80
102	PLANOSSOLO	5,2	1,4	13,7	71,00	127,00	2,39	1,51	5,70	10,30	1,50	0,02	2,51	2,83
103	PLANOSSOLO	5,0	1,2	6,3	18,00	135,00	3,20	3,17	6,80	13,80	1,40	0,07	7,03	4,85
104	PLANOSSOLO	4,8	1,9	11,7	61,00	57,00	2,04	1,49	6,80	10,70	1,50	0,03	2,17	3,39
105	PLANOSSOLO	5,4	1,4	26,4	69,00	246,00	1,94	2,31	5,20	10,70	2,00	0,02	1,87	3,22
106	PLANOSSOLO	4,4	2,1	13,6	142,00	281,00	3,88	3,79	14,60	23,90	3,30	0,02	0,25	0,53
107	PLANOSSOLO	5,3	1,6	23,1	87,00	392,00	3,32	2,93	6,20	14,40	3,20	0,01	2,58	3,74
108	PLANOSSOLO	5,5	1,4	31,1	136,00	135,00	2,69	1,52	4,40	9,60	1,70	0,03	3,05	3,71
109	PLANOSSOLO	5,3	1,6	20,6	57,00	62,00	2,45	1,55	6,20	10,60	1,20	0,03	3,29	2,19
111	PLANOSSOLO	5,0	2,2	37,2	174,00	433,00	4,63	4,83	7,40	19,20	8,70	0,07	4,22	3,69

\*Solo testemunha

**APÊNDICE 7.** Atributos selecionados dos solos de lavouras de arroz irrigado no município de Mostardas/RS na camada de 0 - 20 cm de profundidade.

Ponto	Ordem dos solos	pH	MO	P	K	Na	Ca	Mg	H+Al	CTC	CE	Cd	Cr	Pb
			%	-----mg dm <sup>-3</sup> -----			-----cmolc dm <sup>-3</sup> -----			dS m <sup>-1</sup>	-----mgkg <sup>-1</sup> -----			
112	PLANOSSOLO	5,7	2,3	79,1	135,00	464,00	4,32	5,51	3,70	15,90	20,10	0,07	1,69	2,79
113	PLANOSSOLO	5,1	1,9	22,5	53,00	696,00	2,27	3,39	5,20	14,10	10,10	0,05	2,36	3,20
114	PLANOSSOLO	5,4	1,8	7,7	47,00	190,00	2,67	2,75	6,20	12,60	2,20	0,02	2,26	4,10
115	PLINTOSSOLO	4,6	1,7	7,9	18,00	83,00	0,77	0,63	5,20	7,10	1,60	0,01	3,31	3,45
116	PLINTOSSOLO	4,8	1,6	9,0	20,00	191,00	1,14	1,43	5,70	9,20	1,30	0,02	4,29	5,23
117	PLANOSSOLO	5,2	1,4	5,5	80,00	290,00	1,94	3,68	6,20	13,30	1,90	0,02	4,97	4,85
118	PLANOSSOLO	5,6	1,8	13,6	51,00	116,00	1,56	1,15	5,20	8,60	2,00	0,17	2,63	6,49
119	PLANOSSOLO	6,8	1,1	25,6	70,00	168,00	3,76	1,92	2,20	8,80	2,80	0,02	0,87	3,38
120	PLANOSSOLO	6,7	1,9	49,4	82,00	12,00	2,64	1,63	2,20	6,80	2,40	0,02	1,08	1,84
121	PLANOSSOLO	4,6	5,5	18,2	96,00	952,00	3,30	4,26	12,30	24,30	16,00	0,03	2,21	3,28
122	PLANOSSOLO	5,9	1,6	32,8	43,00	232,00	1,79	1,27	3,10	7,30	3,40	0,06	2,12	2,00
123	PLANOSSOLO	6,3	1,6	21,2	121,00	1979,00	1,90	6,18	2,40	19,40	33,90	0,03	3,17	2,47
124	PLANOSSOLO	5,8	0,9	5,6	29,00	112,00	1,51	1,58	3,40	7,10	1,00	0,01	2,73	3,70
125	PLANOSSOLO	6,5	1,7	9,2	100,00	580,00	2,39	3,01	2,90	11,10	3,60	0,01	2,28	5,42
126	PLANOSSOLO	5,3	2,4	10,5	137,00	940,00	1,40	2,91	4,80	13,60	7,10	0,03	3,43	3,81
127	PLANOSSOLO	4,5	1,8	8,8	149,00	859,00	1,90	4,07	9,50	19,60	8,70	0,05	3,03	3,80
128	PLANOSSOLO*	5,1	2,9	9,0	72,00	197,00	0,91	1,54	8,80	12,20	3,50	0,03	1,64	2,38
129	PLANOSSOLO	5,1	1,3	35,8	95,00	195,00	1,82	2,28	4,10	9,20	3,10	0,05	3,75	3,39
130	PLANOSSOLO	4,7	1,7	18,9	45,00	136,00	2,19	1,74	8,00	12,70	2,20	0,01	2,26	2,54
131	PLANOSSOLO	4,4	0,8	14,1	57,00	23,00	1,36	0,86	5,20	7,70	1,20	0,02	2,35	4,36
132	PLANOSSOLO	5,5	1,3	7,3	85,00	363,00	2,48	3,83	3,70	11,80	3,50	0,01	1,36	3,94
133	PLANOSSOLO	5,4	1,1	12,2	87,00	304,00	3,84	5,03	5,20	15,70	3,20	0,03	2,71	4,04
134	PLANOSSOLO	6,0	1,3	38,9	85,00	322,00	2,94	3,03	3,70	11,30	3,30	0,01	2,52	3,47
135	PLANOSSOLO	4,9	1,3	20,6	57,00	209,00	1,48	1,73	5,20	9,50	3,00	0,06	4,08	4,72
136	PLANOSSOLO	4,9	1,5	6,9	34,00	72,00	2,33	1,74	8,80	13,20	0,90	0,09	4,01	3,75
137	PLANOSSOLO	4,5	1,4	9,3	22,00	57,00	2,23	1,38	7,40	11,30	1,20	0,02	2,89	3,37
138	PLANOSSOLO	4,2	1,1	6,9	12,00	39,00	1,23	0,56	8,00	10,00	1,40	0,04	2,50	2,87
139	PLANOSSOLO	5,2	1,1	19,2	14,00	21,00	1,04	0,45	5,70	7,30	0,60	0,04	1,99	2,14

**APÊNDICE 7. Continuação...**

140	PLANOSSOLO	5,3	0,8	5,7	8,00	19,00	1,24	0,70	4,40	6,50	0,50	0,03	3,23	2,63
141	NEOSSOLO	5,2	1,4	5,4	34,00	62,00	1,52	0,67	8,80	11,30	0,90	0,04	3,41	3,43
142	PLANOSSOLO	5,5	2,3	6,2	14,00	90,00	1,62	1,18	4,10	7,30	0,70	0,01	1,67	2,22
143	PLANOSSOLO	5,7	1,2	8,8	16,00	74,00	1,16	0,95	3,10	5,60	0,90	0,04	4,29	5,57
144	PLANOSSOLO	4,8	2,9	5,9	24,00	72,00	1,87	2,31	15,90	20,50	0,40	0,04	2,51	2,58
145	PLANOSSOLO	4,8	1,6	14,9	51,00	76,00	1,49	1,24	11,30	14,50	0,80	0,10	3,71	4,71
146	PLANOSSOLO	7,4	1,6	7,8	53,00	368,00	16,06	4,69	2,60	25,10	2,50	0,05	2,86	3,50
147	PLINTOSSOLO	5,3	1,7	12,6	95,00	99,00	2,68	2,17	6,20	11,70	1,00	0,06	3,46	3,60
148	PLANOSSOLO	4,3	1,3	11,7	39,00	106,00	2,07	1,90	7,40	11,90	2,70	0,06	3,17	3,91
149	PLANOSSOLO	5,3	1,1	9,4	63,00	137,00	6,14	3,57	4,40	14,90	3,30	0,07	2,76	3,47
150	PLANOSSOLO	4,9	1,3	9,4	51,00	121,00	3,96	2,82	5,70	13,20	3,70	0,02	2,60	2,28
151	PLINTOSSOLO	4,8	0,9	6,3	12,00	70,00	1,19	0,78	3,70	6,00	1,70	0,02	2,56	2,12
152	PLANOSSOLO	5,6	0,9	17,0	50,00	130,00	1,84	1,80	2,90	7,20	1,90	0,02	3,55	3,09
153	PLANOSSOLO	4,6	1,4	23,4	142,00	149,00	5,16	3,42	11,30	20,90	2,20	0,08	4,98	4,24
154	PLINTOSSOLO	4,7	1,1	24,1	77,00	2,00	1,00	0,60	4,80	6,60	1,20	0,06	4,07	3,68
155	PLANOSSOLO	5,7	2,8	5,9	150,00	1060,00	5,08	4,71	5,70	20,50	15,10	0,04	3,18	3,04
156	PLANOSSOLO	5,8	2,0	7,1	137,00	701,00	3,63	3,48	4,80	15,30	9,40	0,06	4,11	3,96
157	PLANOSSOLO	6,0	1,6	7,8	94,00	342,00	2,76	3,12	3,70	11,30	6,10	0,03	2,50	2,65
158	PLANOSSOLO	5,0	1,9	11,5	135,00	137,00	4,30	2,98	8,80	17,00	2,30	0,07	1,49	2,69
159	PLINTOSSOLO	5,2	0,9	14,0	48,00	2,00	0,74	0,91	4,10	5,80	1,50	0,05	2,26	3,10

\*Solo testemunha

**APÊNDICE 8.** Atributos selecionados dos solos de lavouras de arroz irrigado no município de São José do Norte/RS na camada de 0 - 20 cm de profundidade.

Ponto	Ordem dos solos	pH	MO	P	K	Na	Ca	Mg	H+Al	CTC	CE	Cd	Cr	Pb
			%	-----mg dm <sup>-3</sup> -----			-----cmolc dm <sup>-3</sup> -----			dS m <sup>-1</sup>	-----mg kg <sup>-1</sup> -----			
160	PLANOSSOLO	5,6	1,6	18,4	55,00	120,00	2,25	1,15	5,20	9,30	2,20	0,01	2,04	2,89
161	PLANOSSOLO	4,2	1,6	10,5	48,00	43,00	1,33	1,07	8,80	11,50	2,00	0,06	4,21	3,19
162	PLANOSSOLO	4,5	1,0	14,9	38,00	87,00	1,06	0,80	4,80	7,10	1,70	0,03	3,58	3,08
163	PLANOSSOLO	4,6	3,2	15,0	56,00	171,00	2,33	1,31	9,50	14,10	4,20	0,02	2,23	1,97
164	PLANOSSOLO	6,4	1,1	7,5	97,00	1709,00	6,14	4,79	2,40	21,00	31,70	0,05	3,82	3,82
165	PLINTOSSOLO	4,9	1,3	8,5	99,00	121,00	1,78	1,85	6,80	11,20	1,60	0,07	4,44	3,50
166	PLANOSSOLO*	4,9	1,7	10,1	46,00	72,00	2,38	1,50	6,20	10,50	2,50	<LD	0,67	2,39

\*Solo testemunha

(LD) Limite de detecção do aparelho para Cd, Cr e Pb: <0,01 mg kg<sup>-1</sup>

**APÊNDICE 9.** Atributos selecionados dos solos de lavouras de arroz irrigado no município de Tavares/RS na camada de 0 - 20 cm de profundidade.

Ponto	Ordem dos solos	pH	MO	P	K	Na	Ca	Mg	H+Al	CTC	CE	Cd	Cr	Pb
			%	-----mg dm <sup>-3</sup> -----			-----cmolc dm <sup>-3</sup> -----			dS m <sup>-1</sup>	-----mg kg <sup>-1</sup> -----			
167	PLANOSSOLO	4,9	1,2	18,3	123,00	74,00	1,46	1,51	4,40	8,00	2,50	0,01	1,03	2,46
168	PLANOSSOLO*	5,1	1,2	53,3	35,00	33,00	1,39	1,07	4,10	6,70	2,10	<LD	<LD	<LD
169	PLINTOSSOLO	4,9	1,4	9,7	151,00	72,00	1,19	1,19	6,80	9,90	1,60	0,01	1,73	3,04
170	PLINTOSSOLO	5,0	1,0	5,7	10,00	48,00	0,86	0,60	4,10	5,80	0,80	0,02	1,75	3,09
171	PLINTOSSOLO	5,4	1,7	10,9	45,00	126,00	0,94	0,67	4,40	6,70	2,20	0,03	2,46	3,14
172	PLINTOSSOLO	5,4	0,8	6,6	25,00	35,00	1,57	1,74	3,40	7,00	1,80	0,04	3,32	3,65
173	PLINTOSSOLO	5,2	1,2	7,9	25,00	114,00	1,34	1,35	4,40	7,70	0,90	0,06	4,80	3,71
174	PLINTOSSOLO	4,6	1,4	23,4	142,00	149,00	5,16	3,42	11,30	20,90	2,20	0,01	1,57	2,95

\*Solo testemunha

(LD) Limite de detecção do aparelho para Cd, Cr e Pb: <0,01 mg kg<sup>-1</sup>



**APÊNDICE 10.** Atributos selecionados dos solos de lavouras de arroz irrigado no município de Barra do Ribeiro/RS na camada de 0 - 20 cm de profundidade.

Ponto	Ordem dos solos	pH	MO	P	K	Na	Ca	Mg	H+Al	CTC	CE	Cd	Cr	Pb
			-----mg dm <sup>-3</sup> -----			-----cmolc dm <sup>-3</sup> -----			dS m <sup>-1</sup>	-----mg kg <sup>-1</sup> -----				
			%											
175	NEOSSOLO	4,1	1,4	14,1	15,00	20,00	1,23	0,78	8,00	10,20	1,80	<LD	<LD	<LD
176	PLANOSSOLO*	3,9	1,3	19,2	40,00	20,00	0,97	0,50	9,50	11,20	1,90	<LD	<LD	<LD
177	PLANOSSOLO	4,4	1,7	13,1	67,00	14,00	0,77	0,43	7,40	8,80	2,00	0,02	2,17	3,50
178	PLANOSSOLO	4,6	1,4	2,6	33,00	12,00	0,87	0,65	6,80	8,40	1,10	0,03	2,33	3,90
179	PLANOSSOLO	5,2	2,0	12,4	38,00	20,00	2,56	0,76	6,20	9,70	1,30	0,05	2,35	4,29
180	PLANOSSOLO	4,1	1,8	9,5	25,00	18,00	1,46	0,85	10,40	12,80	1,60	0,05	2,41	4,94
181	PLANOSSOLO	5,2	1,8	9,9	29,00	18,00	0,85	0,55	6,20	7,80	1,20	0,05	2,84	5,05
182	ARGISSOLO	4,8	0,9	32,6	46,00	6,00	1,18	0,75	5,70	7,80	0,70	0,07	3,19	5,67
183	PLANOSSOLO	5,5	1,4	1,0	12,00	8,00	1,33	0,93	5,20	7,60	0,70	0,07	3,27	7,23
184	PLANOSSOLO	5,7	0,6	13,2	13,00	12,00	1,87	1,04	3,70	6,70	0,70	0,08	3,62	7,85
185	PLANOSSOLO	4,2	1,5	12,0	35,00	12,00	0,74	0,61	8,00	9,50	1,50	0,09	3,65	8,59
186	PLANOSSOLO	5,3	1,8	12,6	8,00	16,00	2,18	1,32	5,70	9,30	1,10	0,11	3,91	8,84
187	PLANOSSOLO	4,0	2,1	14,6	86,00	18,00	1,28	0,73	14,60	16,90	2,00	0,17	4,65	11,37
188	PLANOSSOLO	5,2	1,1	21,5	40,00	2,00	1,44	0,97	5,20	7,80	0,80	<LD	<LD	<LD
189	PLANOSSOLO	4,3	1,3	7,0	60,00	57,00	1,38	1,34	13,40	16,50	1,20	<LD	<LD	<LD
190	PLANOSSOLO	4,4	1,3	17,1	10,00	14,00	1,59	0,56	8,80	11,00	1,30	<LD	2,17	3,50
191	PLANOSSOLO	4,4	1,3	8,6	15,00	21,00	0,90	0,46	6,20	7,70	1,20	0,01	2,43	3,80

\*Solo testemunha

(LD) Limite de detecção do aparelho para Cd, Cr e Pb: <0,01 mg kg<sup>-1</sup>

**APÊNDICE 11.** Atributos selecionados dos solos de lavouras de arroz irrigado no município de Tapes/RS na camada de 0 - 20 cm de profundidade.

Ponto	Ordem dos solos	pH	MO	P	K	Na	Ca	Mg	H+Al	CTC	CE	Cd	Cr	Pb
			%	-----mg dm <sup>-3</sup> -----			-----cmolc dm <sup>-3</sup> -----			dS m <sup>-1</sup>	-----mg kg <sup>-1</sup> -----			
192	NEOSSOLO	4,9	1,4	13,0	79,00	84,00	1,87	1,24	6,80	10,50	1,50	0,02	4,29	13,19
193	ARGISSOLO	4,2	2,4	10,6	47,00	16,00	0,69	0,38	10,40	11,70	0,90	0,05	1,42	2,42
194	ARGISSOLO	4,2	1,6	13,3	26,00	10,00	0,54	0,34	12,30	13,30	0,70	0,04	4,30	6,09
195	ARGISSOLO	4,7	1,5	14,5	37,00	25,00	1,90	0,93	7,40	10,40	1,40	0,06	4,18	8,54
196	PLANOSSOLO	4,9	4,6	3,4	89,00	72,00	6,01	3,57	20,60	30,70	0,70	0,02	2,05	3,72
197	PLANOSSOLO	5,8	1,4	12,5	106,00	43,00	2,71	1,55	4,10	8,80	0,90	0,02	3,25	5,95
198	PLANOSSOLO	5,2	1,9	6,1	81,00	80,00	3,20	1,76	6,80	12,30	1,20	0,05	2,49	5,74
199	PLANOSSOLO	5,7	1,5	10,0	173,00	35,00	2,43	1,34	4,10	8,40	0,80	0,13	8,41	25,13
200	PLANOSSOLO*	5,5	1,3	7,6	77,00	55,00	2,60	1,50	4,10	8,60	1,40	0,01	1,86	2,86
201	PLANOSSOLO	4,7	1,9	5,0	94,00	66,00	3,06	1,84	9,50	15,00	1,20	0,04	4,85	7,53
202	PLANOSSOLO	5,0	1,8	4,4	98,00	68,00	3,44	2,10	6,20	12,30	1,30	0,03	3,17	10,98
203	PLANOSSOLO	5,0	1,3	32,1	77,00	82,00	1,16	0,66	4,80	7,20	1,50	0,01	3,00	5,54
204	PLANOSSOLO	4,7	1,3	8,7	53,00	68,00	1,61	0,90	7,40	10,30	1,00	0,03	5,53	11,72
205	PLANOSSOLO	4,6	1,3	15,2	211,00	58,00	1,05	0,44	6,20	8,50	1,10	0,03	4,39	8,72
206	ARGISSOLO	4,5	1,9	6,4	31,00	14,00	1,06	0,71	11,30	13,20	0,50	0,02	3,29	12,23
207	ARGISSOLO	4,4	1,6	5,8	33,00	19,00	0,92	0,58	11,30	13,00	0,50	0,02	4,48	5,48
208	ARGISSOLO	4,5	1,6	4,0	26,00	19,00	0,97	0,49	10,40	12,00	0,70	0,00	0,93	1,30
209	PLANOSSOLO	5,4	0,9	11,6	28,00	37,00	2,22	1,08	3,70	7,30	0,70	0,02	4,21	6,16
210	PLANOSSOLO	4,6	1,2	9,0	106,00	35,00	1,35	0,79	6,80	9,30	1,20	0,01	4,46	6,38
211	PLANOSSOLO	4,6	2,3	6,5	85,00	39,00	2,02	1,31	15,90	19,60	0,60	0,01	3,65	5,21
212	PLANOSSOLO	4,6	1,3	27,3	51,00	21,00	1,98	0,78	8,80	11,70	1,00	0,02	3,45	6,68
213	PLANOSSOLO	4,7	2,0	12,3	55,00	60,00	1,70	1,31	9,50	13,00	1,20	0,00	5,14	5,86
214	PLANOSSOLO	4,5	1,6	10,3	6,00	27,00	1,36	1,20	8,00	10,70	1,10	0,04	5,49	15,29
215	PLANOSSOLO	4,8	2,3	22,0	69,00	14,00	2,05	2,19	8,00	12,50	1,60	0,05	3,89	7,40
216	PLANOSSOLO	4,6	1,2	6,1	40,00	8,00	0,85	0,75	10,40	12,10	0,60	0,04	4,01	4,41

\*Solo testemunha

**APÊNDICE 12.** Atributos selecionados dos solos de lavouras de arroz irrigado no município de Camaquã/RS na camada de 0 - 20 cm de profundidade.

Ponto	Ordem dos solos	pH	MO	P	K	Na	Ca	Mg	H+Al	CTC	CE	Cd	Cr	Pb
			%	-----mg dm <sup>-3</sup> -----			-----cmolc dm <sup>-3</sup> -----			dS m <sup>-1</sup>	-----mg kg <sup>-1</sup> -----			
217	PLANOSSOLO	4,8	1,3	11,2	45,00	23,00	1,30	0,58	8,80	10,90	0,60	0,04	4,57	7,25
218	PLANOSSOLO	5,2	1,2	22,2	43,00	35,00	1,69	0,64	4,10	6,70	0,70	0,01	2,17	5,49
219	PLANOSSOLO	5,4	1,6	16,2	39,00	35,00	2,61	1,50	4,80	9,20	0,80	0,11	2,72	6,83
220	PLANOSSOLO	4,7	1,0	6,4	26,00	19,00	0,69	0,44	5,20	6,50	0,50	0,01	1,95	4,34
221	PLANOSSOLO	5,2	1,5	21,0	39,00	25,00	2,69	1,39	5,20	9,50	0,80	0,01	2,02	6,21
222	PLANOSSOLO	5,0	3,0	4,4	79,00	99,00	7,61	4,05	20,60	32,90	0,80	0,10	6,77	22,36
223	PLANOSSOLO	4,8	1,3	18,0	65,00	35,00	1,45	0,82	4,40	7,00	0,80	0,02	3,90	4,73
224	PLANOSSOLO	5,0	1,4	18,3	93,00	29,00	1,87	1,39	3,70	7,40	2,00	0,02	1,99	3,69
225	PLANOSSOLO*	5,0	3,3	14,8	28,00	66,00	0,76	0,66	14,60	16,40	1,20	0,02	2,14	2,43
226	PLANOSSOLO	5,5	0,9	12,7	28,00	64,00	1,24	1,38	3,70	6,70	0,70	0,01	4,56	5,19
227	PLANOSSOLO	5,1	1,5	4,3	65,00	103,00	1,32	1,08	4,80	7,80	1,80	0,02	3,79	4,38
228	PLANOSSOLO	4,9	1,2	16,9	59,00	170,00	1,78	1,30	4,40	8,40	2,30	0,02	4,24	5,70
229	PLANOSSOLO	4,9	1,3	11,1	41,00	43,00	1,26	0,82	8,00	10,40	1,00	0,00	2,92	3,15
230	PLANOSSOLO	5,3	1,4	3,4	33,00	35,00	2,23	1,50	5,70	9,70	0,80	0,03	2,64	5,98
231	PLANOSSOLO	5,0	1,3	3,1	43,00	39,00	2,52	1,60	6,80	11,20	0,60	0,04	4,36	8,25
232	PLANOSSOLO	5,1	1,6	5,3	47,00	43,00	2,93	0,96	9,50	13,70	0,70	0,05	4,46	8,19
233	PLANOSSOLO	5,2	1,8	96,5	134,00	23,00	1,87	1,00	5,70	9,00	1,50	0,08	3,72	6,50
234	PLANOSSOLO	5,0	0,9	14,4	22,00	25,00	1,91	0,70	6,80	9,60	0,50	0,02	3,41	5,02
235	PLANOSSOLO	4,8	2,6	7,8	108,00	55,00	5,36	2,56	15,90	24,40	0,70	0,08	6,59	17,97
236	PLANOSSOLO	4,5	1,3	11,8	43,00	43,00	1,57	1,13	5,20	8,20	1,20	0,05	3,80	5,02
237	NEOSSOLO	4,6	2,1	3,3	83,00	183,00	2,73	4,02	8,80	16,50	1,00	0,01	2,17	5,45
238	PLANOSSOLO	4,7	1,0	5,7	18,00	53,00	1,09	0,55	4,80	6,70	0,80	0,01	2,72	4,83
239	PLANOSSOLO	4,4	1,0	11,5	93,00	35,00	1,39	0,56	4,80	7,20	0,80	0,01	1,92	4,34
240	PLANOSSOLO	4,3	0,8	6,2	37,00	29,00	0,28	0,15	6,20	6,90	0,40	0,01	2,21	6,02

\*Solo testemunha

**APÊNDICE 13.** Atributos selecionados dos solos de lavouras de arroz irrigado no município de Arambaré/RS na camada de 0 - 20 cm de profundidade.

Ponto	Ordem dos solos	pH	MO	P	K	Na	Ca	Mg	H+Al	CTC	CE	Cd	Cr	Pb
			%	-----mg dm <sup>-3</sup> -----			-----cmolc dm <sup>-3</sup> -----			dS m <sup>-1</sup>	-----mg kg <sup>-1</sup> -----			
241	NEOSSOLO	5,2	1,6	16,5	69,00	35,00	1,71	1,20	4,10	7,30	0,90	0,05	3,42	6,41
242	PLANOSSOLO	4,8	1,6	17,3	73,00	10,00	0,72	0,38	5,20	6,60	0,60	0,04	2,57	5,18
243	PLANOSSOLO	5,2	1,2	43,4	167,00	27,00	2,13	0,81	4,80	8,30	0,70	0,02	3,73	7,12
244	PLANOSSOLO	4,7	1,1	8,0	26,00	16,00	0,24	0,18	6,20	6,80	0,40	0,04	3,38	4,45
245	PLANOSSOLO	4,5	1,2	10,1	28,00	19,00	0,98	0,70	7,40	9,20	0,70	0,02	4,32	8,80
246	PLANOSSOLO	4,9	1,6	7,2	28,00	25,00	1,40	0,61	8,00	10,20	0,50	0,04	2,97	5,14
247	PLANOSSOLO	4,7	1,6	4,5	61,00	39,00	1,01	0,72	7,40	9,40	0,90	0,02	3,63	5,10
248	PLANOSSOLO	4,5	1,4	14,5	61,00	27,00	1,26	0,59	7,40	9,50	0,90	0,03	3,52	6,63
249	PLANOSSOLO	4,4	1,1	34,2	59,00	39,00	1,41	0,84	6,80	9,30	1,00	0,04	2,93	5,00
250	PLANOSSOLO*	5,5	1,9	12,2	91,00	138,00	2,22	1,26	3,70	8,00	2,50	0,02	1,80	1,96
251	PLANOSSOLO	5,2	1,4	14,4	61,00	154,00	2,15	1,92	4,10	9,00	2,20	0,02	1,98	4,47
252	PLANOSSOLO	4,7	1,5	5,7	79,00	144,00	1,73	1,76	6,20	10,50	1,70	0,01	3,79	5,82
253	PLANOSSOLO	5,1	1,5	3,6	63,00	195,00	2,15	1,84	4,40	9,40	2,90	0,02	2,86	2,34
254	PLANOSSOLO	5,4	0,7	5,5	148,00	195,00	2,98	2,27	4,10	10,50	2,20	0,01	4,76	5,97
255	PLANOSSOLO	6,1	1,3	9,9	51,00	27,00	4,35	2,54	2,60	9,80	0,50	0,03	3,81	7,24
256	NEOSSOLO	4,6	5,2	12,7	47,00	31,00	0,82	0,59	18,90	20,60	1,10	0,05	3,42	6,41
257	PLANOSSOLO	4,6	1,9	4,0	138,00	162,00	2,90	2,63	11,30	17,90	1,50	0,04	2,57	5,18

\*Solo testemunha

**APÊNDICE 14.** Atributos selecionados dos solos de lavouras de arroz irrigado no município de São Lourenço do Sul/RS na camada de 0 - 20 cm de profundidade.

Ponto	Ordem dos solos	pH	MO	P	K	Na	Ca	Mg	H+Al	CTC	CE	Cd	Cr	Pb
			-----mg dm <sup>-3</sup> -----				-----cmolc dm <sup>-3</sup> -----				dS m <sup>-1</sup>	-----mg kg <sup>-1</sup> -----		
			%											
258	ARGISSOLO	4,3	2,3	3,6	47,00	21,00	0,59	0,64	9,50	11,00	0,70	0,04	4,25	17,65
259	PLANOSSOLO*	5,5	1,3	11,0	55,00	39,00	2,95	1,74	3,10	8,10	0,90	0,02	0,41	1,88
260	PLANOSSOLO	5,5	1,1	26,3	100,00	8,00	1,57	1,19	4,40	7,50	0,90	0,06	3,68	4,30
261	PLANOSSOLO	5,5	1,3	11,4	37,00	47,00	2,21	1,50	3,40	7,40	1,00	0,05	4,09	5,63
262	PLANOSSOLO	5,7	1,5	5,8	94,00	29,00	1,55	1,42	7,40	10,70	0,70	0,04	4,44	5,60
263	PLANOSSOLO	4,7	2,2	20,1	146,00	41,00	1,53	1,24	4,40	7,70	1,30	0,06	3,12	5,23
264	PLANOSSOLO	5,6	1,7	13,3	61,00	12,00	1,74	1,25	5,70	8,90	0,60	0,03	3,35	3,20
265	PLANOSSOLO	5,5	1,1	25,7	28,00	35,00	2,97	1,44	2,90	7,50	0,70	0,05	3,15	4,10
266	PLANOSSOLO	4,9	1,4	5,0	31,00	62,00	1,09	1,00	7,40	9,80	1,20	0,04	2,88	5,95
267	PLANOSSOLO	4,6	1,3	6,5	31,00	58,00	1,38	1,11	3,40	6,20	0,80	0,03	2,11	3,67
268	PLANOSSOLO	4,5	1,4	14,9	49,00	18,00	1,04	0,64	8,00	9,90	0,70	0,04	2,95	4,91
269	ARGISSOLO	6,5	1,8	13,3	51,00	60,00	3,24	2,84	7,40	13,80	0,80	0,04	4,25	17,65
270	PLANOSSOLO	4,8	1,8	16,1	85,00	60,00	2,61	1,65	4,80	9,60	1,40	0,04	6,11	8,45
271	NEOSSOLO	4,5	2,2	9,0	79,00	142,00	2,92	1,10	7,40	12,20	2,10	0,03	3,91	4,00

\*Solo testemunha

**APÊNDICE 15.** Atributos selecionados dos solos de lavouras de arroz irrigado no município de Pelotas/RS na camada de 0 - 20 cm de profundidade.

Ponto	Ordem dos solos	pH	MO	P	K	Na	Ca	Mg	H+Al	CTC	CE	Cd	Cr	Pb
			%	-----mg dm <sup>-3</sup> -----			-----cmolc dm <sup>-3</sup> -----			dS m <sup>-1</sup>	-----mg kg <sup>-1</sup> -----			
272	PLANOSSOLO	4,4	1,4	13,8	39,00	57,00	1,41	1,76	3,70	7,20	1,10	0,07	3,76	6,57
273	PLANOSSOLO	5,0	1,3	13,1	55,00	33,00	2,13	1,27	8,00	11,70	1,00	0,04	3,39	5,97
274	PLANOSSOLO	4,5	1,7	32,6	31,00	19,00	2,66	1,53	4,80	9,20	0,90	0,06	2,41	4,01
275	PLANOSSOLO	5,0	1,4	11,0	47,00	27,00	1,17	0,63	6,80	8,80	0,70	0,04	3,14	4,53
276	PLANOSSOLO	4,7	1,6	7,5	45,00	21,00	1,39	1,12	8,80	11,50	0,70	0,07	5,55	7,82
277	PLANOSSOLO*	6,1	1,3	8,2	47,00	8,00	1,10	0,76	3,40	5,40	0,70	0,02	0,32	1,45
278	NEOSSOLO	5,8	1,3	25,5	120,00	216,00	3,19	2,13	3,70	10,30	3,30	0,06	3,43	4,15
279	NEOSSOLO	6,1	1,5	46,9	81,00	228,00	2,67	2,50	3,10	9,50	2,90	0,07	2,50	2,39
280	NEOSSOLO	5,2	1,2	25,7	53,00	68,00	2,57	1,45	3,10	7,60	1,00	0,15	2,63	2,48
281	NEOSSOLO	5,6	1,9	33,3	22,00	148,00	5,80	0,76	2,20	9,50	2,10	0,09	2,24	2,38
282	PLANOSSOLO	4,6	1,4	21,3	51,00	33,00	1,70	0,75	6,20	8,90	0,80	0,05	3,57	7,66
283	PLANOSSOLO	4,9	1,6	11,9	49,00	25,00	1,44	0,69	11,30	13,70	0,60	0,07	4,34	8,70
284	PLANOSSOLO	4,2	1,4	21,8	43,00	51,00	3,24	1,69	4,80	10,10	0,80	0,05	3,39	5,99
285	PLANOSSOLO	4,6	1,8	11,7	81,00	64,00	2,54	1,29	10,40	14,70	1,10	0,07	4,46	7,73
286	PLANOSSOLO	5,0	1,5	15,6	37,00	35,00	2,29	1,18	8,00	11,80	1,40	0,06	3,33	6,50

\*Solo testemunha

**APÊNDICE 16.** Atributos selecionados dos solos de lavouras de arroz irrigado no município de Capão do Leão/RS na camada de 0 - 20 cm de profundidade.

Ponto	Ordem dos solos	pH	MO	P	K	Na	Ca	Mg	H+Al	CTC	CE	Cd	Cr	Pb
			%	-----mg dm <sup>-3</sup> -----			-----cmolc dm <sup>-3</sup> -----			dS m <sup>-1</sup>	-----mg kg <sup>-1</sup> -----			
287	PLANOSSOLO	4,5	1,2	9,3	26,00	29,00	1,52	0,73	6,20	8,70	0,60	0,03	3,57	0,06
288	PLANOSSOLO*	5,0	1,1	3,9	26,00	29,00	1,20	0,78	6,80	8,90	0,80	0,03	2,24	3,11
289	PLANOSSOLO	5,5	1,4	5,7	47,00	70,00	1,71	1,20	8,80	12,10	1,10	0,06	4,21	7,29
290	GLEISSOLO	5,3	1,3	10,1	65,00	72,00	2,81	1,77	6,20	11,30	0,80	0,06	4,51	7,92

\*Solo testemunha

**APÊNDICE 17.** Atributos selecionados dos solos de lavouras de arroz irrigado no município de Rio Grande/RS na camada de 0 – 20 cm de profundidade.

Ponto	Ordem dos solos	pH	MO	P	K	Na	Ca	Mg	H+Al	CTC	CE	Cd	Cr	Pb
			%	-----mg dm <sup>-3</sup> -----			-----cmolc dm <sup>-3</sup> -----			dS m <sup>-1</sup>	-----mg kg <sup>-1</sup> -----			
290	GLEISSOLO	4,6	1,4	25,3	104,00	123,00	2,13	1,15	5,70	9,80	1,80	0,07	3,77	4,27
291	GLEISSOLO	5,0	1,5	6,7	108,00	103,00	2,57	1,83	8,80	13,90	1,20	0,05	5,58	7,51
292	ARGISSOLO*	6,0	1,6	7,1	98,00	27,00	0,62	0,54	5,70	7,20	1,20	<LD	<LD	<LD
293	PLANOSSOLO	4,8	2,0	10,1	102,00	43,00	1,64	1,05	10,40	13,50	1,20	0,06	3,47	4,75
294	PLANOSSOLO	4,1	1,7	9,3	116,00	544,00	1,56	2,79	6,20	13,20	6,30	0,04	4,11	4,82
295	ARGISSOLO	6,2	1,6	13,7	108,00	94,00	3,45	1,74	3,40	9,30	1,80	0,04	2,20	3,55
296	GLEISSOLO	4,9	1,7	10,3	69,00	107,00	5,51	2,43	5,70	14,30	1,70	0,05	2,84	4,59
297	GLEISSOLO	4,5	1,6	8,8	71,00	142,00	9,42	3,94	3,40	17,60	1,10	0,05	3,53	4,01
298	ARGISSOLO	6,1	0,9	25,1	53,00	45,00	1,01	0,51	4,10	5,90	1,00	0,02	1,52	2,45

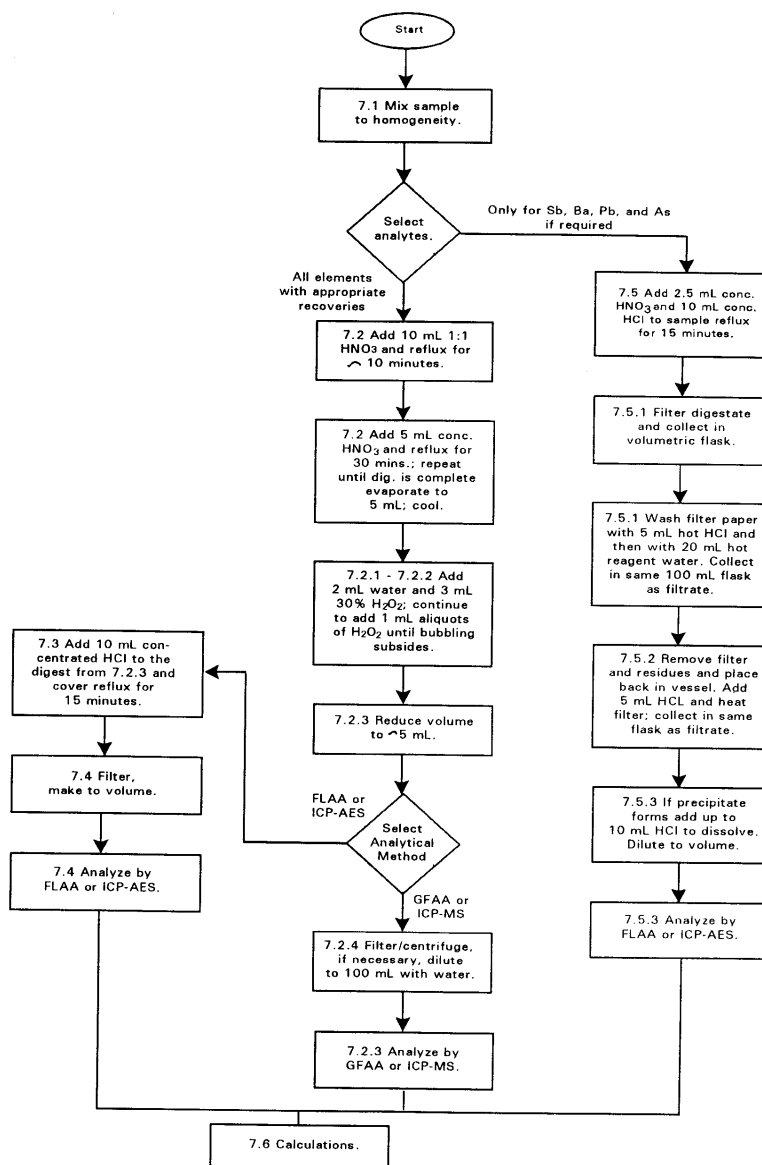
\*Solo testemunha

. (LD) Limite de detecção do aparelho para Cd, Cr e Pb: <0,01 mg kg<sup>-1</sup>




# APÊNDICE 18. Método de extração ácida 3050B – EPA

## METHOD 3050B ACID DIGESTION OF SEDIMENTS, SLUDGES, AND SOILS



CD-ROM

**APÊNDICE 19.** Protocolo de análise de elementos-traço em águas, realizado pelo Laboratório de Química Analítica da FEEVALE

	<b>CENTRAL ANALÍTICA</b>  PROCEDIMENTO TÉCNICO Determinação de Metais por espectrometria de absorção atômica de chama <b>CÓPIA PARA USO DIDÁTICO</b> Palavra-chave: Metais	Procedimento nº PT. AA. 001	
		Revisão nº 01	Página de 142

1. **OBJETIVO:** Determinar a concentração de metais em águas e efluentes.

2. **CAMPO DE APLICAÇÃO:** Este procedimento é aplicável ao laboratório de Via Úmida e de Absorção Atômica.

3. **DOCUMENTOS DE REFERÊNCIA:** Standard Methods for Examination of Water and Wastewater, 20<sup>th</sup> Ed., Instruções do fabricante do equipamento.

4. **MATERIAL E REAGENTES:**

- Chapa de aquecimento ;
- Copos de béquer de 400 mL, forma alta;
- Vidros de relógio;
- Provetas de vários volumes;
- Funis raiados;
- Balões volumétricos, de vidro borossilicato, tampa esmerilha, classe A, de diversos volumes;
- Pipetas volumétricas, de vidro borossilicato, classe A, de diversos volumes.
- Espectrofotômetro de absorção atômica;
- Lâmpadas de cátodo oco para os metais a analisar.

- Solução padrão de 1000 ppm:

- Diluir conforme instruções do fabricante, as ampolas de padrão de 1000 ppm para cada metal a analisar;

- Solução padrão de 100 ppm:

- Pipetar volumetricamente 10 mL da solução padrão de 1000 ppm transferir para um balão volumétrico de 100 mL. Armazenar em frasco de polietileno, na geladeira.

- Solução de SrCl<sub>2</sub> (Cloreto de estrôncio) 5%:

- Pesar 5 g de  $\text{SrCl}_2$  p.a (cloreto de estrôncio) em béquer. Dissolver e completar a 100 mL com água Milli-Q.

- Solução de KCl (Cloreto de potássio) 25%

- Pesar 25 g de KCl p.a (cloreto de potássio) em béquer. Dissolver e completar a 100 mL com água Milli-Q.

## 5. METODOLOGIA

Para as determinações dos metais, otimizar o equipamento seguindo as orientações do fabricante com relação à linearidade, estequiometria da chama e linhas de absorção.

É necessária a construção de uma curva analítica sempre que o procedimento for executado. A Tabela 1 apresenta como sugestão, os pontos para a realização da curva analítica para alguns metais comumente determinados em amostras de efluentes industriais. As concentrações sugeridas podem variar em função do perfil da amostra. As curvas de calibração devem ser construídas com os pontos dentro do intervalo de resposta linear para o metal. A mesma tabela apresenta ainda os valores da concentração da solução de *check* para as linhas de maior sensibilidade para os metais, conforme indicação do fabricante (Varian).

**Tabela 16.** Sugestão de pontos para a preparação da curva de analítica para alguns metais e suas concentrações de check nas linhas mais sensíveis

Metal	Pontos da curva			Solução de Check	Linha analítica
	(mg L <sup>-1</sup> )			(mg L <sup>-1</sup> )	(nm)
Alumínio	0,5	1,0	2,0	40,0	309,3
Cálcio	0,5	1,0	2,0	0,8	422,7
Chumbo	0,1	0,25	0,5	5,0	217
Cobre	0,1	0,25	0,5	1,5	324,8
Cromo	0,25	0,5	1,0	2,5	357,9
Ferro	0,5	1,0	2,0	2,5	248,3
Magnésio	0,25	0,5	1,0	0,15	285,2
Níquel	0,1	0,25	0,5	2,0	232
Ouro	0,1	0,25	0,5	6,0	242,8
Zinco	0,1	0,25	0,5	0,3	213,9

### 5.1 PREPARO DA AMOSTRA

a) Com auxílio de uma proveta graduada, transferir 50 mL de amostra homogeneizada (ou um volume adequado) para um béquer de 250 mL (ou de volume adequado) e adicionar 1 mL de ácido nítrico ( $\text{HNO}_3$ ) concentrado (ou proporcional à metade do volume correspondente a 4% em relação ao volume de amostra);

b) Aquecer, lentamente, em chapa de aquecimento (sem ferver) e reduzir o volume até, aproximadamente, 15 mL. Retirar do aquecimento antes que ocorra a precipitação;

c) Aguarde resfriamento e acrescentar mais 1 mL de ácido nítrico ( $\text{HNO}_3$ ) concentrado (ou proporcional a metade do volume correspondente a 4% em relação ao volume de amostra), cobrir com vidro de relógio e aquecer novamente em chapa de aquecimento, para que ocorra refluxo da amostra. A digestão estará completa quando houver condensação nas paredes do béquer (o ácido escorre em fios) e a solução estiver clara ou levemente colorida, sem turbidez;

d) Retirar da chapa, aguardar resfriamento e filtrar a amostra, transferindo para balão volumétrico de 50 mL (ou de volume adequado), lavando o vidro de relógio, as paredes do béquer e o funil com água Milli-Q, recolhendo-os no balão.

e) Completar o volume com água Milli-Q.

f) Preparar a curva de calibração com, pelo menos, três padrões do metal a ser analisado, a partir da solução padrão de  $100 \text{ mg L}^{-1}$ , conforme indicação da Tabela 1.

g) Preparar também uma prova em branco com água MilliQ e a solução de *check* para otimização do equipamento.

## 5.2 LEITURA NO EQUIPAMENTO

O uso do equipamento deve seguir as instruções do fabricante.

- Colocar a lâmpada do metal a ser analisado;
- Selecionar o melhor comprimento de onda, a corrente e a fenda, conforme especificação do aparelho;
- Otimizar a lâmpada, a chama e o nebulizador, utilizando queimador, gases e concentração de *check* adequados;
- Correr os brancos, padrões e amostras e ler diretamente a concentração. Caso as amostras sejam diluídas multiplicar a concentração das mesmas pelo fator de diluição.

#### OBSERVAÇÕES:

- I. Analisar a amostra em duplicata;
- II. Digerir um branco com água Milli-Q para controle da mesma;
- III. Na determinação de  **cálcio**  e  **magnésio** , para um volume final de 50 mL, adicionar 2 mL de solução de cloreto de estrôncio 5% (SrCl<sub>2</sub>)
- IV. Na determinação de  **alumínio** , para um volume final de 50 mL, adicionar 1 mL de solução de cloreto de potássio 25% (KCl)

#### 6. CÁLCULO E EXPRESSÃO DOS RESULTADOS

Concentração do metal, mg L<sup>-1</sup> = [ ] x F.D.

Onde: [ ] = concentração de metal na amostra digerida, em mg L<sup>-1</sup>.

F.D. = Fator de diluição

Os resultados são expressos em mg L<sup>-1</sup>

**APÊNDICE 20.** Teores de Cd, de Cr e de Pb em diferentes fertilizantes fosfatados, digeridos pelo método nítrico-perclórico (Tedesco et al., 1995) e quantificados por ICP-OES.

Fertilizantes*	Cd	Cr	Pb
	-----mg kg <sup>-1</sup> -----		
Rocha Fosfática	2,47	4,67	1,67
MAP Importado (Marrocos)	22,27	37,60	13,07
Fosfato de Gafsa	14,47	69,00	0,00
Fosfato Monoamônico (10-54-00)	20,31	340,47	0,27
Superfosfato Simples Nacional (Uberaba)	40,67	141,93	314,13
Superfosfato Simples (Araxá-MG)	0,56	16,27	10,13
Fosfato Monoamônico - Nacional Uberaba	0,37	16,67	5,00
<b>Superfosfato triplo importado (Maroccos)<sup>1</sup></b>	<b>1,93</b>	<b>55,40</b>	<b>10,20</b>
Superfosfato triplo nacional	0,57	17,47	7,13

\*Média de três determinações

<sup>1</sup>Teores de Cd, de Cr e de Pb selecionados para aplicação no Gleissolo Háplico Distrófico típico utilizado no Capítulo V