

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

**MODIFICAÇÕES DE SOLO E PLANTAS APÓS DUAS DÉCADAS DA  
APLICAÇÃO DE LODO PROVENIENTE DA ETE DO SITEL DO POLO  
PETROQUÍMICO (TRIUNFO, RS)**

VIVIANE PEREIRA DOS SANTOS  
Engenheira Agrônoma (UFRGS)

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

Porto Alegre (RS) Brasil  
Julho de 2010

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

**MODIFICAÇÕES DE SOLO E PLANTAS APÓS DUAS DÉCADAS DA  
APLICAÇÃO DE LODO PROVENIENTE DA ETE DO SITE DO PÓLO  
PETROQUÍMICO (TRIUNFO, RS)**

**VIVIANE PEREIRA DOS SANTOS**

(Dissertação)

## **DISSERTAÇÃO**

Submetida como parte dos requisitos  
para a obtenção do Grau de

### **MESTRE EM CIÊNCIA DO SOLO**

Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo  
Faculdade de Agronomia  
Universidade Federal do Rio Grande do Sul  
Porto Alegre (RS), Brasil

Aprovada em:

Pela Banca Examinadora

Homologado em:

por:

CLESIO GIANELLO  
Professor Orientador  
PPG - Ciência do Solo / UFRGS

FLAVIO A. DE O. CAMARGO  
Coordenador do Programa de  
Pós-Graduação em Ciência do  
Solo

CARLOS ALBERTO BISSANI  
PPG – Ciência do Solo

MARIA LUCIA KOLOWSKI  
RODRIGUES  
FEPAM/RS

PEDRO ALBERTO SELBACH  
Diretor da Faculdade de  
Agronomia

GUSTAVO TORNQUIST  
PPG – Ciência do Solo

## DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a minha querida e amada mãe, Ivanir Teresinha que, com muita dedicação e sacrifício, deu-me a oportunidade de buscar meus ideais e sonhos. Agradeço e demonstro minha eterna gratidão, oferecendo-lhe todos os méritos desta conquista.

## AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal do Rio Grande do Sul e ao Departamento de Solos pela oportunidade para a realização do mestrado;

Ao Prof. Marino Tedesco pela co-orientação, apoio e exemplo de dedicação à pesquisa.

Ao Prof. Clésio Gianello pela orientação deste trabalho;

Ao Laboratório de Solos pelos recursos físicos e financeiros concedidos;

Aos funcionários e amigos do Laboratório de Análises do Solo: Taís, Élio, Lisandra, Bernadete, Sidnei e Licínio (Psit) pelo grande auxílio na execução do trabalho.

À CAPES pela bolsa de estudos;

Aos colegas de pós-graduação e do LAS pela convivência no decorrer do curso, sugestões, idéias, estímulo e amizade.

As amigas em especial, Vanessa, Daniela, Patrícia, Analú e Jaqueline pela compreensão nos momentos de dificuldades.

As pessoas que passaram e aquelas que ficaram pelo incentivo e apoio durante a concretização de mais esta etapa.

Um agradecimento especial aos meus amigos Janice e Christian, por me incentivar neste final de caminhada, sempre me repassando carinhosamente a coragem necessária para acreditar que seria possível.

*“O bem que hoje fazemos,  
é uma garantia de felicidade futura,  
embora nunca possamos dizer  
quando ou de que forma essa  
felicidade virá às nossas mãos.”*

David Dunn

# MODIFICAÇÕES DE SOLO E PLANTAS APÓS DUAS DÉCADAS DA APLICAÇÃO DE LODO PROVENIENTE DA ETE DO SITE DO POLO PETROQUÍMICO (TRIUNFO, RS)<sup>1/</sup>

AUTOR: Viviane Pereira dos Santos  
ORIENTADOR: Prof. Clésio Gianello  
CO-ORIENTADOR: Marino José Tedesco

## RESUMO

Com o objetivo de estudar os efeitos da aplicação no solo de lodo gerado pela ETE do Sistema Integrado de Tratamento de Efluentes Líquidos do IIIº Pólo Petroquímico (Triunfo, RS), foi iniciado em 1985 um estudo em colunas (microparcelas), com diferentes plantas de cobertura e várias taxas de adição do lodo, em sistema aberto. O experimento foi conduzido por seis anos, com cinco adições anuais de lodo, aplicando-se a quantidade total de até 624 t ha<sup>-1</sup> na maior taxa de adição. Após esse período, as colunas de solo continuaram sendo mantidas a céu aberto, com desenvolvimento da vegetação espontânea. Em 2007/08 foram feitas amostragens de solo, correção da acidez e adubação, conforme as recomendações vigentes, e cultivados milho (*Zea mays*, L.), feijão preto (*Phaseolus vulgaris*, L) e rabanete (*Raphanus sativus*). As plantas apresentaram desenvolvimento normal, não sendo necessário o suprimento de adubo fosfatado nos tratamentos com adição de lodo. O teor de matéria orgânica do solo aumentou com a adição das maiores doses de lodo aplicadas. Os teores de zinco, cobre, cádmio, níquel e chumbo nas plantas situaram-se nas faixas consideradas normais em plantas cultivadas em solos não contaminados.

<sup>1/</sup> Dissertação de Mestrado em Ciência do Solo. Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. (108p.) Julho de 2010. Trabalho realizado com o apoio financeiro do Laboratório de Análises de Solos da Faculdade de Agronomia da UFRGS.

# SOIL AND PLANT MODIFICATIONS AFTER 20 YEARS SUB-SURFACE APPLICATION OF SLUDGE FROM PETROCHEMICAL INDUSTRIES OPERATING AT THE TRIUNFO (RS, BRASIL) COMPLEX<sup>1/</sup>

AUTHOR: Viviane Pereira dos Santos  
ADVISERS: Clésio Gianello  
Marino José Tedesco

## ABSTRACT

A microplot (soil columns) experiment to study the effects of several rates of sludge generated by the SITEL/CORSAN (the integrated wastewater treatment plant of the southern Brazilian petrochemical complex) on plants, soil and leached water was started in 1985. Sludge was applied for six years at the total rates up to 624 t ha<sup>-1</sup> (dry matter) and the microplots maintained in an open area, and cultivated with several plant species until 1993. In the years 2007/08 the soil in the microplots was sampled for chemical analysis; liming and fertilization were conducted according to the actual recommendations, and black beans (*Phaseolus vulgaris*, L), corn (*Zea mays*, L.), and radish (*Raphanus sativus*, L) were cultivated, which showed normal growth, without phosphate fertilization on the microplots with sludge application. Soil organic matter also increased on these microplots. Zinc, copper, cadmium, nickel and lead contents were in the range usually determined in plants grown on non contaminated soils.

M.Sc. Dissertation in Soil Science. Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre (108p.) July, 2010. Supported by the Department's Soil Testing Laboratory.

## SUMÁRIO

	<b>Página</b>
<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	1
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	4
2.1. Características operacionais da ETE do SITEL/CORSAN .....	6
2.1.1. Operação da Fazenda de Lodo .....	7
2.1.2. Estudo em microparcelas .....	8
2.1.3. Descarte de efluente líquido no solo .....	10
2.2. Reciclagem de resíduo no solo.....	10
2.2.1. Acidez e calagem.....	12
2.2.2. Matéria orgânica .....	12
2.3. Sorção / dessorção em solos .....	14
2.4. Elementos tóxicos no ambiente .....	16
2.4.1. Cádmio.....	17
2.4.2. Chumbo.....	17
2.4.3. Cobre.....	17
2.4.4. Zinco .....	18
2.4.5. Níquel .....	18
2.5. Metais pesados em plantas .....	18
2.6. Permanência de metais no solo.....	20
<b>3. MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	23
3.1. Etapas anteriores do trabalho.....	23
3.1.1. Coleta e preparo do solo.....	23
3.1.2. Caracterização do lodo utilizado .....	24
3.1.3. Tratamentos e condução do experimento.....	26
3.1.3.1. Primeiro e 2º anos de cultivo .....	26
3.1.3.2. Terceiro ao 6º anos de cultivo .....	28
3.1.4. Efeito residual em tomateiro e aveia .....	29
3.1.5. Mobilidade e fracionamento dos metais .....	31
3.2. Reutilização do solo para sistemas produtivos .....	31
3.2.1. Cultivos consorciados de milho e feijão preto .....	32
3.2.2. Amostragem das camadas sub-superficiais do solo, correção da acidez e adubação .....	33
3.2.3. Segundo cultivo do milho .....	34

3.2.4. Cultivo do rabanete .....	34
3.2.5. Análise estatística .....	35
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>36</b>
4.1. Caracterização do solo .....	36
4.1.1. Componentes da acidez e da CTC do solo .....	36
4.1.2. Teores de matéria orgânica, C e N totais, P, K e S extraíveis e densidade do solo da camada superficial .....	40
4.1.3. Teores de zinco e cobre .....	44
4.1.4. Níquel, chumbo e cádmio .....	49
4.1.5. Efeitos da correção e adubação do solo .....	50
4.2. Crescimento de plantas e teores de nutrientes e metais.....	51
4.2.1. Matéria seca do milho (1º cultivo) e grãos do feijoeiro .....	51
4.2.2. Matéria seca do milho (2º cultivo) e produção de rabanete ..	55
4.2.3. Teores de metais nas plantas .....	56
<b>5. CONCLUSÕES .....</b>	<b>65</b>
<b>6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>66</b>
<b>7. ANEXOS .....</b>	<b>75</b>

## RELAÇÃO DE TABELAS

	Página
1. Caracterização físico-química inicial do solo utilizado no experimento, coletado em 1985, no município de Triunfo, RS (TEDESCO et al., 1986) .....	25
2. Caracterização físico-química do lodo gerado pelo SITEL/CORSAN (média de 30 amostras utilizadas no período de 1985 a 1991) .....	27
3. Tratamentos a partir do terceiro ano .....	30
4. Componentes da acidez e da capacidade de troca (CTC) do solo das camadas A (até 20 cm de profundidade), B (20 a 40 cm) e C (40 a 60 cm) após oito anos da última correção (média de quatro repetições) .....	38
5. Teores de C e N totais, P, K e S extraíveis e densidade do solo da camada superficial, após 18 anos da última aplicação de lodo (médias dos tratamentos com adições das mesmas doses de lodo) .....	43
6. Teores extraíveis e totais de metais do solo das camadas A (até 20 cm de profundidade), B (20 a 40 cm) e C (40 a 60 cm) após 16 anos da última aplicação de lodo (média de quatro repetições) .....	46
7. Média dos resultados analíticos da camada superficial do solo nos nove tratamentos, antes e 15 dias após a correção/adubação, feitas em 2009 .....	52
8. Teores de zinco (em mg kg <sup>-1</sup> ) nos grãos do feijoeiro, na matéria seca do milho (2 cultivos) e nas raízes e folhas do rabanete (médias de quatro repetições) .....	59
9. Teores de cobre (em mg kg <sup>-1</sup> ) nos grãos do feijoeiro, na matéria seca do milho (2 cultivos) e nas raízes e folhas do rabanete (médias de quatro repetições) .....	60
10. Teores de cádmio (em mg kg <sup>-1</sup> ) nos grãos do feijoeiro, na matéria seca do milho (2 cultivos) e nas raízes e folhas do rabanete (médias de quatro repetições) .....	61

11. Teores de níquel (em $\text{mg kg}^{-1}$ ) nos grãos do feijoeiro, na matéria seca do milho (2 cultivos) e nas raízes e folhas do rabanete (médias de quatro repetições) .....	63
12. Teores de chumbo (em $\text{mg kg}^{-1}$ ) nos grãos do feijoeiro, na matéria seca do milho (2 cultivos) e nas raízes e folhas do rabanete (médias de quatro repetições) .....	64

## RELAÇÃO DE FIGURAS

	Página
1. Teores de matéria orgânica da camada superficial do solo amostrado após a última aplicação do lodo (TEDESCO et. al, 1991) a oito anos após cessar a aplicação de lodo (GAIVIZZO, 2001) e no presente trabalho (média dos tratamentos com as mesmas doses).....	41
2. Teores de zinco total e extraído na camada superficial do solo ..	48
3. Rendimentos percentuais médios de grãos de feijão e matéria seca da parte aérea do milho (1º cultivo) em relação ao tratamento com maior produtividade .....	54
4. Rendimentos percentuais médios de matéria seca do milho (2º cultivo) e do rabanete (folhas + raízes) em relação ao tratamento com maior produtividade .....	56

## RELAÇÃO DE ANEXOS

	Página
1. Tratamentos utilizados nos dois primeiros anos do experimento .....	75
2. Quantidades cumulativas máximas de metais que podem ser aplicadas no solo conforme as legislações de alguns países e estados do Brasil .....	76
3. Matéria orgânica e Índice SMP (nas três camadas), massa do solo e densidade da camada superficial (média de quatro repetições) .....	77
4. Carbono orgânico, nitrogênio total, fósforo, potássio e enxofre do solo das camadas A (até 20 cm de profundidade), B (20 a 40 cm) e C (40 a 60 cm) após 16 anos da última aplicação de lodo (média de quatro repetições) .....	78
5. Características da camada superficial do solo após 15 dias da correção e da adubação (médias de quatro repetições.....)	80
6. Teores de alguns nutrientes considerados adequados em folhas de feijoeiro, de milho e de rabanete .....	82
7. Peso seco (MS) da parte aérea das plantas de milho (1º cultivo) e teores de macronutrientes do mesmo (médias de quatro repetições) .....	83
8. Peso de grãos de feijoeiro cultivado no verão de 2007/2008 e teores de macronutrientes nos mesmos (médias de quatro repetições) .....	84
9. Peso seco (MS) da parte aérea das plantas de milho (2º cultivo) e teores de macronutrientes do mesmo (médias de quatro repetições) .....	85

<b>10.</b> Peso seco de raízes do rabanete cultivado no outono de 2009 e teores de macronutrientes das mesmas (médias de quatro repetições) .....	86
<b>11.</b> Peso seco (MS) das folhas do rabanete cultivado no outono de 2009 e teores de macronutrientes das mesmas (médias de quatro repetições) .....	87
<b>12.</b> Faixas de teores de alguns metais considerados normais ou excessivos (tóxicos) na matéria seca das plantas .....	88
<b>13.</b> Teores de zinco (em mg kg <sup>-1</sup> ) na matéria seca do azevem (inverno) e do capim pangola (verão) cultivados em 1991, nos frutos do tomateiro e nos grãos de aveia cultivados em 1993 (média de quatro repetições).....	89
<b>14.</b> Teores de cobre (em mg kg <sup>-1</sup> ) na matéria seca do azevem (inverno) e do capim pangola (verão) cultivados em 1991, nos frutos do tomateiro e nos grãos de aveia cultivados em 1993 (média de quatro repetições).....	90
<b>15.</b> Teores de cádmio (em mg kg <sup>-1</sup> ) na matéria seca do azevem (inverno) e do capim pangola (verão) cultivados em 1991, nos frutos do tomateiro e nos grãos de aveia cultivados em 1993 (médias de quatro repetições) .....	91
<b>16.</b> Teores de níquel (em mg kg <sup>-1</sup> ) na matéria seca do azevem (inverno) e do capim pangola (verão) cultivados em 1991, nos frutos do tomateiro e nos grãos de aveia cultivados em 1993 (médias de quatro repetições) .....	92
<b>17.</b> Teores de chumbo (em mg kg <sup>-1</sup> ) na matéria seca do azevem (inverno) e do capim pangola (verão) cultivados em 1989/91, nos frutos do tomateiro e nos grãos de aveia cultivados em 1993 (médias de quatro repetições) .....	93
<b>18.1.</b> Efeito da aplicação de Lodo da Estação de Tratamento do SITEL/CORSAN na absorção de nutrientes e metais pesados pelas plantas – primeiro ano de cultivo .....	95
<b>18.2.</b> Efeito da aplicação de Lodo da Estação de Tratamento do SITEL/CORSAN na absorção de nutrientes e metais pesados pelas plantas – segundo ano de cultivo .....	96
<b>18.3.</b> Efeito da aplicação de Lodo da Estação de Tratamento do SITEL/CORSAN na absorção de nutrientes e metais pesados pelas plantas (3 <sup>o</sup> e 4 <sup>o</sup> anos) .....	97
<b>18.4.</b> Efeito da aplicação de Lodo da Estação de Tratamento do SITEL/CORSAN nas plantas e no solo (5 <sup>o</sup> e 6 <sup>o</sup> anos – 1989/91) .....	98

<b>18.5.</b> Efeito da aplicação de Lodo da Estação de Tratamento do SITEL/CORSAN nas plantas e no solo (1993) .....	99
<b>18.6.</b> Mobilidade e formas de retenção de metais pesados em colunas de solo com descarte de lodo industrial.....	100
<b>18.7.</b> Avaliação do efeito de adição de titânio e vanádio no solo para as plantas.....	101
<b>18.8.</b> Avaliação do sistema de aplicação de lodo no solo (Fazenda de Lodo) do SITEL/CORSAN.....	102
<b>19.1.</b> Modificações das propriedades físicas e químicas do solo pela aplicação de efluente petroquímico tratado.....	104
<b>19.2.</b> Acompanhamento das modificações de solo e plantas que ocorrem com o tempo de aplicação do efluente gerado pelo SITEL/CORSAN.....	106
<b>19.3.</b> Avaliação do sistema de disposição final no solo do efluente líquido produzido pelo SITEL/CORSAN.....	107
<b>20.</b> Fluxograma simplificado do SITEL .....	108

## 1. INTRODUÇÃO

A atividade industrial geralmente produz efluentes líquidos que devem ser eficientemente tratados para evitar a contaminação ambiental, principalmente no ambiente aquático. O tratamento de efluentes contendo possíveis contaminantes em suspensão ou dissolvidos em água é feito em instalações apropriadas, denominadas Estações de Tratamento de Efluentes (ETE's). A complexidade do tratamento depende da degradabilidade ou inativação dos materiais contidos no efluente. Substâncias orgânicas solúveis em água como açúcares e proteínas, são facilmente biodegradáveis, enquanto compostos orgânicos com cadeias aromáticas ou contendo polifenóis são de difícil biodegradação.

A tratabilidade biológica de um efluente depende da natureza e concentração dos contaminantes e do processo biológico adotado pela ETE (aeróbio ou anaeróbio), em que fatores que afetam o sistema podem ser controlados. Dentre estes, são geralmente controlados: pH, suprimento de

nutrientes aos microrganismos degradadores, tempo, temperatura, aeração, etc.

A remoção prévia de particulados por peneiras e do óleo por flotação é também geralmente utilizadas em ETE's.

Pelo tratamento biológico conduzido em condições adequadas, são gerados o lodo biológico de excesso, floculado e separado no fundo dos decantadores, e o efluente líquido tratado, que pode ser devolvido ao curso d'água receptor, caso esteja em conformidade com os padrões de lançamento estabelecidos na legislação.

O lodo pode ter diversos destinos como: aterros sanitários, incineração, fertilizante ou substrato para o crescimento de plantas, etc.

A disposição do lodo no solo é uma alternativa bastante utilizada, tendo em vista que o mesmo é um resíduo que pode ser decomposto biologicamente, não sendo, portanto, não tóxico à microbiota do solo. Pode conter, entretanto, baixas concentrações de possíveis poluentes, em níveis subtóxicos para microrganismos. A utilização continuada deste lodo no solo provocaria um acúmulo destes compostos, caso sejam de difícil biodegradação, até atingir níveis prejudiciais ao ambiente solo-planta.

Efluentes de indústrias petroquímicas certamente contêm compostos orgânicos de lenta degradação (recalcitrantes), como por exemplo os polímeros que estão presentes nos lodos gerados nas ETE's, sendo transferidos para o solo, pela utilização agrícola do lodo.

Além de compostos orgânicos recalcitrantes à biodegradação, o lodo petroquímico contém metais, provenientes da deterioração de equipamentos e da utilização de catalisadores em reações químicas.

Tendo em vista a pequena taxa de degradação destes compostos orgânicos, há necessidade de avaliar os efeitos da utilização no solo de grandes quantidades de lodo sobre o crescimento das plantas, num longo período de tempo, bem como as modificações nos teores de componentes orgânicos e/ou inorgânicos (metais) no perfil do solo.

Os objetivos deste trabalho, portanto, foram de:

1. avaliar a possibilidade de retorno à atividade agrícola das áreas utilizadas para o descarte de lodo de ETE que trata efluentes de indústrias petroquímicas, após duas décadas do início da operação;
2. estudar as modificações das propriedades de um Argissolo, pela aplicação de grandes quantidades de lodo;
3. avaliar a dinâmica no solo de alguns metais pesados contidos no lodo e/ou adicionados na forma de sais solúveis;
4. fornecer informações sobre programas de aplicação no solo do lodo gerado na ETE operada pelo SITEL (Sistema Integrado de Tratamento de Efluentes Líquidos) da CORSAN (Companhia Riograndense de Saneamento), localizada no município de Triunfo, RS.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

No início da década de 1980, por motivos estratégicos e de mercado, sob forte insistência do Governo Estadual, foi estabelecido o terceiro Pólo Petroquímico (depois de Cubatão (SP) e Camaçari (Ba), no estado do Rio Grande do Sul. A operação da refinaria Alberto Pasqualini (REFAP), localizada no município de Canoas, abastecida pelo terminal marítimo de Tramandaí para o suprimento de petróleo para o refino, poderia garantir a matéria-prima básica (nafta) para o início das atividades no setor. Considerando a logística necessária (disponibilidade de área adequada, proximidade do centro urbano, rodovias e vias aquáticas) foi selecionado o município de Triunfo para sediar este empreendimento.

À época, a consciência da proteção ambiental já estava muito presente no Estado, tendo em vista que, em geral, empreendimentos petroquímicos eram considerados os “vilões da poluição”, por descartarem os resíduos no mar, por emissários submarinos.

Seguiu-se uma grande discussão na sociedade sobre as formas e possibilidades de tratamento dos resíduos/efluentes. Como resultado desta mobilização da sociedade, a Assembléia Legislativa do Estado do Rio Grande do Sul, aprovou a Lei nº 7691/82 (RS, 1982), a qual estabeleceu que todos os

efluentes gerados pelas indústrias a serem instaladas no Pólo deveriam ser descartados na área destinada ao mesmo.

Esta forte restrição exigiu, portanto, o cumprimento de alguns requisitos, a saber:

1. a Estação de Tratamento de Efluentes (ETE) deveria apresentar grande eficiência, obtida por processo biológico aeróbico;
2. os efluentes/resíduos que não se adaptassem ao tratamento biológico deveriam ser tratados separadamente, em sistema centralizado, ou nas próprias indústrias;
3. o lodo biológico de excesso, gerado nos decantadores, após o tratamento biológico, deveria ser descartado no solo, de modo que a área destinada ao mesmo (Fazenda de Lodo com vegetação permanente) pudesse retornar às atividades agrícolas usuais (produção de alimentos) após o encerramento da vida útil proposta para essa atividade;
4. o efluente líquido (sobrenadante) deveria ser dissipado por infiltração no solo e/ou por evapotranspiração da vegetação, que deveria cobrir toda a área.

Para melhor localizar as áreas de terra destinadas a essa atividade, foi efetuado um levantamento detalhado de solos pelo Departamento de Solos da UFRGS (KLAMT et al., 1982), em que foram descritas e locadas as diferentes áreas conforme sua aptidão às finalidades propostas (Fazenda de Lodo e área de dissipação do efluente líquido).

A execução destes encargos foi atribuída à Companhia Riograndense de Saneamento (CORSAN), que abriu concorrência internacional para propostas com esta finalidade, sendo contemplada a empresa FMC/FILSAN (de São Paulo). Esta contratou o trabalho da Wilson Nolan Inc. (de Oklahoma City, OK – USA) para o planejamento da Fazenda de Lodo (NOLAN, 1982) e a Magna Engenharia Ltda. (de Porto Alegre) para projetar o sistema de dissipação de efluentes líquidos, descrito por Simon et al. (1985a).

Para gerenciar e posteriormente conduzir as operações de funcionamento da ETE e a disposição dos efluentes no solo, foi criado o Sistema Integrado de Tratamento de Efluentes Líquidos (SITEL), implantado em área próxima ao complexo básico do Pólo, onde foi inicialmente instalada a COPESUL (à época subsidiária da Petrobrás), encarregada da produção de matérias primas para as outras indústrias de 2ª geração.

A ETE do SITEL/CORSAN iniciou a operação no início de 1985, com a produção de lodo de  $5,0 \text{ t ano}^{-1}$ , atingindo  $458,0 \text{ t}$  em 2002 (TEDESCO et al., 2004a), com média de  $199,3 \text{ t anuais}$  (base seca). Este lodo é aplicado em áreas que totalizam  $21,6 \text{ ha}$ , tendo sido aplicados, em média,  $184,5 \text{ t ha}^{-1}$  até 2003.

Serão descritos a seguir as operações gerais da ETE do SITEL/CORSAN, as características médias dos efluentes tratados e as principais modificações do meio físico observadas.

### **2.1. Características operacionais da ETE do SITEL/CORSAN**

Tendo em vista que é adotado o tratamento biológico aeróbio dos efluentes, não são admitidos materiais que prejudiquem a eficiência da atividade biológica na ETE.

Os resíduos gerados nas indústrias instaladas no Pólo são classificados em duas categorias: 1) os da “linha verde” (provenientes de atividades domésticas, como varreduras de pátios, sanitários, refeitórios, etc.) a serem dispostos em aterro sanitário, cujo chorume é enviado ao SITEL para tratamento em mistura com o efluente orgânico bruto, não tóxico à microbiota da estação de tratamento; e, 2) os encaminhados à “linha vermelha” (resíduos industriais típicos, potencialmente perigosos, tóxicos, inflamáveis, etc.), são dispostos em dois Valos de Tratamento e Disposição (VTD's), cujos chorumes também são encaminhados ao SITEL para tratamento. Um dos valos é utilizado para resíduos de natureza inorgânica (VTD-1), tais como lama de cromo, torta de filtração em terra diatomácea, etc.; o outro (VTD-2) é utilizado para resíduos de natureza orgânica e oleosa, muitas vezes com alta

viscosidade e altos teores de umidade (50% ou mais) que não podem ser tratados como resíduos líquidos (SIMON et al. 1985b). As condições de operação da ETE nos primeiros 33 meses de operação (de dezembro de 1982 a agosto de 1985) e os dados operacionais foram relatados por Simon et al. (1985 a, b).

### **2.1.1. Operação da Fazenda de Lodo**

O lodo de excesso do tratamento aeróbio do efluente é injetado no solo nos diferentes campos que compõem a Fazenda de Lodo (com dois a quatro ha cada um), com área total de 21,6 ha, por um caminhão tanque (tipo AG-GATOR) apropriado, provido de quatro injetores com comando hidráulico (até 10–15 cm de profundidade) e pneus largos, para evitar compactação do terreno. É obedecido um rígido controle da operação de aplicação do lodo no solo, evitando-se períodos com precipitação, anotando-se os locais de aplicação (campos) e amostrando-se o material aplicado, para envio de amostras compostas para análise nos laboratórios do SITEL/CORSAN, em conformidade com o plano operacional (NOLAN, 1982). Nos campos, foram inicialmente cultivados o capim pangola (*Digitaria decumbens* Stent) no verão, e o azevém (*Lolium multiflorum* Lam) no inverno, após a correção da acidez do solo pela aplicação de calcário dolomítico, em quantidade recomendada para atingir pH 6,5, e adubação com fertilizantes contendo N (uréia), P (superfosfato triplo) e K (KCl), conforme as recomendações oficiais utilizadas à época.

Além do controle das quantidades de lodo adicionado, o monitoramento também inclui análises anuais do solo amostrado nas camadas superficial (0 a 20 cm) e subsuperficial (20 a 50 cm de profundidade), coletado em cada um dos campos da Fazenda de Lodo; com base nos resultados das análises de solo, são feitas a correção da acidez do solo e a fertilização das culturas.

### 2.1.2. Estudo em microparcelas

Tendo em vista que foram indicadas no projeto taxas de aplicação de lodo baixas ( $24,3 \text{ t MS ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ ), para uma vida útil da Fazenda de Lodo de 13 anos (NOLAN, 1982), foi proposto um experimento em microparcelas (colunas de 65 cm de altura com área de  $0,07068 \text{ m}^2$ ), a ser conduzido a céu aberto, na Faculdade de Agronomia (UFRGS), para estudar os efeitos da aplicação de maiores doses de lodo na camada superficial do solo, seus reflexos nas camadas subjacentes e no líquido lixiviado, bem como no crescimento de quatro espécies de plantas. Este experimento foi iniciado em 1985, com os tratamentos e culturas indicados no Anexo 1, sendo os resultados obtidos no 1º e no 2º anos relatados por Tedesco et al. (1986<sup>a</sup>; 1986b; 1987; 1988a), e resumidos nos Anexos 18.1 e 18.2.

Ao final do 2º ano de cultivo, o experimento foi reformulado, mantendo-se duas culturas (capim pangola no verão e azevem no inverno), com a adição de metais (Zn, Cu, Cd, Pb, Ni e Hg na forma de sais) ao lodo, antes das aplicações. Esta modificação foi motivada pela necessidade de estudo dos efeitos no sistema solo/planta/água de um possível aumento dos teores dos mesmos no lodo. Foram utilizadas três taxas de adição de metais, com base nas quantidades máximas aceitas pela Comunidade Econômica Européia (CEC, 1986), para um período de aplicação de 10 anos (Anexo 2). Os tratamentos utilizados de metais adicionados (pelo lodo e por sais) são especificados na Tabela 3. Os resultados obtidos no 3º e no 4º anos de cultivo foram apresentados por Tedesco et al. (1989) e resumidos no Anexo 18.3.

O experimento foi continuado por mais dois anos (até 1991), com os mesmos tratamentos, plantas e adições de lodo e metais. Os resultados obtidos no 5º e no 6º anos de cultivo foram relatados por Tedesco et al. (1991) e resumidos para apresentação em Conferência Internacional por Tedesco et al. (1993<sup>a</sup>; 1993b).

Após o 6º ano de cultivo, foi descontinuada a aplicação de lodo (e metais), mantendo-se os vasos a céu aberto. Em 1993, foram cultivados o tomateiro (no verão) e a aveia (no inverno) para a avaliação da qualidade dos frutos e grãos, respectivamente, tendo em vista a possibilidade do retorno da

terra ocupada pela Fazenda de Lodo à produção de alimentos. Os resultados obtidos foram apresentados por Tedesco et al., (1993c) e resumidos no Anexo 18.5.

Em 1999, os vasos foram desmontados, coletando-se uma amostra do solo de cada camada, para a avaliação das quantidades e formas químicas dos metais e mobilidade dos mesmos no perfil, sendo os resultados obtidos apresentados por Gaivizzo (2001) e resumidos no Anexo 18.6.

Em 2001, foi conduzido um teste em vasos com as adições de titânio e vanádio, metais que não estavam sendo monitorados no lodo. Os resultados indicaram que aplicações maiores que  $200 \text{ kg ha}^{-1}$  de vanádio eram prejudiciais às plantas, o que não ocorreu com o titânio (TEDESCO et al., 2001). Atualmente, o vanádio foi incluído no monitoramento da qualidade do lodo (Anexo 18.7)

Em 2003, o SITEL/CORSAN licitou uma avaliação externa da vida útil da Fazenda de Lodo, tendo em vista uma possível necessidade de mudança de local. Foi feita neste trabalho a análise geral dos dados de monitoramento (quantidades de lodo adicionado e análises químicas do lodo e do solo) para verificar a situação atual e em relação aos limites máximos dos diversos componentes do lodo adotados no projeto (NOLAN, 1982) aprovado pelo órgão ambiental à época (Secretaria da Saúde e Meio Ambiente – 1982). Foi verificado que, mantidas as taxas atuais de aplicação de lodo, e a composição do mesmo, a vida útil da Fazenda de Lodo seria de mais 42 anos. O primeiro fator restritivo a ser atingido seria a quantidade total de zinco aplicado ( $500 \text{ kg ha}^{-1}$ , valor especificado no projeto e atualmente observado). Este fato é devido à menor taxa de aplicação de lodo ( $8,8 \text{ t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$  – base seca) e menor teor deste metal do que o previsto no projeto (NOLAN, 1982). A análise dos dados foi apresentada por Tedesco et al. (2004a) e resumida no Anexo 18.8.

### **2.1.3. Descarte do efluente líquido no solo**

A aplicação do efluente líquido no solo foi iniciada em 1983, em uma área de 52 ha, utilizando-se tubulação perfurada (baixa pressão) e aspersores fixos (alta pressão). Em 1995, o sistema foi ampliado para o dobro dessa área.

Devido ao alto teor de sódio no efluente, e à operação contínua do sistema de dissipação, começaram a ser observadas mudanças no meio físico, como morte de arbustos nas áreas atingidas pelo jato do efluente dos aspersores, redução das taxas de infiltração no solo, queda de árvores por morte das raízes, aparecimento de espécies de plantas adaptadas a solos mal drenados, etc. Estas modificações foram identificadas por Simon (1986a – Anexo 19.1), acentuando-se com o tempo de operação do sistema, conforme relatório de Tedesco et al., (1990 – Anexo 19.2).

Em 1986 e 1987, foi conduzido pelo Departamento de Solos (UFRGS) um experimento a campo em área sob aspersor de efluente, visando identificar espécies de plantas adaptadas às novas condições do meio. Espécies como arroz irrigado, capim arroz e cana-de-açúcar (selecionada na Estação Experimental de Osório, RS) mostraram-se promissoras (TEDESCO et al. 1988b).

Em 2003, foi feita uma avaliação geral do sistema inicialmente implantado, que indicou ter ocorrido gradualmente a modificação natural para outro modo de tratamento de efluente, ou seja, a surgimento de banhados (sistema de “wetlands”) com plantas aquáticas cujas raízes podem depurar o efluente (TEDESCO et al., 2004b – Anexo 19.3)

### **2.2. Reciclagem de resíduos no solo**

A utilização do solo como meio de descarte reduz a exploração sobre os recursos naturais (BETTIOL & CAMARGO, 2000) por viabilizar a reciclagem de nutrientes, promover melhorias químicas, físicas e biológicas, além de possibilitar a disposição do resíduo.

A presença de quantidades significativas de matéria orgânica na maioria dos resíduos, além de proporcionar melhorias no solo pelo aumento da capacidade de retenção da água e incremento da atividade microbológica,

também diminui a toxicidade de certos elementos químicos encontrados em quantidades superiores ao normal.

O conhecimento das características do resíduo e a interação deste com o sistema solo-planta evitam o acúmulo de metais pesados no ambiente (LIMA & PEDROSO, 2001). Assim, devem ser estabelecidos critérios para a aplicação de resíduos em áreas agrícolas, a fim de que a atividade tenha sucesso e os riscos para o ambiente sejam controlados.

Vários critérios são avaliados pelos órgãos ambientais responsáveis pela concessão de licenciamento ambiental para o descarte de resíduos. Entre eles, a atividade que o gerou, a caracterização e composição química do resíduo (pH em água, umidade, teores totais de macro e micronutrientes, de metais pesados, C total, taxa de mineralização de N e a relação C/N), as características do solo, além do fluxograma da geração do resíduo.

Dos citados, o teor de metais pesados (Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Co, Mo, Hg, Sn e Zn) é um dos parâmetros mais importantes para viabilizar o descarte de resíduos. Estes metais podem ter ação poluente quando aplicados no solo em grandes quantidades, aumentando suas concentrações até atingir níveis tóxicos, o que compromete a atividade microbiana, o desenvolvimento de plantas, do homem e dos animais através da cadeia trófica, além da contaminação de aquíferos (ALLOWAY, 1995).

Em alguns países, o critério utilizado pela legislação para o descarte de resíduos no solo é a fitotoxicidade do material (U.S.EPA, 1996; RODRIGUES et al., 1993). No entanto, vários autores consideram esse parâmetro pouco informativo das verdadeiras consequências, uma vez que não são consideradas as variabilidades entre os solos e na capacidade de absorção de metais pelas plantas. Cada solo tem uma capacidade limitada de receber a adição de resíduos (McBRIDE, 1995). Na solução de solo, várias reações ocorrem simultaneamente, sendo que a atividade de metais no solo depende do conjunto de equilíbrio com a fração sólida, ou seja, depende dos teores de argila, matéria orgânica, hidróxidos de Fe, Al e Mn, além dos quelantes solúveis (BERTON, 2000). Considerando que cada solo possui quantidades diferentes desses componentes, a capacidade de receber resíduos é variável.

### **2.2.1. Acidez e calagem**

O valor de pH do solo é uma das propriedades que interferem de forma intensa na disponibilidade de metais. Exceto para As, Mo, Se e alguns estados de valência do Cr, os metais pesados têm suas disponibilidades reduzidas quando ocorre elevação do pH, em decorrência da formação de precipitados, aumento da intensidade de adsorção aos colóides do solo e por conferir maior estabilidade aos complexos que se formam entre os metais e a fração húmica dos solos (MARQUES et al., 2001).

Hinesly et al (1985) estudaram o efeito da aplicação de grandes quantidades de biossólido com pH entre 6,0 e 7,5, em solos degradados, tendo sido determinado o crescimento de nove espécies de gramíneas, destacando *Festuca arundinaceae*, *Lolium perenne* e *Agropyron smithii*, que apresentaram maior crescimento e cobertura do solo com doses de 224, 448 e 896 t ha<sup>-1</sup> (base úmida), respectivamente.

Castro (2000) simulou a degradação de lodo de um Cambissolo álico de textura argilosa, comparando a adubação com biossólido caleado e a adubação mineral, tendo observado uma elevação do pH nos tratamentos que receberam adubação com biossólido. Com relação à acidez potencial (H+Al), verificou diferenças significativas entre os tratamentos concluindo que a adubação com biossólido contribui para a redução desta na camada arável do solo, devido ao efeito corretivo da cal utilizada para a higienização do material.

### **2.2.2. Matéria orgânica**

A matéria orgânica (MO) exerce grande influência sobre as propriedades físicas, químicas e biológicas do solo. Ela atua na regulação de diferentes processos do solo, como a ciclagem e a disponibilidade de nutrientes, a solubilização de fertilizantes, a complexação de metais tóxicos, o poder tampão, o fluxo de gases para a atmosfera e a estabilidade de agregados (STEVENSON, 1994). No solo, são encontradas diferentes substâncias orgânicas, desde compostos livres e com elevada biodisponibilidade, até compostos mais estabilizados quimicamente, em íntima associação com a fase mineral (CHRISTENSEN, 1992). As frações orgânicas que apresentam elevada taxa de ciclagem e que respondem mais rapidamente às mudanças do uso do solo correspondem a uma pequena fração do

C orgânico (CHRISTENSEN, 1996). Em geral, os indicadores que mais respondem às alterações da qualidade do solo são os associados aos compartimentos mais lábeis da matéria orgânica, como é o caso do compartimento associado à fração leve (FL) (STEVENSON, 1994).

Atualmente, tem-se usado diferentes tipos de lodos de esgoto como fonte de nutrientes às plantas e de matéria orgânica para o solo. Doses baixas de resíduo aplicadas no solo podem não alterar o conteúdo de matéria orgânica, visto que 60 a 80% do carbono é liberado durante o processo de oxidação (ALEXANDER, 1977). Assim, o aumento do teor de matéria orgânica do solo depende das características do resíduo, das quantidades aplicadas (TESTER, 1990) e do seu grau de estabilização, isto é, da parte da fração orgânica humificada (EPSTEIN et al., 1978; HSIEH et al., 1981). A frequência das aplicações também exerce influência nos teores de MO do solo, conforme constatado por Abdou & El-Nennah (1980), que mesmo em doses baixas obtiveram aumento de carbono no solo devido às sucessivas aplicações.

Estima-se que a matéria orgânica contribua com aproximadamente 80% da capacidade de troca catiônica do solo ( $200$  a  $300 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ ), enquanto que as contribuições dos óxidos ( $2$  a  $4 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ ) e da caulinita ( $0$  a  $1 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ ) são baixas (McBRIDE, 1995). A reatividade da matéria orgânica é ocasionada pela presença de grupos funcionais contendo oxigênio (-OOH), sendo a dissociação do H fortemente dependente de pH do solo (STEVENSON, 1994).

A matéria orgânica apresenta ponto de carga zero (PCZ) baixo, de aproximadamente 3. O PCZ é definido como o pH no qual um ou mais dos componentes da carga líquida de superfície se igualam. Deste modo, a matéria orgânica é negativamente carregada em valores de pH maiores que 3 e, à medida que o pH do solo aumenta, a quantidade de cargas negativas aumenta. Os grupos funcionais ácidos (carboxílicos e fenólicos) se dissociam em grande parte entre valores de pH de 5 a 7 e constituem 85 a 90 % da carga negativa da matéria orgânica (STEVENSON, 1994).

A matéria orgânica humificada, devido às suas características e grupos funcionais, atua como um tampão ou como um adsorvente genérico. As superfícies minerais e orgânica dos solos podem adsorver moléculas orgânicas

fraca ou fortemente, dependendo da força de interação entre o adsorbato e o adsorvente.

### **2.3. Sorção / dessorção em solos**

Os íons e moléculas do solo podem estar adsorvidos às partículas sólidas do solo ou disponíveis na solução de solo. Este fenômeno ocorre para manter o equilíbrio entre as duas fases. A sorção de íons e moléculas pela fase sólida se refere aos diversos mecanismos de retenção, como os de adsorção, precipitação de superfície e polimerização, entre outros. A liberação de um íon ou molécula da fase sólida para a solução de solo é denominada de dessorção.

A força de retenção de íons na interface sólido-solução é determinada pelo tipo de interação entre os íons e a superfície das partículas. Em geral, íons adsorvidos por ligação do tipo covalente ou iônica são mais fortemente retidos do que íons adsorvidos por forças físicas do tipo van der Waals.

Sposito (1989) propõe a formação de um complexo de superfície onde o grupo funcional de superfície reage com um íon ou molécula (dissolvida na solução de solo) para formar uma unidade molecular estável. Este complexo de superfície, pode ser classificado conforme sua força de ligação, podendo ser denominado por complexo de esfera interna ou de esfera externa. Os complexos de superfície de esfera externa indicam ligações eletrostáticas coulômbicas, menos estáveis. Geralmente são regulados por equilíbrios estequiométricos, rápidos, reversíveis e com alguma seletividade. Por outro lado, nos complexos de superfície de esfera interna (ligações iônica/covalente) não existem moléculas de água interpostas entre o grupo funcional da superfície e o íon (ou molécula), sendo estas ligações mais fortes, permanecendo o íon quimiossorvido com os grupos funcionais de superfície.

Os cátions são retidos com diferentes forças pelas argilas silicatadas. Quanto maior for o número de ligações para um mesmo íon ou molécula, menor será a distância entre os núcleos e maior a energia da interação. Deste modo, os cátions em suas permutabilidades formam uma série chamada série liotrópica. Não existe uma série liotrópica universal. A série depende de condições experimentais, dos cátions envolvidos, tipo de material de permuta, etc.

Stevenson (1994) considera que a retenção dos metais ao longo tempo, especialmente para os complexos orgânicos, é devido à lenta e irreversível formação de complexos de esfera interna. Os metais que são quimissorvidos apresentam baixa mobilidade no solo (HAYNES & TRAINA, 1998). Outros autores, como Abd-Elfattah & Wada (1981), concordam que os complexos formados por metais pesados com os ligantes OH e COOH desprotonados são mais estáveis e maiores do que os formados por metais hidratados. As ligações formadas no perfil no solo por complexo de esfera externa, por alguns metais, tendem a ser mais móveis.

Para Abd-Elfattah & Wada (1981) a afinidade de adsorção no solo por alguns metais como Cu, Pb, Zn, Cd e Co, aumenta na ordem : Cd e Co < Zn < Cu << Pb; essa seqüência não se correlaciona com o raio iônico: Co e Cu (0,72 a) < Zn (0,74 a) < Cd (0,97 a) < Pb (1,20 a), nem com suas eletronegatividades: Pb e Zn (1,6) < Cd (1,7) < Co (1,8) < Cu (2,0). No entanto, os autores indicam que existe um paralelo entre a adsorção e a hidrólise e precipitação dos metais como hidróxido (SPARKS, 1995; ABD-ELFATTAH & WADA, 1981).

Segundo Abd-Elfattah & Wada (1981) e Alloway (1995), as reações de adsorção específica aumentam com a diminuição do pK (constante de hidrólise): Cd (pK=10,1) < Ni (pK= 9,9) < Zn (pK=9) < Pb (pK=8,4) < Cu (pK=8,0) < Cr (pK=4,0) < Hg (pK=3,7) e o aumento do pK<sub>so</sub> (constante de precipitação): Cd (13,6-14,6) < Co (14,2-15,7) < Zn (15,7- 17,4) < Pb (15,1-20,0) < Cu (19,7-19,9).

O potencial iônico (razão entre a unidade de valência e o raio iônico), conforme McBride (1994) e Sparks (1995), pode explicar a maior mobilidade no solo do Cd, Ni e o Zn. Os metais Cu e Pb são menos móveis, sendo fortemente adsorvidos pela fase sólida do solo. Solos com altos teores de matéria orgânica, óxidos e argilo-minerais possuem maior capacidade de retenção de metais pesados (McBRIDE, 1994).

Em estudos de solos com valores de pH menores que 5,5, prevaleceram as reações de troca iônica para os metais Cu e Zn, e de adsorção específica na faixa de pH 5,5 a 7,5. O aumento do pH favorece a adsorção das espécies hidrolisadas, pela menor competição de íons Al<sup>+3</sup> e H<sup>+</sup> pelos sítios de troca e pelo aumento da CTC do solo (GOMES, 1996).

## **2.4. Elementos tóxicos no ambiente**

Vários elementos, chamados elementos-traços, dentre os quais se destacam os metais pesados e alguns micronutrientes, ocorrem na litosfera, em concentrações menores do que  $1 \text{ g kg}^{-1}$ , podendo ser tóxicos para os organismos vivos.

Esses elementos são encontrados naturalmente no ambiente (fonte litogênica), devido à sua existência nas rochas que dão origem aos solos. Seu teor natural varia muito com o tempo de intemperismo e a composição química deste material de origem.

São definidos como metais pesados os elementos que possuem densidade atômica maior que  $6 \text{ g cm}^{-3}$ , ou que apresentam número atômico maior do que 20. Alguns dos metais pesados mais tóxicos são: Hg, Pb, Cd, Cu, Ni e Co. Os três primeiros são particularmente tóxicos para animais superiores e os três últimos apresentam maior toxidez para as plantas do que para os animais (ACCIOLY & SIQUEIRA, 2000; COSTA et al., 2004).

O aumento das concentrações de metais pesados nos solos de regiões agrícolas é resultado da deposição atmosférica, da aplicação de agrotóxicos, resíduos orgânicos e inorgânicos, fertilizantes e corretivos (ALLOWAY, 1993).

Para regulamentar a utilização do solo como receptor de resíduos, são utilizadas as normas/legislações de acordo com os aspectos do país ou região em que serão dispostos. No Anexo 2 são apresentados os valores máximos admitidos para a adição de alguns metais presentes em lodos de estações de tratamento de esgotos (biossólido) que podem ser adicionados cumulativamente a solos agrícolas.

O impacto dos metais pesados, conforme Hayes & Traina (1998), pode ser interpretado sob diferentes formas; do ponto de vista antropogênico, a principal preocupação refere-se aos efeitos direto e indireto sobre a saúde humana. Indiretamente, a contaminação pelos metais pesados pode afetar irreversivelmente a qualidade do solo, da água, do ar e dos alimentos, colocando em risco a sobrevivência humana.

### **2.4.1. Cádmio**

Várias são as atividades humanas que provocam o lançamento de grandes quantidades de Cd no meio ambiente e as fontes individuais de Cd variam consideravelmente entre países.

Estudos de especiação do Cd têm mostrado que, na solução de solo, a espécie predominante é  $\text{Cd}^{2+}$ . Dependendo do pH e de outros íons em solução, o metal pode, também, formar íons complexos tais como:  $[\text{CdCl}]^+$ ,  $[\text{CdOH}]^+$ ,  $[\text{Cd}(\text{HCO}_3)]^+$ . Entretanto, o mais importante estado de valência no ambiente natural é +2, e os principais fatores que controlam a mobilidade do íon Cd no solo são o pH e o potencial de oxidação (KABATA-PENDIAS & PENDIAS, 2001). Ainda conforme estes autores, a concentração e a especiação de um metal como o Cd, na solução de solo, dependem parcialmente da concentração dos ligantes na solução do solo e da constante de estabilidade dos complexos ligante-metal.

### **2.4.2. Chumbo**

O Pb é um dos metais mais abundantes no solo apresentando uma concentração média de 10 a 20  $\text{mg kg}^{-1}$ . Conforme Kabata-Pendias & Pendias (2001), as características geoquímicas do Pb, em alguns casos, assemelham-se às dos metais alcalinos terrosos, o que determina a habilidade do Pb em deslocar K, Ba, Sr e Ca em minerais e sítios de adsorção, sendo por isso considerado um dos metais menos móveis, encontrando-se acumulado nos horizontes superficiais. O Pb apresenta grande afinidade pelos argilominerais, óxidos de Mn, hidróxidos de Fe e Al e matéria orgânica.

### **2.4.3. Cobre**

No solo, o Cu é considerado abundante e sua concentração atinge em média 70  $\text{mg kg}^{-1}$ . Este elemento encontra-se no solo quase que exclusivamente na forma de  $\text{Cu}^{+2}$ , aparecendo em maior proporção adsorvido aos minerais de argila, aos hidróxidos de ferro e à matéria orgânica. Essas formas adsorvidas controlam a concentração desse metal na solução do solo, sendo que, a quase totalidade do Cu solúvel está na forma de complexos com a matéria orgânica (MALAVOLTA, 1980).

#### **2.4.4. Zinco**

O teor de Zn presente em solos depende diretamente da concentração de Zn na rocha de origem. Porém, também depende de fatores como o pH e o conteúdo de matéria orgânica. Conforme Kabata-Pendias & Pendias (2001), a faixa comum nos solos varia de 10 a 300 mg kg<sup>-1</sup> de Zn, sendo o valor médio de 50 mg kg<sup>-1</sup>.

As interações deste elemento no solo dependem de algumas características como: concentração do Zn e outros íons na solução do solo, espécie e quantidades de sítios de adsorção associados com a fase sólida do solo, concentração de todos os ligantes capazes de formarem complexos orgânicos de Zn, pH e potencial redox do solo (ALLOWAY, 1995).

#### **2.4.5. Níquel**

O Ni tem como principal origem geoquímica as rochas magmáticas (máficas e ultramáficas) que contém até 3600 mg kg<sup>-1</sup> do elemento. O Ni pode também ser adicionado ao solo pelo uso de calcários e de fertilizantes fosfatados, que podem conter até 300 mg kg<sup>-1</sup> do metal. Nos biossólidos, sua presença deve-se aos efluentes de indústrias que o utilizam em ligas metálicas, em baterias e compostos eletrônicos, cosméticos e catalisadores (McGRATH, 1990). De acordo com esse autor, a reação do solo exerce grande influência na retenção do Ni, que precipita facilmente na superfície dos óxidos.

### **2.5. Metais pesados em plantas**

O solo é um componente do ecossistema aberto constituído por plantas, animais, água e ar. As diferentes frações dos resíduos adicionados ao solo são redistribuídas no sistema conforme as interações entre os mesmos.

A aplicação de biossólido pode aumentar a absorção de nutrientes pelas culturas, melhorando as propriedades do solo, com reflexo na produtividade. Em função de sua composição, este aumento nem sempre mantém o equilíbrio adequado entre os diferentes nutrientes de modo que, mesmo havendo aumento na disponibilidade, a planta pode não apresentar aumento na produtividade (MELO et al., 2001).

Griebel (1979), avaliou a influência de doses de biossólido entre 75 e 150 t ha<sup>-1</sup> (base seca) e adubação mineral no crescimento de vegetação espontânea em solos degradados. Os tratamentos com biossólido apresentaram mais de 95% de cobertura e tiveram as maiores produções de matéria seca, aumentando conforme as dosagens aplicadas. As doses maiores que 112 t ha<sup>-1</sup> apresentaram resultados semelhantes a solos não degradados.

Concentrações excessivas de metais pesados em formas disponíveis no solo podem provocar fitotoxidez. No Anexo 12, são apresentadas as faixas de teores considerados normais (não tóxicos) e excessivos (tóxicos) de alguns metais em plantas, conforme revisão bibliográfica dos autores indicados. A faixa de valores intermediários pode ser considerada com valores altos, não sendo necessariamente tóxicos.

Conforme Kabata-Pendias & Pendias (2001), entre as possíveis causas do efeito fitotóxico provocado por metais pesados temos: mudanças na permeabilidade da membrana celular, competição com metabólitos essenciais por sítios de ligação, afinidade para reagir com grupos fosfato e grupos atuantes de ADP e ATP, substituição de íons essenciais, ocupação de sítios essenciais para grupos como fosfato e nitrato.

As plantas apresentam diferente suscetibilidade à fitotoxidez e diferentes mecanismos de tolerância aos metais. Backer (1981) descreveu três formas de resposta das plantas a estes elementos: exclusora, indicadora ou acumuladora. Berry (1986) também sugere três formas básicas de resposta da planta à presença de metais: a exclusão, a detoxificação e a tolerância bioquímica. Verkleij & Schat (1990) definem a exclusão como mecanismos de prevenção da planta contra a absorção excessiva de metais tóxicos, e a tolerância como um mecanismo para suportar o acúmulo excessivo desses metais. Entre os mecanismos de exclusão, os autores citam alteração da permeabilidade da membrana, mudanças na capacidade de ligação do metal à parede celular e aumento da exsudação de substâncias quelantes de metais. Os mecanismos de tolerância são: produção de compostos intracelulares ligantes de metais, alterações no metabolismo celular, alteração da estrutura da membrana e, principalmente, alteração do padrão de compartimentalização de metais.

Espécies ou variedades de uma mesma espécie vegetal, expostas a uma concentração similar de metais pesados, podem diferir na absorção e/ou distribuição interna desses na planta. Isso pode resultar em diferenças na capacidade de retenção do elemento absorvido nas raízes, e/ou variação na carga no xilema (SHAW, 1989). Outros fatores, tais como estágio de desenvolvimento da planta, tempo de exposição ao metal e as diferentes espécies químicas dos elementos, podem também interferir nesses aspectos, alterando os teores dos metais nas diferentes partes da planta (ALLOWAY, 1995). A regulação da absorção de metais pesados da 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 a metais pesados (VERKLEIJ & PAREST, 1989; ARDUINI et al., 1996).

De acordo com Sims et al. (1997), para limitar a transferência de parte dos metais pesados para a cadeia alimentar é necessário controlar as quantidades máximas que podem ser aplicadas ao solo e manter o pH em níveis relativamente altos (6 a 6,5).

## **2.6. Permanência de metais no solo**

Algumas estimativas do tempo de permanência de metais pesados no solo mostram que a contaminação com esses elementos pode se constituir em um problema de longa duração. Estima-se que o cádmio permaneça entre 75 a 380 anos no solo, o mercúrio entre 500 a 1.000 anos, enquanto que para o arsênio, cobre, níquel, chumbo, selênio e zinco, este tempo está entre 1.000 a 3.000 anos (ALLOWAY, 1993).

Vários trabalhos que relacionaram a aplicação no solo de biossólidos com os teores de Cd adicionados não verificaram variações significativas nos teores deste metal, quando as adições seguem os padrões pré-estabelecidos. Siegenthaler & Stauffer (1991) analisaram o efeito ambiental a longo prazo de solos que receberam aplicação de biossólido e resíduo líquido de suíno (de 0, 2 a 5 t ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> de matéria orgânica) e, após 11 anos, não observaram incrementos de Cd nesses tratamentos. Erp & Lune (1991) também estudaram a lixiviação de metais pesados onde foi aplicado biossólido e produtos compostos de biossólido nas quantidades de 10% do volume (seco ao ar) de

solo. Foi observado um aumento na concentração de Cd que, posteriormente, decresce e se estabiliza mesmo no tratamento com apenas bio sólido.

McGrath et al. (2000), em estudo comparando solos cultivados e freqüentemente adubados com bio sólidos durante 20 anos, com adubação por fertilizantes minerais, composto de lodo de esgoto e composto vegetal, verificaram acréscimos de Zn até a última aplicação e um posterior decréscimo ao término das aplicações, ficando concentrado na camada arável do solo. Este fato foi atribuído ao pouco deslocamento para os horizontes subsuperficiais e a afinidade do Zn com a matéria orgânica.

Em um solo que recebeu bio sólido durante 6 anos, o acúmulo de Pb ocorreu nos 15 cm superficiais. No entanto, este metal é o menos móvel dos metais pesados, além de não essencial para as plantas ou animais, podendo ser tóxico para ambos.

Parte da matéria orgânica adicionada pelo lodo é resistente à degradação. Mesmo que ocorra sua lenta mineralização, os metais pesados são mantidos em formas de baixa disponibilidade pelos componentes inorgânicos do lodo (TERRY et al., 1979; OVERCASH & PAL, 1981; CHANG et al., 1997).

Em regiões tropicais, os efeitos da adição de lodo de esgoto sobre o C orgânico, quando ocorrem, são temporários (VAZ & GONÇALVES, 2002), porém, em alguns estudos, têm-se verificado, em longo prazo, aumentos lineares desses teores no solo com a aplicação de doses crescentes de lodo de esgoto (MARQUES, 1996; OLIVEIRA et al., 2002).

Terry et al. (1979), estudando amostras de solos com taxas crescentes de lodo, concluíram que o tempo de reciclagem do C orgânico do lodo é da ordem de centenas de anos e que ocorre seu acúmulo no solo quando são adicionadas elevadas taxas de lodo por um período relativamente longo.

Conforme Bernal et al. (1998), as taxas de degradação de lodo de esgoto após aplicação no solo podem ser inferiores a 20 % do C total adicionado. Esses valores refletem a presença de compostos orgânicos de difícil degradação biológica no lodo, como óleos, graxas e outras moléculas mais recalcitrantes (SANTOS et al., 2002). As diferentes frações de C orgânico humificado do solo apresentam características químicas, físicas e morfológicas

diferentes entre si, e a distribuição dessas frações no solo pode indicar a qualidade da matéria orgânica (CANELLAS et al., 2003).

Schirado et al. (1986), em estudos com um Vertissolo, numa região árida do Chile, que recebeu adição por 50 anos de efluentes urbanos e industriais, indicaram lixiviação uniforme de Cd, Co, Cr, Cu, Ni e Zn totais no perfil do solo.

McGrath & Cegarra (1992), analisando solos com textura arenosa, na cidade de Rothamsted (Reino Unido), concluíram que, após 30 anos da instalação do experimento e 10 anos da última aplicação de lodo, a distribuição de Pb, Cu, Ni, Zn e Cd no solo pouco se modificou ao longo do tempo.

Gaivizzo (2001) estudou os efeitos da aplicação de lodo de indústrias petroquímicas durante seis anos consecutivos sobre a mobilidade no solo de Cu, Pb, Ni, Zn e Cd em um argissolo, e a sua relação com as formas químicas dos metais no solo após nove anos do término das aplicações. Indicou a ordem de mobilidade de:  $Zn = Cd > Ni > Cu > Pb$ , em que as maiores quantidades de Cu e Pb estavam associadas às frações orgânica e residual; Ni e o Zn ocorreram principalmente na fração mineral, enquanto que o Cd distribuiu-se entre a fração mineral, orgânica e trocável.

Considerando que o descarte de resíduos no solo é uma prática bastante utilizada em áreas antes produtivas, o estudo da viabilidade da reutilização dessas áreas para agricultura e produção de alimentos, após alguns anos do encerramento dessa prática, é fundamental para o reaproveitamento dos recursos naturais.

### **3. MATERIAL E MÉTODOS**

O experimento foi iniciado em abril de 1985 (TEDESCO et al., 1986b) sendo conduzido a céu aberto, em área do Departamento de Solos da Faculdade de Agronomia, UFRGS, utilizando-se vasos (colunas de PVC) com 30 cm de diâmetro e 65 cm de altura.

As colunas de PVC foram fechadas na extremidade inferior por um disco de madeira colado e impermeabilizado com resina epóxi, sendo a drenagem feita por tubo lateral de mangueira de silicone com 1 cm de diâmetro a 0,5 cm acima do fundo. Uma camada de 5 cm de espessura constituída por brita, separada da camada inferior do solo por tela plástica, foi colocada no fundo do vaso para facilitar a drenagem da água de lixiviação, e evitar perdas de solo.

#### **3.1. Etapas anteriores do trabalho**

##### **3.1.1. Coleta e preparo do solo**

O solo utilizado no experimento foi coletado em área próxima à utilizada para o descarte do lodo, pertencente ao SITEL/CORSAN (Fazenda de

Lodo) no município de Triunfo, RS. Na coleta, o solo foi separado em três camadas (de 0-20, 20-40 e 40-60cm de profundidade), que foram colocadas nos vasos na ordem correspondente à de coleta, separadas por tela de nylon de 2 mm de diâmetro de orifícios (TEDESCO et al. 1986b).

O solo é classificado como Argissolo Vermelho-Amarelo eutrófico, argila de atividade baixa, A moderado abrupto, textura argilosa (PVAe) pelo Sistema Brasileiro de Classificação (STRECK et al., 2008) e como Albaquic Hapludalf conforme o Sistema Americano (Soil Taxonomy) (TEDESCO et al., 1986b). A caracterização físico-química inicial das três camadas de solo é dada na Tabela 1.

Inicialmente, o volume ocupado por cada camada de solo foi de 14,1 litros com 20,4 kg (base seca). Todos os cálculos das quantidades de adubos, corretivo e lodo a serem aplicados, foram feitos considerando-se a área de 0,07068 m<sup>2</sup> por vaso.

### **3.1.2. Caracterização do lodo utilizado**

Foi utilizado o lodo ativado produzido pela ETE do Sistema Integrado de Tratamento de Efluentes Líquidos (SITEL), operada pela CORSAN, localizada no IIIº Pólo Petroquímico, situado no município de Triunfo, RS.

Foi utilizado no experimento o lodo *in natura*, sendo adicionado na camada superficial, em pequena depressão do solo, para evitar contato com as paredes dos vasos e um possível escoamento para as camadas sub-superficiais. Após a infiltração do líquido, o lodo foi coberto com 2 a 3 kg de solo reservado para esse fim. A caracterização do lodo utilizado no experimento é dada na Tabela 2.

**TABELA 1.** Caracterização físico-química inicial do solo utilizado no experimento, coletado em 1985, no município de Triunfo, RS (TEDESCO et al., 1986b).

Determinações <sup>1)</sup>	Profundidade (cm)		
	0 – 20	20 – 40	40 - 60
pH em água	5,4	5,0	4,8
Índice SMP	6,4	6,3	6,2
P disponível (mg dm <sup>-3</sup> )	4	3	3
K disponível (mg dm <sup>-3</sup> )	45	29	20
C orgânico (g kg <sup>-1</sup> )	9	4	4
N total (g kg <sup>-1</sup> )	0,7	0,4	0,33
Relação C/N	13	10	12
Na solúvel (mg dm <sup>-3</sup> )	6	6	3
Al <sup>+3</sup> troc. (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	0,3	1,2	1,3
Ca <sup>+2</sup> troc. (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	4,2	1,9	1,2
Mg <sup>+2</sup> troc. (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	1,2	0,7	0,5
H + Al (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	2,8	3,1	3,5
CTC (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	8,3	5,7	5,2
Mn <sup>+2</sup> troc. (mg dm <sup>-3</sup> )	31	12	6
SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup> extraível (mg dm <sup>-3</sup> )	10	12	16
Cl <sup>-</sup> solúvel (mg dm <sup>-3</sup> )	41	30	30
Cu <sup>+2</sup> extraível (mg dm <sup>-3</sup> )	0,6	0,8	0,6
Zn <sup>+2</sup> extraível (mg dm <sup>-3</sup> )	9,0	5,1	4,8
Fe <sup>+2</sup> extraível (g dm <sup>-3</sup> )	1,5	1,3	1,2
B extraível (mg dm <sup>-3</sup> )	0,5	0,3	0,4
Pb extraível (mg dm <sup>-3</sup> )	0,62	0,91	1,08
Cd extraível (µg dm <sup>-3</sup> )	5,2	2,0	1,2
Hg extraível (µg dm <sup>-3</sup> )	8	6	7
Cr extraível (µg dm <sup>-3</sup> )	35	15	19
CE ( µS cm <sup>-1</sup> )	138	49	34
Areia grossa (g kg <sup>-1</sup> )	360	300	270
Areia fina (g kg <sup>-1</sup> )	470	520	550
Silte (g kg <sup>-1</sup> )	10	20	10
Argila (g kg <sup>-1</sup> )	160	160	170
Cap. máx. ret. água (g kg <sup>-1</sup> )	230	180	176

<sup>1)</sup> Conforme metodologia descrita por Tedesco et al. (1995), Cu, Zn, Cd, Ni, Cr e Pb extraídos por solução de HCl 0,1 mol L<sup>-1</sup>; Hg extraído por HNO<sub>3</sub> (a frio).

### **3.1.3. Tratamentos e condução do experimento**

#### **3.1.3.1. Primeiro e 2º anos de cultivo**

Nos dois primeiros anos (1985 e 1986), foram utilizados 15 tratamentos (com quatro repetições), com duas culturas de inverno (aveia (*Avena strigosa*, L) e azevém (*Lolium multiflorum*, Lam)), e duas de verão (capim pangola (*Digitaria decumbens*, Stent.) e milho (*Pennisetum americanum*, (L) Leeke)). Foram adicionadas doses crescentes de lodo aplicadas em três ou cinco vezes por ano, mantendo-se tratamentos testemunha e com adubação mineral e correção da acidez do solo (Anexo 1).

Foi inicialmente feita calagem ( $1.500 \text{ kg ha}^{-1}$  da mistura de  $\text{CaCO}_3$  +  $\text{MgCO}_3$  na proporção 3:1 em peso) em todos os tratamentos (à exceção da testemunha), e adicionados enxofre e micronutrientes (Cu, Zn, B e Mo). Foram adicionados fertilizantes minerais solúveis (N, P e K), conforme as recomendações técnicas para as culturas, na camada superficial do solo.

**TABELA 2.** Caracterização físico-química do lodo gerado pelo SITEL/CORSAN (média de 30 amostras utilizadas no período de 1985 a 1991)<sup>1)</sup>

Determinação <sup>2)</sup>	Valor	Determinação	Valor
Teor de sólidos (g kg <sup>-1</sup> )	69	Sódio (mg kg <sup>-1</sup> )	7,1
pH em água	7,1	Cobre (mg kg <sup>-1</sup> )	50
Densidade	0,98	Zinco (mg kg <sup>-1</sup> )	708
Carbono orgânico (g kg <sup>-1</sup> )	486	Manganês (mg kg <sup>-1</sup> )	488
Nitrogênio total (g kg <sup>-1</sup> )	22,5	Ferro total (g kg <sup>-1</sup> )	18,9
Relação C/N	21,6	Boro total (mg kg <sup>-1</sup> )	27
Fósforo total (g kg <sup>-1</sup> )	10,2	Cromo total (mg kg <sup>-1</sup> )	158
Potássio total (g kg <sup>-1</sup> )	2,7	Cádmio total (mg kg <sup>-1</sup> )	3,3
Cálcio total (g kg <sup>-1</sup> )	4,9	Níquel total (mg kg <sup>-1</sup> )	67
Magnésio total (g kg <sup>-1</sup> )	1,2	Chumbo total (mg k <sup>-1</sup> )	51
Enxofre total (mg kg <sup>-1</sup> )	5,6	Mercúrio total (mg k <sup>-1</sup> )	3,8

<sup>1)</sup> Tedesco et al. (1993a).

<sup>2)</sup> pH e densidade determinados no material *in natura* e os outros parâmetros determinados no material seco a 65°C, conforme metodologia descrita por Tedesco et al. (1995).

Foram determinados a matéria seca produzida pela parte aérea das culturas e os teores de macro e micronutrientes (e metais) nas mesmas. Foi também coletada água de lixiviação para caracterização química.

Após cada ano de cultivo, os vasos foram desmontados para amostragem do solo nas diferentes camadas, sendo o mesmo repostado nas respectivas posições.

Os resultados obtidos foram apresentados por Tedesco et al. (1986b; 1987).

### **3.1.3.2. Terceiro ao 6º anos de cultivo**

A partir de 1987, foram suprimidas as culturas de aveia e milho, mantendo-se as culturas de azevém no inverno e capim pangola no verão. Em alguns tratamentos das culturas suprimidas foi continuada a adição das mesmas doses de lodo, sendo, entretanto o mesmo enriquecido com metais pesados (Cu, Zn, Cd, Ni, Pb e Hg) na forma de sais solúveis ( $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ;  $\text{ZnO}$ ;  $\text{CdCl}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ;  $\text{Ni-acetato} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ;  $\text{PbCl}_2$  e  $\text{HgCl}_2$ , respectivamente), em três doses. Na dose 1 (M1), com cinco aplicações anuais de  $20 \text{ t ha}^{-1}$  de lodo (base seca), foram adicionadas as doses anuais dos metais permitidas pela legislação da Comunidade Econômica Européia (CEC, 1986), para um período de 10 anos de aplicação (Anexo 2). Na dose 2 (M2), foi aplicado o dobro destas quantidades, e, na dose 4 (M4), quatro vezes mais do que na dose 1. Na Tabela 3 estão especificados os tratamentos e dadas as quantidades de lodo utilizado por aplicação, por ano e no total de seis anos. São dadas também as quantidades dos metais Cu, Zn, Cd, Ni, Pb e Hg aplicados com o lodo e com a adição de sais.

No início do terceiro ano de cultivo foi feita a reaplicação do corretivo de acidez, na dose de  $2,5 \text{ t ha}^{-1}$  nos tratamentos 2 a 7. No tratamento 8 foi aplicado  $5,0 \text{ t ha}^{-1}$  e o tratamento 9 não foi corrigido.

Foram adicionados N, P e K (por adubos minerais solúveis) em cada cultura, conforme as recomendações técnicas.

Foram determinados a matéria seca produzida pela parte aérea das culturas e os teores de macro e micronutrientes (e metais) nas mesmas. Foi também coletada água de lixiviação para caracterização química.

No final do 6º ano de cultivo, os vasos foram desmontados para amostragem do solo nas diferentes camadas, sendo o mesmo repostado nas respectivas posições.

Os resultados obtidos foram apresentados por Tedesco et al. (1989; 1991).

#### **3.1.4. Efeito residual em tomateiro e aveia**

Após o último cultivo (6º ano de experimento), os vasos foram mantidos a céu aberto, com crescimento de vegetação espontânea, e drenagem livre.

Em 1993 foi amostrada a camada superficial do solo para análises. Com base nos resultados das análises de solo e conforme as recomendações técnicas foram aplicados corretivo da acidez (nos tratamentos e doses indicadas no 3º ano de cultivo) e adubos minerais solúveis (N, P e K), sendo cultivados o tomateiro (no verão) e a aveia (no inverno). Foi feita a quantificação dos frutos do tomateiro e dos grãos de aveia produzidos, e determinados os teores de macro e micronutrientes (e metais) nos mesmos.

Foram também coletadas amostras de água de lixiviação, para caracterização química.

Os resultados obtidos foram apresentados por Tedesco et al. (1993c).

**TABELA 3.** Tratamentos a partir do terceiro ano

Tratamento		Lodo aplicado (t ha <sup>-1</sup> )			Insumos <sup>1)</sup>		Metais <sup>2)</sup> adicionados (kg ha <sup>-1</sup> )					
Nº	Denominação	Por aplicação	Por ano	Total 6 anos	Azubos	Calcário	Zn	Cu	Cd	Ni	Pb	Hg
1	Test	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	NPK	-	-	-	NPK	X	-	-	-	-	-	-
3	L1	4	20	120	NPK	X	85	6	0,4	8	6	0,5
4	L1 + M1	4	20	120	NPK	X	85+120 (205)	6+48 (54)	0,4+0,6 (1,0)	8+12 (20)	6+60 (66)	0,5+0,4 (0,9)
5	L2	8	40	240	NPK	X	170	12	0,8	16	12	1,0
6	L2 + M2	8	40	240	NPK	X	170+240 (410)	12+96 (108)	0,8+1,2 (2,0)	16+24 (40)	12+120 (132)	1,0+0,8 (1,8)
7	L2 + M4	8	40	240	NPK	X	170+480 (650)	12+192 (204)	0,8+2,4 (3,2)	16+48 (64)	12+240 (252)	1,0+1,6 (2,6)
8	L3	24	120	624	NPK	2X	442	31	2,1	42	32	2,4
9	L3 - Calc	24	120	624	NPK	-	442	31	2,1	42	32	2,4
Quantidades máximas cumulativas aceitas pela CEE em 10 anos (kg ha <sup>-1</sup> )							300	120	1,5	30	150	2,0

<sup>1)</sup> O sinal (X) indica adição de corretivo, na quantidade indicada para atingir pH 6,0, no 1º e 3º anos; o sinal (-) indica não adição de corretivo do 3º ano em diante.

<sup>2)</sup> Adicionados pelo lodo em 6 anos (1º valor) e por sais (2º valor), aplicados do 3º ao 6º anos; quantidades totais entre parênteses.

### **3.1.5. Mobilidade e fracionamento dos metais**

A partir de 1994 (após o estudo do efeito residual) os vasos continuaram a ser mantidos a céu aberto, com crescimento da vegetação espontânea, e drenagem livre.

Em 1999, os vasos foram desmontados, coletando-se amostras de cada camada. Foi determinada a densidade “in situ” do solo da camada superficial. Foi feita também a caracterização química das amostras de cada camada, determinando-se: pH (em água); índice SMP; P e K extraíveis; MO; Al, Ca e Mg trocáveis e metais disponíveis (extraídos com HCl 0,1 mol L<sup>-1</sup>) conforme metodologia descrita por Tedesco et al. (1995).

Foram também determinados os teores totais dos metais nas amostras (extração com HNO<sub>3</sub> - HClO<sub>4</sub> concentrados), sendo feita a extração seqüencial dos mesmos.

Foi feita a correção da acidez do solo da camada superficial, para atingir valores de pH (em água) de 6,5, à exceção do tratamento 9.

O solo das várias camadas foi a seguir recolocado nos vasos, na ordem inicial, mantendo-se o experimento a céu aberto, e drenagem livre.

Os resultados obtidos foram apresentados por Gaivizzo (2001).

### **3.2. Reutilização do solo para sistemas produtivos**

Para o presente estudo, conduzido a partir de setembro de 2007, a camada superficial do solo (até a tela de separação da primeira e segunda camadas) foi amostrada com trado calador, determinando-se o volume ocupado pela mesma (para a posterior determinação da densidade). Nas amostras do solo foram determinados: pH e índice SMP; P e K disponíveis;

matéria orgânica; Al, Ca e Mg trocáveis; S, Cu e Zn extraíveis e carbono orgânico, conforme metodologia descrita por Tedesco et al. (1995).

Foram também determinados os teores de Zn, Cu, Cd, Ni e Pb extraídos com  $\text{HNO}_3\text{-HClO}_4$  concentrados, conforme metodologia descrita por Tedesco et al. (1995) modificada por Scolmeister (1999).

Foi feita a adição de Ca e Mg (nas formas de gesso e de  $\text{MgSO}_4$ , respectivamente) no tratamento 9 (sem correção da acidez por calcário) nas quantidades indicadas para obter os teores de 2,0 e 0,5  $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ , respectivamente, recomendados pela SBCS/NRS (2004).

### **3.2.1. Cultivos consorciados de milho e feijão preto**

Em 03 de março de 2008 foi semeado o milho (híbrido Santa Helena), cuja emergência foi observada cinco dias após. Em 14 de março de 2008, foi semeado (nos mesmos vasos) feijão preto comum, após a adição de 240  $\text{kg ha}^{-1}$  de  $\text{K}_2\text{O}$  (na forma de KCl em solução), sendo observada a emergência das plântulas após três dias. Foram mantidas uma planta de milho e três plantas de feijão por vaso.

Em 20 de março de 2008, foi aplicado 40  $\text{kg ha}^{-1}$  de N (uréia em solução) em todos os tratamentos. Em 07 de abril de 2008, e em 22 de abril de 2008 foi reaplicado N (uréia em solução) nas quantidades de 60 e 40  $\text{kg ha}^{-1}$ , respectivamente, em todos os tratamentos.

Em 30 de junho de 2008, foi cortada a parte aérea das plantas de milho, para determinação da massa seca produzida. No período de 2 a 10 de julho de 2008, foram colhidos os grãos do feijoeiro, para quantificação do rendimento. No material seco (matéria seca a 60°C) do milho e nos grãos de

feijão foram determinados macronutrientes, micronutrientes e metais, conforme metodologia descrita por Tedesco et al. (1995).

### **3.2.2. Amostragem das camadas sub-superficiais do solo, correção da acidez e adubação**

No período de 1º de setembro a 09 de outubro de 2008, foram desmontados os vasos para amostragem das camadas B (20 a 40 cm) e C (40 a 60 cm) do solo, coletando-se uma amostra para caracterização química, determinando-se os mesmos parâmetros especificados acima. Foi também determinado o peso seco da camada superficial (A) para cálculo da densidade “in situ”. A camada inferior de brita foi substituída por um prato de PVC perfurado, e posicionado de forma invertida, separado do solo por tela de PVC, para possibilitar a drenagem do lixiviado. O solo de cada camada foi a seguir recolocado nos vasos, na posição original, sendo posicionado um disco de tela de PVC entre as camadas.

Em 28 de outubro de 2008 foi feita correção da acidez do solo da camada superficial com a adição de  $\text{CaCO}_3 + \text{MgCO}_3$  (produtos técnicos, na proporção de 3:1 em peso), com base nos valores do índice SMP, para atingir pH 6,5, nos tratamentos 2 a 8, considerando-se o volume do solo em cada vaso.

Na mesma oportunidade, foram também adicionados: 145 kg de  $\text{K}_2\text{O}$   $\text{ha}^{-1}$  (na forma de KCl) nos tratamentos 1 a 9; e 140 kg de  $\text{P}_2\text{O}_5$  (na forma de superfosfato triplo) no tratamento 2 (com adubação mineral), tendo sido adicionado metade desta quantidade na testemunha (tratamento 1).

Os solos da camada A foram mantidos em recipiente de PVC (sacos de polietileno), com teor adequado de umidade até 13 de novembro de 2008,

sendo a seguir coletadas amostras para análise, e recolocados nos respectivos vasos.

### **3.2.3. Segundo cultivo do milho**

Em 14 de novembro de 2008, foi semeado milho (híbrido Santa Helena), observando-se a emergência das plântulas após cinco dias, mantendo-se uma planta por vaso.

Em 08 de dezembro de 2008, foi adicionado 100 kg de N ha<sup>-1</sup> (uréia em solução) nos tratamentos 2 a 9, e metade desta dose no tratamento testemunha. Em 23 de dezembro de 2008 foi repetida a adubação nitrogenada de cobertura, nas mesmas doses e tratamentos.

Em 30 de março de 2009 foi feito o corte da parte aérea das plantas, para posterior secagem (60°C), quantificação da massa produzida e determinação de macronutrientes, micronutrientes e metais na mesma.

### **3.2.4. Cultivo do rabanete**

Em 22 de abril de 2009 foram adicionados 80 kg ha<sup>-1</sup> de N (uréia), 270 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (superfosfato triplo) e 210 kg de K<sub>2</sub>O ha<sup>-1</sup> (KCl) na camada superficial do solo, nos tratamentos 2 a 9. No tratamento testemunha foram adicionadas metade destas quantidades de adubos.

No mesmo dia, foi semeado o rabanete (sete sementes por vaso), observando-se a emergência das plântulas quatro dias após, sendo mantidas quatro plantas por vaso.

Em 30 de abril de 2009, a adubação nitrogenada de cobertura foi repetida, nas mesmas doses e tratamentos. Após 40 dias da emergência, as plantas foram removidas, sendo limpas com água potável e escova (para

remover a terra aderida) sendo a seguir separadas as folhas das raízes, para quantificação, após secagem a 60°C e determinação de macronutrientes, micronutrientes e metais, conforme metodologia descrita por Tedesco et al. (1995).

### **3.2.5. Análise estatística**

Os tratamentos foram comparados utilizando-se a análise de variância e comparação de médias pelo teste de Tukey a (5% de probabilidade) com a utilização do programa SANEST (ZONTA & MACHADO, 1991).

## **4. RESULTADOS E DISCUSSÃO**

Serão discutidas a seguir as modificações de características do solo observadas após oito anos da última caracterização (feita em 1999), e a 16 anos da última aplicação do lodo, tanto na camada superficial como nas subjacentes.

Serão apresentadas e identificadas as necessidades de correção da acidez e adubação para o adequado crescimento das culturas, bem como dos nutrientes de plantas e possíveis efeitos nocivos de metais pesados adicionados ao solo.

### **4.1. Caracterização do solo**

Tanto os insumos (corretivo e fertilizantes) como o lodo foram aplicados na camada superficial do solo nas microparcels. O sistema de condução a céu aberto possibilita o crescimento da vegetação natural espontânea, e a manutenção do sistema aberto, com translocação entre camadas de espécies químicas contidas no lixiviado. Serão apresentadas, inicialmente, as características do solo que são afetadas pelo corretivo, nas três camadas, e a seguir os efeitos da aplicação do lodo e dos fertilizantes minerais, bem como dos elementos potencialmente nocivos ao ambiente.

#### **4.1.1. Componentes da acidez e da CTC do solo**

Os valores de pH da camada superficial do solo nos tratamentos com a aplicação de corretivo mantiveram-se próximos a 5,5, em todos os

tratamentos com a adição de corretivo (Tabela 4). Em 1999, este foi adicionado em quantidades para atingir valores de pH próximos a 6,5 (GAIVIZZO, 2001), à exceção do tratamento 8, em que foi adicionado o dobro da quantidade recomendada, devido à maior adição de lodo, que apresenta grande poder acidificante, conforme observado no tratamento 9.

A neutralização da acidez do solo nas parcelas com adição de corretivo foi também observada nas camadas sub-superficiais (Tabela 4) devido à lixiviação de cátions básicos (Ca e Mg).

O teor de  $Al^{+3}$  trocável diminui com o aumento do pH, sendo em geral totalmente anulado em valores de pH iguais ou maiores que 5,5, devido à formação de oxi-hidróxidos insolúveis deste elemento (MEURER, 2006).

A acidez potencial, expressa pelo valor de  $H+Al$ , o qual pode ser obtido pelo Índice SMP (SBCS/NRS, 2004), é influenciada pelos componentes que afetam o equilíbrio ácido-base do solo, como pH, adição de bases e de resíduos acidificantes. Foi observado aumento da acidez potencial em profundidade, no tratamento 1 (testemunha). Nos tratamentos com adição de lodo e de corretivo, foi observada, em geral, a redução da acidez na camada sub-superficial (B), principalmente quando ocorre o maior aporte de lodo (tratamentos 4 a 9), e a conseqüente adição de maiores quantidades de corretivo (Tabela 4). A redução da acidez potencial pode ser também observada na camada subjacente, devido ao aporte de cátions básicos e à redução da acidez.

Os teores de Ca trocável na camada superficial do solo aumentaram com as adições de corretivo, atingindo o maior valor ( $5,6 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ ) no tratamento 8, em que foi adicionada maior quantidade do mesmo. Nos tratamentos sem adição de corretivo (1 e 9) os teores de Ca trocável foram menores que  $2,0 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ , sendo considerados baixos (SBCS/NRS, 2004) podendo prejudicar o crescimento das culturas. Nos tratamentos com adição de corretivo, pode-se observar a translocação do Ca no perfil, em geral atingindo, na camada subjacente (C) o teor considerado adequado.

**TABELA 4.** Componentes da acidez e da capacidade de troca (CTC) do solo das camadas A (até 20 cm de profundidade), B (20 a 40 cm) e C (40 a 60 cm) após oito anos da última correção (médias de quatro repetições)

Determinação / camada	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Anál. Est. <sup>1)</sup> CV (%) DMS (5%)
	Test.	NPK	L1	L1+M1	L2	L2+M2	L2+M4	L3	L3-Cal	
<b>pH em água:</b>										
A	4,8 B	5,4 A	5,5 abA	5,6 aA	5,5 abA	5,6 aA	5,5 bA	5,6 aA	4,0 C	CV = 4
B	4,7 B	5,4 A	5,8 aA	5,9 aA	5,9 aA	5,9 aA	5,9 aA	5,7 aA	4,2 B	*DMS= 0,4
C	4,7 B	5,2 AB	5,2 bAB	5,0 bAB	5,5 bA	5,0 bAB	5,3 bA	5,2 bAB	4,2 C	**DMS= 0,5
<b>Al<sup>3+</sup> trocável (cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>):</b>										
A	0,8 bB	0,3 bC	0,1 bC	0,0 bC	0,0 bC	0,0 bC	0,0 bC	0,1bC	2,6 bA	CV = 27
B	1,5 aB	0,1 bC	0,0 bC	0,0 bC	0,0 bC	0,0 bC	0,0 bC	0,0 bC	2,6 bA	*DMS= 0,3
C	1,6 aB	0,7 aC	0,7 aC	0,9 aC	0,7 aC	0,9 aC	0,6 aC	0,6 aC	3,3 aA	**DMS= 0,4
<b>H + Al (cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>):</b>										
A	4,3 bB	2,6 B	3,4 B	3,3 B	4,2 aB	3,7 B	4,6 aB	4,5 aB	10,5 aA	CV = 27
B	4,4 abAB	2,1 BC	2,1 C	2,0 C	1,9 bC	2,3 BC	2,3 bBC	2,4 bBC	5,9 bA	*DMS=1,7
C	6,0 aA	3,1 B	3,2 B	3,3 B	2,7 abB	3,7 B	3,1 abB	3,6 aB	7,5 bA	**DMS=2,3

Continua

TABELA 4. Continuação

Determinação/ camada	1 Test.	2 NPK	3 L1	4 L1+M1	5 L2	6 L2+M2	7 L2+M4	8 L3	9 L3-Cal	Anál. Est. CV (%) DMS (5%)
<b>Ca trocável (cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>):</b>										
<b>A</b>	1,2 C	2,6 B	3,2 aB	3,8 aB	3,6 aB	3,6 aB	3,5 aB	5,6 aA	0,2 C	CV = 24
<b>B</b>	1,0 B	2,4 A	2,6 abA	2,7 bA	2,7 abA	2,7 abA	2,9 abA	2,9 bA	0,6 B	*DMS = 0,9
<b>C</b>	1,5 AB	2,3 A	1,9 bA	1,9 bA	2,1 bA	1,9 bA	2,3 bA	2,6 bA	0,6 B	**DMS= 1,3
<b>Mg trocável (cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>):</b>										
<b>A</b>	0,4 D	0,8 aC	1,0 aBC	1,2 aAB	1,1 aBC	1,1 aABC	1,0 aBC	1,4 aA	0,1 D	CV = 20
<b>B</b>	0,2 B	0,7 abA	0,8 bA	0,8 bA	0,8 bA	0,7 bA	0,8 abA	0,7 bA	0,1 B	*DMS = 0,2
<b>C</b>	0,3 BC	0,6 bA	0,7 bA	0,8 bA	0,7 bA	0,6 bAB	0,7 bA	0,7 bA	0,1 C	**DMS= 0,3
<b>CTC cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>:</b>										
<b>A</b>	6,0 abD	6,1 aD	7,7 aCD	8,3 aBCD	9,3 aABC	8,5 aBCD	9,0 aABC	11,5 aA	10,8 aAB	CV = 17
<b>B</b>	5,8 b	5,2 a	5,5 b	5,5 b	5,4 b	5,8 b	6,0 b	6,0 b	6,6 b	*DMS= 1,9
<b>C</b>	7,8 aAB	6,0 abAB	5,8 bAB	6,0 bAB	5,4 bB	6,1 bAB	6,0 bAB	6,8 bAB	8,3bA	**DMS= 2,6

<sup>1)</sup> Médias seguidas de mesma letra minúscula, na coluna, e mesma letra maiúscula, na linha, não diferem entre si pelo teste de Tukey (p<0,05); ausência de letras, indica não significância entre camadas e/ou entre tratamentos, respectivamente.

\*DMS entre camadas (A, B e C).

\*\*DMS entre tratamentos (1 a 9).

Os teores de Mg trocável da camada superficial do solo também aumentaram com as adições de corretivo, atingindo valores maiores que 0,5  $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ , considerado adequado ao crescimento de plantas (SBCS/NRS, 2004). Teores de Mg menores que este valor foram determinados somente nos tratamentos sem adição de corretivo (1 e 9). À semelhança do que foi observado para o Ca, foi também observada a translocação do Mg para as camadas sub-superficiais.

Foi observado aumento da capacidade de troca de cátions (CTC) nos tratamentos com adição de corretivo (3 a 8), pelo aporte de íons alcalinos (Ca e Mg) supridos pelo corretivo da acidez; a adição de resíduo sem calcário (tratamento 9) também propiciou aumento da CTC do solo, devido ao maior teor de  $\text{H} + \text{Al}^{3+}$  provocado pela diminuição do valor do pH (Tabela 4). Nas camadas sub-superficiais os valores de CTC foram menos afetados pela aplicação de lodo.

A adição de corretivo, em quantidades indicadas pelo Índice SMP para atingir valores de pH do solo de 6,5, foi adequada para manter a acidez ativa ( $\text{Al}^{3+}$  trocável) próxima à neutralidade, por um período de tempo de oito anos. Na maior dose de lodo aplicado (tratamento 8), entretanto, foi necessária a aplicação do dobro da quantidade recomendada por esse índice.

#### **4.1.2. Teores de matéria orgânica, C e N totais, P, K e S extraíveis e densidade do solo da camada superficial**

A adição continuada de lodo por um período de seis anos pode afetar algumas características do solo, principalmente na camada superficial, dependendo da constituição química do material adicionado. Como o lodo contém, em média, 486  $\text{g kg}^{-1}$  de carbono total (Tabela 2), o teor de matéria orgânica (MO) aumentou com as quantidades adicionadas (Figura 1). Com a adição da menor dose de lodo (120  $\text{t ha}^{-1}$ ) foi observado aumento proporcionalmente maior no teor de MO do solo. Este fato pode ser devido a interações entre compostos orgânicos e minerais, reduzindo a taxa de decomposição do material orgânico.

Pode-se observar também na Figura 1 as modificações no teor de MO do solo com o tempo. O maior decréscimo do teor de MO do solo foi

observado no período de oito anos após a última adição de lodo, quando foi aplicada a maior dose ( $624 \text{ t ha}^{-1}$ ). Este decréscimo representa uma redução média anual de  $5,5 \text{ g dm}^{-3}$ . Nas doses menores de adição de lodo ( $120$  e  $240 \text{ t ha}^{-1}$ ) o decréscimo em MO do solo foi menos acentuado.

Os teores de MO do solo apresentaram pequena variação entre as amostragens feitas após oito e 18 anos da última adição do lodo. Este fato indica que podem ter sido atingidos níveis de equilíbrio de MO no solo em valores diferentes, aumentando com as quantidades de lodo adicionadas. A tendência de aumento do teor de MO na última amostragem pode ser devida à contribuição das raízes da vegetação espontânea que cresceu durante este período, e ao não revolvimento periódico do solo. A adição da maior dose de lodo propiciou um aumento médio da massa de solo de  $4,3 \text{ kg vaso}^{-1}$  na camada superficial (Anexo 3), em relação ao tratamento testemunha.

Considerando-se as quantidades médias de carbono adicionado na maior dose ( $303 \text{ t ha}^{-1}$ ) e o seu teor médio na camada superficial ( $8,4 \text{ g kg}^{-1}$ , Tabela 5), pode-se estimar uma perda de aproximadamente 55% do adicionado, neste período de tempo (de 1985 a 2009).

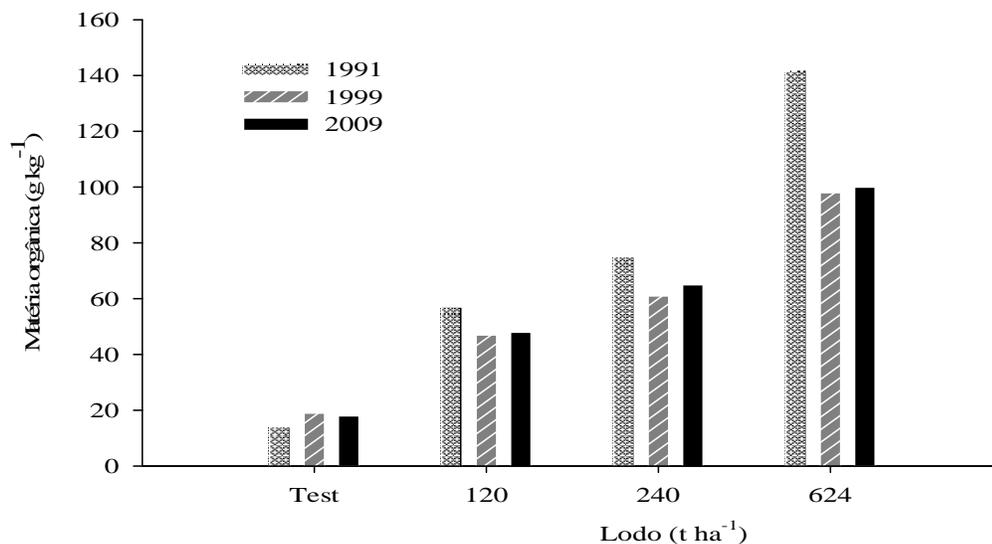


Figura 1: Teores de matéria orgânica da camada superficial do solo amostrado após a última aplicação do lodo (TEDESCO et al.; 1991) a oito anos após cessar a aplicação do lodo (GAIVIZZO, 2001) e no presente trabalho (média dos tratamentos com as mesmas doses).

Os teores de N total da camada superficial do solo também aumentaram com as quantidades de lodo adicionadas (Tabela 5; Anexo 4).

Este aumento, entretanto, foi proporcionalmente menor que o observado para o carbono. Considerando-se a quantidade de N adicionado pelo lodo no tratamento com a maior dose aplicada ( $624 \text{ t ha}^{-1}$ ) pode-se calcular uma dissipação de aproximadamente 64,4% deste nutriente, equivalente a aproximadamente  $379 \text{ kg de N ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ . Além da absorção pelas plantas, ocorrem perdas por lixiviação (TEDESCO et al., 1986b) e possivelmente, por desnitrificação.

Devido à maior dissipação do N no ambiente da microparcela em relação ao carbono, a relação C/N na camada superficial do solo aumenta com a dose de lodo adicionada, atingindo o valor médio de 34, na maior quantidade aplicada ( $624 \text{ t ha}^{-1}$ ) (Tabela 5).

A maior persistência do carbono em relação ao nitrogênio no solo indica que ocorre no lodo uma fração orgânica mais lábil, com maior teor de N. Os compostos carbonados menos suscetíveis à degradação biológica (óleos e graxas/fenóis) acumulam-se no solo, conforme pode ser observado na Figura 1, em que os teores de MO determinados aos 18 anos são semelhantes aos obtidos a oito anos após a última aplicação de lodo.

No período de tempo de 1983 a 2003 foram aplicados na Fazenda de Lodo, em média,  $8,8 \text{ t de lodo ha}^{-1} \text{ ano}$  (TEDESCO et al. 2004a); o teor médio de lodo aplicado no solo neste período foi de  $50,1 \text{ mg kg}^{-1}$ , podendo suprir até  $440 \text{ kg de N total ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ . Esta quantidade é suficiente para manter uma boa vegetação de cobertura do solo, conforme pode ser observado a campo.

Os teores de P extraível da camada superficial do solo aumentaram com as quantidades de lodo adicionadas (Tabela 5; Anexo 4). Os valores determinados na maior taxa de aplicação ( $624 \text{ t ha}^{-1}$ ), atingiu, em média,  $330 \text{ mg dm}^{-3}$ , valor considerado muito alto (SBCS/NRS, 2004). Este valor, entretanto, representa somente 10,4% da quantidade total aplicada. O P é pouco móvel, apresentando pequena translocação para as camadas subsuperficiais do solo (Anexo 4).

**TABELA 5.** Teores de C e N totais, P, K e S extraíveis e densidade do solo da camada superficial, após 18 anos da última aplicação de lodo (médias dos tratamentos com adições das mesmas doses de lodo)

Lodo							
adicionado	C	N	C/N	P	K	S	Densidade
t ha <sup>-1</sup>	----- % -----	----- g kg <sup>-1</sup> -----		..... mg dm <sup>-3</sup> .....			
0	0,78	0,06	13	18	38	10	1,25
120	2,61	0,09	29	181	33	9	1,20
240	3,84	0,12	32	301	27	10	1,10
624	8,4	0,25	34	330	16	10	0,95

Em amostras de solo coletado na Fazenda de Lodo do SITEL/CORSAN, no período de 1996 a 2001, foi determinado um teor médio de P de  $257 \text{ mg dm}^{-1}$  na camada superficial (0 – 20 cm) e de  $56 \text{ mg dm}^{-3}$  na camada de 20 a 50 cm de profundidade (TEDESCO et al., 2004a).

Os teores de potássio disponível do solo foram baixos a muito baixos ( $< 40 \text{ mg dm}^{-3}$ ) em todos os tratamentos, e nas três camadas das microparcelas (Tabela 5; Anexo 4). No tratamento com a maior taxa de aplicação de lodo foram aplicadas  $1.680 \text{ kg de K ha}^{-1}$ , tendo sido o mesmo totalmente lixiviado, conforme já observado no primeiro ano da condução do trabalho (TEDESCO et al., 1986b).

Os teores médios de K disponível determinados na camada superficial do solo da Fazenda de Lodo, no período de 1996 a 2001 foram de  $43 \text{ mg dm}^{-3}$  e de  $24 \text{ mg dm}^{-3}$  na camada de 20 a 50 cm de profundidade (TEDESCO et al., 2004a).

Os teores médios de enxofre extraível da camada superficial do solo foram de  $10 \text{ mg dm}^{-3}$ , com ou sem aplicação de lodo (Tabela 5; Anexo 4). Na taxa mais alta de adição de lodo ( $624 \text{ t}$ ) foram aplicadas  $3.494 \text{ kg de S ha}^{-1}$ , que saíram do sistema por lixiviação, conforme já observado anteriormente (TEDESCO et al., 1986b). O ânion sulfato foi determinado em maior quantidade no lixiviado, juntamente com os cátions Na e K.

Os teores médios de S determinados na Fazenda de Lodo foram semelhantes aos obtidos no experimento de microparcelas, sendo considerados adequados para o crescimento de gramíneas (SBCS/NRS, 2004) (TEDESCO et al., 2004a).

A densidade do solo da camada superficial diminuiu com o aumento das quantidades de lodo aplicadas (Tabela 5), devido ao maior aporte de material orgânico. Esta redução foi mais evidente na determinação feita por Tedesco et al. (1991).

#### **4.1.3. Teores de zinco e cobre**

Foram determinados os teores de zinco e cobre totais (por digestão em  $\text{HNO}_3 + \text{HClO}_4$  concentrados) e extraíveis (por solução de  $\text{HCl } 0,1 \text{ Mol L}^{-1}$ ). Os valores obtidos nas três camadas das microparcelas são dados na Tabela 6.

Pode-se observar que as maiores concentrações dos mesmos foram determinadas na camada superficial do solo. Nas maiores doses de aplicação de zinco, tanto pelo lodo como por ZnO, foi observado aumento do teor deste metal nas camadas sub-superficiais. A translocação do cobre para a camada B foi observada somente quando foi adicionado o sal inorgânico ( $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ) juntamente com o lodo (Tabela 6).

Na Figura 2 são comparados os teores de zinco total com os extraídos, na camada superficial das microparcelas. Em média, na extração total, e nos tratamentos com a adição de lodo, foram recuperadas 38% das quantidades adicionadas (variação entre 26 e 44 %, descontando-se as testemunhas). Nos tratamentos com as adições de lodo enriquecido com metais, a recuperação foi de 30 % (variação entre 22 e 34 %).

Na extração com  $\text{HCl}$   $0,1 \text{ Mol L}^{-1}$ , a recuperação média de Zn nos tratamentos com lodo foi de 10 % (variação entre 2 a 22 %) e nos tratamentos com adições de lodo e ZnO a recuperação foi de 2 % (variação entre zero e 4 %).

A menor recuperação do Zn nos tratamentos com adição de sal solúvel indica que este metal pode ser lixiviado para as camadas de solo subjacentes, tendo em vista que uma fração apreciável do mesmo pode estar na forma trocável (extraído com  $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2$   $0,1 \text{ Mol L}^{-1}$ ), conforme constatado por Gaivizzo (2001).

A translocação do Zn da camada superficial para as camadas subjacentes ocorreu no período de oito anos ( de 1991 a 1999). Tedesco et al. (1991) determinaram um teor médio de Zn na camada superficial de  $45,4 \text{ mg kg}^{-1}$  em 1991, enquanto Gaivizzo (2001) obteve um valor médio de  $30,5 \text{ mg kg}^{-1}$  e no presente trabalho foi determinado o valor médio de  $30,8 \text{ mg kg}^{-1}$ , não ocorrendo portanto modificação significativa nos teores de zinco nas duas últimas amostragens. Esta observação pode indicar que uma fração apreciável do metal pode estar em formas mais estáveis, como complexado à matéria orgânica (extração com  $\text{DTPA}$   $0,005 \text{ Mol L}^{-1}$  e  $\text{NaOH}$   $0,5 \text{ Mol L}^{-1}$ ) ou não identificadas (extraído com  $\text{HNO}_3$  +  $\text{HClO}_4$  concentrados), conforme o fracionamento efetuado por Gaivizzo (2001).

**TABELA 6.** Teores extraíveis e totais de metais do solo das camadas A (até 20 cm de profundidade), B (20 a 40 cm) e C (40 a 60 cm) após 16 anos da última aplicação de lodo (médias de quatro repetições)

Determinação / camada	Tratamentos									Anál. Est. <sup>1)</sup> CV (%) DMS (5%)
	1 Test.	2 NPK	3 L1	4 L1+M1	5 L2	6 L2+M2	7 L2+M4	8 L3	9 L3-Cal	
<b>Cu extraível (mg dm<sup>-3</sup>):</b>										
A	3,4 C	3,9 C	2,6 C	11,7 aBC	2,6 C	18,3 aB	40,0 aA	2,9 C	3,2 C	CV = 135,0 *DMS=9,4 **DMS=12,5
B	1,0	1,0	0,8	2,5 ab	0,9	2,9 bA	5,0 bA	1,0	0,9	
C	0,9	0,8	0,7	0,9 b	0,6	0,9 bA	1,3 bA	0,6	0,7	
<b>Cu total (mg kg<sup>-1</sup>):</b>										
A	5,6 C	6,3 BC	4,7 C	17,0 BC	5,4 C	23,0 aB	52,0 aA	9,7 BC	10,4 BC	CV = 4,3 *DMS=13,0 **DMS=17,3
B	4,7	4,5	5,3	5,9	4,3	5,0 b	9,5 b	5,5	4,1	
C	5,3	3,7	4,3	4,1	3,6	5,2 b	5,7 b	4,3	5,3	
<b>Zn extraível (mg dm<sup>-3</sup>):</b>										
A	8,9 D	6,3 D	14,0 CD	25,8 aCD	26,3 aCD	38,8 aBC	83,5 aA	64,0 aAB	7,8 D	CV = 97,0 *DMS= 20,0 **DMS= 26,4
B	1,4	0,7	1,7	3,3 b	2,2 b	3,9 b	10,0 b	8,6 b	1,0	
C	1,0	0,7	1,1	2,0 b	2,2 b	3,8 b	5,1 b	4,1 b	1,4	
<b>Zn total (mg kg<sup>-1</sup>):</b>										
A	16,8 B	15,3 B	27,5 B	50,0 B	52,0 B	62,0 aB	126,0 aA	113,3aA	36,2 B	CV = 67,3 *DMS= 36,2 **DMS=48,2
B	16,2	14,7	20,2	22,9	18,0	17,3 b	31,2 b	30,5 b	16,0	
C	18,6	16,6	17,7	18,2	18,3	21,5 b	25,8 b	22,3 b	18,7	

Continua

**TABELA 6.** Continuação

Determinação / camada	Tratamentos									Anál. Est. <sup>1)</sup> CV (%) DMS (5%)
	1 Test.	2 NPK	3 L1	4 L1+M1	5 L2	6 L2+M2	7 L2+M4	8 L3	9 L3-Cal	
<b>Ni total (mg kg<sup>-1</sup>):</b>										
A	2,1 E	2,7 DE	4,0 CDE	5,8BCDE	5,1 CDE	6,8 aABCD	11,3 aA	10,4aAB	7,5 aABC	CV = 48
B	3,2	2,9	3,5	3,6	3,2	3,3 b	4,8 b	3,7 b	3,4 b	*DMS=3,5
C	2,4	2,9	2,9	5,4	3,2	3,1 b	3,4 b	3,1 b	2,6 b	**DMS=4,7
<b>Pb total (mg kg<sup>-1</sup>):</b>										
A	12,9 B	12,1 B	12,5 B	28,6 aB	11,5 B	33,9 aB	71,7 aA	14,2 B	14,7 B	CV = 80
B	8,9	8,1	8,6	10,3 ab	8,6	7,3 b	12,4 b	8,9	8,3	*DMS=18,3
C	7,8	7,6	7,2	8,2 b	7,8	9,4 b	7,2 b	8,0	9,9	**DMS=24,4
<b>Cd total (mg kg<sup>-1</sup>):</b>										
A	< 0,1 B	< 0,1 B	0,6 B	1,4 AB	0,6 B	1,9 aAB	3,2 aA	0,2 B	0,5 B	CV = 209
B	< 0,1	< 0,1	0,1	0,1 A	< 0,1	0,1 b	0,3 b	0,1	< 0,1	*DMS=1,7
C	< 0,1	0,6	0,6	0,6 A	< 0,1	0,1 b	1,7 ab	0,2	< 0,1	**DMS=2,3

<sup>1)</sup> Médias seguidas de mesma letra minúscula, na coluna, e mesma letra maiúscula, na linha, não diferem entre si pelo teste de Tukey (p<0,05); ausência de letras, indica não significância entre camadas e/ou tratamentos.

\*DMS entre camadas (A, B e C).

\*\*DMS entre tratamentos (1 a 9).

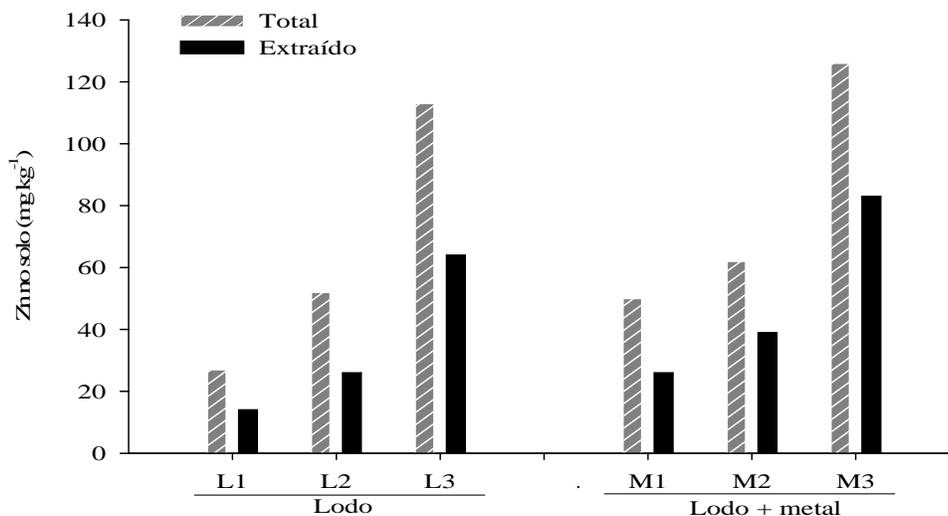


Figura 2. Teores de zinco total e extraído na camada superficial do solo

Na extração total do cobre foi recuperado 32 % do metal adicionado, no tratamento com adição da maior dose de lodo ( $624 \text{ t ha}^{-1}$ ). Nos tratamentos com menores adições de lodo ( $120$  e  $240 \text{ t ha}^{-1}$ ) os teores de Cu total não foram significativamente diferentes da testemunha. Na extração com HCL  $0,1 \text{ Mol L}^{-1}$  não foi observada recuperação de Cu adicionado pelo lodo, em qualquer das doses adicionadas. Nos tratamentos com adição de metais, entretanto foi obtida uma recuperação média de 34 % do Cu adicionado (variação de 28 a 36 %).

Os teores médios de cobre extraído com HCL  $0,1 \text{ Mol L}^{-1}$  na camada superficial do solo variaram entre  $7,9 \text{ mg dm}^{-3}$  em 1991 (TEDESCO et al., 1991),  $9,7 \text{ mg dm}^{-3}$  em 1999 (GAIVIZZO, 2001) e  $9,8 \text{ mg dm}^{-3}$  no presente trabalho.

No estudo de fracionamento do cobre conduzido por Gaivizzo (2001) foi observado que este metal encontra-se preferencialmente na fração orgânica do solo ou em formas não identificáveis (residual).

#### 4.1.4. Níquel, chumbo e cádmio

Os teores totais de Ni, Pb e Cd (extraídos com HNO<sub>3</sub>-HClO<sub>4</sub> concentrados) são apresentados na Tabela 6.

Pode-se observar que as maiores concentrações dos mesmos foram determinadas na camada superficial do solo. Foi observada translocação significativa de Ni no perfil do solo com a adição da maior dose de lodo (624 t ha<sup>-1</sup>). No estudo de fracionamento deste metal conduzido por Gaivizzo (2001), foi observado que as maiores quantidades de Ni foram determinadas nos extratos com DTPA (orgânico) e com HNO<sub>3</sub>-HClO<sub>4</sub> (residual).

À semelhança do Cu e do Pb, o Ni forma complexos estáveis com as frações orgânica e mineral do solo (KABATA-PENDIAS & PENDIAS, 2001); HAYES & TRAINA, 1998).

A translocação do Ni para camadas sub-superficiais do solo foi mais acentuada nos tratamentos com adições de sal solúvel do metal (acetato de Ni), aumentando nos extratos com Mg(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> (trocável) e NaOH (orgânico) (GAIVIZZO, 2001). Na forma trocável o metal pode ser mais facilmente lixiviado no solo.

Em média, foi determinada uma recuperação de 38% do Ni adicionado pelo lodo, na camada superficial do solo. Nos tratamentos com adição do sal solúvel, a recuperação média do mesmo foi de 28 %, indicando a translocação para camadas sub-superficiais do solo.

O teor médio de Ni total determinado em 1999 (5,5 mg kg<sup>-1</sup>) foi semelhante ao obtido no presente trabalho (6,2 mg kg<sup>-1</sup>), tendo sido observada uma estabilização dos teores do mesmo nos últimos 10 anos.

Não foi observada translocação de Pb para as camadas sub-superficiais com a aplicação de lodo, mesmo na maior taxa utilizada. No estudo de fracionamento conduzido por Gaivizzo (2001) foi observado que a maior quantidade deste metal foi extraída por HNO<sub>3</sub>-HClO<sub>4</sub> concentrados (fração residual), ocorrendo, entretanto, pequena extração com DTPA e NaOH (formas orgânicas). A adsorção do Pb por minerais, especialmente óxidos, formando complexos da esfera interna de grande estabilidade é responsável pela baixa mobilidade deste metal no solo (ALLOWAY, 1995; HAYS & TRAINA, 1998; GOMES, 1996).

A adição de Pb na forma de sal solúvel ( $\text{PbCl}_2$ ), entretanto, favoreceu a translocação do metal para as camadas subjacentes do solo (Tabela 6). Este fato pode ser devido à saturação de sítios de adsorção específica na fração mineral do solo. Na extração seqüencial conduzida por Gaivizzo (2001) foi determinada uma fração apreciável de Pb extraído por DTPA com a adição da maior quantidade deste metal ( $252 \text{ kg ha}^{-1}$ , na soma do adicionado pelo lodo ( $12 \text{ kg ha}^{-1}$ ) e pelo sal ( $240 \text{ kg ha}^{-1}$ ); Tabela 3).

A recuperação do Pb adicionado pelo lodo com a extração por  $\text{HNO}_3\text{-HClO}_4$  concentrados foi somente observada no tratamento com a maior dose aplicada (L3), atingindo o valor de 10 %. Nos tratamentos com a adição do metal, entretanto, foi determinado a um valor médio de recuperação de 42 % do adicionado.

O valor médio do teor total de Pb da camada superficial dos solos determinado por Gaivizzo (2001) foi de  $61,8 \text{ mg kg}^{-1}$ . No presente trabalho foi de  $23,6 \text{ mg kg}^{-1}$ . Este fato pode indicar uma formação lenta de compostos minerais de grande estabilidade, não solubilizados pelos ácidos concentrados.

Os teores de Cd da camada superficial do solo aumentaram com as doses de lodo adicionadas (Tabela 6). Este aumento foi mais evidenciado com a aplicação do metal na forma de sal solúvel ( $\text{CdCl}_2\cdot\text{H}_2\text{O}$ ). Nas maiores taxas de aplicação, foi observada translocação do mesmo para as camadas sub-superficiais do solo.

No estudo de fracionamento, Gaivizzo (2001) determinou teores semelhantes de Cd nas frações trocável, orgânica e mineral. Com a adição do metal na forma solúvel, foi também determinado Cd nas formas solúvel, e principalmente na forma trocável.

#### **4.1.5. Efeitos da correção e adubação do solo**

Como o experimento foi mantido a céu aberto, a análise da camada superficial do solo das microparcelas, amostradas em 2007, indicou a necessidade de correção da acidez e reposição de macronutrientes de plantas. Os resultados das análises são dados no Anexo 4.

Após a correção da acidez e adições de nutrientes de plantas (P, K, Ca, Mg e S) foi feita outra amostragem e análise dos solos da camada superficial das microparcelas. Os resultados obtidos são dados no Anexo 5. As

médias das determinações feitas na camada superficial do solo das microparcelas são apresentadas na Tabela 7.

Pode-se observar na Tabela 7, que após 15 dias de incubação, o pH em água do solo da camada superficial atingiu, em média, o valor de 6,4, sendo próximo ao esperado (6,5). Os teores de Ca e Mg também aumentaram, com a adição do corretivo.

Os teores de P disponível na camada superficial do solo mantiveram-se em níveis altos, mesmo após 18 anos da última aplicação de lodo, nos tratamentos com adição do mesmo, não tendo sido necessária, portanto, a adição deste nutriente.

Os teores médios de K, entretanto, foram baixos em todos os tratamentos (Tabela 7), devido à lixiviação deste cátion. A adição de adubo potássico em todos os tratamentos possibilitou obter um teor médio de 144 mg kg<sup>-1</sup>, sendo adequado ao crescimento das plantas (SBCS/NRS, 2004).

As adições de gesso nos tratamentos 1 e 9 e sulfato de magnésio no tratamento 9, com a finalidade de suprir Ca e Mg para as plantas, aportaram também grande quantidade de enxofre nestes tratamentos. O teor médio de S nos outros tratamentos foi 16 mg kg<sup>-1</sup> (Anexo 5), sendo adequado ao crescimento das plantas (SBCS/NRS, 2004).

#### **4.2. Crescimento de plantas e teores de nutrientes e metais**

O efeito residual das aplicações de lodo e metais foi estudado em 1993 (TEDESCO et al., 1993c). Após esta data as micro parcelas foram mantidas em sistema aberto (área cercada), com crescimento de vegetação nativa até 2007.

##### **4.2.1. Matéria seca do milho (1º cultivo) e grãos do feijoeiro**

Os últimos cultivos nas micro parcelas tinham sido feitos em 1993, avaliando-se a qualidade de frutos de tomateiro e grãos de aveia (TEDESCO et al., 1993c). No verão de 2008 foram cultivados milho e feijão consorciados nas micro- parcelas; antes do cultivo, entretanto, foi feita a amostragem do solo da camada superficial (com trado calador) para a avaliação dos indicadores de fertilidade e teores de nutrientes de plantas e metais. Os resultados desta avaliação foram apresentados no item 4.1.5.

**TABELA 7.** Média dos resultados analíticos da camada superficial do solo nos nove tratamentos, antes e 15 dias após a correção/adubação, feitas em 2009

Determinações	Antes corr./ad.	Depois corr./ad.	Significância <sup>1)</sup>
pH em água	5,3	6,4	*
P disponível (mg dm <sup>-3</sup> )	218	224	ns
K disponível (mg dm <sup>-3</sup> )	29	144	*
S extraível (mg dm <sup>-3</sup> )	10	62	*
Ca <sup>+2</sup> troc. (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	3,0	4,5	*
Mg <sup>+2</sup> troc. (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	0,9	1,4	*
CTC (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	8,6	9,9	ns
H + Al (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	4,6	3,6	ns
Zn <sup>+2</sup> extraível (mg dm <sup>-3</sup> )	30,5	25,4	ns
Zn <sup>+2</sup> total (mg dm <sup>-3</sup> )	55,4	64,2	ns
Cu <sup>+2</sup> extraível (mg dm <sup>-3</sup> )	9,8	7,8	ns
Cu <sup>+2</sup> total (mg dm <sup>-3</sup> )	14,9	16,2	ns
Cd total (mg kg <sup>-1</sup> )	0,9	0,9	ns
Ni total (mg kg <sup>-1</sup> )	6,19	6,19	ns
Pb total (mg kg <sup>-1</sup> )	23,6	29,4	ns

<sup>1)</sup> \* indica significância estatística ao nível do DMS de 5%; ns = não significância a esse nível.

Para possibilitar o crescimento das plantas foram aplicados Ca e Mg (nas formas de gesso e MgSO<sub>4</sub>) no tratamento nº 9 (com a maior aplicação de lodo), sem corretivo calcário), e adubos nitrogenado e potássico em todos os tratamentos (itens 3.2 e 3.2.1).

O desenvolvimento das plantas ocorreu normalmente, com pequenas diferenças entre tratamentos com aplicação de lodo, tendo em vista

que foram adicionados adubos nitrogenado e potássico, embora em quantidades inferiores às recomendadas (SBCS/NRS, 2004). A formação de espigas do milho foi desuniforme, tendo sido colhida a parte aérea a 114 dias da emergência das plantas. O feijoeiro, entretanto, completou o ciclo produtivo, tendo sido colhidos os grãos até 125 dias da emergência.

### **Milho**

A maior produtividade de massa seca do milho foi obtida no tratamento 7 (L2 + M4), sendo equivalente a 21,4 kg ha<sup>-1</sup>. Na Figura 3 é mostrada a produtividade média da massa seca do milho, nos diferentes níveis de aplicação do lodo, em relação ao maior rendimento obtido. Pode-se observar uma tendência de aumento na produtividade com as adições passadas de lodo e adubo fosfatado. A última adição de lodo ocorreu em 1991, e a de adubo fosfatado em 1993 (TEDESCO et al., 1993c). O aumento da produtividade pode ser devido ao aporte de fósforo pelo lodo, cujos teores no solo continuam maiores que o nível de suficiência deste nutriente (Tabela 5 – Anexo 4).

O tratamento testemunha apresentou o menor rendimento (24,4% do máximo), sendo o teor de fósforo no solo considerado baixo (SBCS/NRS, 2004). Os teores de fósforo na matéria seca das plantas também aumentaram com a adição de lodo (Anexo 7).

Os teores dos nutrientes N, P, K e S situaram-se em níveis inferiores aos considerados adequados na folha indicadora do nível nutricional do milho no florescimento, (Anexo 6). Este fato pode ser atribuído ao efeito da diluição, considerando-se que estes foram determinados após a formação das espigas.

Os teores médios de Ca e Mg, entretanto, situam-se nas faixas consideradas adequadas, à exceção do teor de Mg no tratamento nº 9 (com L3, sem calcário). A última adição de calcário foi feita em 1999, tendo sido adequada para suprir estes nutrientes para as plantas. Não foi observado efeito negativo da adição de metais ao lodo sobre a produção de matéria seca do milho.

## Feijoeiro

O maior rendimento de grãos de feijão foi obtido no tratamento nº 6 (L2 + M2), equivalente a uma produtividade de 0,9 t ha<sup>-1</sup> (Anexo 8), considerada baixa para solos do estado do Rio Grande do Sul (BISSANI et al., 2008). Pode-se observar, entretanto, o aumento médio no rendimento de grãos com a aplicação do lodo; enquanto no tratamento testemunha foi determinado um rendimento de somente de 22,6% em relação ao máximo, no tratamento com adição de lodo foram obtidos aumentos médios entre 72,6% a 79,0% (Figura 3). A produtividade obtida no tratamento testemunha (0,2 t de grãos ha<sup>-1</sup>) é semelhante à média em solos do estado do Rio Grande do Sul, sem adubação (BISSANI et al., 2008). A adição de metais ao lodo não afetou o rendimento de grãos do feijoeiro.

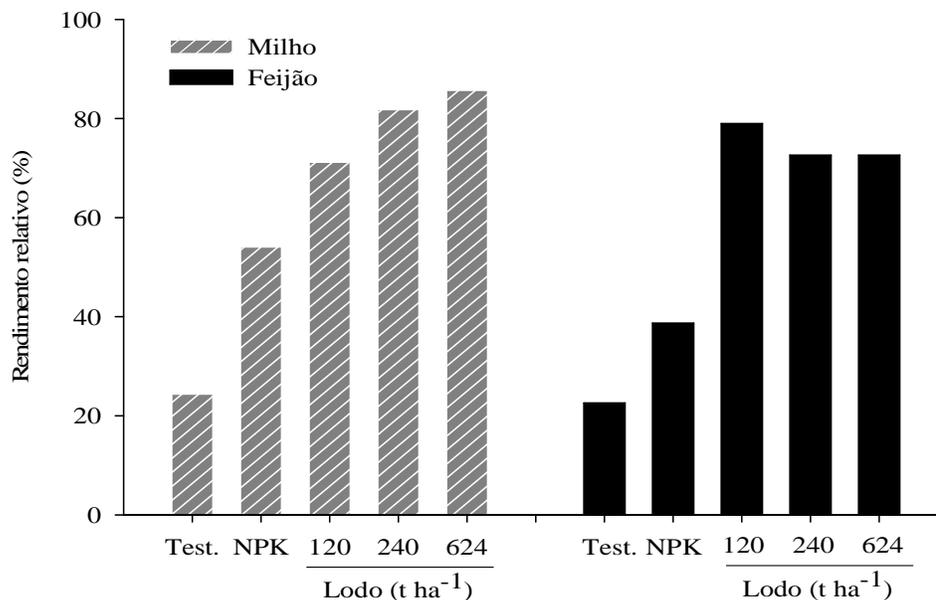


Figura 3: Rendimentos percentuais médios de grãos de feijão e matéria seca da parte aérea do milho (1º cultivo) em relação ao tratamento com maior produtividade

#### **4.2.2. Matéria seca do milho (2º cultivo) e produção de rabanete**

Antes do plantio do milho foi feita a correção da acidez do solo para atingir valores de pH em água de 6,5. Foi adicionado K em todos os tratamentos, e P somente nos tratamentos 1 e 2 (item 3.2.2).

As plantas apresentaram desenvolvimento normal, com pequenas diferenças entre tratamentos.

#### **Milho**

O milho foi cultivado no verão de 2008/2009, sendo colhida a parte aérea para a determinação de matéria seca aos 130 dias após a emergência das plântulas. No tratamento com a maior produtividade (L1 + M1) foi obtido um rendimento de matéria seca de 20,5 t ha<sup>-1</sup> (Anexo 9). As diferenças entre tratamentos foram pequenas (Figura 4) tendo em vista que na testemunha foram adicionados metade das quantidades de adubos do que no tratamento com adubação mineral.

Nos tratamentos com a adição de lodo (sem adubação fosfatada) o rendimento variou entre 76 e 86% do maior valor determinado (Figura 4). A adição de metais ao lodo não afetou o rendimento de matéria seca das plantas.

Os teores de N, P, Ca e Mg na matéria seca das plantas (Anexo 9) situaram-se próximos ou nas faixas destes nutrientes consideradas adequadas (Anexo 6). Os teores de K, entretanto, situaram-se em valor médio de 1/3 do indicado, devido ao efeito de diluição e/ou perdas por tecidos em senescência.

#### **Rabanete**

O cultivo do rabanete foi conduzido entre os meses de abril e maio de 2008 (40 dias). A cultura apresentou desenvolvimento normal, produzindo raízes de qualidade apropriada para a comercialização, mesmo no tratamento testemunha (Figura 4), com peso médio de 25g por unidade (in natura, com 5,7% de matéria seca) (Anexo 10). A adição de metais ao lodo não afetou a produtividade da cultura.

À exceção do K, os teores médios dos outros macronutrientes nas folhas situaram-se próximos ou nas faixas consideradas adequadas para as culturas (Anexos 6 e 11).

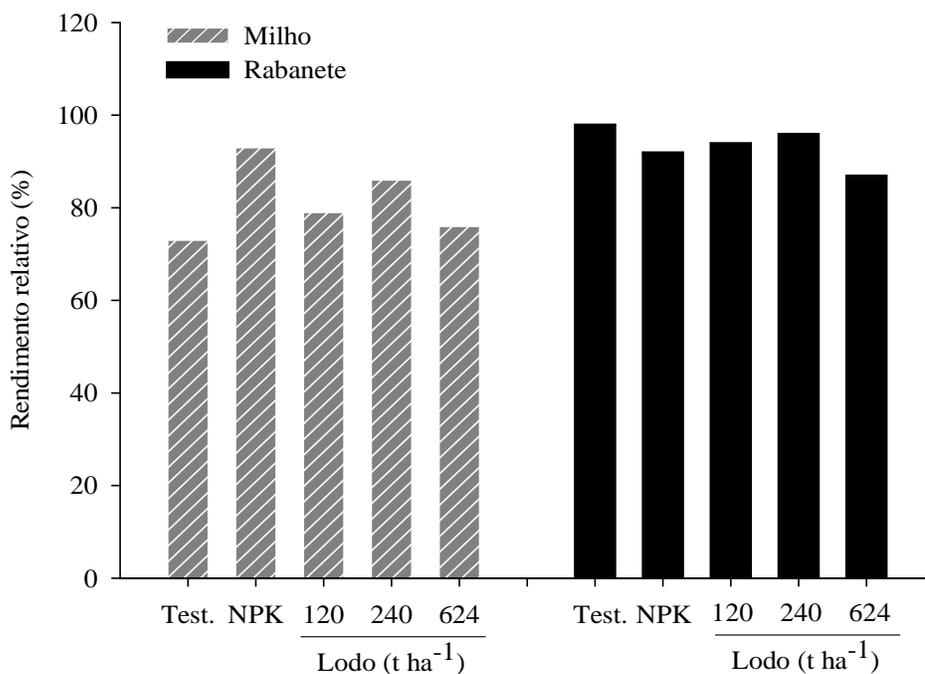


Figura 4. Rendimentos percentuais médios de matéria seca do milho (2º cultivo) e do rabanete (folhas + raízes) em relação ao tratamento com maior produtividade

#### 4.2.3. Teores de metais nas plantas

A presença de metais potencialmente tóxicos deve ser considerada nas práticas de descarte no solo de lodos de ETE's. No caso da Fazenda de Lodo do SITEL/CORSAN, foi inicialmente proposta uma concentração aproximada dos mesmos no lodo por Nolan (1982), para possibilitar a execução do projeto.

As concentrações reais de metais determinadas no lodo em alguns casos são menores que as inicialmente propostas (por exemplo: Cu e Cd) e em outros são maiores (Zn, Ni, Pb), conforme estudo feito por Tedesco et al. (2004a).

Como a disponibilidade de área para a Fazenda de Lodo foi maior do que a inicialmente prevista, a vida útil da mesma está sendo bem maior do que a antecipada (13 anos), devido às menores taxas de aplicação do lodo.

A serem mantidas as concentrações médias atuais e as taxas de aplicação praticadas, a Fazenda de Lodo poderá ser operada até 2.045, ano em que será atingida a aplicação total de 500 kg de Zn ha<sup>-1</sup>, valor proposto como limite máximo para este metal (TEDESCO et al. 2004a).

Como os teores de metais no lodo podem variar conforme o tipo de empreendimento a ser instalado, foram incluídos no projeto, a partir do 3º ano, alguns tratamentos em que o lodo foi “enriquecido” com alguns metais (Cu, Zn, Cd, Ni, Pb e Hg) nas formas de sais.

Serão apresentados a seguir os resultados obtidos nas análises de plantas cultivadas durante este trabalho, em comparação com os obtidos no passado (em 1991 e 1993), com outras culturas.

O estudo interpretativo de possível contaminação de plantas por metais feito com base em faixas de teores normais em plantas ou que indicam possível contaminação (teores tóxicos) deve ser feito criteriosamente. Em geral ocorre uma ampla faixa de valores entre estes dois extremos. Por exemplo: no caso do cádmio, estas faixas compreendem valores de 0,01 a 0,20 mg kg<sup>-1</sup> e entre 5 e 30 mg kg<sup>-1</sup>, respectivamente (Anexo 12). A ampla faixa de teores entre 0,2 e 5,0 mg kg<sup>-1</sup> poderia ser tida como de “algum risco”, dependendo de outros fatores, como quantidade e frequência de ingestão, acumulação do metal no organismo, etc.

Deve-se considerar também que os metais foram adicionados ao lodo na forma de sais solúveis, durante um período de tempo de apenas quatro anos. Na prática, os metais contidos no lodo já estão em contato com os componentes orgânicos por maior período de tempo, durante o processo de tratamento, com maior possibilidade para formação de compostos organo-metálicos mais estáveis. O tempo de aplicação no solo de lodo de ETE's em geral é mais prolongado (10 a 15 anos), com a conseqüente redução na solubilidade de metais.

### **Zinco**

O zinco é um micronutriente de plantas que pode ser absorvido em quantidades elevadas sem causar fitotoxidez. Conforme Pais & Jones (1997), concentrações de até 150 mg de Zn kg<sup>-1</sup> no tecido de plantas (base seca) são considerados normais (Anexo 12). A faixa de suficiência para milho, por

exemplo, situa-se no intervalo de 15 a 100 mg kg<sup>-1</sup> (SBCS/NRS, 2004), (Anexo 6).

No presente trabalho, foram determinados teores de Zn nas plantas menores que 100 mg kg<sup>-1</sup> em todos os tratamentos, inclusive nos casos em que este metal foi adicionado ao lodo (Tabela 8). Em média, foi observada uma tendência de diminuir a absorção deste metal com a elevação do pH do solo pela calagem, na cultura do milho.

Nos cultivos feitos no último ano da aplicação de lodo (1991) os teores de Zn na parte aérea na cultura do azevem situaram-se também na faixa considerada normal, nos tratamentos com adição de lodo (Anexo 13). A concentração de Zn no capim pangola, entretanto, foi duas a três vezes maior. No estudo do efeito residual, conduzido dois anos após a última aplicação de lodo, as concentrações de Zn nos frutos de tomateiro e nos grãos de aveia situaram-se na faixa normalmente encontrada nas plantas, indicando que as quantidades adicionadas do metal, tanto por lodo quanto por sais, não afetaram a qualidade dessas culturas.

### **Cobre**

Os teores de cobre nas plantas situaram-se na faixa considerada normal em plantas (3 a 40 mg kg<sup>-1</sup>), em todos os tratamentos e culturas estudados (Tabela 9; Anexo 14). A faixa de suficiência indicada para a cultura do milho é de 2 a 20 mg kg<sup>-1</sup> (SBCS/NRS, 2004), (Anexo 6).

No presente trabalho foram adicionados até 204 kg de Cu ha<sup>-1</sup> (por lodo e sal inorgânico) no tratamento nº 7 (L2 + M4). O limite proposto para o SITEL/CORSAN foi de 250 kg de Cu ha<sup>-1</sup> (Anexo 2). Conforme foi observado no estudo de fracionamento deste metal no solo conduzido por Gaivizzo (2001) o cobre forma compostos de grande estabilidade, sendo pouco absorvido pelas plantas.

**TABELA 8.** Teores de zinco (em mg kg<sup>-1</sup>) nos grãos do feijoeiro, na matéria seca do milho (2 cultivos) e nas raízes e folhas do rabanete (médias de quatro repetições)<sup>1)</sup>

Tratamento	Feijão	Milho		Rabanete	
	(grãos)	1º cult.	2º cult.	Raízes	Folhas
<b>1 Test.</b>	34 <sup>2)</sup>	46 ab	26	76 a	73 a
<b>2 NPK</b>	33	29 bc	14	32 b	29 c
<b>3 L1</b>	38	18 c	14	42 ab	28 c
<b>4 L1 + M1</b>	48	30 bc	19	32 b	36 c
<b>5 L2</b>	39	29 bc	17	38 b	32 c
<b>6 L2 + M2</b>	43	46ab	21	37 b	38 c
<b>7 L2 + M4</b>	55	71 a	33	35 b	50 bc
<b>8 L3</b>	38	59 a	28	42 ab	39 c
<b>9 L3 - Calc</b>	35	27 b	50	52 ab	70 ab
<b>Médias</b>	<b>40</b>	<b>39</b>	<b>25</b>	<b>43</b>	<b>44</b>
<b>CV(%)</b>	42	27	68	36	21

<sup>1)</sup>Médias seguidas pela mesma letra, na coluna, não diferem entre si pelo teste de Tukey (p < 0,05); ausência de letras indica não significância estatística a esse nível.

<sup>2)</sup>Limite de detecção: 0,1 mg kg<sup>-1</sup> (ICP – OES).

**TABELA 9.** Teores de cobre (em mg kg<sup>-1</sup>) nos grãos do feijoeiro, na matéria seca do milho (2 cultivos) e nas raízes e folhas do rabanete (médias de quatro repetições)<sup>1)</sup>

Tratamento	Feijão (grãos)	Milho		Rabanete	
		1º cult.	2º cult.	Raízes	Folhas
1 Test.	12 <sup>2)</sup>	3	3	3	4 bc
2 NPK	11	3	2	3	3 c
3 L1	13	2	2	2	3 c
4 L1 + M1	12	2	2	3	4 abc
5 L2	16	2	3	3	3 c
6 L2 + M2	15	3	3	4	5 abc
7 L2 + M4	20	3	3	4	6 a
8 L3	12	2	2	3	3 c
9 L3 - Calc	10	2	3	3	5 ab
<b>Médias</b>	<b>14</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>3,1</b>	<b>4,0</b>
<b>CV(%)</b>	50	25	25	19	20

<sup>1)</sup>Médias seguidas pela mesma letra, na coluna, não diferem entre si pelo teste de Tukey (p < 0,05); ausência de letras indica não significância estatística a esse nível.

<sup>2)</sup>Limite de detecção: 1 mg kg<sup>-1</sup> (ICP – OES).

As diferentes legislações são muito discordantes em relação aos limites de aplicação de cobre no solo, variando desde 40 kg ha<sup>-1</sup> na Dinamarca até 1.500 kg ha<sup>-1</sup> nos EUA (Anexo 2). Os critérios utilizados para o estabelecimento de normas que estabelecem os limites para o descarte de metais no solo podem ser, portanto, muito variáveis, conforme foi discutido por Giasson & Tedesco (2010).

### **Cádmio**

Os teores de cádmio em plantas cultivadas em áreas consideradas não contaminadas apresentam teores baixos deste metal (< 0,2 mg kg<sup>-1</sup>). As

concentrações maiores que 5 mg kg<sup>-1</sup> podem ser consideradas excessivas (ou tóxicas)(Anexo 12).

O Cd apresentou a maior mobilidade nas plantas, dentre os metais determinados no presente trabalho. Embora tenha sido aplicada uma pequena quantidade no tratamento com a maior adição deste metal (3,2 kg ha<sup>-1</sup> no tratamento L2 + M4), o mesmo foi facilmente absorvido pelas plantas (Tabela 10). Com a adição de lodo, entretanto, a absorção de Cd foi menor, mesmo na maior dose aplicada, situando-se os teores próximos aos determinados no tratamento testemunha.

**TABELA 10.** Teores de cádmio (em mg kg<sup>-1</sup>) nos grãos do feijoeiro, na matéria seca do milho (2 cultivos) e nas raízes e folhas do rabanete (médias de quatro repetições)<sup>1)</sup>

Tratamento	Feijão (grãos)	Milho (M.S.)		Rabanete	
		1º cult.	2º cult.	Raízes	Folhas
1 Test.	0,2 <sup>2)</sup>	< 0,1 c	< 0,1 b	0,8 abc	1,1 c
2 NPK	0,7	< 0,1 c	< 0,1 b	0,4 bc	0,6 c
3 L1	0,4	< 0,1 c	< 0,1 b	0,4 bc	0,4 c
4 L1 + M1	0,1	0,7 bc	0,4 ab	1,5 ab	4,0 b
5 L2	0,7	< 0,1 c	< 0,1 b	1,1 abc	0,4 c
6 L2 + M2	1,2	1,6 ab	0,3 ab	2,0 a	4,9 ab
7 L2 + M4	0,4	2,7 a	0,7 a	1,5 ab	5,5 a
8 L3	0,3	< 0,1 c	< 0,1 b	0,2 c	0,3 c
9 L3 - Calc	0,1	< 0,1 c	< 0,1 b	0,4 bc	1,0 c
<b>Médias</b>	0,6	0,6	0,6	0,9	2,0
<b>CV(%)</b>	168	85	102	57	29
<b>DMS(5%)</b>	1,9	1,2	0,4	1,2	1,4

<sup>1)</sup>Médias seguidas pela mesma letra, na coluna, não diferem entre si pelo teste de Tukey (p < 0,05); ausência de letras indica não significância estatística a esse nível.

<sup>2)</sup>Limite de detecção: 0,1 mg kg<sup>-1</sup> (ICP – OES).

Os teores de Cd no rabanete, em geral, foram maiores que no milho e nos grãos de feijão, indicando que esta cultura pode ser acumuladora do metal, principalmente nas folhas. Nos tratamentos com adição de lodo,

entretanto, os teores de Cd nas raízes foram menores que o limite inferior da faixa de concentração considerada tóxica ( $5 - 30 \text{ mg kg}^{-1}$ ), (Anexo 12).

Os teores médios de Cd nas plantas de azevém e pangola cultivados em 1991 (Anexo 15) foram maiores que os determinados no milho, indicando que a disponibilidade deste metal diminuiu com o tempo.

Deve-se ressaltar que a legislação americana adota o limite máximo de aplicação de Cd por lodo no solo de  $39 \text{ kg ha}^{-1}$ , bem maior que o admitido em outras legislações (Anexo 2). O estabelecimento da legislação americana foi proposto levando em consideração o risco de toxidez para humanos, por 13 rotas de possível contaminação, iniciando pela ingestão direta do solo. Foi adotado como limite o valor do maior risco. No caso do cromo, não houve consenso entre os estudiosos do assunto, ficando a decisão para futura deliberação (Anexo 2). A legislação da Comunidade Econômica Européia também adotou esta diretriz.

### **Níquel**

Os teores de níquel nas plantas de milho e rabanete situaram-se na faixa considerada normal ( $0,1 \text{ a } 1,0 \text{ mg kg}^{-1}$ ) em plantas de áreas não contaminadas (Tabela 11). Os teores médios do metal nos grãos de feijão, entretanto, foi de  $1,6 \text{ mg kg}^{-1}$ , indicando que pode ocorrer diferenças entre plantas na absorção do mesmo.

Os teores médios determinados nas culturas de 1991 e 1993 foram mais altos (Anexo 16), principalmente no azevém, indicando que a disponibilidade do metal diminuiu com o tempo.

**TABELA 11.** Teores de níquel (em mg kg<sup>-1</sup>) nos grãos do feijoeiro, na matéria seca do milho (2 cultivos) e nas raízes e folhas do rabanete (médias de quatro repetições)<sup>1)</sup>

Tratamento	Feijão (grãos)	Milho (M.S.)		Rabanete	
		1 <sup>o</sup> cult.	2 <sup>o</sup> cult.	Raízes	Folhas
1 Test.	1,4 <sup>2)</sup>	0,4	0,4	0,8	1,2 a
2 NPK	1,0	0,3	0,3	0,4	0,4 ab
3 L1	1,6	0,3	0,3	0,5	0,4 b
4 L1 + M1	1,2	0,3	0,3	0,4	1,0 ab
5 L2	1,7	0,3	0,3	0,4	0,4 ab
6 L2 + M2	1,3	0,6	0,4	0,5	0,7 ab
7 L2 + M4	3,4	0,5	0,3	0,5	0,8 ab
8 L3	1,6	0,4	0,3	0,3	0,4 ab
9 L3 - Calc	0,9	0,5	0,5	0,7	1,2 a
<b>Médias</b>	<b>1,6</b>	<b>0,4</b>	<b>0,3</b>	<b>0,5</b>	<b>0,7</b>
<b>CV(%)</b>	95	38	49	56	50
<b>DMS(5%)</b>	3,5	0,4	0,4	0,7	0,9

<sup>1)</sup>Médias seguidas pela mesma letra, na coluna, não diferem entre si pelo teste de Tukey (p< 0,05); ausência de letras indica não significância estatística a esse nível.

<sup>2)</sup>Limite de detecção: 0,1 mg kg<sup>-1</sup> (ICP – OES).

### Chumbo

Os teores de chumbo determinados nas plantas cultivadas neste estudo foram baixos, mesmo nos tratamentos com a adição do metal na forma de sal solúvel (total de 252 kg ha<sup>-1</sup> no tratamento L2 + M4), situando-se na faixa considerada normal em plantas (0,1 a 5,0 mg kg<sup>-1</sup>). Os teores determinados nas culturas de 1991 e 1993 também foram baixos (Anexo 17), indicando baixa disponibilidade deste metal.

No estudo de fracionamento de metais no solo conduzido por Gaivizzo (2001) foi observado que o Pb encontra-se nas frações mais estáveis do solo, como a orgânica e a residual (não identificada).

**TABELA 12.** Teores de chumbo (em mg kg<sup>-1</sup>) nos grãos do feijoeiro, na matéria seca do milho (2 cultivos) e nas raízes e folhas do rabanete (médias de quatro repetições)<sup>1)</sup>

Tratamento	Feijão (grãos)	Milho (M.S.)		Rabanete	
		1º cult.	2º cult.	Raízes	Folhas
1 Test.	0,8 <sup>2)</sup>	1,9	0,5	1,1	0,6 b
2 NPK	1,4	1,1	0,5	1,3	0,6 b
3 L1	0,4	1,2	0,6	0,2	0,3 b
4 L1 + M1	0,8	0,8	0,8	0,6	1,2 ab
5 L2	0,3	1,4	0,6	1,7	0,4 b
6 L2 + M2	0,3	1,2	0,5	0,8	1,5 ab
7 L2 + M4	0,6	1,1	0,4	0,6	2,2 a
8 L3	1,1	1,1	0,4	3,0	0,3 b
9 L3 - Calc	< 0,1	0,9	2,6	0,2	1,1 ab
<b>Médias</b>	<b>0,7</b>	<b>1,2</b>	<b>0,8</b>	<b>1,0</b>	<b>0,9</b>
<b>CV(%)</b>	175	33	197	167	61
<b>DMS(5%)</b>	2,5	0,9	3,5	2,9	1,3

<sup>1)</sup>Médias seguidas pela mesma letra, na coluna, não diferem entre si pelo teste de Tukey (p < 0,05); ausência de letras indica não significância estatística a esse nível.

<sup>2)</sup>Limite de detecção: 0,3 mg kg<sup>-1</sup> (ICP – OES).

## 5. CONCLUSÕES

Os resultados obtidos possibilitam concluir que:

1. a adição de corretivo da acidez em quantidade adequada para atingir o nível de pH 6,5, foi eficiente em neutralizar a acidez ativa do solo por um período de tempo de oito anos, suprimindo, ao mesmo tempo, as necessidades de Ca e Mg para as plantas.
2. o K é facilmente lixiviado neste solo, sendo necessária reposição freqüente do mesmo pela adubação.
3. o lodo supriu a quantidade de P necessária para obter desenvolvimento adequado das plantas, mesmo após 18 anos da última aplicação.
4. a redução da acidez do nível do pH em água de 5,3 para 6,4 não afetou significativamente os teores de Cu, Zn, Ni, Pb e Cd totais do solo, bem como os teores de Cu e Zn extraíveis.
5. a adição de metais ao lodo, nas quantidades utilizadas, não afetou a produção de matéria seca do milho e o rendimento de grãos do feijoeiro ou de raízes do rabanete.
6. os teores dos metais Zn, Cu, Cd, Ni e Pb nas plantas situaram-se na faixa de ocorrência considerada normal em plantas cultivadas em solos não contaminados.
7. mantida a composição média atual do lodo, e a taxa de aplicação praticada, a vida útil da Fazenda de Lodo do SITEL/CORSAN poderá ser estendida até o ano de 2.045, em que a quantidade de zinco aplicado atingirá o valor limite fixado para sua operação.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDOU, F.M.; EL-NENNAH, M. Effect of irrigating loamy sand soil by liquid sewage sludge on its content of some micronutrients. **Plant and Soil**, The Hague, v.56, p. 53-57, 1980.

ABD-ELFATTAH, A.; WADA, K. Adsorption of lead, copper, zinc, cobalt, and cadmium by soils that differ in cation-exchange materials. **Journal of Soil Science**, Oxford, v.32, p.271-283, 1981.

ACCIOLY, A.M.A.; SIQUEIRA J.O. Contaminação química e biorremediação do solo. In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ V.V.H.; SCHAEFER, C.E.G.R., Eds. **Tópicos em Ciência do solo**. Viçosa, MG, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000. P.299-352.

ALEXANDER, M.I.H. **Introduction to soil microbiology**. 2 ed. New York: John Wiley, 1977. 472p.

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

ALLOWAY, B. J. The origins of heavy metals in soils. In ALLOWAY, B. J. (Ed.) **Heavy metals in soils**. 2 ed. New York: Chapman & Hall, 1995.

ANDREOLI, C. V.; **Uso e manejo do lodo de esgoto na agricultura e sua influência em características ambientais no agroecossistema** - Curitiba, 1999. Tese (Doutorado em Meio Ambiente e Desenvolvimento - NIMAD) – Universidade Federal do Paraná. 279p.

ARDUINI, I.; GODBOLD, D.L.; ONNIS, A. Cadmium and copper uptake and distribution in Mediterranean tree seedlings. **Physiologia Plantarum**, Sweden, 97:111-117, 1996.

BACKER, A.J.M. Accumulators and excluders – strategies in the response of plants to heavy metals. **Journal of Plant Nutrition**, Philadelphia, v.3, n. 1-4, p. 643-654, 1981.

BERNAL, M.P.; SÁNCHEZ-MONEDERO, M.A.; PAREDES, C. & ROIG, A. Carbon mineralization from organic wastes at different composting stages during their incubation with soil. **Agricultural Ecosystems and Environment**, 69:175-189, 1998.

BERTON, R.S. Riscos de contaminação do agroecossistema com metais pesados. In: BETTIOL, W.; CAMARGO, O.A. (Eds.) **Impacto ambiental do uso agrícola de lodo de esgoto**. Jaguariúna, SP: EMBRAPA Meio Ambiente, 2000. p. 259 - 268.

BERRY, W.L. Plant factors influencing the use of plant analysis as a tool for biogeochemical prospecting. In CARLISE, D.; BERRY, W.L.; KAPLAN, I.R.; WATTERSON, J.R. (Eds.) **Mineral exploration: biological systems and organic matter**. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1986. v.5.

BETTIOL, W.; CAMARGO, O. A. (Ed.). **Impacto ambiental do uso agrícola do lodo de esgoto**. Jaguariúna: Embrapa, 2000.

BISSANI, C.A; GIANELLO, C.; CAMARGO, F.A.O.; TEDESCO, M.J. **Fertilidade dos Solos e Manejo da Adubação de Culturas**. 2ª ed.. Departamento de Solos, UFRGS/Editora METRÓPOLE. 2008. 344p

CANELLAS, L.P.; VELOSSO, A.C.X.; MARCIANO, C.R.; RAMALHO, J.F.G.P.; RUMJANEK, V.M.; REZENDE, P.B.C.; SANTOS, G.A. Propriedades químicas de um Cambissolo cultivado com cana-de-açúcar, com preservação do palhço e adição de vinhaça por longo tempo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, 27:935-944, 2003.

CASTRO, L.A.R. **Efeito do lodo de esgoto como recuperador de áreas degradadas com finalidade agrícola**, Curitiba, 2000. Monografia (graduação) – Universidade Federal do Paraná, 297p.

CEC (Council of the European Communities). Council directive on the protection of the environment and in particular of the soil, when sludge is used in agriculture. **Official Journal of the European Communities**, Luxemburgo, n.181, p. 6-12, 1986.

CETESB. (Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental – São Paulo). **Relatório de Estabelecimento de Valores Orientadores para Solos e Águas Subterrâneas no Estado de São Paulo**. DOROTHY C.P.; CASARINI, D.C.P. et al., Ed. São Paulo: CETESB, 2001. 73p. (Série Relatórios Ambientais).

CHANG, A.C.; HYUN, H.; PAGE, A.L. Cadmium uptake for swiss chard grown on composted sewage sludge treated. Field plots: plateau or time bomb? **Journal of Environmental Quality**, Madison, v.26, p.11-19, 1997.

CHRISTENSEN, B.T. Physical fractionation of soil and organic matter in primary particle size and density separates. **Advances in Soil Science**, Oxford, v.20, p.1-90, 1992.

CHRISTENSEN, B.T. Carbon in primary and secondary organo-mineral complexes. In: CARTER, M.R.; STEWART, B.A. (Ed.). **Structure and organic matter storage in agricultural soil**. Boca Raton: CRC Press, 1996. p.97-165.

CONAMA (Conselho Nacional do Meio Ambiente). **Resolução Nº 359 de 29 de agosto de 2006**. (Define critérios e procedimentos para o uso agrícola de lodos de esgoto gerados com estações de tratamento de esgoto, saneamento e seus produtos derivados, e dá outras providências); DOU Nº 167 de 30 de agosto de 2006; p. 141-146.

COSCIONE, A.R.; NOGUEIRA, T.A.R.; PIRES, A.M.M. Eds. Botucatu: FEPAF.IV. UNESP. Faculdade de Ciências Agrônomicas. 2010 pp. 171-196.

COSTA, C.N.; MEURER, E.J.; BISSANI, C.A. & SELBACH, P.A. Contaminantes e poluentes do solo e do ambiente. In: MEURER, E.J. **Fundamentos de química do solo**. 2 ed. Porto Alegre, Gênese, 2004. p.239-281.

EPSTEIN, E. **Mineral nutrition of plants: principles and perspectives**. Department of Soils and Plant Nutrition. University of California, Davis. Ed. John Wiley and sons, Inc. USA. p. 273. 1972.

ERP, P. J.; LUNE, P.V. Long term heavy metal leaching from soils. Sewage sludge and soil. Sewage sludge mixtures. **Treatment and use of sewage sludge and liquid agricultural wastes**, L'ERMITE, P. (Ed.) (Commission of European communities, Brussels, Belgium). Elsevier Applied Science. P. 122-127. 1991.

GAIVIZZO, L.H.B. **Fracionamento e mobilidade de metais pesados em solo com descarte de lodo industrial**. Programa de Pós-graduação em Ciência do Solo, UFRGS, Porto Alegre. 2001. 125p.

GIASSON, E.; TEDESCO, M.J. Classificação das terras e quantidades máximas de metais pesados a adicionar por lodo de esgoto. In: **Uso agrícola do lodo de esgoto** – Avaliação após a resolução nº 375 do CONAMA.

GOMES, P.C. **Fracionamento e biodisponibilidade de metais pesados por calagem e concentrações de metais em Latossolo Vermelho-amarelo**. Viçosa: UFV, 1996. 161f. Tese (Doutorado em Solos) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1996.

GRIEBEL, G.E. Use of composted sewage sludge in revegetation of surfacemined areas. In: SOPPER, W.E. (Ed). **Utilization of municipal sewage effluent and sludge on forest and disturbed land**. University Park, PA: Pennsylvania State University, 1979.

HAYES, F.F.; TRAINA, S.J. Soil Chemistry and ecosystem health. In: HUANG, P.N. (Ed.). **Metal ion speciation and its significance in ecosystem health**. Madison: SSSA, 1998. p.45-84.

HINESLY, T.D.; LARRY, G.H; DONALD, J.B.; KURT, E.R. Transfer of sludgeborne cadmium through plants to chickens - **Agricultural Food Chemistry**, Champaign, v. 33, 173-180, 1985.

HSIEH, Y.O.; DOUGLAS, L.A.; MOTTO, H.L. Modeling sewage sludge decomposition in soil. I Organic carbon transformation. **Journal of Environmental Quality**, Madison, v.10, p. 54 – 159, 1981.

KABATA-PENDIAS, A.; PENDIAS, H. **Trace elements and soils and plants**. 3 ed. Boca Raton, Flórida, CRC Press, 2001, 331p.

KLAMT, E.; TEDESCO, M.J.; COGO, N.P. **Levantamento semi-detalhado dos solos da área destinada ao descarte de efluentes líquidos do Pólo Petroquímico (Município de Triunfo, RS)**. Departamento de Solos, UFRGS/Magma Engenharia. Porto Alegre. 1982. 42p.

LIMA, I.V. de; PEDROZZO, M. de F. M. **Ecotoxicologia do ferro e seus compostos**. Salvador: CRA – Centro de Recursos Ambientais, 2001. (Série Cadernos de Referência Ambiental CRA, v. 4).

MALAVOLTA, E. **Elementos de nutrição mineral de plantas**. São Paulo: Agronômica Ceres, 1980. 252p.

MARQUES, M.O. **Incorporação de lodo de esgoto em solo cultivado com cana-de-açúcar**. Jaboticabal, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinária, 1996. 111p. (Tese de Livre Docência)

MARQUES, M.O.; MELO, W.J. de; MARQUES, T. A. Metais pesados e o uso de bio-sólidos na agricultura – In: **Bio-sólidos na Agricultura** – TSUTIYA M.T.; COMPARINI, J.B.; SOBRINHO, P.A.; et al., Eds. São Paulo: SABESP, 2001. 468p.

McBRIDE, M.B. **Environmental chemistry of soil**. New York: Oxford, 1995. 406p.

McGRATH, S.P. Chromium and nickel. In: ALLOWAY, B.S. **Heavy metals in soils**. New York: John Wiley, 1990. P. 152-178.

McGRATH, S.P.; CEGARRA, J. Chemical extractability of heavy metals during and after long-term applications of sewage sludge to soil. **Journal of Soil Science**, Oxford, v.43, p.313–321, 1992.

McGRATH, S.P.; ZHAO, F.J.; DUNHAM, S. J.; CROSLAND, A.R.; COLEMAN, K. Long-term changes in the extractability and bioavailability of zinc and

cadmium after sludge application. **Journal of Environmental Quality**. Madison, 29:875-883, 2000.

MELO, W.J.; MARQUES, M.O.; MELO, V. P. O uso agrícola do biossólido e as propriedades do solo - *in* **Biossólidos na Agricultura** – TSUTIYA, M. T.; COMPARINI, J.B.; SOBRINHO, P.A.; et al., Eds. São Paulo: SABESP, 2001. 468p.

MEURER, E. (Ed.) **Fundamentos de Química do Solo**. 3ª Ed. Departamento de Solos, UFRGS/Edit. EVANGRAF. 2006. 285p.

McBRIDE, M.B. Toxic metal accumulation from agricultural use of sludge: Are USEPA regulations protective? **Journal of Environmental Quality**, Madison, v.24, n.1, p. 5 – 18, 1995.

NOLAN, W. **Design, operation and monitoring sludge and application system**. Project for CORSAN/COPEL wastewater treatment facility. Wilson Nolan Inc., Oklahoma City, U.S.A. 1982. 102p.

OLIVEIRA, F.C.; MATTIAZZO, M.E.; MARCIANO, C.R. & ROSSETO, R. Efeitos de aplicações sucessivas de lodo de esgoto em um Latossolo Amarelo distrófico cultivado com cana-de-açúcar: Carbono orgânico, condutividade elétrica, pH e CTC. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Piracicaba, SP, 26:505-519, 2002.

OVERCASH, R.M.; PAL, D. **Metals. In: Design of land treatment systems for industrial wastes: theory and practice**. Michigan : Ann Arbor Science, 1981. p.389–457.

PAIS, I.; JONES Jr., J.B. **The handbook of trace elements**. Boca Raton: St. Lucie, Flórida, 1997. 223p.

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

RS (1982). (Diário Oficial do Estado do Rio Grande do Sul). Lei nº 7.691/82 – **Dispõe sobre os resíduos líquidos do Pólo Petroquímico do Sul**. Porto Alegre, 07 de julho de 1982.

SANTOS, D.S.; ANDRADE; C.A. & MATTIAZZO, M.E. **Degradação da fração orgânica de lodos de esgotos após aplicação no solo**. In: FERTBIO, Rio de Janeiro, 2002. Anais. Rio de Janeiro, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2002. CD-ROM

SBCS/NRS (Sociedade Brasileira de Ciência do Solo/Núcleo Regional Sul) Comissão de Química e Fertilidade do Solo – RS/SC. **Recomendações de**

**adubação e calagem para os Estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina.** 10 ed. Porto Alegre: SBCS/NRS, 2004. 400p.

SCHIRADO, T.; VERGARA, I.; SCHALSCHA, E.B.; PRATT, P.F. Evidence for movement of heavy metals in a soil irrigated with untreated wastewater. **Journal Environmental Quality**, Madison, v.15, n.1, p.9-12, 1986.

SCOLMEISTER, D. **Biodisponibilidade de metais pesados em solos do Rio Grande do Sul.** 1999. 78f. Dissertação (Mestrado). PPGCS, Faculdade de Agronomia, UFRGS, Porto Alegre, 1999.

SHAW, A.J. **Heavy metal tolerance in plants: Evolutionary aspects.** New York, CRC Press, 1989. 355p.

SIEGENTHALER, A. F.; STAUFFER, W. Environmental effects of long term slurry and sewage sludge application: reasons and measures. **Treatment and use of sewage sludge and liquid agricultural wastes**, L'ERMITE, P. (Ed), (Commission of European communities, Brussels, Belgium). Elsevier Applied Science. Pages 82-89 (1991).

SIMS, J.T.; CUNNINGHAM, S.D.; SUMNER, M.E. Assessing soil quality for environmental purposes: roles and challengers for soil scientists. **Journal of Environmental Quality**, Madison, v.26, p.20-25,1997.

SIMON, N.Z.; BALDASSO, M.L.; GAZEN, A.I. **Sistema de disposição final de efluentes do SITEL sobre o solo – Critérios de projeto e primeiros resultados.** 13º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. Agosto, 1985a. Maceió, Al. 61p. (não publicado)

SIMON, Z.; BALDASSO, M.L.; FLORES, P.G. **SITEL: uma solução agrícola para o lodo.** 13º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. Agosto, 1985b. Maceió, Al. 76 p. (não publicado)

SIMON, N.Z.; TEDESCO, M.J.; COGO, N.P.; SCHNEIDER, P. **Modificações das propriedades físicas e químicas do solo pela aplicação de efluente petroquímico tratado.** Relatório final encaminhado ao SITEL/CORSAN. Departamento de Solo, UFRGS, 1986a. 46p.

SPARKS, D.L. **Environmental soil chemistry.** San Diego: Academic Press, 1995. 267p.

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

STEVENSON, F.J. **Humus chemistry: genesis, composition, reactions.** 2.ed. New York: John Wiley & Sons, 1994. 496p.

STRECK, E.V.; KAMPF, N.; DALMOLIN, R.S.D., KLAMT, E.; NASCIMENTO, P.C.; SCHNEIDER, P. **Solos do Rio Grande do Sul.** 2ª ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2008. 222p.

TEDESCO, M.J.; LIGO, M.; GIANELLO, C.; SIMON, Z. **Subsurface injection of activated sludge: response of two grass species**. 13th IAWPRC BIENNIAL INTERNATIONAL CONFERENCE (Pre-conference Seminar – use of soil for treatment and disposal of effluents and sludge). IAWPRC/ABES, Agosto, 1986a (Pre-prints). Salvador. pp. 39-48.

TEDESCO, M.J.; LIGO, M.; SIMON, Z.; GIANELLO, C. **Efeito da aplicação de lodo da estação de tratamento do SITEL/CORSAN na absorção de nutrientes e metais pesados pelas plantas** (primeiro ano de cultivo); Porto Alegre: SITEL/CORSAN : FUNDATEC : Departamento de Solos da UFRGS, 1986b. 212p. Relatório Final.

TEDESCO, M.J.; GIANELLO, C.; SIMON, Z. e outros. **Efeito da aplicação do lodo da estação de tratamento na absorção de nutrientes e metais pesados pelas plantas** (segundo ano de cultivo). Porto Alegre: SITEL/CORSAN: FUNDATEC : Departamento de Solos da UFRGS, 1987. 113p. Relatório Final.

TEDESCO, M.J.; LIGO, M.; GIANELLO, C.; SIMON, Z. Effect of petrochemical activated sludge on soil properties. **Water Science and Technology**. London, v. 20, n. 10, p. 63-74, 1988a.

TEDESCO, M.J.; GIANELLO, C.; SCOLMEISTER, D.; SIMON, Z.; BALDASSO, M. **Estudo de seleção de plantas para introdução em área de disposição de efluente líquido por aspersão**. Relatório final encaminhado ao SITEL/CORSAN. Departamento de Solos da UFRGS. 1988b. 176p.

TEDESCO, M.J.; GIANELLO, C.; VOLKWEISS, S.J.; SIMON, Z. e outros. **Efeito da aplicação do lodo da estação de tratamento do SITEL/CORSAN na absorção de nutrientes e metais pesados pelas plantas** (3º e 4º anos) - Porto Alegre : SITEL/CORSAN : FUNDATEC : Departamento de Solos da UFRGS, 1989. 120 p. Relatório Final.

TEDESCO, M.J.; FLORES, A.I.; GIANELLO, C.; SIMON, Z. **Acompanhamento das modificações de solo e plantas que ocorrem com o tempo de aplicação de efluente gerado pelo SITEL/CORSAN**. Relatório final encaminhado ao SITEL/CORSAN. Departamento de Solos, UFRGS. 1990. 83p.

TEDESCO, M. J.; GIANELLO, C; BISSANI, C.A.; SIMON, Z e outros. 1991. **Efeito da aplicação do lodo da estação de tratamento do SITEL/CORSAN nas plantas e no solo** (5º e 6º anos - 1989/91) - Porto Alegre (Relatório final). Fac. De Agronomia, UFRGS. Porto Alegre. 1991. 149p.

TEDESCO, M.J.; BISSANI, C.A.; RIBAS, P.I.F.; MOHRDIECK, F.G., CARVALHO, E.B. **Long term effects of petrochemical activated sludge on plants and soil. Modification of soil properties**, 3<sup>rd</sup> INTERNATIONAL CONFERENCE ON WASTE MANAGEMENT IN THE CHEMICAL AND PETROCHEMICAL INDUSTRIES. NEW TECHNOLOGIES AND PRACTICES

FOR WASTE MINIMIZATION. Pré-prints, Vol. II. Salvador (Bahia) 1993a. pp. 237-243.

TEDESCO, M.J.; GIANELLO, C.; RIBAS, P.I.F.; CARVALHO, E.B. **Long term effects of petrochemical activated sludge on plants and soil. Plant growth and metals absorption.** 3<sup>rd</sup> INTERNATIONAL CONFERENCE ON WASTE MANAGEMENT IN THE CHEMICAL AND PETROCHEMICAL INDUSTRIES: NEW TECHNOLOGIES AND PRACTICES FOR WASTE MINIMIZATION. Pré-prints, Vol. I. Salvador (Bahia)1993b. pp. 371-378.

TEDESCO, M.J.; GIANELLO, C.; SIMON, Z. **Efeito residual da aplicação do lodo da estação de tratamento do SITEL/CORSAN nas plantas e no solo.** Departamento de Solos, UFRGS – Relatório Final. 1993c. 38p.

TEDESCO, M.J.; GIANELLO, C.; BISSANI, C.A.; BOHNEN, H.; VOLKWEISS, S.J.. **Análises de solos, plantas e outros materiais.** 2 ed. Porto Alegre: Departamento de Solos, UFRGS, 1995. 174p. (Boletim técnico, 5).

TEDESCO, M.J.; GIANELLO, C.; SIMON, Z. **Avaliação do efeito da adição de titânio e vanádio no solo para as plantas /** Relatório final das culturas de milho e aveia (2000). Departamento de Solos, UFRGS, 2001. 45p.

TEDESCO, M.J.; GIANELLO, C.; GIASSON, E. **Avaliação do sistema de aplicação de lodo no solo (Fazenda de Lodo) do SITEL/CORSAN.** Relatório Técnico de consultoria para CSD – Geoclock Ltda. Porto Alegre, 2004a. 48p.

TEDESCO, M.J.; GIANELLO, C.; GIASSON, E. **Avaliação do sistema de disposição final no solo de efluente líquido produzido pelo SITEL/CORSAN.** Relatório Técnico de consultoria para CSD – Geoclock Ltda. Porto Alegre, 2004b. 34 p.

TERRY, R.E.; NELSON, D.W.; SOMMERS, L.E. Carbon cycling during sewage sludge decomposition in soils. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, v.43, p.494–499, 1979.

TESTER, C.F. Organic amendment effects on physical and chemical properties of a sandy soil. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, v. 54, p. 827 - 831, 1990.

USEPA. United States Environmental Protection Agency) **Standards for the use and disposal of sewage sludge.** Washington: EPA, 1996. (Code of Federal Regulations 40 CFR Part 503).

VAZ, L.M.S. & GONÇALVES, J.L.M. Uso de biossólidos em povoamento de *Eucalyptus grandis*: Efeito em atributos químicos do solo, no crescimento e na absorção de nutrientes. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Piracicaba, 26:747-758, 2002.

VERKLEIJ, J.A.C.; PAREST, J.E. Cadmium tolerance and co-tolerance in *Silene vulgaris* (Moench.) Garcke [ *S. cucubalus* (L.) Willb.]. **The New Phytologist**, 111:637-645, 1989.

VERKLEIJ, J.A.C.; SCHAT, H. Mechanisms of metal tolerance in higher plants. In: SHAW, A.J. (Ed.) **Heavy metal tolerance in plants: evolutionary aspects**. Boca Raton: CRC Press, 1990. P. 195 – 215.

ZONTA, E. P.; MACHADO, A. A. **SANEST**: sistema de análise estatística para microcomputadores. Piracicaba: CIAGRUESALQ, 1993. 138p.

**ANEXO 1.** Tratamentos utilizados nos dois primeiros anos do experimento<sup>1)</sup>

Nº	Tratamento	Espécies cultivadas	
		Inverno	Verão
1	Testemunha	Azevém	Pangola
2	Completo (macro, micronutrientes e calcário)	Azevém	Pangola
3	Completo menos N	Azevém	Pangola
4	Completo menos P	Azevém	Pangola
5	Completo menos K	Azevém	Pangola
6	Completo menos micronutrientes e calcário	Azevém	Pangola
7	5 aplicações por ano de 4 t de lodo ha <sup>-1</sup>	Azevém	Pangola
8	5 aplicações por ano de 8 t de lodo ha <sup>-1</sup>	Azevém	Pangola
9	3 aplicações por ano de 8 t de lodo ha <sup>-1</sup>	Azevém	Pangola
10	3 aplicações por ano de 24 t de lodo ha <sup>-1</sup>	Azevém	Pangola
11	Testemunha	Aveia	Milheto
12	Completo (macro, micronutrientes e calcário)	Aveia	Milheto
13	5 aplicações por ano de 4 t de lodo ha <sup>-1</sup>	Aveia	Milheto
14	5 aplicações por ano de 8 t de lodo ha <sup>-1</sup>	Aveia	Milheto
15	3 aplicações por ano de 24 t de lodo ha <sup>-1</sup>	Aveia	Milheto

<sup>1)</sup> Quantidades de lodo calculados com base no teor de matéria seca, considerando-se a área do vaso de 0,07068m<sup>2</sup> (TEDESCO et al., 1986).

**ANEXO 2.** Quantidades cumulativas máximas de metais que podem ser aplicadas no solo conforme as legislações de alguns países e estados do Brasil

<b>País/Estado</b>	<b>Cd</b>	<b>Cr</b>	<b>Cu</b>	<b>Hg</b>	<b>Ni</b>	<b>Pb</b>	<b>Zn</b>
	----- kg ha <sup>-1</sup> -----						
USA <sup>1)</sup>	39	-	1.500	17	420	300	2.800
CEE <sup>2)</sup>	1,5	-	120	2,0	30	150	300
Dinamarca <sup>3)</sup>	0,5	30	40	0,5	15	40	100
-----							
Brasil:							
CESTESB (SP) <sup>4)</sup>	41	-	1.500	17	420	300	2.800
FEPAM (RS) <sup>5)</sup>	5	1.000	280	2	70	1.000	560
IAP (Pr) <sup>6)</sup>	1,0	50	50	0,8	15	37,5	125
CONAMA <sup>7)</sup>	4	154	137	1,2	74	41	445
SITEL/CORSAN <sup>8)</sup>	10	225	250	5	100	1.000	500

<sup>1)</sup> United States Environmental Protection Agency (USEPA, 1996)

<sup>2)</sup> CEC/Comunidade Econômica Européia (CEC, 1986)

<sup>3)</sup> Andreoli et al. (1999)

<sup>4)</sup> CETESB/Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (2001)

<sup>5)</sup> Rodrigues et al. (1993)

<sup>6)</sup> IAP/Instituto Ambiental do Paraná (2003)

<sup>7)</sup> CONAMA/Conselho Nacional do Meio Ambiente (2006)

<sup>8)</sup> Nolan (1982).

**ANEXO 3.** Matéria orgânica e Índice SMP (nas três camadas), massa do solo e densidade da camada superficial (médias de quatro repetições)

Determinação / camada	Tratamentos									Anál. Est. <sup>1)</sup> CV (%) DMS (5%)
	1 Test.	2 NPK	3 L1	4 L1+M1	5 L2	6 L2+M2	7 L2+M4	8 L3	9 L3-Cal	
<b>Índice SMP:</b>										
A	6,0 B	6,5 abA	6,2 bAB	6,3 bAB	6,1 bB	6,2 bAB	6,0 bB	6,0 bB	5,3 bC	CV = 3
B	6,0 B	6,7 aA	6,7 aA	6,7 aA	6,8 aA	6,6 aA	6,6 aA	6,6 aA	5,8 aB	*DMS = 0,3
C	5,8 B	6,3 bA	6,3 bA	6,3 bA	6,5 aA	6,2 bA	6,3 aA	6,3 abA	5,5 abB	**DMS= 0,4
<b>Matéria orgânica (% m v<sup>-1</sup>)</b>										
A	1,9 C	1,8 C	4,6 aBC	5,2 aB	6,8 aB	6,3 aB	6,5 aB	9,9 aA	10,0 aA	CV = 55
B	0,5	0,6	0,7 b	0,8 b	0,7 b	0,8 b	0,8 b	1,6 b	0,9 b	*DMS = 2,3
C	0,7	0,7	0,7 b	0,8 b	0,7 b	0,7 b	0,7 b	0,8 b	0,7 b	**DMS= 3,0
<b>Massa do solo (kg vaso<sup>-1</sup>)</b>										
A	8,7 BC	7,8 C	10,2 ABC	10,4 ABC	10,5 ABC	11,5 AB	11,0 ABC	12,4 A	12,6 A	CV = 13 DMS= 3,2
<b>Densidade do solo</b>										
A	1,3	1,2	1,2	1,2	1,1	1,1	1,1	1,0	0,9	CV = 55 DMS = 1,0

<sup>1)</sup> Médias seguidas de mesma letra minúscula, na coluna, e mesma letra maiúscula, na linha, não diferem entre si pelo teste de Tukey (p<0,05); ausência de letras indica não significância entre camadas e/ou entre tratamentos.

\*DMS entre camadas (A, B e C).

\*\*DMS entre tratamentos(1 a 9).

**ANEXO 4.** Carbono orgânico, nitrogênio total, fósforo, potássio e enxofre do solo das camadas A (até 20 cm de profundidade), B (20 a 40 cm) e C (40 a 60 cm) após 16 anos da última aplicação de lodo (médias de quatro repetições)

Determinação / camada	Tratamentos									Anál. Est. <sup>1)</sup> CV (%) DMS (5%)
	1 Test.	2 NPK	3 L1	4 L1+M1	5 L2	6 L2+M2	7 L2+M4	8 L3	9 L3-Cal	
<b>C orgânico (g kg<sup>-1</sup>):</b>										
A	0,8 CD	0,8 D	2,5 aBCD	3,0 aBCD	4,1aB	3,7 aBC	3,9 aB	8,2 aA	8,6 aA	CV = 79 *DMS = 2,1 **DMS= 2,8
B	0,3	0,3	0,5 b	0,6 b	0,5 b	0,6 b	0,5 b	1,0 b	0,6 b	
C	0,4	0,4	0,3 b	0,3 b	0,3 b	0,3 b	0,3 b	0,4 b	0,3 b	
<b>N total (g kg<sup>-1</sup>):</b>										
A	0,06 C	0,06 C	0,09 C	0,09 aC	0,13 aBC	0,12 aBC	0,11 aC	0,2 aB	0,3 aA	CV = 54 *DMS = 0,60 **DMS= 0,77
B	0,03	0,03	0,03	0,04 ab	0,03 b	0,03 b	0,03 b	0,04 b	0,03 b	
C	0,03	0,02	0,03	0,03 b	0,02 b	0,04 b	0,03 b	0,04 b	0,03 b	
<b>Relação C orgânico / N total:</b>										
A	13,3 AB	13,3 AB	29,4 AB	32,6 AB	32,3 B	30,1 B	36,4AB	41,6 aA	30,5 B	CV = 89,2 *DMS = 14,6 **DMS= 19,5
B	9,4	9,4	16,7	17,1	16,7	18,7	18,5	27,0	18,7	
C	13,3	16,0	10,0	9,4	10,0 a	8,1 a	10,0 a	10,8 b	9,4 a	

Continua

**ANEXO 4.** Continuação

Determinação / camada	Tratamentos									Anál. Est. CV (%) DMS (5%)
	1 Test.	2 NPK	3 L1	4 L1+M1	5 L2	6 L2+M2	7 L2+M4	8 L3	9 L3-Cal	
<b>P disponível (mg dm<sup>-3</sup>):</b>										
<b>A</b>	14 C	22 C	156 aB	207 aAB	303 aA	283 aAB	317 aA	331 aA	328 aA	CV = 73
<b>B</b>	2	3	9 b	16 b	16 b	16 b	14 b	72 b	33 b	*DMS = 99
<b>C</b>	3	3	3 b	4 b	4 b	4 b	4 b	7 b	5 b	**DMS = 132
<b>K disponível (mg dm<sup>-3</sup>):</b>										
<b>A</b>	33 abABC	44 aA	32 aABC	34 aAB	25 ABC	33 aABC	24 ABC	19 BC	14 C	CV = 43
<b>B</b>	44 aA	22 bB	18 abB	16 bB	17 B	16 bB	15 B	14 B	23 B	*DMS = 15
<b>C</b>	18 b	15 b	12 b	13 b	13	12 b	11	11	27	**DMS = 20
<b>S extraível (mg dm<sup>-3</sup>)</b>										
<b>A</b>	11 A	9 A	10 A	8 A	11 A	9 A	10 A	12 A	9 cA	CV = 79
<b>B</b>	7 B	5 B	5 B	6 B	6 B	5 B	5 B	13 B	49 bA	*DMS = 16
<b>C</b>	7 B	5 B	7 B	7 B	10 B	8 B	7 B	13 B	70 aA	**DMS = 21

<sup>1)</sup> Médias seguidas de mesma letra minúscula, na coluna, e mesma letra maiúscula, na linha, não diferem entre si pelo teste de Tukey (p<0,05); ausência de letras indica não significância entre camadas e/ou entre tratamentos.

\*DMS entre camadas (A, B e C).

\*\*DMS entre tratamentos(1 a 9).

**ANEXO 5.** Características da camada superficial do solo após 15 dias da correção e da adubação (médias de quatro repetições)<sup>1)</sup>

Tratamentos	pH	Índice SMP	----- mg dm <sup>-3</sup> -----			----- cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> -----				
			P	K	S	Ca	Mg	Al	H + Al	CTC
<b>1 Test.</b>	4,1 c	5,9 b	30 f	214 a	213 a	2,4 ef	0,3 f	1,1 b	5,0 b	8,4 de
<b>2 NPK</b>	6,1 b	6,8 a	55 ef	171 ab	17 b	3,3 de	1,1 e	0,0 c	1,9 c	6,7 e
<b>3 L1</b>	6,3 ab	6,6 a	108 de	133 ab	10,5 b	4,4 cd	1,5 de	0,0 c	2,3 c	8,5 de
<b>4 L1 + M1</b>	6,4 a	6,6 a	159 d	149 b	11 b	5,2 bc	1,7 cd	0,0 c	2,2 c	9,5 cd
<b>5 L2</b>	6,3 ab	6,6 a	315 b	120 b	15 b	5,1 bc	1,7 cd	0 c	2,4 c	9,4 cd
<b>6 L2 + M2</b>	6,5 a	6,7 a	234 c	133 b	11 b	5,3 bc	1,9 bc	0,0 c	1,9 c	9,5 cd
<b>7 L2 + M4</b>	6,6 a	6,7 a	271 bc	140 b	13 b	6,3 ab	2,1 ab	0,0 c	2,0 c	10,8 bc
<b>8 L3</b>	6,4 a	6,5 a	407 a	112 b	36 b	7,6 a	2,4 a	0,0 c	2,5 c	12,7 ab
<b>9 L3 - Cal</b>	4,0 c	5,1 c	425 a	120 b	231 a	1,3 f	0,3 f	2,5 a	11,9 a	13,9 a
<b>CV (%)</b>	2	2	14	21	36	12	12	22	17	9
<b>DMS (5%)</b>	0,3	0,3	73	71	53	1,3	0,4	0,2	1,5	2,2

Continua

**ANEXO 5. Continuação**

Tratamentos	Cu		Zn		Cd	Ni	Pb
	extraível	total	extraível	total		total	
----- mg dm <sup>-3</sup> -----							
<b>1 Test.</b>	2,4 cd	5,4 c	4,8 a	15,1 b	0,10	1,89	18,4 c
<b>2 NPK</b>	2,5 cd	5,7 c	5,0 a	22,7 b	0,10	3,87	17,0 c
<b>3 L1</b>	2,0 d	7,0 c	11,5 b	42,2 b	0,16	5,69	16,1 c
<b>4 L1 + M1</b>	9,3 bc	16,4 c	23,3 bc	79,3 ab	1,17	6,90	28,7 c
<b>5 L2</b>	2,5 cd	7,4 c	22,0 cd	71,7 ab	0,20	6,54	15,5 c
<b>6 L2 + M2</b>	14,5 b	30,1 b	33,3 de	79,5 ab	2,50	8,08	45,8 b
<b>7 L2 + M4</b>	27,7 a	50,0 a	63,5 e	116,8 a	2,80	7,35	83,1 a
<b>8 L3</b>	6,6 cd	9,4 c	60,0 e	79,1 ab	0,40	6,59	16,8 c
<b>9 L3 - Calc</b>	2,9 cd	14,3 c	5,6 e	71,3 ab	0,70	8,77	23,7 c
<b>CV (%)</b>	38	36	18	48	166	56	22
<b>DMS (5%)</b>	7,2	13,4	11,2	72,7	2,50	7,50	18,4

<sup>1)</sup>Médias seguidas de mesma letra, na coluna, não diferem entre si pelo teste de Tukey (p<0,05);

**ANEXO 6.** Teores de alguns nutrientes considerados adequados em folhas de feijoeiro, de milho e de rabanete<sup>1)</sup>

<b>Nutriente</b>	<b>Feijoeiro</b>	<b>Milho</b>	<b>Rabanete</b>
N (g kg <sup>-1</sup> )	30 – 50	27 – 35	30 – 60
P (g kg <sup>-1</sup> )	2 – 3	2 – 4	3 – 7
K (g kg <sup>-1</sup> )	20 – 25	17 – 35	40 – 60
Ca (g kg <sup>-1</sup> )	10 – 25	2 – 8	30 – 45
Mg (g kg <sup>-1</sup> )	2,5 – 5,0	2 – 5	5 – 12
S (g kg <sup>-1</sup> )	2 – 3	1 – 3	-
Cu (mg kg <sup>-1</sup> )	4 – 20	6 – 20	5 – 25
Zn (mg kg <sup>-1</sup> )	18 - 50	15 - 100	20 – 250

<sup>1)</sup> Terceiras folhas com pecíolo do terço médio no florescimento do feijoeiro; Terço central da folha oposta e abaixo da espiga do milho, na fase do pendoamento (50% de plantas pendoadas); folhas recém-desenvolvidas do rabanete (SBCS/NRS, 2004).

**ANEXO 7.** Peso seco (MS) da parte aérea das plantas de milho (1º cultivo) e teores de macronutrientes do mesmo (médias de quatro repetições)<sup>1)</sup>

Tratamentos	MS	N	P	K	Ca	Mg	S
	--- g vaso <sup>-1</sup> ---	----- g kg <sup>-1</sup> -----					
<b>1 Test.</b>	36,7 c	11	0,8 de	17,1 a	2,1	0,9 e	0,8 ab
<b>2 NPK</b>	82,3 bc	8	0,7 e	13,5 ab	2,4	1,6 cd	0,7 b
<b>3 L1</b>	116,8 ab	7	1,2 cde	9,7 b	2,2	2,0 bc	0,6 b
<b>4 L1 + M1</b>	99,8 abc	6	1,5 bc	9,4 b	2,4	2,4 ab	0,6 b
<b>5 L2</b>	103,1 ab	7	1,5 bc	10,2 b	2,6	2,4 ab	0,6 b
<b>6 L2 + M2</b>	115,7 ab	7	1,8 ab	10,2 b	2,5	2,5 ab	0,7 b
<b>7 L2 + M4</b>	151,6 a	8	1,7 bc	10,3 b	2,6	2,2 bc	0,7 b
<b>8 L3</b>	129,9 ab	7	2,3 a	8,3 b	3,2	2,9 a	0,7 b
<b>9 L3 - Calc</b>	99,6 abc	10	1,2 cd	10,5 b	2,7	1,0 de	1,0 a
<b>Médias</b>	<b>111,7</b>	<b>8</b>	<b>1,4</b>	<b>11,0</b>	<b>2,5</b>	<b>2,0</b>	<b>0,7</b>
<b>CV(%)</b>	26	17	15	23	19	13	19
<b>DMS (5%)</b>	65,6	1	0,5	6,1	1,1	0,6	0,3

<sup>1)</sup>Médias seguidas pela mesma letra, na coluna, não diferem entre si pelo teste de Tukey (p<0,05); ausência de letras indica não significância estatística a esse nível.

**ANEXO 8.** Peso de grãos de feijoeiro cultivado no verão de 2007/2008 e teores de macronutrientes nos mesmos (médias de quatro repetições) <sup>1)</sup>

Tratamentos	Peso de grãos	N	P	K	Ca	Mg	S
	---- g vaso <sup>-1</sup> ----	----- g kg <sup>-1</sup> -----					
<b>1 Test.</b>	1,4 c	6,8	4,1	12,8	1,4	2,1	1,8
<b>2 NPK</b>	2,4 bc	6,8	4,0	11,7	1,0	1,5	2,2
<b>3 L1</b>	4,6 abc	6,2	4,5	12,6	1,7	1,7	2,3
<b>4 L1 + M1</b>	5,2 ab	6,5	4,8	13,5	1,7	2,1	2,8
<b>5 L2</b>	4,4 abc	6,6	4,2	11,8	1,3	1,8	2,6
<b>6 L2 + M2</b>	6,2 a	7,2	4,4	12,9	1,6	2,0	2,1
<b>7 L2 + M4</b>	2,9 bc	6,2	4,4	20,0	2,2	3,0	3,0
<b>8 L3</b>	4,5 abc	6,9	4,0	13,6	1,3	1,9	2,5
<b>9 L3 - Calc</b>	2,1 bc	6,9	3,4	11,1	1,1	1,5	1,6
<b>Médias</b>	<b>3,7</b>	<b>6,7</b>	<b>4,2</b>	<b>11,9</b>	<b>1,5</b>	<b>1,9</b>	<b>2,3</b>
<b>CV (%)</b>	41	12	26	42	43	41	41
<b>DMS (5%)</b>	3,6	9,0	2,6	13,3	1,5	1,9	2,3

<sup>1)</sup>Médias seguidas pela mesma letra, na coluna, não diferem entre si pelo teste de Tukey (p<0,05); ausência de letras indica não significância estatística a esse nível.

**ANEXO 9.** Peso seco (MS) da parte aérea das plantas de milho (2<sup>o</sup> cultivo) e teores de macronutrientes do mesmo (médias de quatro repetições) <sup>1)</sup>

Tratamentos	MS	N	P	K	Ca	Mg	S
	--- g vaso <sup>-1</sup> ---		----- g kg <sup>-1</sup> -----				
<b>1 Test.</b>	105,7	39	0,6 b	7,4	2,8	0,9	0,8 b
<b>2 NPK</b>	135,5	29	1,0 ab	6,1	2,9	2,1	0,5 b
<b>3 L1</b>	85,1	37	1,4 ab	6,1	3,4	3,0	0,7 b
<b>4 L1 + M1</b>	144,9	33	1,7 ab	5,4	2,8	2,7	0,6 b
<b>5 L2</b>	122,6	50	1,9 ab	6,5	3,4	3,2	0,9 b
<b>6 L2 + M2</b>	128,2	31	1,8 ab	5,1	2,6	2,8	0,6 b
<b>7 L2 + M4</b>	122,8	34	2,0 ab	5,3	3,2	3,1	0,7 b
<b>8 L3</b>	110,8	39	2,6 a	6,0	4,2	4,0	1,0 b
<b>9 L3 - Calc</b>	94,4	55	2,3 a	7,8	2,6	1,3	2,1 a
<b>Médias</b>	<b>116,7</b>	<b>38</b>	<b>1,6</b>	<b>6,2</b>	<b>3,1</b>	<b>2,6</b>	<b>0,6</b>
<b>CV(%)</b>	54	36	42	42	31	20	42
<b>DMS (5%)</b>	149,5	30	1,7	6,1	2,3	1,2	0,9

<sup>1)</sup>Médias seguidas pela mesma letra, na coluna, não diferem entre si pelo teste de Tukey (p<0,05); ausência de letras indica não significância estatística a esse nível.

**ANEXO 10.** Peso seco de raízes do rabanete cultivado no outono de 2009 e teores de macronutrientes das mesmas (médias de quatro repetições) <sup>1)</sup>

<b>Tratamentos</b>	<b>Peso de raízes</b>	<b>N</b>	<b>P</b>	<b>K</b>	<b>Ca</b>	<b>Mg</b>	<b>S</b>
	--- g vaso <sup>-1</sup> ---	----- g kg <sup>-1</sup> -----					
<b>1 Test.</b>	6,4	8,0	4,8	28,1	3,8	1,2 b	5,5
<b>2 NPK</b>	5,4	8,7	5,0	26,6	4,2	1,6 ab	4,5
<b>3 L1</b>	5,4	9,3	5,6	25,5	4,8	1,9 ab	5,2
<b>4 L1 + M1</b>	5,7	6,6	5,2	25,6	5,1	2,0 ab	4,7
<b>5 L2</b>	6,0	5,7	5,6	28,9	5,4	2,2 ab	5,7
<b>6 L2 + M2</b>	5,5	8,5	5,5	27,1	5,4	2,2 ab	5,2
<b>7 L2 + M4</b>	5,3	7,5	5,3	26,9	5,0	2,0 ab	4,7
<b>8 L3</b>	5,2	10,1	5,6	24,5	5,8	2,3 a	5,9
<b>9 L3 - Calc</b>	6,4	8,8	5,8	28,7	5,0	1,9 ab	5,5
<b>Médias</b>	<b>5,7</b>	<b>8,1</b>	<b>5,4</b>	<b>26,9</b>	<b>4,9</b>	<b>1,9</b>	<b>5,2</b>
<b>CV (%)</b>	12,2	40	10	13	18	22	18
<b>DMS (5%)</b>	1,6	7,0	1,3	8,2	2,1	1,0	2,2

<sup>1)</sup>Médias seguidas pela mesma letra, na coluna, não diferem entre si pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ); ausência de letras indica não significância estatística a esse nível.

**ANEXO 11.** Peso seco (MS) das folhas do rabanete cultivado no outono de 2009 e teores de macronutrientes das mesmas (médias de quatro repetições) <sup>1)</sup>

Tratamentos	MS	Folhas + raízes	N	P	K	Ca	Mg	S
	---- g vaso <sup>-1</sup> ----		----- g kg <sup>-1</sup> -----					
<b>1 Test.</b>	7,5	13,9	40,0	4,6 b	28,8 ab	15,7 b	1,5 b	6,2
<b>2 NPK</b>	7,7	13,1	42,8	4,6 b	23,5 abc	24,9 a	3,8 a	5,9
<b>3 L1</b>	8,8	14,2	36,5	4,3 b	22,8 abc	27,0 a	4,3 a	6,0
<b>4 L1 + M1</b>	6,9	12,6	38,5	4,8 ab	24,3 abc	27,3 a	4,1 a	6,0
<b>5 L2</b>	7,0	13,0	40,2	4,8 ab	23,1 abc	27,8 a	4,6 a	5,6
<b>6 L2 + M2</b>	8,9	14,4	39,8	4,8 ab	20,8 bc	29,4 a	5,0 a	6,3
<b>7 L2 + M4</b>	8,5	13,8	40,5	5,6 ab	22,1 abc	30,1 a	5,3 a	6,4
<b>8 L3</b>	7,1	12,3	39,6	4,8 ab	17,0 c	30,5 a	5,2 a	7,1
<b>9 L3 - Calc</b>	7,4	13,8	44,5	6,4 a	30,2 a	9,9 b	1,1 b	7,2
<b>Médias</b>	<b>7,7</b>	<b>13,4</b>	<b>40,3</b>	<b>5,0</b>	<b>23,6</b>	<b>24,7</b>	<b>3,9</b>	<b>6,3</b>
<b>CV (%)</b>	27	17	15	14	15	12	17	17
<b>DMS (5%)</b>	5,1	5,6	15,0	1,6	8,4	7,2	1,6	2,6

<sup>1)</sup>Médias seguidas pela mesma letra, na coluna, não diferem entre si pelo teste de Tukey (p<0,05); ausência de letras indica não significância estatística a esse nível.

**ANEXO 12.** Faixas de teores de alguns metais considerados normais ou excessivos (tóxicos) na matéria seca das plantas

Metal	Faixas de teores	Faixas de teores
	considerados normais (não tóxicos) <sup>1)</sup>	considerados excessivos (tóxicos) <sup>2)</sup>
	----- mg kg <sup>-1</sup> -----	
Cádmio	0,01 – 0,2	5 – 30
Cromo	0,02 – 6	>10
Cobre	3 – 40	20 – 100
Chumbo	0,1 – 5	30 – 300
Níquel	0,1 – 1,0	10 – 100
Zinco	15 – 150	100 - 400

<sup>1)</sup> Conforme Pais & Jones (1997).

<sup>2)</sup> Conforme Kabata – Pendias & Pendias (1986).

**ANEXO 13.** Teores de zinco (em mg kg<sup>-1</sup>) na matéria seca do azevem (inverno) e do capim pangola (verão) cultivados em 1991, nos frutos do tomateiro e nos grãos de aveia cultivados em 1993 (média de quatro repetições)<sup>1)</sup>

<b>Tratamento</b>	<b>Azevem</b>	<b>Pangola</b>	<b>Tomate (1993) (frutos)</b>	<b>Aveia (1993) (grão)</b>	<b>Médias</b>
1 Test.	36	61	-	30	42
2 NPK	28	48	12	44	33
3 L1	77	230	13	36	89
4 L1 + M1	130	318	13	47	127
5 L2	101	233	16	40	97
6 L2 + M2	193	404	14	53	166
7 L2 + M4	298	470	18	64	212
8 L3	114	297	19	57	122
9 L3 - Calc	191	394	20	70	169
Médias	130	273	16	49	117
CV (%)	9	13	-	25	
DMS (5%)	28	87	-	29	

<sup>1)</sup> Tedesco et al. (1991; 1993c)

**ANEXO 14.** Teores de cobre (em mg kg<sup>-1</sup>) na matéria seca do azevem (inverno) e do capim pangola (verão) cultivados em 1991, nos frutos do tomateiro e nos grãos de aveia cultivados em 1993 (médias de quatro repetições)<sup>1)</sup>

<b>Tratamento</b>	<b>Azevem</b>	<b>Pangola</b>	<b>Tomate (1993) (frutos)</b>	<b>Aveia (1993) (grão)</b>	<b>Médias</b>
1 Test.	6	6	-	3	5
2 NPK	6	5	3	4	4
3 L1	6	6	5	3	5
4 L1 + M1	8	7	4	4	6
5 L2	6	6	3	3	4
6 L2 + M2	8	7	4	4	6
7 L2 + M4	10	7	4	4	6
8 L3	7	6	4	3	5
9 L3 - Calc	7	6	3	4	5
Médias	7	7	4	4	5
CV (%)	9	14	-	16	
DMS (5%)	2	2	-	2	

<sup>1)</sup> Tedesco et al. (1991; 1993c)

**ANEXO 15.** Teores de cádmio (em mg kg<sup>-1</sup>) na matéria seca do azevem (inverno) e do capim pangola (verão) cultivados em 1991, nos frutos do tomateiro e nos grãos de aveia cultivados em 1993 (médias de quatro repetições)<sup>1)</sup>

Tratamento	Azevem	Pangola	Tomate (1993) (frutos)	Aveia (1993) (grão)	Médias
1 Test.	0,11	0,29	-	-	0,20
2 NPK	0,07	0,17	-	0,06	0,10
3 L1	0,18	0,43	0,91	0,05	0,39
4 L1 + M1	2,96	7,24	0,39	0,27	2,71
5 L2	0,21	0,31	0,13	0,06	0,18
6 L2 + M2	3,65	12,31	0,68	0,53	4,29
7 L2 + M4	6,27	15,06	0,73	0,82	5,72
8 L3	0,26	0,38	0,14	0,13	0,23
9 L3 - Calc	0,27	0,41	0,05	0,15	0,22
Médias	1,55	4,07	0,45	0,26	1,58
CV (%)	9	11		66	
DMS (5%)	0,33	1,12		0,40	

<sup>1)</sup> Tedesco et al. (1991; 1993c)

**ANEXO 16.** Teores de níquel (em mg kg<sup>-1</sup>) na matéria seca do azevem (inverno) e do capim pangola (verão) cultivados em 1991, nos frutos do tomateiro e nos grãos de aveia cultivados em 1993 (médias de quatro repetições)<sup>1)</sup>

Tratamento	Azevem	Pangola	Tomate (1993) (frutos)	Aveia (1993) (grão)	Médias
1 Test.	1,22	1,49	-	-	1,35
2 NPK	0,88	0,96	-	1,8	1,21
3 L1	1,67	1,74	2,9	1,9	2,05
4 L1 + M1	5,78	4,27	3,0	3,9	4,24
5 L2	2,74	1,67	3,0	2,2	2,40
6 L2 + M2	7,80	5,01	2,6	6,0	5,35
7 L2 + M4	14,71	6,64	2,7	7,1	7,78
8 L3	8,03	2,18	1,3	2,5	3,50
9 L3 - Calc	3,24	2,67	5,8	26,5	9,55
Médias	5,12	2,96	3,0	3,6	
CV (%)	14	22	-	31	
DMS (5%)	1,50	1,54	-	4,8	

<sup>1)</sup> Tedesco et al. (1991; 1993c)

**ANEXO 17:** Teores de chumbo (em mg kg<sup>-1</sup>) na matéria seca do azevem (inverno) e do capim pangola (verão) cultivados em 1991, nos frutos do tomateiro e nos grãos de aveia cultivados em 1993 (médias de quatro repetições)<sup>1)</sup>

Tratamento	Azevem	Pangola	Tomate (1993) (frutos)	Aveia (1993) (grão)	Médias
1 Test.	0,82	0,79	-	-	0,80
2 NPK	0,92	0,88	-	0,11	0,63
3 L1	1,12	1,02	2,05	0,06	1,06
4 L1 + M1	1,05	0,99	1,63	0,07	0,93
5 L2	1,14	1,05	1,22	0,04	0,86
6 L2 + M2	1,15	1,14	1,30	0,07	0,91
7 L2 + M4	1,31	1,15	1,46	0,06	0,99
8 L3	1,44	1,34	0,23	0,03	0,76
9 L3 - Calc	1,58	1,31	0,19	0,07	0,79
Médias	1,17	1,07	1,15	0,06	
CV (%)	12	11	-	-	
DMS (5%)	0,33	0,27	-	-	

<sup>1)</sup> Tedesco et al. (1991; 1993c)

## **ANEXO 18**

- 18.1.** Efeito da aplicação de Lodo da Estação de Tratamento do SITEL/CORSAN na absorção de nutrientes e metais pesados pelas plantas – primeiro ano de cultivo
  
- 18.2.** Efeito da aplicação de Lodo da Estação de Tratamento do SITEL/CORSAN na absorção de nutrientes e metais pesados pelas plantas – segundo ano de cultivo
  
- 18.3.** Efeito da aplicação de Lodo da Estação de Tratamento do SITEL/CORSAN na absorção de nutrientes e metais pesados pelas plantas (3º e 4º anos)
  
- 18.4.** Efeito da aplicação de Lodo da Estação de Tratamento do SITEL/CORSAN nas plantas e no solo (5º e 6º anos – 1989/91)
  
- 18.5.** Efeito da aplicação de Lodo da Estação de Tratamento do SITEL/CORSAN nas plantas e no solo (1993)
  
- 18.6.** Mobilidade e formas de retenção de metais pesados em colunas de solo com descarte de lodo industrial
  
- 18.7.** Avaliação do efeito de adição de titânio e vanádio no solo para as plantas
  
- 18.8.** Avaliação do sistema de aplicação de lodo no solo (Fazenda de Lodo) do SITEL/CORSAN

## ANEXO 18.1. Efeito da aplicação de Lodo da Estação de Tratamento do SITEL/CORSAN na absorção de nutrientes e metais pesados pelas plantas – primeiro ano de cultivo<sup>1)</sup>

**RESUMO:** Com o objetivo de estudar o efeito no sistema solo-planta-água da aplicação de lodo ativado produzido na estação de tratamento do SITEL (Sistema Integrado de Tratamento de Efluentes Líquidos do Pólo Petroquímico do Sul) da CORSAN, foi conduzido um experimento de microparcels em cooperação entre o Departamento de Solos da UFRGS, através da FUNDATEC, e o SITEL – CORSAN. Foram utilizados no experimento, conduzido a céu aberto, vasos de produção-lixiviação (em PVC) de 0,070686 m<sup>2</sup> de área, contendo três camadas de solo (zero a 20, 20 a 40 e 40 a 60 cm) dispostas na ordem encontrada no campo. Este solo é encontrado na Fazenda de Lodo do SITEL, no município de Triunfo, RS, sendo classificado como Podzólico Vermelho Amarelo eutrófico pelo Sistema Brasileiro de Classificação e Albaquic Hapludalf pelo Sistema Americano (Comprehensive Soil Classification System). Foram adicionadas na camada superficial do solo, quantidades totais de zero a 72 t de matéria seca (m.s.) de lodo/ha, em várias aplicações. Tratamentos com adubo mineral (macro e micronutrientes) e calcário também foram incluídos. Cultivou-se no inverno azevém (*Lolium multiflorum*, Lam.) e aveia (*Avena strigosa*, L.) e no verão capim pangola (*Digitaria decumbens*, Stent.) e milheto (*Pennisetum americanum*, (L.) Leeke). Foram determinados os nutrientes e/ou metais absorvidos pelas plantas, contidos na água de lixiviação e extraídos do solo no final de um ano de cultivo. As quantidades de nitrogênio (N), fósforo (P), sódio (Na), zinco (Zn), e enxofre (S) absorvidos pelas plantas aumentaram com a aplicação de lodo, não sendo afetados os teores de potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg), ferro (Fe), manganês (Mn), boro (B), cobre (Cu), cromo (Cr), chumbo (Pb) e níquel (Ni) na parte aérea das mesmas. Sódio, sulfato e cloreto aumentaram na água de lixiviação nos tratamentos com adição de lodo, não sendo, entretanto, afetados os teores de N, K, Ca, Mg, Mn, B, Cu, Zn, Cr, Pb e Ni.

---

<sup>1)</sup> Tedesco et al. (1986a)

**ANEXO 18.2. Efeito da aplicação de Lodo da Estação de Tratamento do SITEL/CORSAN na absorção de nutrientes e metais pesados pelas plantas – segundo ano de cultivo<sup>1)</sup>**

**RESUMO:** O experimento foi conduzido sem maiores problemas no segundo ano. De maneira geral, as respostas das plantas e modificações no solo começaram a se manifestar melhor neste período, em relação ao primeiro ano. Um trabalho, portanto, deverá ser continuado por mais um período de dois anos, com algumas modificações, para possibilitar uma previsão do desempenho do sistema no campo, a médio prazo. Mesmo na taxa mais alta da aplicação de lodo, com uma adição de 192 t ha<sup>-1</sup> (m.s.) em 2 anos, não foram observados efeitos adversos sobre as plantas em relação ao crescimento ou ao teor de metais pesados. Este período corresponde à operação de 8 anos da Fazenda de Lodo, com aplicação de 24 t de lodo/ha/ano (m.s.), que é a taxa de projeto.

---

<sup>1)</sup> Tedesco et al. (1986b)

### **ANEXO 18.3. Efeito da aplicação de Lodo da Estação de Tratamento do SITEL/CORSAN na absorção de nutrientes e metais pesados pelas plantas (3º e 4º anos)<sup>1)</sup>**

**RESUMO:** Este trabalho é a continuação do que foi iniciado em 1985, apresentando-se os resultados obtidos no terceiro e quarto anos de cultivo. Foram estudados em microparcelas, os efeitos do lodo de excesso gerado pela estação de tratamento do Sistema Integrado de Tratamento de Efluentes Líquidos (SITEL), operada pela Companhia Riograndense de Saneamento (CORSAN), em área do Pólo Petroquímico do Sul (Triunfo, RS), adicionado ao solo "in natura" e com o enriquecimento de Cu, Zn, Pb, Cd, Ni e Hg. O lodo aumentou o rendimento das plantas (azevém – *Lolium multiflorum* Lam e capim pangola – *Digitaria decumbens* Stent), não sendo observado efeito negativo da adição de metais. As concentrações de Na, Zn, Pb, Ni e Cd nas plantas aumentaram com a adição de lodo, em relação ao tratamento com adubo mineral. A absorção de nutrientes e/ou metais pesados também aumentou. Os teores de C, N, P, S, Na, Zn, Cd, Cr e Ni no solo da camada superficial aumentaram com a adição de lodo. Nas camadas sub-superficiais aumentaram somente os teores de Na, sulfato e cloreto. Os teores de Na, sulfato e cloreto, bem como a condutividade elétrica da água de percolação aumentaram com a adição de lodo.

---

<sup>1)</sup> Tedesco et al. (1989)

#### **ANEXO 18.4. Efeito da aplicação de Lodo da Estação de Tratamento do SITEL/CORSAN nas plantas e no solo (5º e 6º anos – 1989/91)<sup>1)</sup>**

**RESUMO:** Este trabalho é a continuação do que foi iniciado em 1985, sendo apresentados os resultados obtidos no quinto e no sexto anos de cultivo. Foram estudados em microparcelas, os efeitos do lodo biológico gerado pela estação de tratamento do Sistema Integrado de Tratamento de Efluentes Líquidos (SITEL), operada pela Companhia Riograndense de Saneamento (CORSAN), em área do Pólo Petroquímico do Sul (Triunfo, RS), adicionado ao solo “in natura” e com o enriquecimento dos metais Cu, Zn, Pb, Cd, Ni, e Hg. Foi avaliado também o efeito da adição do lodo da bacia de equalização inorgânica (LBEI). O lodo biológico aumentou o rendimento das plantas (azevém – *Lolium multiflorum* Lam. e capim pangola – *digitaria decumbens*, Stent), não sendo observado efeito negativo da adição de metais. As concentrações de P, Na, S, Zn, Ni e Cd nas plantas aumentaram com a adição de lodo, em relação aos tratamentos com adubo mineral. O mesmo entretanto não foi observado com a aplicação do LBEI. Os teores de C, N, P, S, Na, Zn, Cr, Ni e Hg da camada superficial do solo aumentaram com a adição de lodo biológico. A adição de LBEI aumentou o pH e os teores de Ca, Mg, Na, Ni e Cr na camada superficial do solo. A decomposição do lodo biológico no solo, medida por evolução de CO<sub>2</sub>, foi de 4,9% em aproximadamente um ano. Os teores de Na, sulfato e cloreto, bem como a condutividade elétrica da água de percolação aumentaram com a adição de lodo.

---

<sup>1)</sup> Tedesco et al. (1991)

## **ANEXO 18.5. Efeito da aplicação de Lodo da Estação de Tratamento do SITEL/CORSAN nas plantas e no solo (1993)<sup>1)2)</sup>**

**RESUMO:** Com o objetivo de estudar o efeito residual da aplicação no solo de quantidades variáveis de zero a 672 t ha<sup>-1</sup> (base seca) de lodo biológico de excesso gerado pela estação de tratamento do SITEL/CORSAN, num período de seis anos, foram cultivados tomateiro e aveia em microparcelas durante o ano de 1993. O rendimento de frutos e sementes foram quantificados, determinando-se os teores de nutrientes e metais pesados nos mesmos. A adição de lodo favoreceu a produção de frutos do tomateiro e o rendimento de grãos de aveia. Os teores dos metais zinco, cádmio, níquel e chumbo dos frutos do tomateiro e dos grãos da aveia aumentaram com a adição do lodo, estando, entretanto em teores compatíveis com produtos não contaminados. A água de lixiviação não apresentou contaminação por esses metais, pelos limites fixados pelo Conselho Nacional do Meio Ambiente.

---

<sup>1)</sup>Tedesco et al. (1993c)

<sup>2)</sup>Efeito residual, após dois anos sem aplicação de lodo

## **ANEXO 18.6. Mobilidade e formas de retenção de metais pesados em colunas de solo com descarte de lodo industrial<sup>1)</sup>**

**RESUMO:** Após o encerramento das aplicações de lodo, a decomposição da matéria orgânica (MO) pode provocar grandes mudanças nas ligações dos metais e suas formas químicas no solo. Modificações em sua solubilidade e disponibilidade podem aumentar riscos de contaminação de águas superficiais e subterrâneas, afetar os ciclos naturais do solo e a transferência para a cadeia alimentar. O presente trabalho visou estudar os efeitos da aplicação de lodo industrial (120, 240 e 624 t ha<sup>-1</sup>, base seca em várias aplicações) durante seis anos, sobre a mobilidade de Cu, Pb, Ni, Zn e Cd em Argissolo Vermelho-Amarelo e sua relação com as formas químicas (solúvel, trocável, orgânica e residual) dos metais no solo 9 anos após a última aplicação de lodo na camada superficial do solo. Os resultados mostraram teores elevados de MO, capacidade de troca de cátions e o pH ácido nos tratamentos com lodo. De 1991 a 1999, verificou-se a redução do teor de matéria orgânica à medida que aumentou a dose de lodo. A mobilidade dos metais nesses tratamentos aumentou na seguinte ordem: Zn>Cd>Ni>Cu>Pb. A formação de complexos de esfera interna de Cu e Pb com a fase sólida foi o mecanismo responsável pela baixa mobilidade dos mesmos nas colunas de solo; a formação de complexos organo-solúveis favoreceu o deslocamento do Cu adicionado ao lodo na forma de sal para as camadas subsuperficiais do solo; enquanto que a formação de complexos de esfera externa foi responsável pelo aumento da solubilidade e mobilidade de Zn, Ni e Cd para essas camadas, principalmente nos tratamentos com a adição ao lodo dos elementos na forma de sal. Na maior dose de lodo sem a aplicação de calcário, a redução do pH aumentou a extração de Zn, Cd e Ni nas frações solúvel e trocável, não afetando a distribuição de Cu e Pb. A oxidação química da matéria orgânica aumentou a concentração de Cu e Zn na fração solúvel do solo.

---

<sup>1)</sup> Gaivizzo (2001).

## **ANEXO 18.7. Avaliação do efeito de adição de titânio e vanádio no solo para as plantas<sup>1)</sup>**

**RESUMO:** Embora o titânio seja um elemento encontrado em grande quantidade na crosta terrestre e no solo, não apresenta geralmente efeito nocivo sobre a biota, por constituir minerais de alta estabilidade química. O vanádio é amplamente distribuído na natureza, em quantidades geralmente não tóxicas para as plantas e animais; sua acumulação no ambiente geralmente é devida à atividade industrial. Com o objetivo de estudar o efeito das adições de titânio e vanádio na forma de sais solúveis em solo com e sem adição prévia do lodo de estação de tratamento de efluentes de indústrias petroquímicas, foi conduzido um estudo em vasos em ambiente aberto, nas dependências do Departamento de Solos da Faculdade de Agronomia da UFRGS. Foram utilizadas as culturas de milho (*Zea mays*) e de aveia (*Avena strigosa*), no período de março a dezembro do ano de 2000. Foram determinados o crescimento das plantas e os teores de titânio e vanádio na parte aérea das mesmas e no solo. O crescimento das plantas não foi afetado pela adição de até 500 kg ha<sup>-1</sup> de titânio, em ambas as culturas. A adição de 200 kg ha<sup>-1</sup> de vanádio na forma de sal reduziu o crescimento da cultura do milho, em ambos os solos. O crescimento de aveia, entretanto, não foi afetado nesta taxa de aplicação, no solo da Fazenda de Lodo. A adição de lodo não afetou o crescimento das culturas, nem os teores de titânio e vanádio absorvidos pelas plantas.

---

<sup>1)</sup> Gianello et al. (2001)

## **ANEXO 18.8. Avaliação do sistema de aplicação de lodo no solo (Fazenda de Lodo) do SITEL/CORSAN<sup>1)</sup>**

**RESUMO:** Conforme a Legislação Estadual, os resíduos gerados no Sistema Integrado de Tratamento de Efluentes Líquidos (SITEL) operado pela CORSAN junto ao IIIº Pólo Petroquímico, instalado no Município de Triunfo, no Estado do RS, devem ser descartados no solo, em área adequada a esta finalidade. Foi feita neste trabalho a avaliação da aplicação no solo do lodo de excesso da Estação de Tratamento de Efluentes (ETE), iniciada em 1983 e conduzida até 2003, com base nas quantidades adicionadas, nas análises do lodo e no monitoramento dos diversos campos da área (Fazenda de Lodo). Esta avaliação foi baseada nos critérios inicialmente propostos e aceitos pelo órgão de proteção ambiental para a operação da Fazenda de Lodo, em comparação com as normas reguladoras desta atividade adotadas em outros países. Foi observado que a operação da Fazenda de Lodo está sendo feita corretamente, sendo cumpridos os requisitos agronômicos e operacionais adequados para evitar a contaminação da área. Caso sejam mantidas a composição do lodo e a taxa de aplicação atuais, a Fazenda de Lodo poderá ser utilizada por até 42 anos antes de atingir o primeiro parâmetro restritivo ao uso da área, referente à quantidade máxima tolerada de adição de zinco. São apresentadas também algumas sugestões para adequar o monitoramento da operação da Fazenda de Lodo às necessidades anuais.

---

<sup>1)</sup> Tedesco et al. (2004a)

## **ANEXO 19**

- 19.1.** Modificações das propriedades físicas e químicas do solo pela aplicação de efluente petroquímico tratado
  
- 19.2.** Acompanhamento das modificações de solo e plantas que ocorrem com o tempo de aplicação do efluente gerado pelo SITEL/CORSAN
  
- 19.3.** Avaliação do sistema de disposição final no solo do efluente líquido produzido pelo SITEL/CORSAN

## **ANEXO. 19.1 – Modificações das propriedades físicas e químicas do solo pela aplicação de efluente petroquímico tratado<sup>1)</sup>**

**RESUMO:** No Sistema Integrado de Tratamento dos Efluentes Líquidos do Pólo Petroquímico do Sul (SITEL) e efluente final, tratado a nível terciário, é aplicado desde 1983 sobre o terreno em áreas contíguas à estação de tratamento, a taxas em torno de  $140 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ dia}$ . Com o intuito de investigar as alterações das propriedades físicas e químicas do solo em áreas que receberam diferentes cargas acumuladas de efluente, comparativamente a áreas intactas próximas, foram executados, em cada um dos oito pontos escolhidos, dois testes de infiltração e foram coletadas amostras de solo a três profundidades (0-30, 30-60 e 60-120 cm) para análises físicas e químicas, além de observações de campo. Nos solos submetidos às maiores cargas notaram-se elevações significativas de pH, condutividade elétrica e teores de Na, Ca e S. Houve decréscimos dos teores de Al trocável e Zn disponível, atribuídos ao aumento de pH. Com relação aos demais macro e micro-nutrientes praticamente não se observaram alterações nos teores de K, Mg, P, Cu, Mn e B. As taxas de infiltração em todas as áreas apresentaram valores em média quatro vezes inferiores às taxas medidas nas áreas intactas, o que pode ser explicado pela dispersão da argila por efeito da elevação de pH, redução de Al e aumento de Na. O impacto geral sobre a vegetação pareceu restringir-se a efeitos físicos e fisiológicos ao invés de fitotóxicos, destacando-se a queda de árvores causada pela mudança para condições anaeróbicas na camada superficial do solo, por efeito do encharcamento do terreno do terreno pelo efluente, e a regressão de alguns trechos de vegetação submetida ao impacto direto do líquido. Os teores dos demais metais pesados não se alteraram em níveis estatisticamente significativos. Os resultados parecem compatíveis, de um modo geral, com as características do efluente aplicado: teores apreciáveis dos íons  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Cl}^-$ , e  $\text{So}_4^{-2}$ ; pH ligeiramente alcalino; baixos teores de metais tóxicos e de carga orgânica estabilizada (não tóxica). A vida útil estimada para a área de aplicação, mantidas as condições históricas de quantidade e qualidade de líquido aplicado, é da ordem de décadas em relação à

acumulação de metais. Porém, em relação à infiltração, algumas áreas já apresentam problemas de escoamento superficial, podendo ser necessária a curto prazo sua recuperação através de um longo descanso ou adição de Ca e Mg para reduzir a percentagem da saturação de Na.

---

Tedesco et al. (1986a)

**ANEXO. 19.2. Acompanhamento das modificações de solo e plantas que ocorrem com o tempo de aplicação do efluente gerado pelo SITEL/CORSAN<sup>1)</sup>**

RESUMO: Com o objetivo de estudar os efeitos da aplicação do efluente líquido gerado pela estação de tratamento SITEL (Sistema de Tratamento de Efluentes Líquidos) da CORSAN (Companhia Riograndense de Saneamento) sobre o solo e as plantas, foi efetuado um estudo de campo em quatro áreas em que o efluente está sendo aplicado desde 1983, comparado com áreas testemunhas. Observou-se que o pH médio da camada superficial do solo aumentou de 5,1 para 5,7, mantendo-se estável desde 1985. A acidez potencial do solo também foi reduzida devido à aplicação do efluente alcalino (pH 9,5). Foram também observados aumentos nos teores de sódio, potássio e cálcio trocáveis, enxofre, fósforo, zinco e níquel extraíveis, cloreto e condutividade elétrica. A aplicação continuada do efluente causou também redução na taxa de infiltração e no grau de floculação do solo. As plantas das áreas com aplicação de efluente apresentaram maiores teores de sódio, potássio, enxofre, nitrogênio, fósforo, cádmio e zinco e menores teores de boro do que as de áreas sem efluente. As modificações mais evidentes na vegetação foram observadas em áreas com vegetação arbórea e naquelas onde o lançamento do efluente foi realizado por aspersores. Nas áreas irrigadas por tubulação perfurada, as modificações na vegetação foram menores, restringindo-se à área de influência direta do efluente.

---

<sup>1)</sup> Tedesco et al. (1990)

### **ANEXO.19.3. Avaliação do sistema de disposição final no solo do efluente líquido produzido pelo SITEL/CORSAN**

**RESUMO:** Conforme a legislação estadual específica para o Pólo Petroquímico de Triunfo, localizado no Estado do Rio Grande do Sul, Brasil, os resíduos gerados pelo mesmo devem ser tratados e descartados na própria área e de forma a preservar a qualidade ambiental. Com esta finalidade, foi implantado o Sistema Integrado de Tratamento de Efluentes Líquidos (SITEL), operado pela Companhia Riograndense de Saneamento (CORSAN). Neste contexto, após tratamento terciário, o efluente líquido é descartado sobre o solo, evitando-se desta forma o lançamento direto nos cursos d'água. A aplicação de efluente no solo foi iniciada em 1983, sendo disponibilizada uma área de 100 ha, utilizando-se tubulação perfurada (baixa pressão) e aspersores fixos (alta pressão). Em 1995 o sistema foi ampliado para atingir aproximadamente o dobro da área inicial. O monitoramento da qualidade dos cursos d'água da área (rio Caí e arroio Bom Jardim), do efluente gerado, do solo e da vegetação tem sido feito desde o início da operação do sistema. Os dados disponíveis indicam que até o momento não se observa degradação da qualidade dos cursos d'água, podendo ser estes enquadrados na classe 3 pelas normas do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), como água potável com tratamento convencional. A qualidade do efluente descartado no solo também aumentou nos últimos anos. A infiltração no solo, entretanto, apresentou sensível redução devido à dispersão da argila provocada pela sodicidade do efluente. Como consequência da presença de líquido no solo por longos períodos, a vegetação nativa apresentou, ao longo do tempo, gradual modificação, com predomínio de espécies mais adaptadas a esse ambiente. O descarte do efluente no solo não reduziu, entretanto, a qualidade química do solo. Foram também sugeridos os parâmetros a ser monitorados no futuro, indicativos da qualidade das águas de superfície, solo e plantas.

---

<sup>1)</sup> Tedesco et al. (2004b)



**ANEXO 20. Fluxograma simplificado do SITEL**

