

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

**APLICAÇÃO DE LODO DE ETE DE ATERRO INDUSTRIAL
E O IMPACTO NA MICROBIOTA DE SOLOS E NAS PLANTAS**

Leonardo Capeleto de Andrade
(Dissertação)

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

**APLICAÇÃO DE LODO DE ETE DE ATERRO INDUSTRIAL
E O IMPACTO NA MICROBIOTA DE SOLOS E NAS PLANTAS**

LEONARDO CAPELETO DE ANDRADE

Engenheiro Ambiental (UPF)

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

Porto Alegre (RS) Brasil
Fevereiro de 2014

CIP - CATALOGAÇÃO INTERNACIONAL NA PUBLICAÇÃO

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

**Faculdade de Agronomia.
Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo,
Porto Alegre, 2014.**

Catálogo na publicação:

Biblioteca Setorial da Faculdade de Agronomia da UFRGS

LEONARDO CAPELETO DE ANDRADE
Engenheiro Ambiental - UPF

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: **26/02/2014**
Pela Banca Examinadora

Homologada em:
Por

PAULO CÉSAR DO NASCIMENTO
Presidente de Banca

ALBERTO V. INDA JUNIOR
Coordenador do Programa de Pós-
Graduação em Ciência do Solo

ENILSON L. SACCOL DE SÁ
PPG - Ciência do Solo/UFRGS

PEDRO ALBERTO SELBACH
Faculdade de Agronomia/UFRGS

PEDRO ALBERTO SELBACH
Diretor da Faculdade de Agronomia

MAURIZIO SILVEIRA QUADRO
Centro de Engenharias/UFPEL

Dedicado à minha família: Carmen,
Paulo, Guilherme e Cláudia.

AGRADECIMENTOS

À minha família (meus primeiros orientadores) pela formação educacional que me permitiu chegar a este grau intelectual.

Aos meus orientadores, Flávio Camargo e Robson Andreazza, assim como aos meus professores do PPGCS, pela formação intelectual que me permitiu alcançar este grau acadêmico.

Ao Programa de Pós Graduação em Ciência do Solo, UFRGS, pela oportunidade de pesquisa. E ao CNPq pela concessão da bolsa de estudos neste período.

Aos colegas do Laboratório de Biorremediação, do Departamento de Solos, UFRGS, pelo companheirismo e amizade. Assim como aos funcionários do Laboratório de Análises do Solo, pela paciência nos ensinamentos práticos.

A UTRESA, em nome do Eng^o Químico João Luis Bombarda, pela oportunidade de pesquisa na empresa.

À minha companheira Cláudia F. Wentz pela paciência, compreensão e auxílio nesta jornada.

APLICAÇÃO DE LODO DE ETE DE ATERRO INDUSTRIAL E O IMPACTO NA MICROBIOTA DE SOLOS E NAS PLANTAS

Autor: Leonardo Capeleto de Andrade

Orientador: Flávio Anastácio de Oliveira Camargo

Co-orientador: Robson Andreazza

RESUMO

A destinação final ambientalmente adequada dos resíduos sólidos industriais é necessária para evitar os problemas decorrentes. A disposição destes resíduos no solo pode ser recomendada, dado o seu potencial corretivo e fertilizante. Os objetivos deste estudo foram avaliar o efeito no solo e na planta da adição de doses de lodo de ETE de um aterro industrial. Foram desenvolvidos dois experimentos, sendo um em laboratório com frascos respirométricos e outro em casa de vegetação com vasos, analisando a mineralização de carbono, hidrólise do diacetato de fluoresceína (FDA), pH, condutividade e teores de macro e micro-nutrientes em solo e plantas. Os valores de carbono mineralizado aumentaram com o tempo de incubação em função da adição do lodo. A redução do FDA nas menores doses de lodo indica redução na atividade enzimática com a adição deste resíduos. O pH aumentou excessivamente nas maiores doses, em função do grande valor de neutralização do lodo estudado. A condutividade elétrica do solo aumentou com a aplicação do lodo. De forma geral, a dose de lodo que causou menores impactos aos micro-organismos e plantas foi a 2 Mg ha⁻¹, apresentando pouca, ou nenhuma, diferença em relação aos tratamentos controle ou testemunha. A atividade microbiana aumentou com a aplicação de doses de lodo. A aplicação de lodo, em pequenas doses, não causou danos significativos às plantas e foram observados aumentos nos teores de macro-nutrientes no tecido.

¹ 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. (66 p.) Fevereiro, 2014.

APPLICATION OF ETP SLUDGE FROM AN INDUSTRIAL LANDFILL AND THE IMPACT ON SOIL MICROBIOTA AND PLANTS¹

Author: Leonardo Capeleto de Andrade
Adviser: Flávio Anastácio de Oliveira Camargo
Co-adviser: Robson Andrezza

ABSTRACT

The safety-environmentally disposal of industrial solid waste is required to prevent further problems. The disposal of these wastes in soils can be recommended due its liming and fertilizer potential effect. The objectives of this study were to evaluate the effect on soil and plant, the addition of ETP sludge doses from an industrial landfill. Two experiments were conducted in laboratory and in greenhouse, analyzing carbon mineralization, hydrolysis of fluorescein diacetate (FDA), pH, conductivity and concentration of macro and micro - nutrients in soil and plants. The amounts of mineralized carbon increased with the incubation time due to the addition of the sludge. Reducing the FDA in the lowest doses of sludge indicated microbial stress with the waste addition. The pH increased excessively in larger doses, due to the large sludge value of neutralization. The electrical conductivity showed linear behavior, but not reaching critical values at the doses tested. In general, the dose of sludge that caused minor impacts to plants and micro-organisms was the dose of 2 Mg ha^{-1} , showing little or no difference compared to other treatments or control. Microbial activity increased with the application of sewage sludge doses. The application of sludge in small doses, did not cause significant damage to plantas and increased the the levels of macro-nutrients in the tissue.

¹ 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. (66 p.). February, 2014.

SUMÁRIO

	Página
1 INTRODUÇÃO	12
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
2.1 A problemática dos resíduos sólidos	14
2.2 Disposição de lodos de ETE no solo	15
2.2.1 Cálcio	16
2.2.2 Cromo	17
2.2.3 Sódio	18
2.2.4 Arsênio	19
2.3 Efeitos da aplicação de lodo em plantas e microbiota	20
3 MATERIAL E MÉTODOS	22
3.1 Coleta e caracterização do lodo	22
3.2 Coleta e caracterização dos solos	24
3.3 Ensaio e Experimentos	25
3.3.1 Frascos respirométricos	25
3.3.1.1 Atributos microbianos	26
3.3.1.2 Mineralização de Carbono	26
3.3.1.3 Hidrólise do diacetato de fluoresceína (FDA)	27
3.3.2 Vasos em casa de vegetação	27
3.3.2.1 pH e condutividade elétrica	28
3.3.2.2 Argila dispersa em água e Grau de Flocculação	28
3.3.2.3 Teores dos elementos no solo	29
3.3.2.4 Efeitos do lodo no desenvolvimento das plantas	29
3.3.2.5 Teores dos elementos no tecido	29
3.4 Análises estatísticas	29
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	30
4.1 Atributos microbianos	30
4.1.1 Mineralização de carbono (C-CO ₂)	31
4.1.2 Hidrólise do diacetato de fluoresceína (FDA)	35
4.2 Atributos químicos do solo	38
4.2.1 Argila Dispersa em Água e Grau de Flocculação	42
4.2.2 Teores de nutrientes disponíveis no solo	42
4.3 Respostas das plantas às doses de lodo	46
5 CONCLUSÕES	51
6 REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	52
7 APENDICES	59

RELAÇÃO DE TABELAS

	Página
Tabela 1: Caracterização químico-física do Lodo UTRESA e limites da Resolução CONAMA 420/2009.....	23
Tabela 2: Caracterização de atributos físicos para o Lodo UTRESA.....	24
Tabela 3: Caracterização dos solos S1, S2 e S3.....	25
Tabela 4: Carbono da biomassa microbiana do solo (BMS-C), Respiração Basal do Solo (RBS-5) e quociente metabólico do solo (qCO_2) para os solos S1, S2 e S3 e doses de lodo.....	31
Tabela 5: Carbono mineralizado (C-CO ₂) em solos sob doses de lodo de ETE de um aterro industrial.....	32
Tabela 6: Carbono mineralizado (Cm), carbono potencialmente mineralizado (Co) e taxa de mineralização (k).....	35
Tabela 7: Hidrólise do FDA ($\mu g g^{-1} h^{-1}$) em solos sob doses de lodo aos 15, 30, 60 e 90 dias – amostras em frascos respiratórios.....	36
Tabela 8: Hidrólise do FDA ($\mu g g^{-1} h^{-1}$) em solos sob doses de lodo aos 15, 30, 60 e 90 dias - vasos em casa de vegetação.....	37
Tabela 9: Valores de pH _{H2O} (1:1) na camada 0-5 cm aos 15, 30, 60 e 90 dias após aplicação das doses de lodo nos solos S1, S2 e S3.....	39
Tabela 10: Condutividade Elétrica na camada 0-5 cm aos 15, 30, 60 e 90 dias após aplicação das doses de lodo nos solos S1, S2 e S3.....	40
Tabela 11: Valores de pH _{H2O} (1:1) e condutividade elétrica (1:5) na camada 0-20 cm aos 90 dias após aplicação do lodo.....	41
Tabela 12: Valores médios da Argila Dispersa em Água (ADA) e Grau de Floculação (GF) nos solos S1, S2 e S3.....	42
Tabela 13: Teores disponíveis de P, K e Ca em solos sob doses de lodo.....	44
Tabela 14: Teores disponíveis de Mg, Zn, Cu e Na em solos sob doses de lodo.....	45
Tabela 15: Resposta do milho (altura e massa seca) às doses de lodo - 60 dias após germinação.....	46
Tabela 16: Resposta do Sorgo (altura e massa seca) às doses de lodo - 30 dias após germinação.....	47
Tabela 17: Resposta do Girassol (altura, diâmetro do caule e massa seca) às doses de lodo - 90 dias após germinação.....	48

RELAÇÃO DE FIGURAS

	Página
Figura 1: Mineralização de Carbono Acumulado em doses de lodo (0; 2; 10; 25; 50 Mg ha ⁻¹) no solo S1 durante 91 dias de incubação.	33
Figura 2: Mineralização de Carbono Acumulado em doses de lodo (0; 2; 10; 25; 50 Mg ha ⁻¹) no solo S2 durante 91 dias de incubação.	33
Figura 3: Mineralização de Carbono Acumulado em doses de lodo (0; 2; 10; 25; 50 Mg ha ⁻¹) no solo S3 durante 91 dias de incubação.	34

1 INTRODUÇÃO

A destinação final ambientalmente adequada dos resíduos sólidos industriais é um dos principais problemas ambientais atuais. Anteriormente, o investimento tecnológico na área ambiental concentrou-se em grande parte na questão hídrica. Deste modo, na área de resíduos sólidos focou-se à destinação final dos resíduos, sendo o aterramento sua principal forma. Com a evolução das políticas ambientais, a destinação final adequada dos resíduos foi estimulada, buscando-se assim novas tecnologias e destinos para suprir a demanda de resíduos gerados.

A biorremediação é um processo de remoção ou minimização dos contaminantes e poluentes do ambiente, com a utilização de organismos vivos (micro-organismos, plantas ou ambos) ou produtos originados de organismos vivos (enzimas, biosurfactantes) para detoxificar, degradar, imobilizar ou sequestrar compostos químicos tóxicos presentes em ambientes aquáticos ou solos (Crawford, 2006; Andrade et al., 2010). Estes processos são importantes, em função de seus efeitos bioquímicos e por destruírem ou transformarem os contaminantes potencialmente perigosos em compostos menos danosos ao ser humano e ao meio ambiente (Andrade et al., 2010). A capacidade de degradação de um contaminante pode ser característica apenas de alguns grupos de micro-organismos. Porém, como citado por Andrade et al. (2010), micro-organismos nativos do solo podem desenvolver a capacidade de degradar contaminantes, após longo período de exposição.

A disposição de resíduos em solo, de forma ecologicamente correta, atende às questões pressupostas da “disposição final ambientalmente adequada”, preceito da PNRS - Política Nacional de Resíduos Sólidos (Brasil, 2010). Segundo Ferreira et al. (2003) e Silva (2009), a disposição de resíduos

orgânicos em solos pode ser recomendada, dado os potenciais corretivos e fertilizantes destes materiais. Esta utilização de resíduos pode, também, reduzir a aplicação de adubos minerais e melhorar a qualidade do solo, visto que alguns resíduos orgânicos atuam como condicionadores de solo. A utilização de resíduos em substituição a adubos minerais gera uma redução no consumo de matérias-primas, com conseqüente redução na poluição ambiental e uso de recursos naturais, o que caracteriza melhoria na qualidade ambiental (Silva, 2009).

A aplicação em solo de lodo de Estação de Tratamento de Efluentes (ETE) de aterro industrial pode aumentar a atividade microbiana e obter efeitos positivos sobre as plantas. Com base nesta hipótese, o objetivo deste estudo foi avaliar o efeito em solos da adição de doses de lodo de ETE de um aterro industrial na atividade microbiana e no desenvolvimento de plantas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 A problemática dos resíduos sólidos

Um dos maiores desafios à sociedade moderna é o equacionamento da geração excessiva e da disposição final ambientalmente segura dos resíduos sólidos (Jacobi e Besen, 2011). O problema dos resíduos sólidos é intrinsecamente ligado à história da humanidade e a utilização de resíduos sólidos orgânicos tem sido associada à agricultura. Relatos de poetas gregos (300-900 A.C.), como Homero e Theophrastus, citam a utilização de resíduos orgânicos e cinzas na adubação do solo (Coelho, 1973; Bissani et al., 2008). No Brasil, o problema dos resíduos sólidos é uma questão antiga, porém a legislação específica surgiu apenas em 2010. A Lei nº 12.305/2010 criou a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), que regula diretrizes e metas para o gerenciamento dos resíduos sólidos no Brasil. Dentre estes, a redução na destinação de resíduos para aterros, incentivando as destinações ambientalmente adequadas.

A Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), Lei 12.305/2010, cria a definição de rejeitos: “resíduos sólidos que, depois de esgotadas todas as possibilidades de tratamento e recuperação por processos tecnológicos disponíveis e economicamente viáveis, não apresentem outra possibilidade que não a disposição final ambientalmente adequada”. A destinação final ambientalmente adequada dos resíduos inclui a reutilização, a reciclagem, a compostagem, a recuperação e o aproveitamento energético e outras destinações admitidas pelos órgãos competentes, de modo a evitar danos ou riscos à saúde pública e a minimizar os impactos ambientais adversos.

A classificação brasileira de periculosidade ambiental (e destinação para aterros) dos resíduos sólidos é dada pela NBR 10.004:2004, que os classifica em: perigosos ou não perigosos (e inertes ou não inertes, para o caso dos não- perigosos). Pela norma, os resíduos sólidos são definidos como: “resíduos nos estados sólido e semi-sólido; que resultam de atividades; incluídos os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água e instalações de controle de poluição. Assim sendo, os lodos de Estações de Tratamento de Efluentes (ETE)”.

Para os solos contaminados (e remediados) a classificação é dada pela resolução CONAMA nº 420/2009, onde em seu Anexo II são definidos os diferentes usos possíveis do solo e seus indicadores limitantes. Sendo assim, alguns indicadores químicos dos solos e resíduos sólidos podem ser limitantes para seu uso posterior, mesmo após o seu tratamento, sendo estes enviados para aterros como modo de destinação final.

A resolução CONAMA 375/2006 considera que o uso agrícola dos lodos de Estação de Tratamento de Esgotos (não considerando neste caso, efluentes industriais) é uma alternativa que apresenta vantagens ambientais quando comparado a outras práticas de destinação final, enquadrando-se nos princípios de reutilização de resíduos de forma ambientalmente adequada. Sendo o lodo de ETE uma fonte de matéria orgânica e nutrientes para as plantas, sua aplicação no solo pode trazer benefícios à agricultura, desde que não cause danos à saúde e ao meio ambiente. Para a aplicação, a resolução prevê que a taxa de aplicação máxima anual deve garantir que o pH final da mistura solo-lodo de esgoto ou produto derivado não ultrapasse o limite de 7,0.

2.2 Disposição de lodos de ETE no solo

O descarte de lodos e resíduos alcalinos no solo apresenta-se como uma alternativa como corretivos da acidez do solo, dependendo do seu valor de neutralização. Os lodos de ETE, comumente alcalinos, têm a capacidade de aumentar o pH pela presença de hidróxidos (Selbach et al., 1991; Albuquerque et al., 2002), porém pode ser limitada pela presença de sódio (Medeiros et al., 2009) e metais o que poderia acarretar alterações negativas no solo. Doses

excessivas podem também aumentar o pH do solo acima de 7, o que não é desejado (Selbach et al., 1991; Tedesco et al., 2009), visto que o aumento do pH afeta a disponibilidade de vários nutrientes, devido à predominância de formas insolúveis (Bissani et al., 2008), podendo causar deficiências de alguns micro-nutrientes nas plantas, cuja disponibilidade diminui com a elevação do pH (Tedesco et al., 2009).

Os lodos de ETE industriais diferenciam dos lodos de ETE urbanas principalmente por sua composição química e possível presença de metais pesados. No caso da indústria do curtume, os lodos de ETE (e outros resíduos) geralmente são classificados como perigosos (Classe I – NBR 10.004/2010) devido ao alto teor de Cromo total. Entretanto estes lodos possuem altos teores de matéria orgânica e nutrientes, além do poder de correção da acidez dos solos (Selbach et al., 1991; Gianello et al., 2011). Os resíduos de curtume são constituídos na maior parte de materiais orgânicos de origem animal misturados com sais inorgânicos. Alguns destes componentes são nutrientes para as plantas e micro-organismos, como: nitrogênio, fósforo, potássio, enxofre, cálcio e magnésio (Selbach et al., 1991). Alguns metais pesados como Zn, Fe, Cu, Mn são essenciais para o crescimento de plantas e constituintes importantes de várias enzimas metabólicas. Outros metais como Pb, Cd, As, Se, Cr e Al são biologicamente não essenciais e tóxicos acima de certos níveis (Panda e Choudhury, 2005). Dentre alguns dos principais elementos presentes em lodos de ETE da indústria do curtume estão: Cr, Na, As, Fe, Mn e Ca.

2.2.1 Cálcio

O Cálcio (Ca^{2+}) é um dos macro-nutrientes mais abundantes para as plantas, importante no desenvolvimento e funcionamento das raízes e necessário na formação de folhas normais (Coelho, 1973). O cálcio é absorvido pelas plantas na forma de íon divalente, sendo encontrado nas células em compostos orgânicos ou na forma iônica (Bissani et al., 2008). A translocação de carboidratos e proteínas e seu armazenamento, durante a formação da semente, são influenciados pelo cálcio (Coelho, 1973).

O cálcio é um elemento não-móvel nas plantas, não sendo transportado pelo floema. Na parte aérea, a deficiência do nutriente é caracterizada pela redução de crescimento de tecidos meristemáticos, acarretando prejuízos para extremidades e folhas novas, que se tornam deformadas e cloróticas (Raij, 1991). Em solos altamente intemperizados e nos arenosos, onde a CTC é baixa, o teor de Ca é muito reduzido, devido às perdas por lixiviação (Bissani et al., 2008). O método mais comum de corrigir a deficiência do elemento se dá pela aplicação de calcário em solo (Coelho, 1973), porém a deficiência é rara em condições de campo, exceto no caso de culturas com exigências especiais (RAIJ, 1991).

2.2.2 Cromo

O Cromo (Cr) é o sétimo metal mais abundante na crosta da terra e um potencial contaminante ambiental. É utilizado extensivamente na indústria de aço, couro, têxtil, entre outros (Panda e Choudhury, 2005). Na indústria calçadista, e de peles em geral, o cromo possui a capacidade de conferir ao couro maior resistência contra os ataques de micro-organismos, motivo de seu uso preferencial (Konrad e Castilhos, 2001). Na natureza o Cr existe em duas formas estáveis de oxidação: trivalente (Cr III) e hexavalente (Cr VI). Ambas formas diferem em termos de mobilidade, biodisponibilidade e toxicidade. O Cr VI possui maior toxicidade que o Cr III, além de possuir alta solubilidade em água. O Cr III, por outro lado, possui baixa solubilidade em água e é requerido, em pequenas quantidades, como um micro-nutriente inorgânico para animais (Panda e Choudhury, 2005). Segundo Selbach et al. (1991), é aceitável a ingestão humana de Cr III em pequenas doses (até $300 \mu\text{g Cr dia}^{-1}$). Nos resíduos de curtume o cromo apresenta-se na forma trivalente (Cr III), sendo não tóxico e essencial neste estado químico. No solo, o Cr III é a forma mais estável, apresentando baixa solubilidade e mobilidade com o aumento do pH (Castilhos et al., 2000).

Segundo Panda e Choudhury (2005), O Cr é tóxico para as plantas (sendo o VI mais fitotóxico) e não desempenha qualquer papel em seu metabolismo. A fitotoxicidade do Cr pode resultar em inibição da germinação

de sementes, balanço nutricional, enzimas antioxidantes e induzir stress oxidativo. A acumulação de Cr pode também reduzir a taxa de crescimento das plantas, alterar o funcionamento enzimático, causar danos celulares e redução de crescimento nas raízes, modificações estruturais em membranas e redução na germinação de sementes.

A presença de matéria orgânica facilmente decomponível tem um duplo efeito em impedir a formação de Cr VI, tanto pela disponibilidade de elétrons na mineralização, como pela formação de compostos orgânicos que formam complexos estáveis com o Cr III (Selbach et al., 1991). Estudos de Selbach et al. (1991) mostram que com a adição de Cr III e resíduos orgânicos não houve a formação de Cr VI no solo (nem presença em água de percolação), devido à capacidade de formar complexos com proteínas. Além disto, na faixa restrita de pH normalmente encontrada no solo (4,5 a 8,0), o Cr III é muito pouco móvel, mesmo em solos arenosos.

2.2.3 Sódio

O Sódio (Na^+) é um metal alcalino, monovalente, com alto raio iônico hidratado. É o sexto elemento mais abundante da crosta e um elemento essencial para animais e algumas espécies vegetais (Raij, 1991). A predominância de sódio em relação aos demais cátions, no complexo de troca, pode promover alterações físicas no solo como: redução do grau de floculação e dispersão do solo, migração dos colóides no perfil e obstrução de poros (Albuquerque et al., 2002; Freire et al., 2003). No caso de aplicação de resíduos sódicos em solo, as alterações ocorrerem principalmente na camada superficial, podendo ocorrer selamento e consequentes processos erosivos, reduzindo a infiltração de água e aeração (Raij, 1991; Albuquerque et al., 2002; Freire et al., 2003; Medeiros et al., 2009). A desestruturação do solo pode afetar o desenvolvimento radicular, além de dificultar ou impedir a emergência das plântulas (período crítico de desenvolvimento) pela formação de crostas na superfície do solo (Bissani et al., 2008).

A redução do desenvolvimento das plantas também é influenciada por toxicidade e pressão osmótica, podendo causar desordem nutricional,

modificações morfológicas, redução na disponibilidade hídrica (seca fisiológica) e evapotranspiração (Viana et al., 2004; Bissani et al., 2008). Os efeitos da salinidade podem ser observados pelas reduções da taxa de crescimento, tamanho e número de folhas, estatura e comprimento e massa das raízes (Shannon e Grieve, 1999). Porém, segundo Raij (1991), o efeito sobre as plantas afeta as produções muito antes de sintomas visuais se tornarem aparentes.

A condutividade elétrica é um dos indicadores mais utilizados na caracterização de solos afetados por sais (McBride, 1994). Segundo Bissani et al. (2008), a tolerância das culturas aos sais é classificada como: tolerantes (8-12); moderadamente tolerantes (5-8); moderadamente sensíveis (4-6) e sensíveis (0-4 dS m⁻¹). Já segundo Sposito (2008), um solo é considerado salino quando sua condutividade elétrica na fase aquosa está acima de 4 dS m⁻¹. Cátions com baixo grau de hidratação tendem a formar complexos de esfera-interna, minimizando as forças de repulsão. Cátions com alto grau de hidratação formam complexos de esfera externa; desse modo, as forças atrativas de curto alcance não se manifestam e o sistema dispersa (Meurer, 2010). A substituição de cátions floculantes (como Al³⁺, Ca²⁺ e Mg²⁺) por dispersantes (como o Na⁺) pode causar a dispersão de argila.

A recuperação de solos salinos pode ser feita pela lavagem do excesso de sais solúveis, com água de boa qualidade. Assim, o sódio apresenta menos problemas em climas com altas taxas de precipitação, como tropicais e subtropicais, pela fácil remoção por lixiviação (Raij, 1991). Condicionadores minerais, como o Sulfato de Cálcio (CaSO₄), mais conhecido como “gesso”, também podem ser utilizados, seguidos de lavagem e lixiviação para remoção do sódio (Raij, 1991; Bissani et al., 2008).

2.2.4 Arsênio

O Arsênio (As) é um elemento-traço carcinogênico altamente tóxico aos humanos, animais e medianamente tóxico às plantas. É considerado há vários anos uma das substâncias mais perigosas à saúde humana (Sparks, 2003; Campos et al., 2013b). Segundo ASTDR (2011), a principal utilização do

As ocorre na preservação da madeira (na forma de Arseniato de Cobre Cromatado). No passado, seu uso predominante foi na agricultura (Arseniato de chumbo, cálcio e sódio), no controle de crescimento de plantas, herbicidas e inseticidas. Entretanto, segundo Pacheco (2005), o As também foi utilizado na indústria do couro como conservante de peles.

O Arsênio ocorre em dois principais estados de oxidação, As III e As V. Ambas as formas ocorrem naturalmente, formando fortes complexos de esfera-interna com óxidos metálicos, como Al, Fe e Mn. Esses complexos reduzem a toxicidade do As (Sparks, 2003). A capacidade de adsorção de As pelos solos fornece indícios do poder-tampão do sistema, visto que muitos atributos do solo interferem no poder tampão e, por consequência, influenciam na lixiviação (Campos et al., 2013a). A concentração de As em solos varia de 0,1 a 97 mg dm⁻³ (Sparks, 2003).

A resposta das plantas está relacionada com a biodisponibilidade do elemento no solo e com a sua absorção e acumulação na planta que, por sua vez, condiciona a sua fitotoxicidade (Madeira et al., 2010). O arsênio interfere com o metabolismo das plantas inibindo o seu crescimento, influenciando a absorção de nutrientes, por interação ou competição (Madeira et al., 2010). Os sintomas mais comuns associados a fitotoxicidade do As são: redução das taxas de germinação, crescimento e produção, além da murchidão das folhas e descoloração das raízes. (Madeira et al., 2010). Apesar de ser um elemento tóxico, até para micro-organismos, Reaves et al. (2012) e Erb et al. (2012) demonstraram que o isolado bacteriano GFAJ-1, uma Gammaproteobacteria do gênero Halomonas, substituiria o fósforo por arsênio, incorporando em seu DNA.

2.3 Efeitos da aplicação de lodo em plantas e microbiota

Efeitos positivos e negativos da aplicação de lodos com presença de cromo podem ser observados, dependendo das doses (Castilhos et al., 2000). Diversos efeitos positivos já foram apresentados por autores (Selbach et al., 1991; Castilhos et al., 2000; Cavallet e Selbach, 2008; Gianello et al., 2011). Em estudos de Selbach et al. (1991), Castilhos et al. (2000), Passionato et al.

(2001), Ferreira et al. (2003) e Cavallet e Selbach (2008), a adição de lodos de curtume estimulou a atividade microbiana do solo e não influenciou na população de micro-organismos. Segundo Castilhos et al. (2000), com a aplicação de lodo de curtume ao solo, em doses de até $500 \text{ mg Cr}_{\text{III}} \text{ kg}^{-1}$, houve aumento da atividade e das populações de bactérias, actinomicetos e fungos. Porém Selbach et al. (1991) citam que teores de Cr III entre 10 e 100 mg dm^{-3} afetaram a população microbiana, causando redução na mineralização de CO_2 , em solos francos. Segundo Gianello et al. (2011) a aplicação de resíduos da indústria coureiro-calçadista não afetou o crescimento de plantas, e ainda poderia ser utilizado como fonte de nitrogênio. Em relação aos teores de Cr nas plantas, os autores concluíram que mesmo ocorrendo aumento da concentração, estes não atingiam níveis tóxicos para o consumo. Em relação à percolação de cromo no perfil, o estudo não observou a translocação para camada sub-superficial dos solos com a aplicação dos resíduos. Segundo Selbach et al. (1991), foram facilmente observados aumentos nos teores de nitrogênio, fósforo, cálcio, magnésio e enxofre nas plantas após a aplicação de resíduos de curtumes.

3 MATERIAL E MÉTODOS

Os experimentos foram conduzidos no Laboratório de Biorremediação dos Solos e casas de vegetação do Departamento de Solos, da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, RS.

3.1 Coleta e caracterização do lodo

O lodo utilizado nos experimentos foi coletado na UTRESA (União dos Trabalhadores em Resíduos Especiais e Saneamento Ambiental), central de resíduos sólidos industriais, localizada em Estância Velha, Rio Grande do Sul. Dentre os resíduos recebidos pela UTRESA estão: aparas, recortes e pó de couro curtido; plásticos não recicláveis; fibra de vidro; metais não recicláveis; materiais têxteis; alimentos vencidos não recicláveis; varreduras contaminadas de pátio e de fábrica; limalha de aço; EPI contaminados; isolantes térmicos e refratários; lodos oriundos de ETE de indústrias do setor coureiro-calçadista; areias de fundição; areias de rampa de lavagens; entre outros (UTRESA, 2013). As células de aterro possuem dutos de drenagem para escoamento dos lixiviados (percolados, “chorume” e pluviais contaminados) gerados, que são conduzidos à Estação de Tratamento de Efluentes (ETE) da UTRESA. Após o tratamento, os efluentes tratados são destinados ao Arroio Cascalho (afluente do Arroio Portão; afluentes do Rio dos Sinos). O lodo gerado no processo de tratamento (derivado principalmente do tratamento físico-químico) é centrifugado e disposto em leitos de secagem para redução do volume, sendo posteriormente disposto nas células do aterro. A geração média de lodo (úmido) é de $12 \text{ m}^3 \text{ dia}^{-1}$ (aproximadamente $100 \text{ Mg m}^2 \text{ mês}^{-1}$ de material seco).

O lodo utilizado neste estudo foi coletado nos leitos de secagem da ETE do aterro UTRESA. O material foi seco em estufa a $65^{\circ}\text{C}\pm 4^{\circ}\text{C}$, moído e tamisado (2 mm). Para a caracterização do lodo utilizado no experimento foram determinados atributos químicos (Tabela 1) e físicos (Tabela 2).

Tabela 1: Caracterização químico-física do Lodo UTRESA e limites da Resolução CONAMA 420/2009.

Indicador	Unidade	Resultado	Res. 420 (P)¹	Res. 420 (A)¹
Carbono orgânico	% (m/m)	7,3	-	-
Nitrogênio (TKN)	% (m/m)	3,9	-	-
Fósforo total	% (m/m)	0,19	-	-
Potássio total	% (m/m)	0,31	-	-
Cálcio total	% (m/m)	20	-	-
Magnésio total	% (m/m)	0,81	-	-
Enxofre total	% (m/m)	1,2	-	-
Ferro total	% (m/m)	4,7	-	-
Sódio total	% (m/m)	2,6	-	-
Cobre total	mg/kg	23	60	200
Zinco total	mg/kg	32	300	450
Manganês total	mg/kg	658	-	-
Cádmio total	mg/kg	0,3	1,3	3
Cromo total	mg/kg	602	75	150
Cromo hexavalente	mg/kg	<1	-	-
Cromo trivalente	mg/kg	602	-	-
Níquel total	mg/kg	38	30	70
Chumbo total	mg/kg	2	12	180
Molibidênio total	mg/kg	0,4	30	50
Arsênio total	mg/kg	12	15	35
Selênio total	mg/kg	<4	5	-
Bário total	mg/kg	31	150	300
Vanádio total	mg/kg	20	-	-
Boro total	mg/kg	34	-	-
Mercúrio	mg/kg	0,01	0,5	12
Poder de neutralização	% (m/m)	49	-	-
pH H ₂ O (1:1)	-	7,9	-	-
Condutividade elétrica	dS/m	12,8	-	-
C:N	-	1,87	-	-

¹Limites da Resolução CONAMA 420/2009 para solos: (P) = Limite de Prevenção; (A) = Limite para uso agrônômico. Indicadores sem definição não são estabelecidos pela resolução.

Tabela 2: Caracterização de atributos físicos para o Lodo UTRESA.

Indicadores	Valores
Umidade	3,0 g/g
Sólidos totais	0,25 g/g
Densidade (úmida)	1,1 g/cm ³
Densidade (seca)	0,75 g/cm ³
Densidade dos sólidos	2,16 g/cm ³
Porosidade total	0,65 cm ³ /cm ³
Capacidade de campo	0,67 cm ³ /cm ³
Porosidade de aeração	0 cm ³ /cm ³

O lodo da ETE da UTRESA apresentou semelhança com lodos de curtume (Apêndice 1), em função do grande volume de resíduos dispostos originários das indústrias coureiro-calçadistas presentes na região da unidade. Entre as principais semelhanças estão os altos teores de C_{org}, Na e Cr. O lodo apresenta uma umidade variável, reduzindo seu volume com a umidade.

3.2 Coleta e caracterização dos solos

Nos ensaios foram utilizados três solos: S1 - Argissolo Vermelho Distrófico, impactado (Pvd*); S2 - Argissolo Vermelho Distrófico (Pvd - São Jerônimo); e S3 - Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico espessarênico abrutíptico (Pvad - Itapuã). Os solos foram classificados segundo o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos - SiBCS (Embrapa, 2009) e Streck et al. (2008).

O solo “S1” foi coletado na área da UTRESA, em local de escavação de argila (utilizada na compactação dos leitos das células), sendo o material predominantemente derivado dos horizontes A e C, com poucos resquícios do horizonte B. O solo “S2” foi coletado na Estação Experimental Agronômica (EEA/UFRGS), em Eldorado do Sul (RS), em área de campo nativo. O solo “S3” foi coletado em Itapuã, distrito de Viamão (RS), nas proximidades da RS 118. Foi coletada a camada de 0-20 cm dos solos, sendo caracterizados (Tabela 3) no Laboratório de Análises do Solo, da Faculdade de Agronomia, UFRGS, segundo metodologia de rotina (Tedesco et al., 1995, modificado).

Tabela 3: Caracterização dos solos S1, S2 e S3.

Indicadores	Unidade	S1	S2	S3
Argila	%	13	26	12
pH H ₂ O (1:1)	-	6,9	5,4	5,2
SMP	-	7,1	6,1	6,5
M.O.	%	1,9	1,9	1,3
Al _{troc}	cmol _c /dm ³	0	6,4	1,2
Ca _{troc}	cmol _c /dm ³	0,2	2,3	1,0
Mg _{troc}	cmol _c /dm ³	0,6	0,6	0,3
Al+H	cmol _c /dm ³	1,2	3,9	2,5
CTC	cmol _c /dm ³	8,9	7,5	3,4
Bases	% Sat. CTC	86	47	26
Al	% Sat. CTC	0,0	5,3	39,7
Ca/Mg	-	5	2,3	1,7
Ca/K	-	86	11	7
Mg/K	-	16	4,9	4,2
P	mg/dm ³	10	5,5	2,9
K	mg/dm ³	29	80	28
S	mg/dm ³	12	7,4	6,2
Zn	mg/dm ³	12	7,7	3,9
Cu	mg/dm ³	1,8	1,1	0,5
Mn	mg/dm ³	12	35	21
Na	mg/dm ³	8	5	6

S1 = Pvd* (impactado); S2 = Pvd – UM São Jerônimo; S3 = Pvd – UM Itapuã.

3.3 Ensaio e Experimentos

Para a verificação dos impactos da disposição de doses de lodo nos solos foram desenvolvidos dois experimentos: em frascos respirométricos (laboratório) e em vasos (em casa de vegetação).

3.3.1 Frascos respirométricos

O experimento foi conduzido utilizando-se delineamento inteiramente casualizado, com três solos (S1, S2 e S3), cinco doses de lodo (0, 2, 10, 25, e 50 Mg ha⁻¹) e três repetições. Foram utilizados frascos respirométricos de vidro (1,1 L), hermeticamente fechados, com 200 g de solo (massa úmida), com a umidade dos solos ajustada a 70% da capacidade de campo. O lodo foi aplicado no início do experimento, sendo homogeneizado com o solo. Os

frascos foram acondicionados em incubadora ($26^{\circ}\text{C}\pm 1$) durante tempo total de 91 dias.

3.3.1.1 Atributos microbianos

Foram determinados a Biomassa microbiana (BMS-C), a Respiração Basal do Solo (BMS-5) e o Quociente Metabólico ($q\text{CO}_2$). Para determinação da BMS-C utilizou-se metodologia (*i/i*) proposta por Ferreira et al. (1999). Para determinação do $q\text{CO}_2$ utilizou-se equação proposta por Silva et al. (2009).

3.3.1.2 Mineralização de Carbono

A metodologia utilizada foi proposta por Anderson e Domsch (1978). O método respirométrico é uma forma indireta de avaliação da atividade microbiana (Cetesb, 1990) e da decomposição dos resíduos orgânicos no solo (ABNT, 1999) e tem sido utilizada como bioindicador dos efeitos de metais pesados sobre a microbiota do solo (Castilhos et al., 2000). A mineralização de carbono (C-CO_2) foi quantificada pela titulação do NaOH, que reage com o CO_2 (gerado pela respiração microbiana) precipitado pelo BaCl_2 . Foram utilizados copos plásticos transparentes, com volume de 50 mL, postos sobre tripés metálicos, adicionando-se 20 mL de NaOH $0,5 \text{ mol L}^{-1}$. Para as titulações utilizou-se bureta digital com HCl $0,5 \text{ mol L}^{-1}$, adicionando-se 2 mL de BaCl_2 10% e duas gotas de fenolftaleína 1%. As leituras ocorreram aos 5, 10, 16, 23, 32, 45, 64 e 91 dias de incubação.

A cinética da mineralização do carbono foi obtida a partir da regressão exponencial: “ $y = a (1 - e^{-bx})$ ”, ou “ $\text{C}_m = \text{C}_o (1 - e^{-kt})$ ”, onde: C_m = carbono mineralizado no tempo t (em mg kg^{-1}); C_o = carbono potencialmente mineralizável (em mg kg^{-1}); k = constante de velocidade da reação de mineralização (em dias); t = tempo em dias. Para as regressões e obtenção dos parâmetros utilizou-se o programa SigmaPlot v.10.0.

3.3.1.3 Hidrólise do diacetato de fluoresceína (FDA)

A metodologia utilizada foi descrita por Schnürer e Rosswall (1982) e modificada por Adam e Duncan (2001). Foram utilizados 2 g de solo, adicionados em tubos *falcon* de 50 mL. As amostras foram preparadas em duplicatas, diferenciando-se apenas pela adição de 0,2 mL de FDA ($1000 \mu\text{g mL}^{-1}$) nos tubos controle. Nos tubos foram adicionados 15 mL de Tampão Fosfato (60 mM; pH 7,6); agitados em incubadora com agitador orbital (*shaker*) por 20 minutos, a 140 RPM e 30°C. Após a agitação foram adicionados 15 mL de solução clorofórmio/metanol (2:1 v/v) para cessar a reação de hidrólise; os conjuntos foram centrifugados por 4 minutos a 3.500 RPM e 15°C; o sobrenadante foi filtrado em filtro-seletivo; a absorbância dos filtrados oriundos foi quantificada em espectrofotômetro a 490 nm. Os valores de absorbância foram convertidos pela curva padrão de fluoresceína ($0-200 \mu\text{g mL}^{-1}$); a concentração de fluoresceína ($\mu\text{g mL}^{-1}$) foi calculada pela diferença entre os valores dos frascos com e sem adição de FDA, respectivamente; o valor foi convertido, pela massa de solo e tempo de hidrólise ($\mu\text{g}_{\text{fluoresceína}} \cdot \text{g}_{\text{solo}}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$).

Nos frascos respirométricos as coletas ocorreram aos 16, 32, 66 e 91 dias (utilizando-se da mesma abertura para leitura de CO_2). Nos vasos em casa de vegetação foram coletadas amostras de solo de 0-5 cm de profundidade (aos 15, 30, 60 e 90 dias), de forma composta, e imediatamente levadas ao laboratório para análise.

3.3.2 Vasos em casa de vegetação

O experimento foi conduzido utilizando-se delineamento em blocos casualizados, em triplicata, com seis tratamentos, três solos (S1, S3, S3) e cinco doses de lodo, sendo: controle (sem adição de lodo); Testemunha (NPK+Calcário); e doses de lodo de 2, 5, 10 e 20 Mg ha^{-1} (equivalentes). Para a calagem da Testemunha seguiram-se as recomendações do Manual de Adubação e de Calagem (CQFS-RS/SC, 2004); para a adubação foram seguidas as recomendações para correção total (120, 120 e 70 kg ha^{-1} de NPK, respectivamente); e para a calagem baseou-se no índice SMP, para pH 6,5.

Para o solo S1 não houve calagem, devido ao seu pH em água e pH SMP altos. O lodo foi aplicado após a montagem dos vasos, em superfície e homogeneizado em profundidade, sendo o único aporte de nutrientes (além do solo) para estes tratamentos (Apêndice 4. Foram utilizados vasos plásticos com volume total de 6 L, adicionando-se 4 dm³ de solo por vaso. No solo S1 (“Utresa”) plantou-se milho (*Zea mays*); e nos solos S2 (São Gerônimo) e S3 (Itapuã) plantou-se girassol (*Helianthus annuus L.*; cultivar Charrua) e sorgo (*Sorghum sp.*), semeados entre setembro e outubro de 2013. O plantio ocorreu cerca de 10 dias após a adição de lodo nos solos. Ao fim do experimento, coletou-se amostras compostas de solo na profundidade de 0-20 cm, com auxílio de trado calador. A colheita do milho (S1) ocorreu em novembro, 75 dias após a germinação. O girassol e sorgo foram colhidos em dezembro, 75 e 50 dias após a germinação, respectivamente.

3.3.2.1 pH e condutividade elétrica

As análises de pH e Condutividade Elétrica (CE) seguiram as metodologias estabelecidas por Tedesco et al. (1995). Para o pH em água (pH H₂O) utilizou-se a relação solo-água de 1:1 (m/m). Para a condutividade utilizou-se a relação 1:5. O pH e a CE foram analisados nos solos (vasos em vasa de vegetação), nas mesmas coletas utilizadas para o FDA, além da amostra de 0-20 cm.

3.3.2.2 Argila Dispersa em Água e Grau de Flocculação

O Grau de Flocculação é uma relação entre a argila naturalmente dispersa (em água) e a argila total (com utilização de dispersante), indicando a proporção da fração argila que se encontra floculada (Embrapa, 1997). Para a obtenção da Argila Dispersa em Água (ADA) e o Grau de Flocculação (GF), utilizou-se a metodologia descrita no Manual de Métodos de Análise de Solo (Embrapa, 1997), para o Método do Densímetro (“Bouyoucos”). Para isto utilizou-se 25 g de solo (amostras de 0-20 cm); para a dispersão total adicionou-se 25 mL de NaOH 0,5 M e 50 mL de água destilada (sendo apenas

água para dispersão natural); as soluções foram agitadas e transferidas para provetas, completando-se o volume com água destilada. O GF foi calculado segundo Embrapa (1997).

3.3.2.3 Teores dos elementos no solo

Nas amostras de 0-20 cm foram analisados os teores disponíveis de: P, K, Ca, Mg, Cu, Zn e Na. Para a extração utilizou-se o método Mehlich-1, descrito em Tedesco et al. (1995). As quantificações ocorreram em ICP, sendo os resultados convertidos para unidade padrão.

3.3.2.4 Efeitos do lodo no desenvolvimento das plantas

O efeito das doses de lodo nas plantas foi analisado pela medição da altura, produção de matéria seca (parte aérea e raízes) e diâmetro do caule (para o girassol). A colheita para determinação dos atributos ocorreu aos 60 dias após germinação para o milho, 30 dias para o sorgo e 90 dias para o girassol.

3.3.2.5 Teores dos elementos no tecido

Nos tecidos (parte aérea e raízes) das plantas colhidas foram analisados os teores de: P, K, Ca, Mg, S, Cu, Zn, Fe, Mn, Na, Cd, Cr, Ni, Pb, As e Se. Para isto utilizou-se a extração nitro-perclórica, segundo método descrito por Tedesco et al. (1995). As quantificações ocorreram em ICP.

3.4 Análises estatísticas

O programa ASSISTAT Versão 7.7 beta (Silva e Azevedo, 2009) foi utilizado para a análise de variância dos resultados e quando significativo a 5% de probabilidade, as médias foram comparadas pelo teste de Tukey.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Atributos microbianos

A biomassa microbiana (BMS-C) reduziu proporcionalmente às doses de lodo (Tabela 4), aumentando o quociente metabólico (qCO_2). Os valores de BMS-C no solo S1 (Pvd*) variaram de 106,8 a 53,2 mg C kg_{solo}⁻¹; no solo S2 (Pvd) de 272,6 a 44,2; e no solo S3 (Pvad) de 167,7 a 38,5. Estas variações representam respectivamente reduções de 50, 84 e 77% dos valores iniciais do solo (Controle). Os valores de qCO_2 no solo S1 (Pvd*) variaram de 1,53 a 22,40 mg C-CO₂ g⁻¹ BMS-C hora⁻¹; no solo S2 (Pvd) de 0,79 a 40,10; e no solo S3 (Pvad) de 1,29 a 43,04 (Tabela 4). O quociente metabólico (qCO_2) indica que a população microbiana do solo está consumindo mais carbono oxidável para sua manutenção (Anderson e Domsch, 2010). Para os três solos não houve diferenças ($p < 0,005$) entre os tratamentos Controle e Ld1 (2 Mg ha⁻¹), tanto para a BMS-C quanto para o qCO_2 . Resultados similares foram encontrados por Bueno et al. (2011) e Mendoza et al. (2013).

A redução na BMS-C pode ser relacionada ao aporte de elementos causado pela adição do lodo em solo (Apêndice 4), dentre estes o sódio (Tripathi et al., 2006; Yuan et al., 2007), um dos elementos em maior concentração no lodo. O sódio pode causar efeitos negativos diretamente, por pressão osmótica (Raij, 1991; McBride, 1994), ou indiretamente, em função de desordem nutricional (Bissani et al., 2008; Sposito, 2008). Porém, a adição conjunta da matéria orgânica presente no lodo tende a reduzir o efeito negativo da salinidade sobre a biomassa microbiana (Silva Junior et al., 2009; Mendoza et al., 2013). Deste modo, outros fatores podem interferir conjuntamente na

BMS-C, como o aumento nas concentrações de elementos-traço e a alteração no pH ($r = -0,76$) e condutividade elétrica (Bueno et al., 2011), alterando as condições naturais da microbiota.

Tabela 4: Carbono da biomassa microbiana do solo (BMS-C), Respiração Basal do Solo (RBS-5) e quociente metabólico do solo (qCO_2) para os solos S1, S2 e S3 e doses de lodo.

Tratamentos	doses	BMS-C	RBS-5	qCO_2
	Mg ha ⁻¹	mg C.kg solo ⁻¹	mg C-CO ₂ .kg ⁻¹ solo.hora ⁻¹	mg C-CO ₂ .g ⁻¹ BMS-C.h ⁻¹
Controle (S1)	0	106,81 aC	0,16 eA	1,53 dA
Ld1	2	109,76 aC	0,32 dC	2,93 cdA
Ld2	10	86,12 abB	0,55 cC	6,39 cB
Ld3	25	82,32 abB	0,92 bB	11,2 bB
Ld4	50	53,19 bA	1,19 aC	22,4 aB
Média		87,6 c	0,63 b	8,88 c
C.V. (%)		26,0	62,4	94,8
Controle (S2)	0	272,57 aA	0,22 eA	0,79 cA
Ld1	2	238,08 aA	0,44 dB	1,86 cA
Ld2	10	182,47 bA	0,87 cB	4,76 cB
Ld3	25	121,27 cA	1,38 bA	11,4 bB
Ld4	50	44,20 dA	1,77 aA	40,1 aA
Média		171,7 a	0,94 a	11,78 b
C.V. (%)		53,3	64,0	138,9
Controle (S3)	0	167,73 aB	0,22 eA	1,29 dA
Ld1	2	153,00 aB	0,57 dA	3,7 dA
Ld2	10	92,93 bB	1,03 cA	11,1 cA
Ld3	25	70,27 bcB	1,31 bA	18,7 bA
Ld4	50	38,53 cA	1,66 aB	43,04 aA
Média		104,5 b	0,96 a	15,57 a
C.V. (%)		52,4	55,8	107,9

As Médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si. Foi aplicado o Teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade. Letras minúsculas representam diferentes tratamentos; letras maiúsculas representam diferentes solos. S1 = Pvd* (impactado); S2 = Pvd – UM São Jerônimo; S3 = Pvad – UM Itapua.

4.1.1 Mineralização de carbono (C-CO₂)

A mineralização de carbono reflete a atividade microbiana do período analisado. Foram incubadas amostras dos três solos estudados por um tempo total de 91 dias (Tabela 5). Com a aplicação do lodo e incubação ocorreu intensa liberação de CO₂, principalmente nos primeiros 10 a 20 dias,

para os três solos. Esta rápida mineralização pode ser atribuída principalmente à baixa relação C:N e à composição mais lábil da fração orgânica do lodo. Um segundo fator que pode influir é a remineralização, onde a microbiota remanescente utiliza como fonte de carbono, nutrientes e energia os compostos oriundos dos micro-organismos impactados pelo estresse da modificação do sistema (Moreira e Siqueira, 2006; Haney e Franzluebbers, 2009).

Tabela 5: Carbono mineralizado (C-CO₂) em solos sob doses de lodo de ETE de um aterro industrial.

Tratamentos	Doses Mg ha ⁻¹	Dias após aplicação do lodo							
		5	10	16	23	32	45	64	91
	 mg C-CO ₂ kg ⁻¹							
Controle (S1)	0	20	8	7	16	15	20	32	44
Ld1	2	39	16	15	25	26	30	29	41
Ld2	10	66	35	35	38	42	47	49	50
Ld3	25	110	54	49	66	71	75	67	69
Ld4	50	143	78	65	81	77	93	100	86
Média		75,5	38,2	33,9	45,2	45,9	52,8	55,6	57,8
C.V. (%)		67,3	74,7	70,5	61,1	59,4	57,4	52,4	33,1
Controle (S2)	0	26	21	12	21	19	46	59	66
Ld1	2	53	28	21	30	23	48	65	68
Ld2	10	104	66	55	63	56	80	84	99
Ld3	25	166	97	80	85	74	98	103	131
Ld4	50	213	144	105	100	88	109	108	121
Média		112,3	71,3	54,9	59,7	52,1	76,0	83,8	97,3
C.V. (%)		68,9	71,4	71,4	57,0	59,1	37,2	26,1	30,6
Controle (S3)	0	26	24	17	17	35	48	46	81
Ld1	2	68	26	36	34	69	70	56	84
Ld2	10	124	67	69	65	86	81	68	98
Ld3	25	158	85	73	63	75	69	56	89
Ld4	50	199	100	90	73	91	83	74	100
Média		114,9	60,3	57,0	50,5	71,3	70,4	60,0	90,2
C.V. (%)		60,1	57,1	51,8	47,5	31,2	20,0	17,9	9,1

S1 = Pvd* (degradado); S2 = Pvd – UM São Jerônimo; S3 = Pvad – UM Itapuã.

Os resultados apontaram grandes valores de carbono mineralizado (C_m) com a aplicação de lodo (Tabela 6). Os maiores valores de C-CO₂ ocorreram no solo S2, seguido de S3 e S1 (Figuras 1, 2 e 3), sendo

estatisticamente diferentes. A mesma relação ocorreu na BMS-C, tendo esta direta relação com o influxo de CO_2 (Anderson e Domsch, 2010).

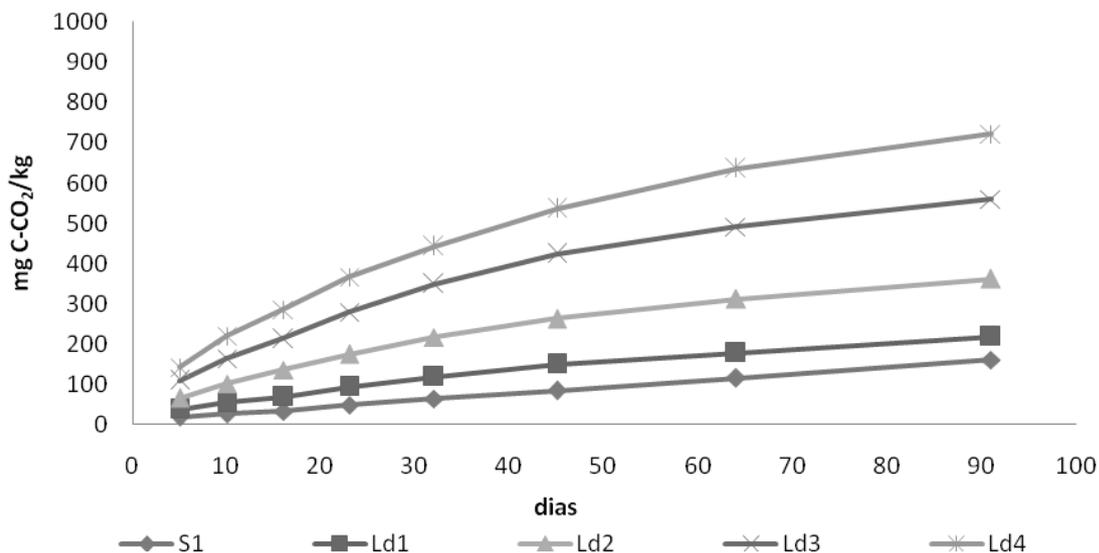


Figura 1: Mineralização de Carbono Acumulado em doses de lodo (0; 2; 10; 25; 50 Mg ha^{-1}) no solo S1 durante 91 dias de incubação.

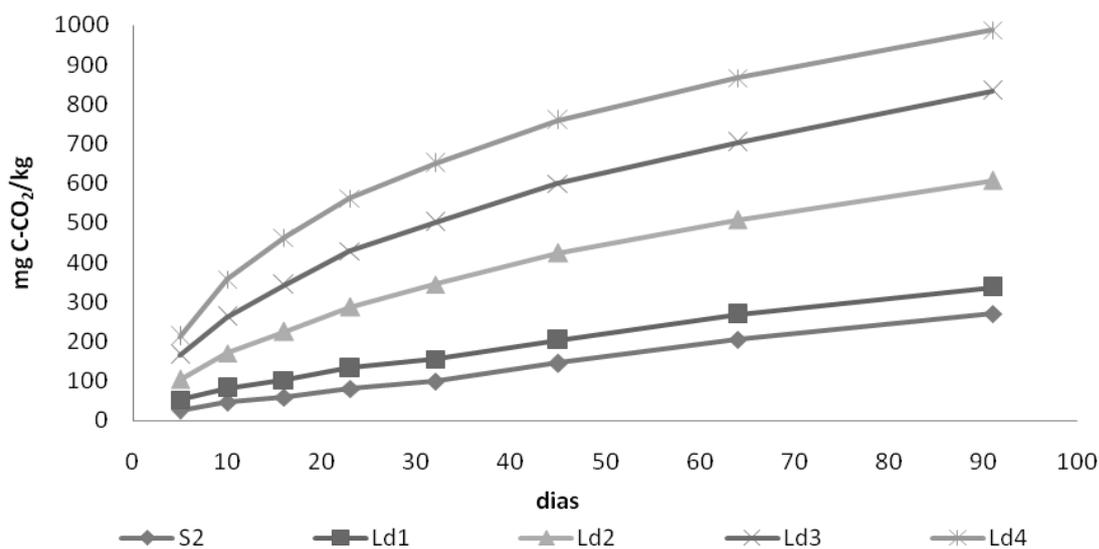


Figura 2: Mineralização de Carbono Acumulado em doses de lodo (0; 2; 10; 25; 50 Mg ha^{-1}) no solo S2 durante 91 dias de incubação.

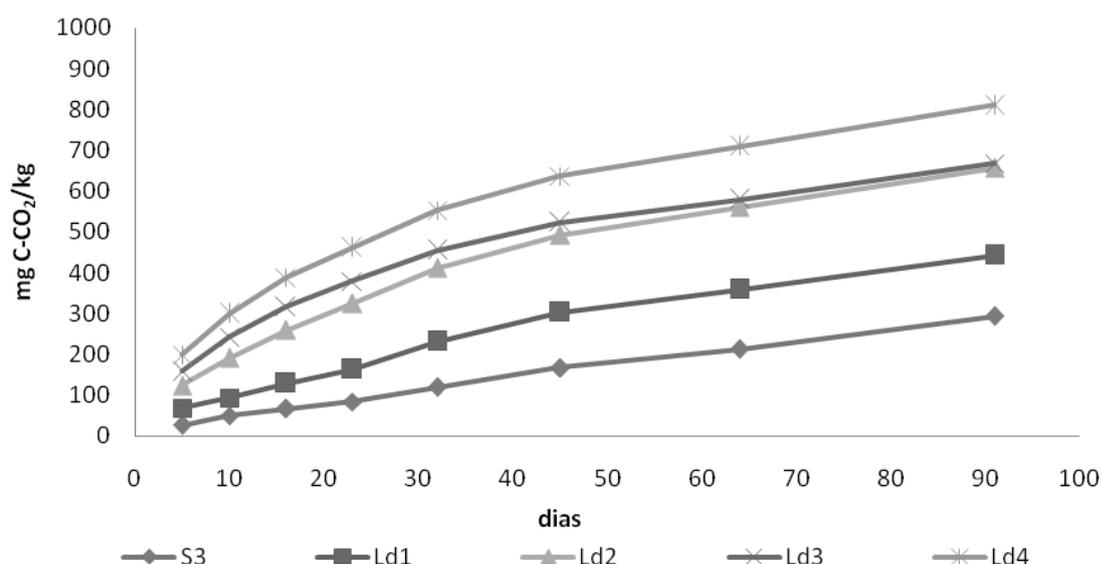


Figura 3: Mineralização de Carbono Acumulado em doses de lodo (0; 2; 10; 25; 50 Mg ha⁻¹) no solo S3 durante 91 dias de incubação.

Todas doses diferenciaram ($p < 0,005$), sendo proporcionais em função do carbono orgânico presente no lodo, tendo alta correlação positiva ($r = 0,85$). Correlações (Apêndice 2) positivas ocorreram também com o qCO_2 , pH e condutividade elétrica (0,82; 0,65 e 0,78, respectivamente), apontando a influência destes atributos na degradação do lodo. Castilhos et al. (2000) e Martines et al. (2006) apontam que a maior liberação de C-CO₂ em solos tratados com lodo não se deve apenas à incorporação de carbono orgânico e nutrientes, mas também ao efeito corretivo e à ação inoculante do lodo.

A aplicação do lodo promoveu maior mineralização, proporcionalmente às doses. Efeitos positivos na atividade microbiana com adição de doses crescentes de lodo (da indústria de curtume) também foram encontrados por Castilhos et al. (2000) e Cavallet e Selbach (2008). O carbono potencialmente mineralizável (Co), no tratamento Controle, obteve maiores valores que as doses iniciais em função da lenta decomposição das frações recalcitrantes presentes no solo, linearizando a mineralização (Tabela 6). Segundo Barreto et al. (2010), a queda na inclinação das curvas de mineralização de C devem-se possivelmente à presença, em maior proporção, de resíduos de maior estabilidade. A taxa de mineralização (k) variou no solo S1 (Pvd*) de 0,5 a 2,9% de carbono mineralizado por dia; no solo S2 de 0,5 a 3,8%; e no solo S3 de 0,6 a 4,1% (Tabela 6). Não houve diferenças estatísticas

(teste de médias) entre os tratamentos Ld3 e Ld4 (25 e 50 Mg ha⁻¹, respectivamente).

Tabela 6: Carbono mineralizado (Cm), carbono potencialmente mineralizado (Co) e taxa de mineralização (k).

Tratamentos	Doses Mg ha ⁻¹	Cm mg C-CO ₂ .kg ⁻¹	Co	k dia	R ²
Controle (S1)	0	161 eC	408,8	0,005	1,00 **
Ld1	2	220 dC	254,2	0,020	0,99 **
Ld2	10	362 cC	389,3	0,026	1,00 **
Ld3	25	561 bC	594,8	0,029	1,00 **
Ld4	50	722 aC	758,3	0,029	0,99 **
Controle (S2)	0	271eB	785,2	0,005	1,00 **
Ld1	2	337dB	442,6	0,015	0,99 **
Ld2	10	607 cB	655,5	0,025	0,99 **
Ld3	25	834 bA	848,7	0,030	0,99 **
Ld4	50	988 aA	970,5	0,038	0,99 **
Controle (S3)	0	294 dA	678,2	0,006	1,00 **
Ld1	2	443 cA	567,1	0,016	1,00 **
Ld2	10	658 bA	687,2	0,029	1,00 **
Ld3	25	668 bB	650,1	0,040	0,99 **
Ld4	50	810 aB	787,8	0,041	0,99 **

As Médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si. Foi aplicado o Teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade. Letras minúsculas representam diferentes tratamentos; letras maiúsculas representam diferentes solos. S1 = Pvd* (impactado); S2 = Pvd – UM São Jerônimo; S3 = Pvad – UM Itapuã. Cm = Carbono mineralizado no período de 91 dias; Co = Carbono potencialmente mineralizável; k = taxa de mineralização. R² = referente a curva de mineralização,

4.1.2 Hidrólise do diacetato de fluoresceína (FDA)

O FDA - diacetato de fluoresceína (3'6' – diacetil – fluoresceína) - é uma fluoresceína conjugada a dois radicais acetato, formando um composto incolor que ao ser hidrolisado por enzimas (como proteases, lipases e esterases), libera como produto da reação a fluoresceína, que é visível e colorida (STUBBERFIELD e SHAW, 1990; GREENA et al., 2006). Foram incubadas amostras dos frascos respirométricos (Tabela 7) e vasos em casa de vegetação (Tabela 8).

A redução da hidrólise do FDA com as menores doses de lodo indica uma menor atividade enzimática, porém com as maiores doses de lodo, e entrada de carbono orgânico e micro-organismos adaptados, há um restabelecimento no sistema. Trannin et al. (2007) observaram que o aumento

da atividade hidrolítica do FDA correlacionou-se positivamente com o C_{org} do solo.

Tabela 7: Hidrólise do FDA ($\mu\text{g g}^{-1} \text{h}^{-1}$) em solos sob doses de lodo aos 15, 30, 60 e 90 dias – amostras em frascos respiratórios.

Tratamentos	Doses Mg ha ⁻¹	Dias após aplicação do lodo			
		15	30	60	90
Controle (S1)	0	1,30 dC	1,93 cA	1,13 dB	1,21 fB
Ld1	2	1,01 fC	1,98 cB	1,01 dB	1,02 dB
Ld2	10	1,70 cB	1,73 eB	0,97 dB	0,91 dB
Ld3	25	2,42 bA	2,04 bB	1,19 fB	1,07 dB
Ld4	50	1,71 cA	3,25 aA	1,21 dB	1,41 fB
Média		1,63	2,18	1,10	1,14
C.V. (%)		32,2	26,9	13,8	19,0
Controle (S2)	0	1,86 eA	2,01 cA	2,16 bA	1,87 cA
Ld1	2	1,62 cA	1,81 eA	2,24 cB	2,27 bA
Ld2	10	1,93 cA	1,82 cA	2,84 cA	2,04 cA
Ld3	25	6,57 aB	1,80 cA	3,09 aA	2,35 dA
Ld4	50	7,28 aA	2,28 cB	2,47 bB	2,39 bA
Média		3,85	1,95	2,58	2,19
C.V. (%)		68,5	12,6	16,6	12,8
Controle (S3)	0	2,71 aC	4,14 bA	5,91 bA	2,70 bA
Ld1	2	1,17 dD	2,26 bB	2,29 dB	1,25 dA
Ld2	10	1,91 cA	1,76 cC	1,35 dC	0,86 fA
Ld3	25	1,63 eA	1,88 cA	1,72 cC	1,01 dA
Ld4	50	1,48 cA	2,26 dA	2,29 cA	1,23 dA
Média		1,77	2,47	2,71	1,41
C.V. (%)		37,3	37,8	63,5	49,0

As médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si. Foi aplicado o Teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade; considerando o fator “doses” como quantitativo. S1 = Pvd* (degradado); S2 = Pvd – UM São Jerônimo; S3 = Pvd – UM Itapuã.

Houve grande variação na hidrólise do FDA, entre solos e dias, nos frascos respirométricos (Tabela 7). A hidrólise do FDA, nos frascos respirométricos, foi estatisticamente diferente ($p < 0.005$) para os três solos, sendo $S2 > S3 > S1$ (na média dos dias), como na mineralização de carbono. Entre as doses, os menores valores (teste de média) foram relativos a Ld1 e Ld2 (2 e 10 Mg ha⁻¹, respectivamente) não diferindo estatisticamente entre si. Os maiores valores foram relativos as doses Controle e Ld4 (0 e 50 Mg ha⁻¹, respectivamente), não diferindo entre si.

Tabela 8: Hidrólise do FDA ($\mu\text{g g}^{-1} \text{h}^{-1}$) em solos sob doses de lodo aos 15, 30, 60 e 90 dias - vasos em casa de vegetação.

Tratamentos	Doses Mg ha ⁻¹	Dias após aplicação do lodo			
		15	30	60	90
Controle (S1)	0	0,81 cD	0,94 cD	0,36 bE	1,23 cC
Ld1	2	1,33 aC	0,88 cD	0,41 cE	1,47 cB
Ld2	5	1,23 aC	0,84 cD	0,59 bE	1,78 cB
Ld3	10	1,54 aB	1,00 cD	0,79 bD	1,54 bB
Ld4	20	1,14 bD	1,45 cB	1,07 bD	2,37 bA
T (NPK)	0	0,96 cD	0,85 cD	0,41 cE	1,50 cB
Média		1,17	0,99	0,60	1,62
C.V. (%)		22,5	24,3	46,1	25,7
Controle (S2)	0	1,61 aE	1,47 bE	2,48 aC	3,76 aA
Ld1	2	1,33 aE	1,92 bD	3,01 aB	3,85 aA
Ld2	5	0,96 bF	2,44 aC	2,26 aC	2,93 aB
Ld3	10	1,45 aE	2,44 aC	2,60 aC	2,41 aC
Ld4	20	2,01 aD	3,13 aB	2,62 aC	2,33 bC
T (NPK)	0	1,55 bE	2,10 bD	3,33 aB	3,51 aA
Média		1,48	2,25	2,72	3,13
C.V. (%)		23,2	25,0	14,3	21,4
Controle (S3)	0	1,18 bD	2,81 aA	2,74 aA	2,11 bC
Ld1	2	0,81 bE	2,50 aB	2,18 bC	2,81 bA
Ld2	5	0,86 bE	2,02 bC	2,16 aC	2,48 bB
Ld3	10	0,75 bE	2,08 bC	2,38 aC	2,19 aC
Ld4	20	0,96 bE	1,97 bC	2,72 aA	2,68 aA
T (NPK)	0	1,88 aC	3,05 aA	2,18 bC	2,37 bC
Média		1,07	2,41	2,39	2,44
C.V. (%)		39,6	18,9	11,4	11,2

As médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si. Foi aplicado o Teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade; considerando o fator “doses” como quantitativo. S1 = Pvd* (degradado); S2 = Pvd – UM São Jerônimo; S3 = Pvd – UM Itapuã. T (NPK) = Testemunha com adição de nutrientes (NPK) e calcário.

As quantidades de fluoresceína liberadas, na hidrólise do FDA, são proporcionais a população microbiana (SWISHER e CARROLL, 1980). Diversos autores já comprovaram a utilização do método da hidrólise de FDA como bioindicador ambiental (GHINI et al., 1998; SILVA et al., 2004; TRANNIN et al., 2007; GOMES et al., 2010; CHAVEZ et al., 2011). Sendo a microbiota dependente de fatores ambientais, como temperatura e umidade, há maior variação destes fatores nos vasos em casa de vegetação (Tabela 8). Assim como nos frascos respirométricos, os maiores valores de FDA se deram em: S2 > S3 > S1. Em relação às doses, os maiores valores (teste de médias) de

FDA foram encontrados nos tratamentos Ld1 (2 Mg ha⁻¹) e Testemunha (NPK+Calc.), assim como ocorrido na biomassa microbiana (BMS-C). O FDA, porém, não se correlacionou fortemente com nenhum atributo analisado (Apêndices 3 e 4).

4.2 Atributos químicos do solo

Para avaliar as modificações das propriedades do solo foram analisados o pH e condutividade elétrica (nas camadas 0-5 e 0-20 cm), Argila Dispersa em Água (ADA) e teores de nutrientes para os solos S1, S2 e S3. A aplicação do lodo proporcionou aumento do pH na camada 0-5 cm para os três solos (Tabela 9). Segundo Sposito (2008), este aumento no pH deve-se principalmente a alcalinidade do material, em função da adição de íons de maior valência, como Ca²⁺ e Mg²⁺. Na camada superficial (0-5 cm), o pH e a condutividade elétrica (CE) não apresentaram diferenças estatísticas significativas entre as culturas de sorgo e girassol, nos solos S2 e S3 (Tabela 9).

De forma geral, houve tendência de redução do pH (assim como da CE) com o tempo (Tabelas 9 e 10), para as menores doses (2 e 5 Mg ha⁻¹), ocorrendo o inverso (no pH) para as maiores (10 e 20 Mg ha⁻¹). Segundo Castilhos et al. (2002) e Bueno et al. (2011), o decréscimo no pH e CE (das menores doses) pode ser ocasionado pela lixiviação e, ou, fitoextração de nutrientes, como o Ca e Mg, aumentando a acidez potencial (H + Al) do solo. Nas doses 10 e 20 Mg ha⁻¹ não houve diferença estatística entre os solos (teste de médias), não havendo diferenciação do pH, limitando-se ao valor do lodo (próximo a 8,0). Para a camada de 0-5 cm, a dose de 2 Mg ha⁻¹ foi suficiente para aproximar o pH a 7,0 para os solos S2 e S3 (sendo S1 já alcalino). O aumento excessivo do pH causa problemas de redução da disponibilidade de nutrientes, porém processos naturais de acidificação do solo provocam a redução gradual do pH com o tempo (Tedesco et. al., 2009).

Tabela 9: Valores de $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$ (1:1) na camada 0-5 cm aos 15, 30, 60 e 90 dias após aplicação das doses de lodo nos solos S1, S2 e S3.

Tratamentos	Doses Mg ha^{-1}	Dias após aplicação do lodo			
		15	30	60	90
Controle (S1)	0	7,3 aB	7,2 aB	7,0 aB	7,7 aB
Ld1	2	8,1 aA	7,6 aB	7,4 aA	7,5 aB
Ld2	5	8,1 aA	7,8 aAB	7,6 bA	7,8 aAB
Ld3	10	7,9 aA	7,8 aAB	8,0 aA	7,9 aA
Ld4	20	7,8 aA	8,0 aA	8,0 aA	8,1 aA
T (NPK)	0	7,0 bC	6,9 aC	7,1 aB	7,0 aC
Média		7,7	7,5	7,5	7,7
C.V. (%)		5,7	5,4	6,0	4,9
Controle (S2)	0	5,4 bC	5,3 bB	4,9 cD	4,9 cC
Ld1	2	7,0 cB	6,5 cB	6,9 bB	6,6 bC
Ld2	5	7,4 bA	7,5 aA	8,0 aA	7,8 aB
Ld3	10	7,6 aA	7,6 aA	7,9 aA	8,1 aA
Ld4	20	7,9 aA	7,8 aA	8,1 aA	8,2 aA
T (NPK)	0	7,4 aA	5,5 bB	6,2 cC	6,3 bB
Média		7,1	6,7	7,0	7,0
C.V. (%)		12,6	16,3	18,4	18,4
Controle (S3)	0	5,2 bB	5,3 bC	5,2 bC	5,4 bC
Ld1	2	7,4 bA	7,2 bB	6,9 bB	6,8 bC
Ld2	5	7,7 bA	7,7 aA	7,8 abA	7,8 aB
Ld3	10	7,7 aA	7,7 aA	8,0 aA	8,0 aAB
Ld4	20	7,9 aA	7,8 aA	8,2 aA	8,3 aA
T (NPK)	0	7,6 aA	7,0 aB	6,7 bB	6,6 bB
Média		7,2	7,1	7,1	7,1
C.V. (%)		14,2	13,4	15,5	15,5

Médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si. Foi aplicado o Teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade; considerando o fator "doses" como quantitativo. S1 = Pvd* (degradado); S2 = Pvd – UM São Jerônimo; S3 = Pvd – UM Itapuã. T (NPK) = Testemunha com adição de nutrientes (NPK) e calcário.

A condutividade elétrica (CE) na camada 0-5 cm, como o pH, aumentou de forma proporcional às doses de lodos nos três solos (Tabela 10), reduzindo linearmente com o tempo. Esta redução dá-se possivelmente pela lixiviação dos íons mais solúveis, principalmente o sódio, em função de seu grande raio de hidratação, percolando facilmente pelo perfil com a adição de água de boa qualidade (Raij, 1991; Bissani et al., 2008).

Tabela 10: Condutividade Elétrica (1:5) na camada 0-5 cm aos 15, 30, 60 e 90 dias após aplicação das doses de lodo nos solos S1, S2 e S3

Tratamentos	Dose (Mg/ha)	Dias após aplicação do lodo			
		15	30	60	90
Controle (S1)	0	0,10 aF	0,08 aF	0,07 aF	0,06 aF
Ld1	2	0,24 aD	0,21 aD	0,10 bF	0,11 aF
Ld2	5	0,32 aC	0,30 aC	0,16 bE	0,18 aE
Ld3	10	0,32 cC	0,48 aB	0,20 bE	0,22 bD
Ld4	20	0,37 cC	0,63 aA	0,24 bD	0,34 aC
T (NPK)	0	0,18 aE	0,26 aD	0,11 bF	0,09 aF
Média		0,25 cB	0,33 aA	0,15 cC	0,17 aC
C.V. (%)		40,3	60,3	45,9	62,6
Controle (S2)	0	0,04 aG	0,06 aG	0,06 aG	0,04 aG
Ld1	2	0,24 aE	0,18 aF	0,18 aF	0,08 aG
Ld2	5	0,34 aD	0,27 aE	0,31 aE	0,16 aF
Ld3	10	0,65 aB	0,36 bD	0,39 aD	0,29 aE
Ld4	20	1,08 aA	0,55 bC	0,40 aD	0,30 aE
T (NPK)	0	0,20 aF	0,13 bF	0,29 aE	0,06 cG
Média		0,42 aA	0,26 bB	0,27 aB	0,15 aC
C.V. (%)		89,8	68,4	47,8	75,7
Controle (S3)	0	0,06 aH	0,05 aH	0,04 aH	0,03 aH
Ld1	2	0,22 aF	0,13 bG	0,14 aG	0,06 aH
Ld2	5	0,34 aD	0,25 aF	0,28 aE	0,15 aG
Ld3	10	0,43 bD	0,33 bD	0,35 aD	0,20 bF
Ld4	20	0,73 bA	0,51 bB	0,45 aC	0,33 aD
T (NPK)	0	0,16 aG	0,15 bG	0,24 bG	0,07 aH
Média		0,32 bA	0,24 cB	0,25 bB	0,14 aC
C.V. (%)		74,1	69,9	58,0	80,9

Médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si. Foi aplicado o Teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade; considerando o fator "doses" como quantitativo. S1 = Pvd* (impactado); S2 = Pvd – UM São Jerônimo; S3 = Pvd – UM Itapua. T (NPK) = Testemunha com adição de nutrientes (NPK) e calcário. Unidade: dS m^{-1} a 25°C.

Na camada 0-20 cm o lodo proporcionou o aumento do pH para os três solos, porém sendo estatisticamente diferente apenas para a dose Ld4 (20 Mg ha^{-1}), para os solos S2 e S3 (Tabela 11). No solo S1 o pH variou, entre o tratamento Controle a maior dose (Ld4), de 7,0 a 7,4; no solo S2 variou de 4,9 a 7,5; e no solo S3 variou de 5,0 a 7,2. Os solos S2 e S3, no tratamento Testemunha, receberam calagem inicial para correção do pH (6,5), sendo S1 alcalino. Houve, porém, um processo de acidificação, reduzindo o pH dos solos (S2 e S3) para 5,4 e 5,3. Para estes solos, a dose de 2 Mg ha^{-1} já obteve valores de pH superiores à Testemunha. Tanto para S2, quanto para S3, seria

necessária uma dose de lodo equivalente a 8 Mg ha^{-1} para alcançar pH 6,5. Como no estudo de Selbach et al. (1991), o pH dos solos S2 e S3, na camada 0-20 cm, aumentou excessivamente (acima de 7,0) a partir de 15 Mg ha^{-1} . Isto se deve ao grande valor de neutralização dos lodos estudados, 47 e 49% (Apêndice 1). Houve alta correlação positiva (0,84) do $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$ (0-20 cm) com os teores disponíveis de Ca (Apêndice 3), comprovando o efeito de calagem.

Tabela 11: Valores de $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$ (1:1) e condutividade elétrica (1:5) na camada 0-20 cm aos 90 dias após aplicação do lodo.

Tratamentos	Dose Mg ha^{-1}	pH H_2O	Condutividade dS m^{-1}
Controle (S1)	0	7,0 a	0,06 a
Ld1	2	7,2 a	0,07 ab
Ld2	5	7,4 a	0,12 b
Ld3	10	7,6 a	0,19 b
Ld4	20	7,4 a	0,31 a
T (NPK)	0	7,0 a	0,07 a
Controle (S2)	0	4,9 b	0,04 ab
Ld1	2	5,6 b	0,08 a
Ld2	5	6,4 b	0,16 a
Ld3	10	6,6 b	0,22 a
Ld4	20	7,5 a	0,30 a
T (NPK)	0	5,4 b	0,04 ab
Controle (S3)	0	5,0 b	0,03 b
Ld1	2	5,6 b	0,04 b
Ld2	5	6,1 b	0,09 b
Ld3	10	6,8 b	0,18 b
Ld4	20	7,2 a	0,29 a
T (NPK)	0	5,3 b	0,03 b

Médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si. Foi aplicado o Teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade; considerando o fator “doses” como quantitativo. S1 = Pvd* (impactado); S2 = Pvd – UM São Jerônimo; S3 = Pvd – UM Itapuã. T (NPK) = Testemunha com adição de nutrientes (NPK) e calcário.

A CE na camada 0-20 cm (Tabela 11), 90 dias após a aplicação do lodo, apresentou comportamento linear para os três solos. No solo S1 a condutividade variou, entre o tratamento Controle e a maior dose (Ld4), de 0,06 a $0,31 \text{ dS m}^{-1}$; no solo S2 variou de 0,04 a 0,30; e no solo S3 variou de 0,03 a 0,29. Para a maior dose de lodo (20 Mg ha^{-1}) não houve diferença estatística entre os três solos. A condutividade não alcançou valores críticos em comparação aos valores de sensibilidade à salinidade para plantas (Bissani et

al., 2008) e permaneceram muito abaixo de 2 dS m^{-1} , valor máximo proposto por Daker (1970, apud Castilhos et al., 2002) para solos não salinos. O valor crítico de 2 dS m^{-1} , de acordo com a equação média ($y = 0,0128x + 0,0512$), seria alcançado apenas em dose de 150 Mg ha^{-1} , para este mesmo período. Houve alta correção positiva (0,96) da CE com os teores disponíveis de Na no solo (Apêndice 3).

Resultados similares, para pH e CE, foram encontrados por Oliveira et al. (2002), Castilhos et al. (2002), Ferreira et al. (2003), Medeiros et al. (2009), Gianello et al. (2011) e Vieira et al. (2011).

4.2.1 Argila Dispersa em Água e Grau de Flocculação

Não foi observada dispersão da Argila Dispersa em Água (ADA) e modificação do Grau de Flocculação (GF), nos solos S1, S2 e S3 com a aplicação das doses de lodo (Tabela 12). A adição de matéria orgânica e íons pode afetar as cargas elétricas dependentes de pH do solo, em função do aumento de cargas negativas pela matéria orgânica (Sposito, 2008; Meurer, 2010). Pode haver, assim, uma compensação do Na^+ (dispersante) com a matéria orgânica e íons flocculantes (como o Ca^{2+}), não causando a dispersão da argila em água. Resultados similares, com aplicação de lodo de esgoto em solos, foram encontrados por Tavares Filho et al. (2010).

Tabela 12: Valores médios da Argila Dispersa em Água (ADA) e Grau de Flocculação (GF) nos solos S1, S2 e S3.

Solo	ADA	ADT	GF
 %		
S1	6,7	13	49
S2	22,4	26	14
S3	4,8	12	60

S1 = Pvd* (impactado); S2 = Pvd – UM São Jerônimo; S3 = Pvd – UM Itapuã. ADA – Argila Dispersa em Água; ADT – Argila Dispersa Total; GF – Grau de Flocculação.

4.2.2 Teores de nutrientes disponíveis no solo

Nas amostras de solo de 0-20 cm de profundidade foram analisados os teores disponíveis dos elementos: P, K, Ca (Tabela 13), Mg, Zn, Cu e Na

(Tabela 14). A aplicação de lodo alterou significativamente os teores de P, K, Ca, Mg e Na. Por outro lado, não teve efeitos significativos sobre os teores de Zn e Cu. Houve correlação positiva das doses de lodo apenas com os teores de P, Ca e Na (Apêndice 3).

Para os macro-nutrientes P e K (Tabela 13) não houve diferenças ($p < 0,005$) entre os tratamentos Controle e Ld1 (2 Mg ha^{-1}). A Testemunha (NPK+Calc.) obteve em média os mesmos valores que os tratamentos Ld3 e Ld4 para o fósforo (P) e Ld1 para o potássio (K). Sendo o elemento de maior concentração no lodo (20% m/m), o Ca atingiu grandes teores nos solos (Tabela 13). Ainda na dose Ld1 (2 Mg ha^{-1}) foram obtidos maiores, ou iguais, teores de Ca que no tratamento Testemunha (NPK+Calc.). O Mg (Tabela 14), em menor concentração no lodo, obteve relações similares ao Ca. No caso do Cu e Zn (Tabela 14), sendo elementos de baixa concentração no lodo, houve pouca variação entre os tratamentos. Para o Cu não houve diferença estatística entre os tratamentos testados. Para o Zn não houve diferenças entre os tratamentos Controle, Testemunha (NPK+Calc.), Ld1 e Ld2, diferenciando-se apenas os tratamentos Ld3 e Ld4.

Segundo os valores de interpretação para teores disponíveis do Manual de Adubação e Calagem para RS e SC (CQFSRS/SC, 2004), os valores de P variaram de acordo com os solos: para o solo S1 (Pvd*), as concentrações passaram de “baixo” para “médio”, nas doses testadas, em relação ao Controle; para o solo S2 (Pvd), passaram de “muito baixo” para “médio”; e para o solo S3 (Pvad), passaram de “muito baixo” para “baixo”. Sendo assim, o lodo propiciou maiores mudanças para o solo S2, em função da maior quantidade de argila (26% - Classe 3). Para o K, os valores também variaram em cada solo: em S1, os valores passaram de “muito baixo” para “baixo”; em S2 os valores mantiveram-se em “alto”; e em S3, mantiveram-se (média) em “baixo”. As maiores modificações ocorreram para o Cálcio, onde os solos S2 e S3 passaram de “baixo” para “alto” (extremos), sendo que no solo S1 os valores já eram considerados “altos”.

Tabela 13: Teores disponíveis de P, K e Ca em solos sob doses de lodo.

Tratamentos	Dose Mg ha ⁻¹	P		K		Ca	
	 mg kg ⁻¹ mg kg ⁻¹	
Controle (S1 m)	0	9,9	dA	15,3	bB	6,1	dA
Ld1	2	13,8	bcA	16,7	abC	6,8	dA
Ld2	5	11,7	cdA	18,0	abC	8,8	cA
Ld3	10	13,4	cdAB	22,3	abC	10,5	bA
Ld4	20	16,0	bA	28,7	aCD	12,7	aAB
T (NPK)	0	21,4	aA	29,3	aB	7,0	dA
Média		14,4	a	21,7	cd	8,6	a
C.V. (%)		27,9		28,1		29,7	
Controle (S2 s)	0	4,3	dBC	63,5	cA	1,8	dB
Ld1	2	6,6	cdB	67,3	cA	3,7	cB
Ld2	5	8,5	bcAB	80,7	bA	7,2	bA
Ld3	10	11,4	abAB	70,0	cbA	8,7	bB
Ld4	20	12,7	aB	121,3	aA	13,8	aA
T (NPK)	0	10,6	abB	38,0	dAB	2,1	cdB
Média		9,0	b	73,5	a	6,2	b
C.V. (%)		35,0		37,3		75,0	
Controle (S2 g)	0	3,3	bC	55,3	bA	1,8	deB
Ld1	2	4,0	bB	52,3	bB	3,6	cB
Ld2	5	7,6	aB	45,5	bB	3,4	cdB
Ld3	10	7,7	aC	52,3	bB	8,3	bB
Ld4	20	9,5	aB	89,0	aB	11,3	aB
T (NPK)	0	7,5	aB	43,7	bA	1,6	eB
Média		6,6	c	56,4	b	5,0	c
C.V. (%)		36,4		29,5		78,5	
Controle (S3 s)	0	4,5	cBC	17,0	bB	0,4	dB
Ld1	2	5,2	bcB	16,0	bC	1,4	cdC
Ld2	5	8,1	abB	21,3	bC	2,8	cB
Ld3	10	8,6	aBC	25,7	bC	4,9	bC
Ld4	20	10,4	aB	41,0	aC	6,7	aC
T (NPK)	0	10,3	aB	13,3	bC	1,5	cdB
Média		7,8	bc	22,4	c	3,0	d
C.V. (%)		32,1		45,1		81,3	
Controle (S3 g)	0	7,0	bcdAB	18,0	abB	0,4	cB
Ld1	2	4,3	dB	10,0	bC	1,3	bcC
Ld2	5	6,0	cdB	13,3	bC	2,2	bB
Ld3	10	12,6	aA	18,5	abC	6,2	aC
Ld4	20	9,9	abB	27,0	aD	5,4	aC
T (NPK)	0	8,9	bcB	13,0	bC	1,2	bcB
Média		8,1	b	16,6	d	2,8	d
C.V. (%)		36,5		36,2		86,7	

Médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si. Foi aplicado o Teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade. Letras minúsculas representam diferentes tratamentos; letras maiúsculas representam diferentes solos ou culturas. S1 = Pvd* (impactado); S2 = Pvd – UM São Jerônimo; S3 = Pvd – UM Itapuã. “m” = milho; “s” = sorgo; “g” = girassol. T (NPK) = Testemunha com adição de nutrientes (NPK) e calcário.

Tabela 14: Teores disponíveis de Mg, Zn, Cu e Na em solos sob doses de lodo.

Tratamentos	Dose Mg ha ⁻¹	Mg		Zn		Cu		Na	
		mg kg ⁻¹		mg kg ⁻¹		mg kg ⁻¹		mg kg ⁻¹	
Controle (S1 m)	0	1,2	cA	13,0	cA	2,6	bA	9,7	dA
Ld1	2	1,3	bcA	13,6	bcA	3,7	aA	17,0	cDa
Ld2	5	1,4	bcA	14,6	abcA	2,8	bA	33,0	cBC
Ld3	10	1,5	abA	15,8	abA	2,8	bA	76,0	bB
Ld4	20	1,7	aA	16,3	aA	3,7	aA	120,0	aB
T (NPK)	0	1,4	bcA	16,4	aA	3,1	abA	8,3	dA
Média		1,4	a	14,9	a	3,1	a	44,0	b
C.V. (%)		12,3		9,6		14,9		102,2	
Controle (S2 s)	0	0,9	cB	7,4	aB	1,6	bA	5,3	eA
Ld1	2	1,0	cB	5,4	abC	1,4	aBC	25,3	dA
Ld2	5	1,3	bA	6,8	aB	1,8	aB	56,3	cA
Ld3	10	1,3	bAB	6,5	aBC	1,7	aB	103,5	bA
Ld4	20	1,7	aA	5,8	abC	1,6	aB	149,7	aA
T (NPK)	0	0,8	cB	3,6	cbB	1,2	BA	5,3	eA
Média		1,2	b	5,9	b	1,5	b	57,6	a
C.V. (%)		29,5		23,0		13,9		101,5	
Controle (S2 g)	0	0,9	dB	6,6	aB	1,5	aB	7,7	dA
Ld1	2	1,1	bcAB	7,7	aB	1,8	aB	24,0	dA
Ld2	5	0,7	dB	2,2	bC	1,2	aBC	40,0	cB
Ld3	10	1,2	abB	8,0	aB	1,7	aB	111,7	bA
Ld4	20	1,5	aA	8,0	aB	1,6	aB	143,3	aA
T (NPK)	0	0,6	dB	2,2	BC	1,0	aB	5,7	dA
Média		1,0	c	5,8	b	1,4	b	55,4	a
C.V. (%)		33,4		48,8		21,0		104,9	
Controle (S3 s)	0	0,2	cC	2,2	cC	0,8	aB	3,3	dA
Ld1	2	0,2	cC	2,1	cD	1,1	aBC	11,3	cdA
Ld2	5	0,3	cbC	2,6	bcC	0,9	aC	20,7	cC
Ld3	10	0,5	abC	4,6	abCD	0,9	aC	58,7	bC
Ld4	20	0,6	aB	2,4	bcD	0,9	aB	88,3	aC
T (NPK)	0	0,6	abB	5,1	aB	0,9	aB	4,3	dA
Média		0,4	d	3,2	c	0,9	c	31,1	c
C.V. (%)		49,4		41,8		8,8		111,6	
Controle (S3 g)	0	0,2	cC	2,2	bC	1,0	aB	8,0	dA
Ld1	2	0,3	bcC	3,4	abCD	0,8	aC	19,0	dA
Ld2	5	0,3	bcC	3,8	abC	0,9	aC	38,3	cD
Ld3	10	0,5	abC	4,1	abD	1,0	aBC	59,5	bC
Ld4	20	0,7	aB	4,2	abCD	1,1	aB	117,0	aB
T (NPK)	0	0,5	abB	5,3	aB	1,1	aB	5,0	dA
Média		0,4	d	3,8	c	1,0	c	41,1	b
C.V. (%)		42,0		26,8		10,2		103,1	

Médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si. Foi aplicado o Teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade. Letras minúsculas representam diferentes tratamentos; letras maiúsculas representam diferentes solos ou culturas. S1 = Pvd* (impactado); S2 = Pvd – UM São Jerônimo; S3 = Pvd – UM Itapuã. “m” = milho; “s” = sorgo; “g” = girassol. T (NPK) = Testemunha com adição de nutrientes (NPK) e calcário.

Sendo um dos elementos de maior concentração no lodo, o sódio (Na) obteve grandes teores disponíveis (Tabela 14), aumentando linearmente com as doses de lodo. O Na se correlacionou fortemente (0,96) com a condutividade elétrica do solo na camada de 0-20 cm (Apêndice 3). Os maiores valores de Na ocorreram no solo S2, em função da maior quantidade de argila neste solo, retendo o cátion no perfil. Resultados similares na alteração dos teores de nutrientes com aplicação de resíduos em solo foram encontrados por Castilhos et al. (2002), Oliveira et al. (2002), Ferreira et al. (2003), Gianello et al. (2011) e Vieira et al. (2011).

4.3 Respostas das plantas às doses de lodo

Para todas culturas testadas (milho, sorgo e girassol) não houve diferenças estatísticas, para altura e massa seca, entre os tratamentos Controle e doses de lodo (Tabelas 15, 16 e 17), diferenciando-se ($p < 0,005$) apenas o tratamento Testemunha (Calc.+NPK).

Tabela 15: Resposta do milho (altura e massa seca) às doses de lodo - 60 dias após germinação.

Tratamentos	Dose Mg ha ⁻¹	Altura cm	Massa seca Aérea (g)
Controle (S1)	0	20,3 b	4,1 b
Ld1	2	21,9 b	4,3 b
Ld2	5	26,8 b	5,3 b
Ld3	10	23,2 b	4,2 b
Ld4	20	26,8 b	5,0 b
T (NPK)	0	37,8 a	12,7 a
Média		26,1	5,9
C.V. (%)		24,1	56,5

Médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si. Foi aplicado o Teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade; considerando o fator “doses” como quantitativo. S1 = Pvd* (impactado). T (NPK) = Testemunha com adição de nutrientes (NPK) e calcário. T (NPK) = Testemunha com adição de nutrientes (NPK) e calcário.

Resultados similares foram encontrados por Castilhos et al. (2002) e Gianello et al. (2011), onde também não foram verificadas diferenças entre os rendimentos de matéria seca total (raízes e parte aérea) nos diferentes tratamentos com adição de lodo com presença de cromo, diferindo apenas a

Testemunha. Diversos autores, porém, comprovam resultados benéficos da adição de lodos, mesmo com presença de cromo, em solos (Selbach et al., 1991; Castilhos et al., 2000; Cavallet e Selbach, 2008; Gianello et al., 2011).

Tabela 16: Resposta do Sorgo (altura e massa seca) às doses de lodo - 30 dias após germinação.

Tratamentos	Dose Mg ha ⁻¹	Massa seca		
		Altura cm	aérea (g)	raiz (g)
Controle (S2)	0	37,7 a	1,02 a	0,65 a
Ld1	2	42,7 a	2,13 a	0,94 a
Ld2	5	37,7 a	0,88 a	0,59 a
Ld3	10	48,0 a	2,93 a	1,88 a
Ld4	20	43,3 a	1,54 a	0,73 a
T (NPK)	0	71,3 a	9,96 a	14,01 a
Média		46,8	3,1	3,1
C.V. (%)		31,2	116	163
Controle (S3)	0	36,7 a	0,42 a	0,51 a
Ld1	2	50,3 a	1,86 a	0,92 a
Ld2	5	42,3 a	1,52 a	0,87 a
Ld3	10	37,3 a	1,29 a	0,63 a
Ld4	20	25,0 a	0,22 a	0,07 a
T (NPK)	0	71,3 a	11,99 a	8,74 b
Média		43,8	2,9	2,0
C.V. (%)		47,1	148	168

Médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si. Foi aplicado o Teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade; considerando o fator “doses” como quantitativo. S2 = Pvd – UM São Jerônimo; S3 = Pvad – UM Itapuã. T (NPK) = Testemunha com adição de nutrientes (NPK) e calcário. T (NPK) = Testemunha com adição de nutrientes (NPK) e calcário.

O girassol (Tabela 17), não apresentou diferença estatística entre os solos para a altura e massa seca (aérea e raízes). Para o solo S3, o tratamento Ld4 (20 Mg ha⁻¹) diferenciou-se dos demais, sendo o menor valor. A redução no diâmetro do caule, com as doses de lodo, pode causar problemas na sustentação da planta, tendendo a quebra do caule e, ou, queda da planta.

Tabela 17: Resposta do Girassol (altura, diâmetro do caule e massa seca) às doses de lodo - 90 dias após germinação.

Tratamentos	Dose Mg ha ⁻¹	Altura		Diâmetro		Massa seca	
		Cm		Mm		aérea (g)	raiz (g)
Controle (S2)	0	70,3	a	3,8	a	2,39	a
Ld1	2	74,3	a	3,9	a	3,06	a
Ld2	5	67,7	a	4,3	a	3,53	a
Ld3	10	86,0	a	4,5	a	5,02	a
Ld4	20	63,0	a	3,5	a	2,87	a
T (NPK)	0	102,3	a	6,3	a	8,55	b
Média		77,3		4,4		4,2	0,7
C.V. (%)		22,1		24,3		55,3	161
Controle (S3)	0	64,0	a	3,8	a	2,19	a
Ld1	2	71,3	a	4,2	a	3,04	a
Ld2	5	69,0	a	3,9	a	3,27	a
Ld3	10	65,0	b	3,8	a	3,30	a
Ld4	20	47,3	a	2,4	b	1,62	a
T (NPK)	0	133,3	a	7,1	a	12,68	a
Média		75,0		4,2		4,4	0,5
C.V. (%)		38,8		36,4		93,6	108

Médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si. Foi aplicado o Teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade; considerando o fator "doses" como quantitativo. S2 = Pvd – UM São Jerônimo; S3 = Pvad – UM Itapuã. T (NPK) = Testemunha com adição de nutrientes (NPK) e calcário.

Os elementos na parte aérea (Apêndices 5, 6 e 7) e raízes (Apêndices 8, 9 e 10) do milho, sorgo e girassol, em relação às doses de lodo, não tiveram diferenças significativas entre os tratamentos Controle, ou Testemunha, e Ld1 (2 Mg ha⁻¹) nos teores dos elementos. Na parte aérea do milho, sorgo e girassol houve aumento nos teores de P, K, Ca, S e Na, com a adição de lodo. No caso do Ca, um dos elementos em maior concentração no lodo estudado, o tratamento Ld1 (2 Mg ha⁻¹) obteve maiores teores que a Testemunha (NPK+Calc.), sendo as maiores doses encontradas no tratamento Ld2 (5 Mg ha⁻¹). Nas raízes do sorgo e girassol houve aumento nos teores de P, Ca, S, Mn, Na e Cr com a adição de lodo. Mesmo com o aumento de Cr nas raízes, ocorreu fraca translocação do elemento para a parte aérea.

Ocorreu redução nos teores (ou diferenças não significativas), na parte aérea das plantas (em relação aos teores do tratamento Controle), de: Mg, Cu, Zn, Fe, Mn, Cd, Cr, Ni, Pb, As e Se (Apêndices 5, 6 e 7). O mesmo efeito ocorreu nas raízes para: K, Mg, Cu, Zn, Fe, Cd, Ni, Pb (Apêndices 8, 9 e

10). Dentre as doses estudadas, diferenciou em geral apenas o tratamento Ld4 (20 Mg ha⁻¹), onde ocorreu aumento nos teores de metais. Com a adição de resíduos com presença de metais, em solos, há a tendência de aumento da absorção pelas plantas. Porém, as grandes concentrações de carbono orgânico presentes no lodo estudado podem ter contribuído na complexação dos metais e indisponibilização para as plantas, em função do aumento de cargas negativas no solo (Tan, 1982; Sposito, 2008).

Em comparação com as faixas de suficiência no tecido foliar, do Manual de Adubação e Calagem para RS e SC (CQFSRS/SC, 2004): o P apresentou-se "abaixo" para todos tratamentos; o K apresentou-se "dentro" do limite apenas na dose Ld4 (20 Mg ha⁻¹), para o milho, "dentro" ou "acima" para o sorgo e "abaixo" para o girassol; o Mg apresentou-se "acima" para o milho e girassol, e "abaixo" para sorgo; e o Ca e S "dentro" ou "acima" para todos tratamentos. Para os micro-nutrientes, os teores de Zn, Fe e Mn apresentaram-se "dentro" ou "acima" da faixa de suficiência. Já o Cu teve maior variação: para o sorgo, apresentou-se "dentro" da faixa; para o milho, "abaixo" até dose dose Ld4 (20 Mg ha⁻¹); e para o girassol, no limite inferior para o solos S3 e abaixo até dose Ld3 (10 Mg ha⁻¹) para o solo S2. De forma geral, os valores variaram principalmente de acordo com os teores naturais dos solos, tendo as doses de lodo pouca influência em relação às faixas de suficiência.

De acordo com a estimativa de aporte de nutrientes (Apêndice 4), em comparação com a Resolução CONAMA nº 420/2009, o único elemento com risco de ultrapassar os limites estabelecidos é o Cromo total (Cr). Com concentração no lodo de 602 mg kg⁻¹, as doses de disposição em solo que alcançariam os Limites de "Prevenção" e "Agrícola" seriam de 125 e 250 Mg ha⁻¹, respectivamente. Considerando aplicações recorrentes, com doses de 2 e 5 Mg mês ha⁻¹, o limite de Prevenção seria alcançado respectivamente em 62 e 25 meses (sendo o limite Agrícola no dobro do tempo).

O Sódio (Na) apresentou tendência de aumento progressivo com as doses de lodo, tanto na parte aérea quanto raízes das plantas (Apêndices 6 e 9). Não houve diferenças estatísticas entre os tratamentos Controle, Testemunha, Ld1 e Ld2 (2 e 5 Mg ha⁻¹) na parte aérea. Nas raízes apenas não diferiram os tratamentos Controle e Testemunha, tendo maiores valores os demais. Os aumentos no crescimento da parte aérea e raízes devem-se as

concentrações de macro e micro-nutrientes, como: nitrogênio, fósforo, cálcio, magnésio e enxofre (Coelho, 1973; Selbach et al., 1991; Bissani et al., 2008). Efeitos negativos, como os observados principalmente na maior dose (20 Mg ha⁻¹), podem dever-se a duas principais funções: aumento da concentração de metais tóxicos no solo com a aplicação do lodo; ou, aumento dos teores de Na, presente em grande quantidade no lodo (2,6 %). O Na pode causar redução do desenvolvimento das plantas por pressão osmótica e desordem nutricional, gerando reduções da taxa de crescimento, estatura e comprimento e massa das raízes (Shannon e Grieve, 1999; Viana et al., 2004; Bissani et al., 2008).

Em suma, poucos efeitos sobre as plantas foram observados neste estudo. Nas menores doses não houve diferenças estatísticas em relação ao tratamento Controle, porém houve redução significativa no diâmetro do caule do girassol na dose de 20 Mg ha⁻¹. De forma geral, a dose de lodo que causou menores impactos aos micro-organismos e plantas foi a 2 Mg ha⁻¹, apresentando pouca (ou nenhuma) diferença em relação aos tratamentos Controle ou Testemunha. Apesar de causar alguns impactos (principalmente estresse microbiano), as doses de 5 e 10 Mg ha⁻¹ apresentaram benefícios nos valores de pH e teores de nutrientes em solo e plantas. Estes fatores seriam variáveis em caso de taxa de aplicação recorrente.

5 CONCLUSÕES

1. A mineralização de carbono aumentou com a aplicação em solo de lodo de ETE de aterro industrial;
2. O pH e a condutividade do solo aumentaram com a aplicação em solo de lodo de ETE de aterro industrial;
3. Poucos efeitos sobre as plantas foram observados com a aplicação em solo de lodo de ETE de aterro industrial;
4. O lodo possibilitou o aumento dos macro-nutrientes, em solo e plantas, proporcionalmente às doses, porém não nas relações ideais;
5. Os resultados demonstraram a viabilidade da disposição do lodo de ETE de aterro industrial em solos, sendo recomendada a complementação nutricional.

6 REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Resíduos Sólidos – Classificação**. Rio de Janeiro: ABNT, 2004. 77p. (NBR 10004)

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Resíduos em solos – Determinação da Biodegradação pelo método respirométrico**. Rio de Janeiro: ABNT, 1999. 8p. (NBR 14283)

ADAM, G.; DUNCAN, H. Development of a sensitive and rapid method for the measurement of total microbial activity using fluorescein diacetate (FDA) in a range of soils. **Soil Biology & Biochemistry**, Elmsford, v. 33, n. 7/8, p. 943-951, 2001.

AGENCY FOR TOXIC SUBSTANCES AND DISEASE REGISTRY. **Arsenic**: production, import/export, use, and disposal. Buford Hwy NE, Atlanta, USA. ATSDR, 2011. Disponível em: <<http://www.atsdr.cdc.gov/toxprofiles/tp2-c5.pdf>>. Acesso em: 16 dez 2013.

ALBUQUERQUE, J.A. et al. Propriedades físicas e químicas de solos incubados com resíduo alcalino da indústria de celulose. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 26, p.1065-1073, 2002.

ANDERSON, J.P.E.; DOMSCH, K.H. A physiological method for the quantitative measurement of microbial biomass in soils. **Soil Biology & Biochemistry**, Elmsford, v. 10, p. 215-221, 1978.

ANDERSON, T.; DOMSCH, K.H. Soil microbial biomass: the eco-physiological approach. **Soil Biology & Biochemistry**, Elmsford, v. 42, pp. 2039-2043, 2010.

ANDRADE, J.A.; AUGUSTO, F.; JARDIM, I.C.S.F. Biorremediação de solos contaminados por petróleo e seus derivados. **Eclética Química** [online], 2010, v. 35, n.3, pp. 17-43. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/S0100-46702010000300002>>. Acesso em: out 2012.

BARRETO, P.A.B. et al. Mineralização de nitrogênio e carbono em solos sob plantações de eucalipto, em uma sequência de idades. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 34, n. 3, p. 735-745, 2010. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832010000300015>>. Acesso em: 15 jan 2014.

BISSANI, C.A. et al. **Fertilidade dos solos e manejo da adubação de culturas**. 2. ed. Porto Alegre : Gênese, 2008. 344 p. : il.

BRASIL. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, 3 ago 2010. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm>. Acesso em: 12 out 2012.

BRASIL. Resolução CONAMA Nº 375, de 30 de agosto de 2006. Define critérios e procedimentos para o uso agrícola de lodos de esgoto gerados em estações de tratamento de esgoto sanitário e seus produtos derivados. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, 30 ago 2006. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res06/res37506.pdf>>. Acesso em: 17 jul 2013.

BRASIL. Resolução CONAMA Nº 420, de 28 de dezembro de 2009. Dispõe sobre critérios e valores orientadores de qualidade do solo quanto à presença de substâncias químicas e estabelece diretrizes para o gerenciamento ambiental de áreas contaminadas por essas substâncias em decorrência de atividades antrópicas. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, 30 dez 2009. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=620>>. Acesso em: 18 jul 2013.

BUENO, J.R.P. et al. Chemical and microbiological attributes of an oxisol treated with successive applications of sewage sludge. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** [online], v. 35, n. 4, p. 1461-1470, 2011. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832011000400040>>. Acesso em: 18 jan 2014.

CAMPOS, M.L. et al. Teor de arsênio e adsorção competitiva arsênio/fosfato e arsênio/sulfato em solos de Minas Gerais, Brasil. **Ciência Rural** [online], 2013, v. 43, n. 6, p. 985-991, 2013a. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/S0103-84782013005000057>>. Acesso em: 22 dez 2013.

CAMPOS, M.L. et al. Teores de arsênio e cádmio em solos do bioma cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** [online]. v. 37, n. 1, p. 281-286, 2013b. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832013000100029>>. Acesso em: 22 dez 2013.

CASTILHOS, D.D., VIDOR, C., CASTILHOS, R.M.V. Atividade microbiana em solo suprido com lodo de curtume e cromo hexavalente. **Revista Brasileira de Agrocência**, Pelotas, v.6 n. 1, p. 71-76, 2000.

CASTILHOS, D.D.; TEDESCO, M.J.; VIDOR, C. Rendimentos de culturas e alterações químicas do solo tratado com resíduos de curtume e crômio hexavalente. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 26, p. 1083-1092, 2002.

CAVALLET, L.E.; SELBACH, P.A. Populações microbianas em solo agrícola sob aplicação de lodos de curtume. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 32, p. 2863-2869, 2008.

CHAVEZ, L.F. et al. Diversidade metabólica e atividade microbiana no solo em sistema de integração lavoura-pecuária sob intensidades de pastejo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira** [online], v. 46, n. 10, p. 1254-1261, 2011. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/S0100-204X2011001000020>>. Acesso em: 07 set 2013.

COELHO, F.S. **Fertilidade do solo**. 2. ed. Campinas: Instituto Campineiro de Ensino Agrícola, 1973. 384 p. : il.

COMISSÃO DE QUÍMICA E FERTILIDADE DO SOLO - CQFSRS/SC. **Manual de adubação e calagem para os Estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina**. 10.ed. Porto Alegre, SBCS - Núcleo Regional Sul/UFRGS, 2004. 400p.

COMPANHIA DE TECNOLOGIA E SANEAMENTO AMBIENTAL. **Determinação da biodegradação de resíduos - Método Respirométrico de Bartha**. São Paulo: CETESB, 1990. 15 p. (Norma Técnica L 6.350: Solos)

CRAWFORD, R.L. Bioremediation. In: PROKARYOTES. Edited by Dworkin M. New York: Springer-Verlag, 2006. v.1, p.850-863

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISAS AGROPECUÁRIA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos (Rio de Janeiro, RJ). **Manual de métodos de análise de solo**. 2.ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA, 1997. 212p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISAS AGROPECUÁRIAS. Centro Nacional de Pesquisa de Solos (Rio de Janeiro, RJ). **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Rio de Janeiro: EMBRAPA, 2009. 412 p.

ERB, T.J. et al. GFAJ-1 Is an Arsenate-Resistant, Phosphate-Dependent Organism. **Science Magazine**, v. 337, p. 467-470, 2012. Disponível em: DOI: 10.1126/science.1218455. Acesso em: 12 dez 2013.

FERREIRA, A.S. et al. Alterações de atributos químicos e biológicos de solo e rendimento de milho e soja pela utilização de resíduos de curtume e carbonífero. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 27, n. 4, p. 755-763, 2003. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832003000400020>>. Acesso em: 12 set 2013.

FERREIRA, A.S.; CAMARGO, F.A.O.; VIDOR, C. Utilização de microondas na avaliação da biomassa microbiana do solo. **Revista Brasileira da Ciência do Solo**, Campinas, v. 23, p. 991-996, 1999.

FREIRE, M.B.G.S. et al. Condutividade hidráulica de solos de Pernambuco em resposta à condutividade elétrica e RAS da água de irrigação. **Revista**

Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, Campina Grande, v. 7, n. 1, p. 45-52, 2003.

GHINI, R.; MENDES, M. D. L.; BETTIOL, W. Método de hidrólise de diacetato de fluoresceína (FDA) como indicador de atividade microbiana no solo e supressividade a *Rhizoctonia solani*. **Summa Phytopathologica**, Jaguariuna, v. 24, n. 3/4, p. 239-241, 1998.

GIANELLO, C. et al. Viabilidade do uso de resíduos da agroindústria coureiro-calçadista no solo. **Ciência Rural** [online], v. 41, n. 2, p. 242-245, 2011. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/S0103-84782011005000007>>. Acesso em: 23 nov 2013.

GOMES, J.B.V. et al. Relações entre atributos do solo e atividade de formigas em restingas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** [online], v. 34, n. 1, p. 67-78, 2010. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832010000100007>>. Acesso em: 05 jan 2014.

GREENA, V.S.; STOTTB, D.E.; DIACKA, M. Assay for fluorescein diacetate hydrolytic activity: Optimization for soil samples. **Soil Biology & Biochemistry**, Elmsford, v. 38, p. 693-701, 2006. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.soilbio.2005.06.020>>. Acesso em: 12 dez 2014.

HANEY, R.L.; FRANZLUEBBERS, A.J. Soil CO₂ evolution: Response from arginine additions. **Applied Soil Ecology**, Amsterdam, v. 42, p. 324-327, 2009.

JACOBI, P.R.; BESEN, G.R. Gestão de resíduos sólidos em São Paulo: desafios da sustentabilidade. **Estudos Avançados** [online], v. 25, n. 71, p. 135-158, 2011. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/S0103-40142011000100010>>. Acesso em: 17 out 2012.

KONRAD, E.E.; CASTILHOS, D.D. Atividade Microbiana em um Planossolo após a Adição de Resíduos de Curtume. **Revista Brasileira de Agrociência**, Pelotas, v. 7 n. 2, p. 131-135, 2001.

MADEIRA, A.C. et al. Comparação de correctivos aplicados a um solo de uma área mineira contaminado com arsénio e seu efeito no crescimento de plantas. **Revista de Ciências Agrárias** [online], v. 33, n. 1, p. 31-40, 2010. Disponível em: <http://www.scielo.gpeari.mctes.pt/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0871-018X2010000100004&lng=pt&nrm=iso>. Acesso em: 12 dez 2013.

MARTINES, A.M.; ANDRADE, C.A.; CARDOSO, E.J.B.N. Mineralização do carbono orgânico em solos tratados com lodo de curtume. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 41, n. 7, 2006. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/S0100-204X2006000700011>>. Acesso em: 02 ago 2013.

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

MEDEIROS, J.C. et al. Calagem superficial com resíduo alcalino da indústria de papel e celulose em um solo altamente tamponado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 33, p. 1657-1665, 2009.

MENDOZA, B. et al. Atributos biológicos de dos suelos de Quibor com aplicación de abono orgánico y soluciones salinas. **Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas**, Texcoco, v. 4, n. 3, p. 409-421, 2013. Disponível em: <http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-09342013000300006&lng=es&nrm=iso>. Acesso em: 03 jan 2014.

MEURER, E.J. (Ed.). **Fundamentos de química do solo**. 4. ed. Revista e ampl. Porto Alegre : Evangraf, 2010. 264 p. : il.

MOREIRA, F.M.S.; SIQUEIRA, J.O. **Microbiologia e bioquímica do solo**. 2.ed. Lavras, UFLA, 2006. 729p.

OLIVEIRA, F.C. et al. 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**, Campinas, p. 26, p. 505-519, 2002.

PACHECO, J.W.F. **Curtumes**. São Paulo : CETESB, 2005. 76 p.

PANDA, S.K.; CHOUDHURY, S. Chromium stress in plants. **Brazilian Journal of Plant Physiology**, Piracicaba, v. 17, n. 1, p. 95-102, 2005.

PASSIANOTO, C.C. et al. Atividade e biomassa microbiana no solo com aplicação de dois diferentes lodos de curtume. **Revista Brasileira Agrociência**, Pelotas, v. 7, n. 2, p. 125-130, 2001.

RAIJ, B. van. **Fertilidade do solo e adubação**. Piracicaba: Ed. Agronômica Ceres, 1991. 343p.

REAVES, M.L. et al. Absence of Detectable Arsenate in DNA from Arsenate-Grown GFAJ-1 Cells. **Science Magazine**, v. 337, p. 470-473, 2012. Disponível em: <DOI: 10.1126/science.1219861>. Acesso em: 15 nov 2013.

SCHNÜRER, J.; ROSSWALL, T. Fluorescein diacetate hydrolysis as a measure of total microbial activity in soil and litter. **Applied and Environmental Microbiology**, Washington, v. 43, n. 6, p. 1256-1261, 1982.

SELBACH, P.A. et al. Descarte e biodegradação de lodos de curtume no solo. **Revista do Couro**, Estância Velha, v. 17, n. 79, p. 51-62, 1991.

SHANNON, M.C.; GRIEVE, C.M. Tolerance of vegetable crops to salinity. **Scientia Horticulturae**, Amsterdam, 78, p.5-38, 1999.

SILVA, C.A. Uso de resíduos orgânicos na agricultura. In: SANTOS, G.A. et al. (Ed.). **Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais & subtropicais**. 2.ed. ver. e atual. Porto Alegre: Metropole, 2009. p.597-624.

SILVA, E.E.; AZEVEDO, P.H.S.; DE-POLLI, H. **Determinação da respiração basal (RBS) e quociente metabólico do solo ($q\text{CO}_2$)**. Seropédica/RJ: EMBRAPA Agrobiologia, 2007. 4p. (Embrapa Agrobiologia. Comunicado Técnico, 99)

SILVA, F.A.S.E.; AZEVEDO, C.A.V. **Principal Components Analysis in the Software Assistat-Statistical Attendance**. In: WORLD CONGRESS ON COMPUTERS IN AGRICULTURE, 7., 2009, Reno,USA. [Proceedings] Reno-NV-USA: American Society of Agricultural and Biological Engineers, 2009.

SILVA, M.; SIQUEIRA, E.R.; COSTA, J.L.S. Hidrólise de diacetato de fluoresceína como bioindicador da atividade microbológica de um solo submetido a reflorestamento. **Ciência Rural** [online]. v. 34, n. 5, p. 1493-1496, 2004. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/S0103-84782004000500025>>. Acesso em: 15 dez 2012.

SILVA JUNIOR, J.M.T. et al. Efeitos de níveis de salinidade sobre a atividade microbiana de um Argissolo Amarelo incubado com diferentes adubos orgânicos. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, Recife, v. 4, n. 4, p. 378-382, 2009.

SPARKS, D.L. **Environmental soil chemistry**. 2.ed. San Diego: Academic Press, 2003. xiv, 352 p.

SPOSITO, G. **The chemistry of soils**. 2.ed. New York: Oxford University Press, 2008. xii, 329 p.

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

STUBBERFIELD, L. C. F.; SHAW, P. J. A. A comparison of tetrazolium reduction and FDA hidrólise with other measures of microbial activity. **Journal of Microbiological Methods**, Amsterdam, v. 12, p. 151-162, 1990.

SWISHER, R.; CARROLL, C.G. Fluorescein diacetate hydrolysis as an estimator of microbial biomass on coniferous needle surface. **Microbial Ecology**, Canberra, v.6, p.217-226, 1980.

TAN, K.H. **Principles of soil chemistry**. New York : Marcel Dekker, 1982. xii, 267 p.

TAVARES FILHO, J.; BARBOSA, G. M. C.; RIBON, A. A. Water-dispersible clay in soils treated with sewage sludge. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 34, n. 5, 2010. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832010000500005>>. Acesso em: 15 nov 2013.

TEDESCO M.J. et al. **Análises de solos, plantas e outros materiais**. 2ª ed. Porto Alegre: UFRGS, Departamento de Solos, 1995. 174p. (Boletim Técnico, 5)

TEDESCO, M.J. et al. Resíduos orgânicos no solo e os impactos no ambiente. In: SANTOS, G.A. et al. (Ed). **Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais & subtropicais**. 2.ed. ver. e atual. Porto Alegre: Metropole, 2009. p.113-135.

TRANNIN, I.C.B.; SIQUEIRA, J.O.; MOREIRA, F.M.S. Características biológicas do solo indicadoras de qualidade após dois anos de aplicação de biossólido industrial e cultivo de milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** [online], v. 31, n. 5, p. 1173-1184, 2007. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832007000500032>>. Acesso em: 16 nov 2013.

TRIPATHI, S. S. et al. Microbial biomass and its activities in salt-affected coastal soils. **Biology and Fertility of Soils**, New York, v. 42, p. 273-277, 2006.

UTRESA. **UTRESA – resíduos e gestão ambiental**. Disponível em: <<http://www.utresa.org/>>. Acesso em: 02 nov. 2013.

VIANA, S.B.A. et al. Índices morfofisiológicos e de produção de alface sob estresse salino. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 08, n. 1, p. 23-30, 2004.

VIEIRA, G. A.; CASTILHOS, D.D.; CASTILHOS, R.M.V. Atributos do solo e crescimento do milho decorrentes da adição de lodo anaeróbio da estação de tratamento de efluentes da parbolização do arroz. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 35, p. 535-542, 2011.

YUAN, B.C. et al. Microbial biomass and activity in salt affected soils under arid conditions. **Applied Soil Ecology**, Amsterdam, v. 35, p. 319-328, 2007.

7 APENDICES

APÊNDICE 1: Comparativo entre atributos de lodos da indústria do curtume.

Determinação	Unidade	UTRESA	Selbach et al. (1991) ¹	Konrad e Castilhos (2001) ²
Carbono (C _{org})	%	7,3	21	60
Nitrogênio (N)	%	3,9	3,1	3,4
Fósforo (P)	%	0,19	0,20	0,25
Potássio (K)	%	0,3	0,1	0,1
Cálcio (Ca)	%	20	18	3
Magnésio (Mg)	%	0,81	14	0,15
Enxofre (S)	%	1,2	1,5	-
Sódio (Na)	%	2,6	1,5	0,6
Zinco (Zn)	mg/kg	32	129	-
Cobre (Cu)	mg/kg	23	22	-
Manganês (Mn)	mg/kg	658	5.430	-
Cádmio (Cd)	mg/kg	0,3	12	-
Chumbo (Pb)	mg/kg	2	120	-
Cromo III (Cr III)	mg/kg	602	8.040	36.000
Cromo VI (Cr VI)	mg/kg	<1	N.D.	0,0
pH	-	7,9	9,4	7,1
P.N.	%	49	47	42
C/N	-	1,9	6,8	17,4

¹Selbach et al. (1991) – “L. Cromo”; ²Konrad e Castilhos (2001) – “L. Cromo”. N.D. – Não detectado; P.N. – Potencial de Neutralização.

APÊNDICE 2: Correlação de Pearson – frascos respirométricos (laboratório).

	Dose	PMC	FDA	pH	Cond.	BMS-C	RBS-5
PMC	0,85	-					
FDA	-0,01	0,14	-				
pH	0,65	0,67	-0,38	-			
Cond.	0,78	0,93	0,03	0,75	-		
BMS-C	-0,72	-0,57	0,45	-0,76	-0,55	-	
RBS-5	0,90	0,98	0,01	0,74	0,96	-0,66	-
qCO₂	0,93	0,82	-0,03	0,58	0,80	-0,71	0,89

APÊNDICE 3: Correlação de Pearson – vasos (casa de vegetação).

	Doses	FDA	pH H ₂ O	Cond. elétrica	Altura plantas
pH H ₂ O	0,73	-0,56			
Condutividade	0,86		0,68		
M.Seca (A)					
M.Seca (R)					
P ₁	0,62		0,69		
K ₁				0,65	
Ca ₁	0,74		0,84	0,88	-0,61
Mg ₁			0,58	0,64	-0,71
Zn ₁		-0,53	0,55		-0,62
Cu ₁			0,52		-0,68
Na ₁	0,93		0,68	0,96	
P ₂			0,50		
K ₂		0,58			
Ca ₂					
Mg ₂		-0,54			
Zn ₂					
Cu ₂					
Na ₂	0,58				
Ni ₂		0,62			
Pb ₂		0,62			

Apresentados apenas valores acima de 0,50 de correlação (positiva/negativa). Massa Seca (A) - aérea; (R) - raízes; teores disponíveis. 1 – Melich (solo); 2 – Nitro/Perclórica (tecido – parte aérea).

APÊNDICE 4: Estimativa do aporte de elementos em solo com a aplicação de doses de lodo de ETE de aterro industrial.

Atributos	Dose de Lodo (Mg ha ⁻¹)					
	2	5	10	25	50	100
 mg kg ⁻¹					
Carbono orgânico	145,9	364,9	729,7	1.824	3.649	7.297
Nitrogênio (TKN)	78,0	194,9	389,8	974,6	1.949	3.898
Fósforo total	3,8	9,5	19,0	47,5	95,0	189,9
Potássio total	6,2	15,5	31,0	77,5	154,9	309,9
Cálcio total	399,8	999,6	1.999	4.998	9.996	19.992
Magnésio total	16,2	40,5	81,0	202,4	404,8	809,7
Enxofre total	24,0	60,0	120,0	299,9	599,8	1.199
Ferro total	94,0	234,9	469,8	1.174	2.349	4.698
Sódio total	52,0	129,9	259,9	649,7	1.299	2.599
Manganês total	1,3	3,3	6,6	16,5	32,9	65,8
Cádmio total	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Cromo trivalente	1,2	3,0	6,0	15,1	30,1	60,2
Níquel total	0,1	0,2	0,4	1,0	1,9	3,8
Arsênio total	0,0	0,1	0,1	0,3	0,6	1,2

APÊNDICE 5: Teores de P, K, Ca, Mg e S na matéria seca da parte aérea de milho (m), sorgo (s) e girassol (g).

Tratamentos	P		K		Ca		Mg		S	
 %									
S1 m	0,10	aA	0,37	cD	0,77	abAB	0,73	aA	0,10	cA
Ld1	0,12	aA	0,47	cC	0,88	abB	0,83	aA	0,10	aB
Ld2	0,11	aA	0,53	cB	0,91	aB	0,75	aA	0,11	aC
Ld3	0,11	aA	1,04	bB	0,97	aB	0,72	aA	0,14	aB
Ld4	0,12	aA	1,80	aB	0,94	aB	0,75	aA	0,17	aC
T (NPK)	0,12	aA	1,01	bC	0,66	bC	0,57	bBC	0,10	aA
Média	0,11	a	0,87	e	0,85	b	0,72	a	0,12	c
C.V. (%)	8,4		61,9		13,8		11,9		22,1	
S2 s	0,06	aB	2,73	abA	0,41	aC	0,32	aC	0,12	aC
Ld1	0,09	aB	2,99	aA	0,41	aC	0,32	aD	0,16	aB
Ld2	0,07	aB	2,40	bA	0,53	aC	0,32	aB	0,16	aC
Ld3	0,09	aA	2,78	abA	0,54	aC	0,34	aB	0,17	aB
Ld4	0,09	aBC	2,64	abA	0,49	aD	0,30	aC	0,18	aC
T (NPK)	0,07	aB	2,45	bA	0,43	aC	0,40	aD	0,10	aA
Média	0,08	b	2,66	a	0,47	d	0,33	d	0,15	c
C.V. (%)	12,9		8,3		12,7		10,9		20,7	
S2 g	0,06	bB	1,97	cdB	0,86	cA	0,36	aC	0,20	bdA
Ld1	0,06	bB	2,20	bcB	1,32	abA	0,45	aC	0,33	cA
Ld2	0,08	bB	2,39	bcA	1,24	bA	0,44	aB	0,42	bA
Ld3	0,09	abA	2,57	abA	1,21	bA	0,43	aBC	0,39	bcA
Ld4	0,11	aAB	2,99	aA	1,49	aA	0,38	aB	0,51	aA
T (NPK)	0,08	abB	1,63	dB	1,15	bB	0,46	aCD	0,14	dA
Média	0,08	b	2,29	b	1,21	a	0,42	c	0,33	a
C.V. (%)	24,0		20,7		17,3		10,0		41,8	
S3 s	0,08	abAB	2,05	bB	0,59	abBC	0,38	bBC	0,13	abBC
Ld1	0,08	abB	1,86	bB	0,74	abB	0,41	bCD	0,14	abB
Ld2	0,08	abB	2,01	bA	0,80	aB	0,35	bB	0,15	abC
Ld3	0,10	aA	2,60	aA	0,70	abC	0,35	bC	0,18	aB
Ld4	0,06	bC	1,20	cC	0,68	abCD	0,30	bB	0,20	aC
T (NPK)	0,07	bB	1,03	cC	0,56	bC	0,63	aAB	0,09	bA
Média	0,08	b	1,79	c	0,68	c	0,40	c	0,15	c
C.V. (%)	19,6		32,6		13,6		28,4		26,7	
S3 g	0,08	bAB	1,46	aC	0,90	cA	0,50	cB	0,21	bA
Ld1	0,07	bB	0,83	bcC	1,36	abA	0,66	abB	0,32	aA
Ld2	0,09	bAB	0,92	bcB	1,38	abA	0,66	abA	0,33	aB
Ld3	0,09	bAB	1,26	abB	1,21	bA	0,54	bcB	0,33	aA
Ld4	0,08	bA	1,40	aBC	0,90	cBC	0,37	dB	0,34	aB
T (NPK)	0,12	aA	0,73	cC	1,46	aA	0,72	aA	0,08	cA
Média	0,09	b	1,10	d	1,20	a	0,57	b	0,27	b
C.V. (%)	21,1		28,3		20,4		22,9		38,1	

Médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si. Foi aplicado o Teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade. Letras minúsculas representam diferentes tratamentos; letras maiúsculas representam diferentes solos ou culturas. S1 = Pvd* (impactado); S2 = Pvd – UM São Jerônimo; S3 = Pvd – UM Itapuã. “m” = milho; “s” = sorgo; “g” = girassol. T (NPK) = Testemunha com adição de nutrientes (NPK) e calcário. Tratamentos Ld1 a Ld4 = 2; 5; 10; 20 Mg ha⁻¹, respectivamente.

APÊNDICE 6: Teores de Cu, Zn, Fe, Mn e Na na matéria seca da parte aérea de milho (m), sorgo (s) e girassol (g).

Tratamentos	Cu	Zn	Fe	Mn	Na
 mg kg ⁻¹				
S1 m	4,61 aB	54,72 aC	96,77 bC	36,35 aC	24,16 aA
Ld1	4,31 aB	69,86 aB	131,95 abB	38,26 aB	28,53 aA
Ld2	5,43 aB	69,17 aB	110,05 bA	36,98 aC	35,78 aB
Ld3	5,63 aB	76,22 aB	124,27 abAB	44,67 aC	215,1 aB
Ld4	6,49 aC	86,63 aB	204,30 aB	65,39 aC	308,0 aCD
T (NPK)	4,34 aB	50,33 aB	111,59 bB	34,62 aC	36,11 aA
Média	5,14 c	67,8 d	129,8 c	42,7 d	107,9 c
C.V. (%)	16,9	19,9	29,6	27,2	113,6
S2 s	9,03 aB	219,5 aB	324,30 aA	129,5 aBC	50,4 aA
Ld1	9,22 aB	129,5 bB	153,17 bAB	130,1 aB	43,9 aA
Ld2	8,72 aB	114,9 bB	186,45 bA	90,2 aC	103,0 bA
Ld3	8,29 aB	114,9 bB	192,87 bA	90,7 aBC	133,2 aB
Ld4	10,21 aC	124,9 bB	203,16 bB	125,3 aC	132,7 aD
T (NPK)	6,36 aB	79,7 bB	158,76 bB	193,2 aC	23,7 aA
Média	8,64 b	130,5 c	203,1 b	126,5 d	81,2 c
C.V. (%)	14,9	36,0	30,8	29,7	59,0
S2 g	19,44 bcA	347,0 aA	89,61 cC	247,9 bBC	42,5 bA
Ld1	19,31 bcA	368,2 aA	106,66 bcB	204,3 bB	118,8 bA
Ld2	22,74 bA	136,6 bB	113,81 bcA	414,9 abB	95,2 bB
Ld3	26,32 abA	350,8 aA	129,03 bcAB	341,8 abB	203,5 bB
Ld4	32,04 aA	395,8 aA	270,15 aB	592,9 aB	523,7 aC
T (NPK)	13,49 cA	105,9 bB	191,05 abB	562,4 aAB	60,4 BA
Média	22,22 a	284,1 b	150,1 c	394,0 b	174,0 c
C.V. (%)	28,9	44,9	45,6	40,7	103,6
S3 s	8,22 aB	143,7 bB	192,96 bB	344,8 abAB	44,7 bA
Ld1	7,92 aB	87,4 bB	225,79 bA	212,4 abB	71,3 bA
Ld2	7,84 aB	110,2 bB	163,34 bA	165,0 bBC	124,8 bB
Ld3	9,72 aB	131,3 bB	191,24 bA	164,6 bBC	279,0 bB
Ld4	7,56 aC	106,5 bB	488,16 aA	222,0 abC	2985 aA
T (NPK)	7,43 aAB	230,1 aA	481,18 aA	466,0 bA	18,2 bA
Média	8,11 b	134,9 c	290,4 a	262,5 c	587,1 a
C.V. (%)	10,3	37,5	52,2	45,5	200,7
S3 g	26,39 aA	357,3 aA	131,57 abBC	544,3 cA	113,5 dA
Ld1	21,08 aA	350,7 aA	87,08 bB	556,7 cA	200,1 cdA
Ld2	26,78 aA	351,5 aA	116,75 abA	1267 bA	455,0 bcA
Ld3	26,62 aA	416,5 aA	92,29 bB	1863 aA	604,3 bA
Ld4	23,45 aB	388,3 aA	196,75 aB	1530 bA	1220 bA
T (NPK)	13,67 bA	257,6 bA	136,81 abB	742,8 cA	55,9 dA
Média	23,00 a	353,6 a	126,9 c	1084 a	441,4 b
C.V. (%)	22,2	15,2	31,3	50,9	98,9

Médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si. Foi aplicado o Teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade. Letras minúsculas representam diferentes tratamentos; letras maiúsculas representam diferentes solos ou culturas. S1 = Pvd* (impactado); S2 = Pvd – UM São Jerônimo; S3 = Pvd – UM Itapuã. “m” = milho; “s” = sorgo; “g” = girassol. T (NPK) = Testemunha com adição de nutrientes (NPK) e calcário. Tratamentos Ld1 a Ld4 = 2; 5; 10; 20 Mg ha⁻¹, respectivamente.

APÊNDICE 7: Teores de Cd, Cr, Ni, Pb, As e Se na matéria seca da parte aérea de milho (m), sorgo (s) e girassol (g).

Tratamentos	Cd	Cr	Ni	Pb	As	Se
 mg kg ⁻¹					
S1 m	0,05 aC	1,65 bAB	0,72 aC	0,17 aA	1,06 aA	1,05 bcA
Ld1	0,05 aC	2,49 bA	1,35 aB	0,21 aA	0,72 abA	1,83 aA
Ld2	0,06 aD	1,56 bAB	0,90 aC	0,34 aA	0,39 bcB	0,92 cAB
Ld3	0,05 aD	2,18 bAB	0,91 aC	0,26 aB	0,35 bcBC	1,26 bcA
Ld4	0,07 aD	4,52 aB	1,70 aC	0,65 aC	0,30 cBC	1,44 abBC
T (NPK)	0,06 aB	1,52 bA	1,10 aB	0,14 aA	0,22 cB	1,45 abB
Média	0,06 d	2,32 b	1,1 d	0,29 c	0,51 bc	1,32 a
C.V. (%)	15,4	49,3	32,2	64,1	63,0	24,5
S2 s	0,32 aA	2,12 aAB	2,61 abB	0,70 aA	0,26 bB	0,57 cBC
Ld1	0,20 bAB	1,58 aA	2,73 abB	0,35 aA	0,21 bB	0,72 bcB
Ld2	0,21 bBC	1,64 aAB	3,58 aB	0,24 aA	0,37 abB	0,84 bcAB
Ld3	0,19 bBC	1,84 aAB	2,73 abB	0,24 aB	0,71 aAB	0,62 cBC
Ld4	0,18 bC	2,14 aCD	3,33 abA	0,20 aC	0,30 cBC	1,11 bCD
T (NPK)	0,15 bA	1,34 aA	1,43 bB	0,34 aA	0,45 abB	2,19 aA
Média	0,21 c	1,78 bc	2,73 b	0,34 c	0,38 c	1,01 b
C.V. (%)	28,4	17,9	27,2	54,0	47,3	60,6
S2 g	0,22 bB	2,74 aAB	3,22 aB	1,15 abA	0,45 cB	0,60 bBC
Ld1	0,22 bA	0,93 aA	1,52 cB	0,52 bA	0,71 abcA	0,98 bB
Ld2	0,29 abAB	1,15 aB	1,54 cC	0,64 bA	0,83 abcA	0,61 bB
Ld3	0,28 abB	1,18 aB	1,68 bcBC	1,46 abA	0,87 abA	0,90 bAB
Ld4	0,33 aB	1,57 aD	1,77 abcC	1,79 aB	0,97 aA	1,73 aB
T (NPK)	0,21 bA	1,48 aA	3,08 abA	0,69 bA	0,56 bcAB	0,56 bCD
Média	0,26 b	1,51 c	2,13 c	1,04 b	0,73 a	0,90 b
C.V. (%)	18,8	43,0	37,1	49,1	27,0	49,3
S3 s	0,24 abAB	3,37 bA	23,68 aA	1,13 bA	1,19 aA	0,91 bAB
Ld1	0,12 cBC	2,62 bA	6,17 bA	0,85 bA	0,67 bA	0,27 cC
Ld2	0,12 cCD	2,96 bA	5,62 bcA	0,97 bA	0,62 bcAB	0,84 bAB
Ld3	0,18 bcC	3,33 bA	4,79 bcA	0,66 bAB	0,21 cdC	0,36 cC
Ld4	0,28 aB	6,43 aA	4,24 cA	4,35 aA	0,19 dC	2,46 aA
T (NPK)	0,17 bcA	1,91 bA	2,37 dAB	0,95 bA	0,31 bcdB	0,37 cD
Média	0,18 c	3,44 a	7,81 a	1,48 a	0,53 bc	0,87 b
C.V. (%)	35,4	45,4	100,9	95,2	71,6	95,1
S3 g	0,22 bB	1,19 bB	2,31 bA	0,57 aA	0,93 aA	0,48 bC
Ld1	0,22 bA	1,12 bA	1,47 aB	1,15 aA	0,34 bAB	0,67 bBC
Ld2	0,32 bA	1,43 bAB	1,96 aC	1,06 aA	0,23 bB	1,25 aA
Ld3	0,41 aA	1,43 bB	1,94 aBC	0,73 aAB	0,31 bC	1,23 aA
Ld4	0,48 aA	3,51 aBC	1,92 aBC	0,78 aC	0,59 abAB	0,75 bD
T (NPK)	0,24 bA	1,78 abA	2,40 aAB	0,70 aA	0,90 aA	0,84 abC
Média	0,32 a	1,74 bc	2,00 c	0,83 b	0,55 b	0,87 b
C.V. (%)	34,4	51,3	16,6	26,9	55,8	35,9

Médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si. Foi aplicado o Teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade. Letras minúsculas representam diferentes tratamentos; letras maiúsculas representam diferentes solos ou culturas. S1 = Pvd* (impactado); S2 = Pvd – UM São Jerônimo; S3 = Pvd – UM Itapuã. “m” = milho; “s” = sorgo; “g” = girassol. T (NPK) = Testemunha com adição de nutrientes (NPK) e calcário. Tratamentos Ld1 a Ld4 = 2; 5; 10; 20 Mg ha⁻¹, respectivamente.

APÊNDICE 8: Teores de P, K, Ca, Mg e S nas raízes do milho (m), sorgo (s) e girassol (g).

Tratamentos	P	K	Ca	Mg	S
	%				
S2 s	0,07 bA	1,18 aB	0,15 bB	0,13 aB	0,09 bcA
Ld1	0,08 abA	0,96 aB	0,23 bB	0,17 aC	0,18 abB
Ld2	0,07 abB	0,93 aB	0,26 abB	0,18 aB	0,17 abB
Ld3	0,07 abB	0,89 aB	0,45 aA	0,19 aA	0,23 aC
Ld4	0,10 aA	1,09 aA	0,34 abB	0,21 aA	0,30 aAB
T (NPK)	0,04 cB	0,33 bB	0,13 bB	0,10 aB	0,04 cA
Média	0,07 aA	0,90 aB	0,26 bB	0,16 aB	0,17 aB
C.V. (%)	28,1	33,4	46,5	25,0	55,4
S2 g	0,06 bA	3,07 abA	0,34 cdA	0,41 abA	0,10 bA
Ld1	0,08 abA	2,73 bA	0,45 bcA	0,47 aB	0,31 aA
Ld2	0,10 aA	3,39 aA	0,60 abA	0,29 bcAB	0,39 aA
Ld3	0,08 abB	1,57 cA	0,51 abcA	0,23 cA	0,36 aAB
Ld4	0,09 abAB	0,75 dAB	0,68 aA	0,20 cA	0,36 aA
T (NPK)	0,06 bAB	0,83 dA	0,22 dAB	0,24 bcAB	0,06 bA
Média	0,08 aA	2,06 aA	0,47 aA	0,31 bA	0,26 aA
C.V. (%)	18,8	56,2	36,3	35,7	55,8
S3 s	0,07 bA	0,51 abC	0,20 bAB	0,14 aB	0,10 bcA
Ld1	0,06 bA	0,66 abBC	0,35 abAB	0,14 aC	0,17 abcB
Ld2	0,06 bB	0,68 abBC	0,29 abB	0,15 aB	0,17 bcB
Ld3	0,11 aA	1,00 aB	0,49 aA	0,28 aA	0,30 aBC
Ld4	0,05 bC	0,40 bB	0,49 aAB	0,12 aA	0,21 abB
T (NPK)	0,06 bAB	0,37 bAB	0,25 bAB	0,20 aB	0,06 cA
Média	0,07 aB	0,60 bA	0,35 aB	0,17 aB	0,17 aB
C.V. (%)	27,9	38,8	35,2	33,7	50,4
S3 g	0,07 aA	0,58 aC	0,34 bAB	0,46 bA	0,12 cA
Ld1	0,08 aA	0,32 aC	0,45 abA	0,67 aA	0,37 abA
Ld2	0,08 aAB	0,23 aC	0,54 abA	0,38 bA	0,38 abA
Ld3	0,10 aAB	0,36 aC	0,59 aA	0,32 bcA	0,47 aA
Ld4	0,07 aBC	0,34 aB	0,46 abB	0,20 cA	0,33 bA
T (NPK)	0,08 aA	0,27 aB	0,35 bA	0,37 bcA	0,06 cA
Média	0,08 aA	0,35 bB	0,45 aA	0,40 aA	0,29 aA
C.V. (%)	11,7	35,4	21,8	39,2	56,4

Médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si. Foi aplicado o Teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade. Letras minúsculas representam diferentes tratamentos; letras maiúsculas representam diferentes solos ou culturas. S2 = Pvd – UM São Jerônimo; S3 = Pvad – UM Itapuã. “s” = sorgo; “g” = girassol. T (NPK) = Testemunha com adição de nutrientes (NPK) e calcário. Tratamentos Ld1 a Ld4 = 2; 5; 10; 20 Mg ha⁻¹, respectivamente.

APÊNDICE 9: Teores de Cu, Zn, Fe, Mn e Na nas raízes do milho (m), sorgo (s) e girassol (g).

Tratamentos	Cu		Zn		Fe		Mn		Na	
 mg kg ⁻¹									
S2 s	37,23	aA	255,1	aA	6457	cA	154,1	aA	225	aB
Ld1	28,94	aAB	205,3	abB	7019	bcA	144,8	aA	1040	aC
Ld2	25,93	bA	142,2	bcBC	9478	aA	163,0	aAB	869	aB
Ld3	25,32	aA	170,0	abB	8084	abcA	187,8	aC	2593	aB
Ld4	37,44	aA	213,3	abA	9263	abA	194,0	aB	2378	aC
T (NPK)	8,65	bA	54,9	cB	7230	abcA	196,3	aA	178	aA
Média	27,3	aB	173,5	bA	7922	aA	173,3	bA	1214	aB
C.V. (%)	38,7		40,2		15,6		12,8		86,1	
S2 g	28,39	bcAB	291,5	aA	4913	abA	125,8	aA	1912	cAB
Ld1	41,51	abA	197,2	bB	4506	abB	113,5	aA	8554	bB
Ld2	48,67	aA	104,0	cdC	2719	bBC	149,5	aAB	14177	aA
Ld3	37,96	abA	169,8	bcB	2791	bB	111,3	aC	14084	aA
Ld4	33,01	abA	159,9	bcAB	5297	aB	153,7	aB	13871	aB
T (NPK)	14,84	cA	39,9	dB	6725	aA	89,3	aA	1286	cA
Média	34,1	aA	160,4	bA	4492	aB	123,9	bB	8981	bA
C.V. (%)	34,4		53,1		34,3		19,8		68,0	
S3 s	16,09	abB	249,7	abA	2788	aB	204,9	bA	628	bB
Ld1	14,09	abC	115,4	cC	2291	aC	193,9	bA	2070	abC
Ld2	27,95	aB	277,2	aA	2076	aC	133,8	bA	2307	abB
Ld3	24,83	aA	286,7	aA	3455	aB	424,8	bA	3760	aB
Ld4	8,00	bB	176,0	bcAB	2841	aC	198,6	bB	1485	abC
T (NPK)	15,84	abA	231,7	abA	4064	aB	227,7	bA	721	abA
Média	17,8	bB	222,8	aA	2919	bA	230,6	aB	1828	aB
C.V. (%)	41,2		29,5		25,3		43,4		63,8	
S3 g	41,90	aA	233,3	bA	1153	cB	188,1	bA	4248	dA
Ld1	24,84	bcBC	334,9	aA	1917	bcC	132,9	bA	11808	cA
Ld2	26,25	abB	191,6	bcdB	4738	aB	292,1	bA	12108	cA
Ld3	27,71	abA	206,3	bcAB	2789	abcB	633,1	aA	16586	bA
Ld4	9,58	cB	130,2	cdB	4126	abBC	630,5	aA	25580	aA
T (NPK)	16,34	bcA	114,7	dB	4289	aB	158,8	bA	1039	eA
Média	24,4	bA	201,8	aA	3168	bA	3168	aA	11895	aA
C.V. (%)	45,0		39,4		45,5		45,5		73,8	

Médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si. Foi aplicado o Teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade. Letras minúsculas representam diferentes tratamentos; letras maiúsculas representam diferentes solos ou culturas. S2 = Pvd – UM São Jerônimo; S3 = Pvad – UM Itapuã. “s” = sorgo; “g” = girassol. T (NPK) = Testemunha com adição de nutrientes (NPK) e calcário. Tratamentos Ld1 a Ld4 = 2; 5; 10; 20 Mg ha⁻¹, respectivamente.

APÊNDICE 10: Teores de Cd, Cr, Ni e Pb nas raízes do milho (m), sorgo (s) e girassol (g).

Tratamentos	mg kg ⁻¹			
	Cd	Cr	Ni	Pb
S2 s	0,29 aA	9,41 cA	4,63 aA	7,77 aA
Ld1	0,23 aA	18,85 bA	5,46 aA	7,59 aAB
Ld2	0,23 aAB	13,24 bcAB	6,60 aA	10,38 aA
Ld3	0,20 abB	28,81 aA	6,89 aA	8,17 aA
Ld4	0,25 aA	18,16 bBC	5,87 aB	9,05 aB
T (NPK)	0,12 bA	16,93 bA	16,28 aA	7,76 aA
Média	0,22 aB	17,57 aA	7,62 bA	8,45 bA
C.V. (%)	26,3	37,3	56,7	12,8
S2 g	0,37 aA	7,48 cA	3,80 aA	12,15 aA
Ld1	0,21 bcA	8,78 cB	4,65 aA	12,10 aA
Ld2	0,31 abA	10,98 bcAB	4,44 aA	8,69 aA
Ld3	0,23 bcB	11,81 bcC	3,23 aA	7,06 aA
Ld4	0,30 abA	31,94 aA	4,00 aB	8,38 bA
T (NPK)	0,17 cA	16,33 bA	5,22 aA	6,71 aA
Média	0,27 aA	14,55 bA	4,22 aA	9,18 aA
C.V. (%)	28,1	62,2	16,5	26,2
S3 s	0,12 aB	9,59 bA	9,01 bA	8,50 bA
Ld1	0,10 aB	8,57 bB	8,54 bA	5,15 bB
Ld2	0,08 aC	9,23 bB	7,41 bA	5,95 bA
Ld3	0,15 aB	18,30 aB	8,83 bA	4,80 bA
Ld4	0,10 aB	21,64 aB	180,68 aA	42,22 aA
T (NPK)	0,15 aA	10,18 bB	6,69 bA	5,69 bA
Média	0,12 bB	12,92 aB	36,86 aA	12,05 aA
C.V. (%)	23,5	43,3	191,2	123,1
S3 g	0,15 bB	3,82 bA	3,87 aA	10,42 aA
Ld1	0,15 bAB	5,93 bB	3,35 aA	4,95 aB
Ld2	0,19 bB	16,10 aA	4,33 aA	7,12 aA
Ld3	0,35 aA	17,93 aB	3,13 aA	7,42 aA
Ld4	0,33 aA	15,59 aC	2,25 aB	8,25 aB
T (NPK)	0,16 bA	7,08 bB	5,49 aA	6,02 aA
Média	0,22 aA	11,08 aB	3,74 aB	7,36 bB
C.V. (%)	41,6	55,3	29,7	25,6

Médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si. Foi aplicado o Teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade. Letras minúsculas representam diferentes tratamentos; letras maiúsculas representam diferentes solos ou culturas. S2 = Pvd – UM São Jerônimo; S3 = Pvad – UM Itapuã. “s” = sorgo; “g” = girassol. T (NPK) = Testemunha com adição de nutrientes (NPK) e calcário. Tratamentos Ld1 a Ld4 = 2; 5; 10; 20 Mg ha⁻¹, respectivamente.