

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

**ATRIBUTOS QUÍMICOS DE SOLOS E CRESCIMENTO DE
PLANTAS SOB IRRIGAÇÃO COM LIXIVIADO INDUSTRIAL
TRATADO**

Filipe Selau Carlos

(Dissertação)

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

**ATRIBUTOS QUÍMICOS DE SOLOS E CRESCIMENTO DE
PLANTAS SOB IRRIGAÇÃO COM LIXIVIADO INDUSTRIAL
TRATADO**

FILIPPE SELAU CARLOS

Engenheiro Agrônomo (UFRGS)
Engenheiro Agrícola (Ulbra)

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

Porto Alegre, (RS), Brasil

Fevereiro de 2014

FILIPPE SELAU CARLOS
Engenheiro Agrônomo (UFRGS)
Engenheiro Agrícola (Ulbra)

DISSERTAÇÃO

Submetida como parte dos requisitos

para obtenção do Grau de

MESTRE EM CIÊNCIA DO SOLO

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DO SOLO

FACULDADE DE AGRONOMIA

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

Porto Alegre (RS), Brasil

Aprovada em:
Pela Banca Examinadora

Homologado em:
por

FLÁVIO A. de OLIVEIRA CAMARGO
Professor Orientador

ALBERTO V. INDA JR
Coordenador do PPG em Ciência
do Solo

CARLOS ALBERTO BISSANI
PPG – Ciência do Solo/UFRGS

CARLOS GUSTAVO TORNQUIST
PPG – Ciência do Solo/UFRGS

PEDRO ALBERTO SELBACH
Diretor da Faculdade de Agronomia

PEDRO ALBERTO SELBACH
Departamento de Solos/UFRGS

DEDICO a meus pais: João Carlos e
Sandramara Selau Carlos

Aos meus irmãos Viviane, Liliani e Diego,
Pessoas especiais na minha vida,

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal do Rio Grande do Sul, ao PPG em Ciência do Solo e ao Departamento de Solos, que auxiliaram e possibilitaram a realização do trabalho.

Ao Professor Flávio Camargo, pelo desafio da orientação, estímulo ao espírito de pesquisa, exemplo de dedicação e honestidade e, acima de tudo, amizade.

Ao Professor Marino José Tedesco, pelo auxílio na orientação nos momentos decisivos na elaboração e andamento do trabalho, exemplo de honestidade, humanismo, amizade e, acima de tudo, dedicação, seriedade e comprometimento exemplar com a ciência.

Ao Professor Robson Andreazza, pelo auxílio na orientação nos momentos decisivos na elaboração e andamento do trabalho, exemplo de honestidade, humanismo, amizade e, acima de tudo, dedicação, seriedade e comprometimento exemplar com a ciência.

À minha grande companheira nas horas boas e ruins Barbara Maciel Getz.

Aos demais professores do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo pelos ensinamentos e pela oportunidade de convívio com profissionais dedicados ao desenvolvimento da ciência do solo e na formação de profissionais e pessoas.

Ao CNPq, pela concessão da bolsa de doutorado.

Aos colegas do PPG em Ciência do Solo, em especial a Naihana Schaffer, Douglas Rogeri, Magno Amorin, Fernando Arnuti, José Bernardo, Anderson Vedelago, Cácio Boechat, Patrícia Giovanella, Amanda Posselt, Leonardo Capeletto e aos demais colegas, pelas valiosas horas de convívio e boas recordações dos momentos de lazer e alegria, entre tantos outros, que fizeram parte da minha passagem pelo curso e certamente ficarão para sempre na minha memória.

Agradeço de maneira especial, aos bolsistas de iniciação científica Andrei José Marafon e Bruno Loss, que realizaram o trabalho de forma brilhante e com qualidade.

Aos funcionários do Laboratório de Análise de Solo, Taís, Bebeca, Daniel. Aos funcionários do Departamento, Adão Luís, José Ferreira (Zé),

Jader Ribeiro pelo importante auxílio prestado, pela competência na realização de seu trabalho e pelos momentos de descontração e alegria.

À Utresa e ao Engenheiro Químico João Luis Bombarda, que abriu as portas dessa empresa e possibilitou a execução do presente trabalho.

A todos, meu muito obrigado!

ATRIBUTOS QUÍMICOS DE SOLOS E CRESCIMENTO DE PLANTAS SOB IRRIGAÇÃO COM LIXIVIADO INDUSTRIAL TRATADO ⁽¹⁾

Autor: Filipe Selau Carlos

Orientador: Flávio Anastácio de Oliveira Camargo

RESUMO

Lixiviados de centrais de resíduos industriais podem ser nocivos ao meio ambiente caso sejam lançados inadequadamente em mananciais hídricos, mas podem ser tratados e utilizados na agricultura com o aproveitamento dos nutrientes e de material orgânico. Deste modo, o objetivo deste trabalho foi avaliar o efeito de diferentes doses de lixiviado tratado nas propriedades químicas e eletroquímicas do solo, na dinâmica de nutrientes e elementos no solo e no rendimento de milho, arroz irrigado e milheto. Foram realizados estudos nas dependências do Departamento de Solos da UFRGS, onde a concentração do lixiviado tratado foi a principal variável. No primeiro estudo, avaliou-se o efeito da irrigação com lixiviado em atributos químicos de solo degradado, de percolado, nos teores de argila dispersa em água e na nutrição e produção de biomassa vegetal de plantas de milho. No segundo estudo, avaliou-se o rendimento e a absorção de nutrientes pelo arroz irrigado com lixiviado industrial tratado. No terceiro estudo analisaram-se as alterações eletroquímicas da solução do solo cultivado com arroz irrigado com lixiviado. No quarto estudo, avaliaram-se as alterações químicas de três solos bem como produção de biomassa vegetal e aspectos nutricionais de plantas de milheto irrigado com lixiviado. No estudo 1, a irrigação com lixiviado aumentou os teores de P, Na e CE no solo degradado, não alterou o desenvolvimento de milho, aumentou a absorção de macronutrientes à exceção de Ca e Mg e aumentou boa parte dos nutrientes, Na, a CE e DBO₅. Para o arroz, a irrigação com lixiviado aumentou a salinidade do solo e os nutrientes em solução e no tecido, porém, o lixiviado em proporções crescentes, diminuiu o rendimento de grãos. A irrigação com lixiviado na cultura do milheto aumentou os teores de Na e K nos solos e no tecido das plantas, além do N no tecido. Mesmo com altos teores de Na nos solos desse estudo, não se verificaram alterações nos teores de argila dispersa em água. O gesso agrícola não teve efeito na lixiviação de Na e as chuvas lixiviam a maior parte do Na. Dessa forma, a aplicação do lixiviado industrial pode ser uma fonte de nutrientes para o sistema solo-planta e uma alternativa ecológica de disposição de efluentes, desde que sejam monitorados os níveis de sódio.

⁽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, RS, Brasil. (115 p.) – Fevereiro, 2014. Trabalho realizado com apoio financeiro do CNPq.

SOIL CHEMICAL AND PLANT GROWTH ATTRIBUTES UNDER IRRIGATION WITH TREATED INDUSTRIAL LEACHATE⁽¹⁾

Author: Filipe Selau Carlos

Adviser: Flávio Anastácio de Oliveira Camargo

ABSTRACT

Waste plant Leachates can be harmful to the environment if they are improperly discharged in water bodies, but can be treated and used in agriculture as a source of nutrients and organic material. The aim of this work was to evaluate the effect of different doses of treated leachate in the soil chemical and electrochemical properties, dynamic of soil nutrients and elements and yield of maize, rice and millet. All studies performed used different concentration of the treated leachate as the main variable. The first study assessed the effect of leachate irrigation on the chemical properties of a degraded soil, leachate and plants. The second study assessed the yield and nutrient uptake by rice irrigated with leachate. In the third study the electrochemical changes on soil solution was analyzed after leachate irrigation. The fourth study evaluated the chemical changes of three soils and nutritional aspects of millet plants irrigated with leachate. Maize irrigation with leachate increased the levels of P, Na and EC in the degraded soil, did not alter the growth of corn, and increased macronutrients uptakes except for Ca and Mg. Rice irrigation with leachate increased salinity, nutrients in solution and in tissue and decreased grain yield. Millet irrigation with leached increased levels of Na and K in soils and plant tissue, and N in the tissue. Gypsum had no effect and the rains leach most of the Na. The industrial leachate can be a major source of nutrients to the soil but sodium levels require some monitoring.

⁽¹⁾ Master Dissertation in Soil Science. Programa de Pós Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, RS, Brazil. (115 p.) – February, 2014. Research work supported by CNPq.

SUMÁRIO

Página

1. INTRODUÇÃO GERAL	1
2. CAPÍTULO I – ESTADO ATUAL DO CONHECIMENTO	3
2.1. Contextualização do problema.....	4
2.2. Qualidade das águas residuárias tratadas.....	6
2.3. Fatores que influenciam a eficiência de utilização de efluentes no sistema solo-planta	7
2.4. Efeitos da irrigação com efluentes nos atributos do solo	8
2.5. Salinização dos solos pela aplicação de efluentes e razão de adsorção de sódio (RAS)	11
2.6. Efeito de efluentes no desenvolvimento e na nutrição de plantas	14
2.7. Solos alagados	16
3. CAPÍTULO II - ATRIBUTOS DE SOLO, PERCOLADO E DE PLANTAS DE MILHO SOB IRRIGAÇÃO COM LIXIVIADO INDUSTRIAL TRATADO	17
3.1. Resumo	17
3.2. Introdução	18
3.3. Material e métodos	19
3.4. Resultados e discussão.....	24
3.4.1. Rendimento de matéria seca e nutrição do milho	24
3.4.2. Composição do percolado.....	29
3.4.3. Solo	40
3.4.4. Argila dispersa em água.....	43
3.5. Conclusões	44
4. CAPÍTULO III – RENDIMENTO E ABSORÇÃO DE NUTRIENTES PELO ARROZ IRRIGADO COM LIXIVIADO INDUSTRIAL TRATADO	45
4.1. Resumo	45
4.2. Introdução	46
4.3. Material e métodos	47
4.4. Resultados e discussão.....	50
4.4.1. Nutrientes de plantas e Na adicionados pelo LIT	50
4.4.2. Rendimento de plantas e componentes da produção	51
4.4.3. Nutrientes e sódio absorvidos pelas plantas	53

4.4.4. Teores de nutrientes e condutividade elétrica (CE) do solo após cultivo do arroz.....	56
4.5. Conclusões	58
5. CAPÍTULO IV - ALTERAÇÕES ELETROQUÍMICAS E DINÂMICA DE NUTRIENTES EM SOLUÇÃO DE SOLO CULTIVADO COM ARROZ IRRIGADO COM LIXIVIADO INDUSTRIAL TRATADO.....	59
5.1. Resumo	59
5.2. Introdução	60
5.3. Material e métodos	61
5.4. Resultados e discussão.....	64
5.5. Conclusões	75
6. Capítulo V - ATRIBUTOS QUÍMICOS DE SOLOS DO RIO GRANDE DO SUL E ASPECTOS NUTRICIONAIS DE PLANTAS DE MILHETO SOB IRRIGAÇÃO COM LIXIVIADO INDUSTRIAL TRATADO	76
6.1. Resumo	76
6.2. Introdução	77
6.3. Material e métodos	78
6.4. Resultados e discussão.....	83
6.5. Atributos químicos do solo	83
6.6. Crescimento vegetal.....	89
6.4.1. Argila dispersa em água.....	93
6.7. Conclusões	95
7. CONCLUSÕES GERAIS	96
8. CONSIDERAÇÕES FINAIS	98
9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	101
10. APÊNDICE.....	113

RELAÇÃO DE TABELAS

	Página
Tabela 1. Caracterização do solo degradado antes da instalação do experimento	20
Tabela 2. Características, padrões de lançamento em corpos hídricos e especiação iônica do lixiviado industrial tratado.....	21
Tabela 3. Tratamentos, tipos e doses de insumos e líquidos utilizados para irrigação	22
Tabela 4. Teores de N, P, K, Ca, Mg, S, Fe, Mn e Na no tecido da parte aérea de plantas de milho	28
Tabela 5. Teores de Cu, Zn, Cd, Cr, Ni, e Pb no tecido da parte aérea de plantas de milho, após o corte das plantas	29
Tabela 6. Valores de pH, condutividade elétrica e teores de potássio do percolado coletado a 23, 47 e 60 dias após a emergência das plântulas de milho	31
Tabela 7. Adição de sódio pela irrigação como lixiviado, sódio retido no solo, no percolado, absorvido pelas plantas e somatório de Na nas médias dos tratamentos (T0, T50 e T100)	32
Tabela 8. Teores de cálcio, magnésio e sódio do percolado coletado a 23, 47 e 60 dias após a emergência das plântulas de milho.....	34
Tabela 9. Teores de sulfato, amônio e nitrato do percolado coletado a 23, 47 e 60 dias após a emergência das plântulas de milho.....	36
Tabela 10. Razão de adsorção de sódio (RAS), classificação para uso na irrigação e demanda biológica de oxigênio (DBO ₅) do percolado coletado a 23, 47 e 60 dias após a emergência das plântulas de milho	39
Tabela 11. Teores de P, K, Ca, Mg e Na e valores de pH, SMP e CE do solo após o corte das plantas de milho (73 dias após a emergência das plântulas)	42
Tabela 12. Características do lixiviado industrial tratado (LIT) e padrões para lançamento em corpos hídricos	48
Tabela 13. Quantidades totais (kg ha ⁻¹) de nutrientes adicionados pela irrigação com o LIT durante o período experimental comparadas à recomendação regional (SOSBAI, 2012)	51
Tabela 14. Rendimento de matéria seca da parte aérea e de grãos, esterilidade, peso de mil grãos, número de perfilhos e teor de	

clorofila (SPAD) de arroz irrigado com lixiviado industrial tratado em diferentes diluições	53
Tabela 15. Teores e quantidades absorvidas de macronutrientes e de sódio na biomassa da parte aérea de arroz irrigado com lixiviado industrial tratado em diferentes diluições	55
Tabela 16. Teores e quantidades absorvidas de macronutrientes e de sódio nos grãos de arroz irrigado com lixiviado industrial tratado em diferentes diluições	55
Tabela 17. Teores de micronutrientes (Fe, Mn, Cu e Zn) e de alguns metais na biomassa da parte aérea e nos grãos de arroz irrigado com lixiviado industrial tratado em diferentes diluições.	56
Tabela 18. Teores de P, K, Ca e Mg e Na e valor de CE no solo após ciclo de 126 dias de arroz irrigado por alagamento com lixiviado industrial tratado em diferentes proporções	58
Tabela 19. Características do lixiviado industrial tratado (LIT) e padrões para lançamento em corpos hídricos	63
Tabela 20. Quantidade total de fertilizantes minerais, carbono orgânico dissolvido (COD) e de sódio adicionados pela irrigação com o LIT durante o período experimental comparado a recomendação regional (SOSBAI, 2012)	65
Tabela 21. Tratamentos, tipos e doses de insumos e líquidos utilizados para irrigação	79
Tabela 22. Atributos dos três solos antes da instalação do experimento ...	80
Tabela 23. Características do lixiviado industrial tratado (LIT) e padrões para lançamento em corpos hídricos	80
Tabela 24. Quantidades de chuva e irrigação com lixiviado industrial tratado durante o período de condução do experimento no município de Porto Alegre-RS, Brasil.....	82
Tabela 25. Quantidade total de fertilizantes minerais aplicados durante o período experimental comparado à recomendação regional (CQFS-RS/SC, 2004).....	84
Tabela 26. Características químicas ao longo do tempo de três solos Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico arênico (PVAd), Argissolo Vermelho distrófico típico (PVd) e Latossolo vermelho(LVd) sob irrigação com lixiviado em diferentes proporções	88
Tabela 27. Teores de macronutrientes e sódio da biomassa da parte aérea de milho cultivado sob irrigação com lixiviado industrial tratado em três solos: Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico arênico (PVAd), Argissolo Vermelho distrófico típico (PVd) e Latossolo Vermelho distrófico (LVd) com amostragens feitas em outubro de 2012, março de 2013 e novembro de 2013.....	91

RELAÇÃO DE FIGURAS

	Página
Figura 1. Figura de interpretação da RAS, indicador da qualidade da água para fins de irrigação agrícola. (Richards, 1954; adaptado de Cauduro & Dorfman, 1990).	13
Figura 2. Unidade experimental de PVC com sistema de drenagem para coleta do percolado (A) e foto do experimento em coleta de percolado (B).....	23
Figura 3. Curvas de resposta do milho às adições de adubos nitrogenado e fosfatado.*significativo a nível de 95% de probabilidade pelo teste de Scott Knott.....	25
Figura 4. Rendimento de matéria seca do milho (médias de três repetições); letras diferentes indicam diferença significativa entre tratamentos, a nível de 95% de probabilidade pelo teste de Scott Knott.....	26
Figura 5. Teor de argila dispersa em água após aplicação de lixiviado industrial tratado em diferentes tratamentos. (Scott Knott 5%)....	43
Figura 6. Volume de irrigação em 13 semanas de alagamento com diferentes concentrações de lixiviado. (◊) T0, (-▲-) T25, (-●-) T50, (-x-) T75 e (-■-) T100, (médias de três repetições).	49
Figura 7. Volume de irrigação em 13 semanas de alagamento com diferentes concentrações de lixiviado. (◊) T0, (-▲-) T25, (-●-) T50, (-x-) T75 e (-■-) T100. (média de três repetições).	64
Figura 8. Valores de fósforo (A), enxofre (B), amônio (C) e nitrato (D) na solução do solo sob irrigação com lixiviado industrial tratado (LIT) em diferentes concentrações, em 88 dias de alagamento. (◊) T0, (-▲-) T25, (-●-) T50, (-x-) T75 e (-■-) T1. Barras verticais indicam erro padrão. Os valores de trat e data nos gráficos indicam os valores de diferença mínima significativa (dms) para os tratamentos e datas, respectivamente, pelo teste de Tukey (p<0,05).	66
Figura 9. Teores de potássio (A), cálcio(B) e magnésio(C) na solução do solo sob irrigação com lixiviado industrial tratado (LIT) em diferentes concentrações durante 88 dias de alagamento.(◊) T0, (-▲-) T25, (-●-) T50, (-x-) T75 e (-■-) T100. Barras verticais indicam erro padrão. Os valores de trat e data nos	

gráficos indicam os valores de diferença mínima significativa (dms) para os tratamentos e datas, respectivamente, pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).....

69

Figura 10. Valores de sódio (A) razão de adsorção de sódio (B) e condutividade elétrica (C) na solução do solo sob irrigação com lixiviado industrial tratado (LIT) em diferentes concentrações durante 88 dias de alagamento. (♦) T0, (▲) T25, (●) T50, (x) T75 e (■) T100. Barras verticais indicam erro padrão. Os valores de trat e data nos gráficos indicam os valores de diferença mínima significativa (dms) para os tratamentos e datas, respectivamente, pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).....

71

Figura 11. Valores de pH (A) E_H (B) e DBO5 (C) na solução do solo sob irrigação com lixiviado industrial tratado (LIT) em diferentes concentrações durante 88 dias de alagamento. (♦) T0, (▲) T25, (●) T50, (x) T75 e (■) T100. Barras verticais indicam erro padrão. Os valores de trat e data nos gráficos indicam os valores de diferença mínima significativa (dms) para os tratamentos e datas, respectivamente, pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).....

73

Figura 12. Produção de biomassa vegetal de milho em diferentes concentrações de lixiviado industrial tratado. Médias dos três solos com três repetições. Barras verticais indicam desvio padrão da média. ns - não se observou diferença estatística entre os tratamentos (Tukey $< 0,05$).....

93

Figura 13. Teor de argila dispersa em água após aplicação de lixiviado industrial tratado (out/12) em tratamentos com diferentes diluições nos três solos. Teste de Tukey a 5% de significância. Barras verticais indicam erro padrão da média.....

94

RELAÇÃO DE APÊNDICES

	Página
Apêndice 1. Percentual de distribuição das espécies químicas presentes no lixiviado industrial tratado.....	113

1. INTRODUÇÃO GERAL

O aumento populacional e a expansão das atividades industriais nos últimos 50 anos aumentaram a degradação dos recursos naturais. No Rio Grande do Sul esse cenário não é diferente. As regiões do Delta do Jacuí, do Vale dos Sinos e da Serra são responsáveis por quase 60% do potencial poluidor do Estado. Como consequência, o IBGE em 2010 relatou que o Rio Grande do Sul tem 3 dos 10 rios mais poluídos do Brasil, todos desaguando na região metropolitana de Porto Alegre (Rio dos Sinos, 4º lugar; Rio Gravataí, 5º. Lugar; Rio Cai, 8º. Lugar). O impacto desta poluição industrial poderia ser diminuído com a reutilização de águas residuárias na agricultura, uma vez que a demanda por água no Estado para a atividade agrícola é muito grande, especialmente para culturas de grande demanda hídrica como o arroz, milho e milho.

A irrigação utilizando efluentes tratados diminui a exploração de reservas hídricas de água doce, diminui o volume de efluentes lançados, além de diminuir o risco de eutrofização e outros desequilíbrios em mananciais hídricos, promovendo a reciclagem da carga orgânica e dos nutrientes no solo. Apesar da recomendação do uso de águas residuárias para a irrigação, pode ocorrer contaminação ambiental em determinadas situações. Entre os problemas recorrentes destaca-se a contaminação do lençol freático por nitrato e o aumento da salinização do solo, em especial a sodicidade e as suas consequências na deterioração da estrutura do solo, diminuição da permeabilidade da água e redução do rendimento das culturas por efeitos tóxicos e osmóticos. No entanto, a irrigação com águas residuárias aumenta a absorção de nutrientes do solo e o incremento no rendimento das culturas.

Elementos como sais, nitrogênio em formas minerais e carbono orgânico dissolvido (COD) encontram-se em altas concentrações em efluentes tratados. Os altos teores de Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} e K^+ encontrados nos efluentes, também modificam a composição da solução do solo e podem afetar o desenvolvimento vegetal.

Poucos trabalhos avaliam a dinâmica de compostos presentes em águas residuárias industriais tratadas no solo e a sua influência na nutrição e no desenvolvimento de plantas sob condições tropicais e principalmente nos solos do Rio Grande do Sul. Realizar esta avaliação foi o objetivo deste trabalho, que especificamente procurou avaliar o efeito da irrigação com lixiviado industrial tratado em diferentes proporções nas propriedades químicas e eletroquímicas do solo, na dinâmica de nutrientes e elementos no solo, bem como a nutrição e a produção de biomassa vegetal de milho, arroz irrigado e milheto.

2. CAPÍTULO I – ESTADO ATUAL DO CONHECIMENTO

O abastecimento de água e a degradação de corpos hídricos são preocupações globais e esses problemas têm se intensificado nas últimas décadas pela expansão da população e das atividades econômicas. As alterações no clima possivelmente poderão interferir na disponibilidade de água num futuro próximo (Pedrero et al., 2010). Por essas razões, as águas de menor qualidade passarão a ter participação importante no abastecimento agrícola, principalmente em regiões com déficits hídricos (Qadir et al., 2007). Efluentes domésticos e industriais são exemplos de águas de baixa qualidade e os aspectos sanitários e potenciais impactos ambientais da irrigação com efluentes devem ser considerados (Fonseca et al., 2007; Pedrero et al., 2010). Deste modo, é fundamental que as águas residuárias atendam as exigências mínimas de lançamento e que tenham um tratamento prévio adequado, a fim de evitar alterações no ambiente e na saúde humana (Salgot et al., 2003).

Os efluentes são utilizados há séculos em cidades como Berlin, Londres, Milão e Paris (AATSE, 2006). O México conta com 260.000 ha irrigados com efluentes, na grande maioria aplicados sem tratamento ou diluído (México CAN, 2004). A Califórnia-EUA foi pioneira na implantação e recuperação de águas residuárias (Asano e Levine, 1996). Atualmente, os Estados Unidos usa 1,5% dos efluentes domésticos, volume próximo a 656 milhões de litros anuais (Pedrero et al., 2010). Já no Brasil essa prática é recente (Fonseca et al., 2005). A utilização de efluentes tratados na agricultura tem três principais objetivos: (1) fazer um tratamento complementar do efluente (Bouwer & Chaney, 1974); (2) utilizar águas residuárias como fonte hídrica para a agricultura (Bouwer & Idelovitch, 1987; Al-Jaloud et al., 1995; Tanji, 1997; Fonseca et al., 2007) - sendo um setor que demanda 70% da água consumida

no Brasil (Hespanhol, 2002) e (III) uso como fonte de nutrientes (Bouwer & Chaney, 1974; Vazquez-Montiel et al., 1996; Fonseca et al., 2007).

O manejo adequado do solo, das culturas e da irrigação propicia a absorção dos elementos contidos em efluentes (Fonseca et al., 2007). Os elementos encontrados em maiores concentrações nos efluentes são os nutrientes, com destaque para o nitrogênio (Pedrero et al., 2010). Quando aplicados ao solo, o sistema radicular das plantas absorve parte desses elementos, evitando a lixiviação para águas profundas (Pedrero et al., 2010). Além da absorção pelas plantas, os solos influenciam na dinâmica dos nutrientes. O fósforo adicionado pelos efluentes (Fonseca et al., 2007) é adsorvido com forte energia de ligação aos óxidos de Fe e Al em solos tropicais (Meurer, 2008; Sposito, 2008), conferindo baixa mobilidade a esse elemento. O nitrogênio e o fósforo podem causar inúmeros problemas de contaminação de corpos d'água (Powlson et al., 2008). Apesar da irrigação com efluentes atenuar a degradação e exploração de corpos hídricos e reciclar nutrientes no solo, estudos mais detalhados devem ser conduzidos em solos tropicais (Fonseca et al., 2007; Blum et al., 2013).

2.1. Contextualização do problema

Atualmente no RS, mais de 90% dos municípios com maior potencial poluidor se encontram na região metropolitana de Porto Alegre, Vale do Sinos, do Caí e Serra (FEE, 2010). Entre as principais indústrias da região do Vale do Sinos destaca-se a coureiro-calçadista. Os curtumes são as unidades responsáveis por processar o couro bruto, oriundo dos frigoríficos e abatedouros de animais (Souza, 2007). Nos curtumes, o couro é beneficiado para as indústrias de calçados. No processamento das peles, são geradas grandes quantidades de resíduos sólidos, como retalhos de couro não processado e aparas de couro, que são destinadas a centrais de resíduos (Souza, 2007).

A Utresa, no município de Estância Velha-RS, é a maior central de resíduos industriais perigosos do RS. Os principais resíduos que recebe são: aparas de couro, retalhos de couro, lodos de ETE's de curtumes, areia de fundição e outros resíduos industriais perigosos. Na recepção, é estimado o volume de resíduos e posteriormente são destinados para as células. Cada

célula do aterro possui impermeabilização com uma camada compactada de argila na parte inferior, recoberta com geomembrana. No fundo são instalados drenos de lixiviado. Com a decomposição dos resíduos orgânicos, ocorre liberação de líquidos (lixiviado) que possuem alta carga orgânica e de nitrogênio, além de alto teor de Na proveniente da salga do couro e do NaOH utilizado no tratamento das peles (Souza, 2007). O lixiviado então é bombeado dos drenos para uma estação de tratamento de efluentes (ETE). Na ETE, são feitas duas etapas. O tratamento primário, ou tratamento físico, que utiliza peneiras e floculantes para diminuir a quantidade de sólidos em suspensão (Feigin et al., 1991). Nesta etapa, uma pequena parte da demanda bioquímica de oxigênio (DBO_5) é reduzida. No tratamento subsequente, secundário ou biológico, em lagoas biológicas, são utilizados aeradores que aumentam os níveis de O_2 nos efluentes para intensificar o metabolismo microbiano e metabolizar o carbono orgânico dissolvido. Nessa etapa, são reduzidos boa parte dos teores de material orgânico dissolvido (DQO e DBO_5) e nitrogênio (Feigin et al., 1991). Porém, mesmo que tratados, os teores de N e carbono orgânico dissolvido remanescentes, em algumas condições, causam desequilíbrios em corpos hídricos (Herpin et al., 1991). Além disso, o arroio Cascalho, que recebe os efluentes tratados da Utresa, possui uma capacidade limite de lançamentos, principalmente, devido ao grande volume atual de lançamento de efluentes tratados.

A bacia hidrográfica do Rio do Sinos é amplamente urbanizada e industrializada. Os mananciais hídricos, especificamente o Arroio Portão e Arroio Cascalho estão com sua capacidade de lançamento de efluentes excedida. Assim, em períodos de grande geração de efluentes tratados, os excedentes são destinados às lagoas de contenção. Além disso, em algumas ocasiões o volume de lixiviado gerado nas células de aterros de resíduos ultrapassa a capacidade de tratamento da ETE, e o excedente não tratado é destinado as lagoas de contenção. Entretanto, as chuvas diluem os compostos e nutrientes presentes nessas águas. Poré, esses potenciais contaminantes de corpos hídricos pode ser dispostos no solo, promovendo ciclagem de nutrientes e atenuando a degradação ambiental (Fonseca et al., 2007).

2.2. Qualidade das águas residuárias tratadas

A composição das águas residuárias depende de vários fatores. Os efluentes tratados apresentam composição relacionada com os resíduos e processos dos quais foram originados e o tratamento utilizado. Efluentes domésticos tratados dependem da qualidade da água de abastecimento, da natureza dos resíduos adicionados durante seu uso e do grau de tratamento do efluente (Quadir et al., 2007). Entre os indicadores para avaliar a qualidade das águas residuárias utilizadas no solo, destacam-se a demanda bioquímica de oxigênio (DBO_5); a demanda química de oxigênio (DQO); os teores de nitrogênio, fósforo, sais, metais pesados e a presença de organismos patogênicos e substâncias orgânicas sintéticas (Westcot & Ayers, 1985; Ayers & Westcot 1989). A DBO_5 e a DQO são indicadores importantes para avaliar a carga orgânica presente. A DBO_5 é a quantidade de oxigênio requerida para metabolizar o carbono orgânico dissolvido num período de cinco dias. Avalia indiretamente o carbono lábil (proteínas solúveis, carboidratos e ácidos orgânicos de rápida decomposição presentes nas águas). A DQO indica a quantidade total de oxigênio para degradar todo o carbono orgânico dissolvido. Efluentes, quando não tratados, em sua grande maioria, apresentam altos teores de DBO_5 e DQO. No tratamento secundário, nas lagoas biológicas, ocorre intensa metabolização dos resíduos orgânicos por microorganismos. Essa redução pode possibilitar o lançamento desses efluentes já tratados em mananciais hídricos, ou então, a reutilização no solo (Pettygrove & Asano, 1985).

A qualidade das águas residuárias pode ser também comprometida por altas concentrações de íons tóxicos, como elementos traço, microorganismos e nitrato, pois esses compostos podem apresentar grandes riscos à saúde humana e ao ambiente (Pedrero et al., 2010). Nos efluentes é bastante comum encontrar altos teores de Na (Herpin et al., 2007; Leal et al., 2009; Blum et al., 2013) que podem afetar os atributos físicos do solo (Hilel, 2001). Altas quantidades de nitrato nos efluentes também podem interferir na irrigação devido ao potencial contaminação de águas subterrâneas (Hook & Kardos 1978; Powlson et al., 2008).

Entre os atributos microbiológicos e patogênicos presentes em águas residuárias destacam-se os coliformes fecais (Quadir et al., 2007). Conforme regulamentações mais recentes, efluentes devem possuir tratamento mínimo para reduzir as quantidades de coliforme (WHO, 2006). Alguns trabalhos demonstraram que a irrigação com efluentes tratados não altera as concentrações de coliformes de culturas comestíveis cozidas (Sheik et al., 1990).

2.3. Fatores que influenciam a eficiência de utilização de efluentes no sistema solo-planta

No Brasil, há poucas políticas de longo prazo voltadas para o tratamento de efluentes domésticos e industriais, além da ausência de tratamento na maior parte dos efluentes gerados (Brasil, 2001). Por outro lado, inúmeros estudos têm demonstrado que a aplicação de efluentes no solo com cultivo de espécies agrícolas é de baixo custo (Asano et al., 1996) e utilizado tanto em regiões secas e úmidas (Bouwer & Chaney, 1974; Nichele 2009), além de ser uma prática ecologicamente recomendada para disposição de efluentes tratados no ambiente (Pedrero et al., 2010). Na Conferência das Nações Unidas para o Meio Ambiente no Rio de Janeiro em 1992 foi discutido o uso dos efluentes no solo e na irrigação de culturas como uma prática sustentável ambientalmente, pois diminui os lançamentos em corpos hídricos, contribui para a nutrição de plantas e diminui o uso de água doce na agricultura (Agenda 21, 1992).

Porém, a eficiência do uso de efluentes no solo depende de fatores importantes, que são enumerados a seguir: a) qualidade microbiológica (Bouwer & Chaney, 1974; Wescot, 1997) e composição química do efluente (Bouwer & Idelovitch, 1987) como salinidade (Leal et al., 2009), sodicidade (Bond, 1998), elementos traço (Tanji, 1997) e NO_3^- como a forma de N predominante no efluente (Powlson et al., 2008); b) disponibilidade de fontes de água e condições ambientais (Shahalan et al., 1998); c) adequação do tipo de irrigação com a qualidade do efluente (Bouwer & Idelovitch, 1987); d) concentrações de nutrientes no efluente (Janssen et al., 2005), bem como quantidade de fertilizante mineral aplicado (Fonseca et al., 2007); e) Características químicas (Bond, 1998), físicas (Balks et al., 1998), microbiológicas (Friedel et al., 2000) e bioquímicas dos solos (Speir, 2002),

além da fertilidade natural dos solos (Janssen et al., 2005); f) tipo e finalidade da cultura a ser utilizada (Janssen et al., 2005); g) condições sócio-econômicas e infra-estrutura das propriedades e dos produtores (Agunwamba, 2001).

2.4. Efeitos da irrigação com efluentes nos atributos do solo

Os efluentes tratados utilizados na irrigação podem alterar os atributos químicos (Leal et al., 2009; Blum et al., 2012), físicos (Halliwelet al., 2001), microbiológicos (Friedel et al., 2000) e bioquímicos do solo (Speir, 2002). As alterações no sistema solo-planta dependem das condições locais como tipo de solo, espécie de planta, clima, qualidade e quantidade do efluente aplicado (Mohammad & Ayadi, 2005; Fonseca et al., 2007; Pedrero et al., 2010).

Com relação ao carbono total, nitrogênio total e atividade microbiológica, vários autores verificaram aumento devido ao aporte de C e N pela irrigação (Mancino & Peper, 1992; Friedel et al., 2000). Ramirez-Funtes et al. (2002) e Pedrero et al. (2010) observaram que essas alterações foram verificadas em áreas irrigadas por longo prazo. Porém, outros autores verificaram diminuição nos teores totais de C e N e atribuíram ao aumento da atividade microbiana no solo pela adição de efluente, que estimula a degradação da matéria orgânica do solo, diminuindo também os teores totais de N (Feigin et al., 2001; Herpin et al., 2007). A diminuição dos teores de C total em solos sob aplicação de efluentes pode ser também devido à manutenção de condições ideais para mineralização da matéria orgânica como umidade, temperatura, nutrientes, pH, suprimento de O_2 (Artiola & Peper, 1997; Barton et al., 2005).

Em relação à dinâmica do N após a aplicação de efluentes, alguns autores observaram que altos teores de C carbono solúvel estimularam comunidades microbianas hetrotróficas na formação de NO_3^- (Nurk et al., 2005; Su et al., 2006). Além disso, essas comunidades microbianas podem utilizar o NO_3^- ou o NO_2^- como acceptor de elétrons, transformando-os em óxido nitroso (N_2O) (Mclain & Martens, 2006). As maiores concentrações de NO_3^- após a irrigação com o efluente e o baixo teor de O_2 também podem estimular a desnitrificação (Schipper et al., 1996). Outro aspecto relevante é a alcalinidade dos efluentes, que pode favorecer a volatilização de amônia e contribuir para

as perdas de N em solos irrigados com efluentes (Fonseca et al., 2007). A concentração de amônio no efluente, o pH do solo e a temperatura são fatores que afetam diretamente o equilíbrio entre NH_4^+ e NH_3 na solução do solo (Smith et al., 1996). Conforme os mesmos autores, as perdas de NH_3 foram maiores no período diurno pelas maiores temperaturas e observaram que pequenas quantidades diárias aplicadas de efluente doméstico tratado reduziram a volatilização de amônia. As formações de N em formas voláteis, descritas anteriormente, são as responsáveis por dobrar (Schipper et al., 1996) ou aumentar 50 vezes a perda de N em solos irrigados com efluentes (Friedel et al., 2000).

De acordo com Fonseca et al. (2007), existem poucos estudos que avaliam as perdas de N em solos brasileiros sob irrigação com efluentes. O amônio é a forma predominante de N em efluentes tratados (Feigin et al., 1991; Nichele, 2009; Fonseca et al., 2007). No entanto diversos autores verificaram que o NO_3^- é a forma mineral de N predominante em solos irrigados com efluentes tratados. Esse efeito deve-se principalmente a três principais fatores: a) rápida transformação do NH_4^+ em NO_3^- em condições aeradas; b) aumento da mineralização e nitrificação do N orgânico do solo e c) incompatibilidade das quantidades de N aportadas ao solo com a demanda das plantas. Por essas razões, é importante o monitoramento dos teores de nitrato em solos sob aplicação de águas residuárias, visto os problemas que esse íon pode causar na saúde humana como metahemoglobinemia ou “síndrome do bebe azul” (Stevenson, 1986) a formação de nitrosaminas e nitrosamidas substâncias potencialmente carcinogênicas (Bouchard et al., 1992) além da eutrofização de mananciais hídricos (Powlson et al., 2008).

O pH do solo é um atributo químico de grande relevância, pois sua variação altera a disponibilidade de nutrientes no solo (Sposito, 2008) e pode ser afetado pela irrigação com efluentes (Fonseca et al., 2007). No entanto, Bouwer & Idelovitch (1987) não verificaram alteração no pH em solos sob irrigação com efluentes domésticos tratados, devido à capacidade tampão do solo. Já outros trabalhos verificaram aumento nos valores de pH e atribuíram esse aumento ao a) alcalinidade e adição de cátions básicos (Falkiner & Smith, 1997), b) aumento da desnitrificação com consumo de H^+ (Friedel et al., 2000); c) adição de resíduos orgânicos acompanhados de descarboxilação e

desaminação como processos que consomem prótons (Yan et al., 1996) e a associação desses fatores com baixa CTC do solo como acontece em boa parte dos solos brasileiros (Fonseca et al., 2005). Porém, o aumento nos valores de pH são baixos e não afetam a disponibilidade de nutrientes (Speir et al., 1999). Em contrapartida, alguns autores verificaram a diminuição do pH do solo sob aplicação de efluentes. A nitrificação do amônio, após aplicação do efluente no solo, pode ser uma importante fonte de acidez do solo (Blum et al., 2011). Em alguns casos, efluentes com altos teores de amônio, ao serem aplicados ao solo, em condições aeradas, promovem intensa nitrificação, com grande liberação de íons H^+ , superiores a alcalinidade e ao poder de neutralização do efluente, podendo aumentar a acidez do solo (Blum et al., 2011). Kiziloglu et al. (2008) também verificaram a diminuição do pH do solo cultivado com brássicas e atribuiu esse efeito, em parte, ao alto teor médio de N no efluente com 1100 mg L^{-1} de N. Além disso, conforme Bouwer & Chaney (1974), a produção de CO_2 e ácidos orgânicos gerados pela degradação dos resíduos orgânicos adicionados ao solo pelo lixiviado também pode contribuir para a acidificação do solo, com aumento dos teores de H+Al.

Os efluentes tratados, em geral, possuem baixos teores de P (Fonseca et al., 2007). No entanto, vários autores verificaram aumento dos teores de P na superfície do solo (Quin & Woods, 1978) e em camadas subsuperficiais (Mohammad & Mazahreh, 2003). Os maiores teores de P no solo foram verificados em experimentos irrigados com efluentes domésticos tratados por mais de cinco anos (Wang et al., 2003). A retirada do P excedente do solo, adicionado pelos efluentes, via exportação pelas plantas é importante para reduzir os teores de P da solução do solo e os seus potenciais perigos de contaminação de corpos d'água (Fonseca et al., 2007). Além desse fato, os solos brasileiros possuem altos teores de óxidos de Fe e Al, que possuem grande capacidade de adsorção específica de grupos fosfatos, reduzindo a mobilidade do P no solo (Meurer, 2008). Por outro lado, (Bond, 1998) verificou maior migração de P em solos arenosos. Já Blum et al. (2011) verificaram aumento de P com o tempo de irrigação e em profundidade em um Latossolo, utilizando um efluente doméstico com teor médio de 8 mg L^{-1} . Poucos estudos avaliam a dinâmica do P sob irrigação com efluentes (Falkiner & Polglase, 1997) e em solos tropicais (Fonseca et al., 2007).

Além do P, a irrigação com águas residuárias tratadas também pode alterar os teores de Ca, Mg e K no solo. Aumentos nos teores de Ca foram verificados em longos períodos de aplicação de efluentes (Speir et al., 1999) e também aumento nos teores de Mg (Falkiner & Smith, 1997). Blum et al. (2012) verificaram o aumento dos teores de Ca em Latossolo do sudeste brasileiro sob irrigação com efluentes. Em solos tropicais, alguns autores verificam que nem todo Ca aplicado via irrigação aumenta seus teores trocáveis, pois o cálcio apresenta grande mobilidade (Blum et al., 2011). Os teores trocáveis de Mg podem aumentar no solo sob aplicação de efluentes, no entanto, o Na⁺ também adicionado pela irrigação, por efeito de massa, pode contribuir para a translocação do Mg²⁺ no complexo de troca e diminuir os teores de Mg (Ribeiro et al., 2009). Para o potássio, Johns & McConchie (1994) não verificaram alterações. Porém, vários autores observaram a contribuição do K das águas residuárias para o aumento do K trocável e em solução de Latossolo do estado de São Paulo (Fonseca et al., 2005; Herpin et al., 2007). Por outro lado, Stewart et al. (1990) e Pereira et al. (2011) verificaram que a aplicação de águas residuárias diminuiu o teor de potássio trocável, e conforme esses autores, os altos teores de Na deslocam o K do complexo de troca. Nessas condições, aplicações complementares de fertilizantes minerais solúveis são recomendadas em solos tropicais de baixa fertilidade natural e baixa CTC sob irrigação com efluentes (Fonseca et al., 2005).

2.5. Salinização dos solos pela aplicação de efluentes e razão de adsorção de sódio (RAS)

Vários trabalhos relacionam o aumento da salinidade do solo ao caráter salino do efluente ou do lixiviado aplicado (Leal et al., 2009; Pedrero et al., 2010). A salinidade é devida ao aumento da concentração dos íons Cl⁻, SO₄²⁻, HCO₃⁻, Na⁺, Ca²⁺, Mg²⁺ e em alguns casos NO₃⁻ e K⁺ (Richards, 1954). Conforme Oron et al. (1999), efluentes com alto teor de sódio podem provocar um impedimento hidráulico no solo, além de reduzir a difusão de oxigênio. A elevada salinidade pode ser grande limitante na utilização de águas residuárias (Pedrero et al., 2010). Conforme Balks et al. (1998), a irrigação com efluentes domésticos e industriais tratados pode promover o aumento da concentração de sódio no solo, caso contenha teores médios e altos de sais. Os teores de sódio

podem variar de 50 a 250 mg L⁻¹, mas em alguns casos podem ultrapassar 500 mg L⁻¹ sendo que a maior parte dos efluentes tratados possui altos teores de Na⁺ (Fonseca et al., 2007). Em regiões de clima tropical úmido, a alta pluviosidade promove a lixiviação de bases no perfil do solo (Ribeiro et al., 2009). Já em condições de evapotranspiração superior à precipitação, como solos do semi-árido brasileiro, ocorre acúmulo de sais (Ribeiro et al., 2009). Os sais adicionados ao solo pela irrigação com águas residuárias promovem alterações iônicas, como dispersão ou floculação de argilas (Bouwer e Chaney, 1974). Também podem afetar a dinâmica e a disponibilidade da água e reduzir o desenvolvimento das plantas (Ayers e Westcot, 1989). Em condições onde as quantidades de entrada de água, efluentes e precipitação são inferiores à evapotranspiração, a salinidade do solo pode se agravar (Bouwer e Chaney, 1974). O Ca²⁺ e o Mg²⁺ são os íons que predominam na solução e na CTC dos solos ácidos (Meurer, 2008). Entretanto, o aumento do Na⁺ em solução pode promover o deslocamento de Ca²⁺ e Mg²⁺ do complexo de troca e posterior precipitação na solução do solo (Richards, 1954).

O sódio possui grande raio iônico hidratado (Meurer, 2008), que diminui a atração entre as partículas ocasionando a dispersão das mesmas (Sposito, 2008). As partículas dispersas ocupam os espaços porosos, promovendo o selamento e conseqüente redução da infiltração de água no perfil do solo (Halliwell et al., 2001), prejudicando o desenvolvimento das plantas (Rengasamy & Olsson, 1991). Já a capacidade de expansão e dispersão de argilominerais está associada à natureza do mineral predominante (Halliwell et al., 2004). Caulinitas apresentam pouca expansão com a presença de sódio; entretanto a presença de baixas quantidades de montmorilonitas e ilitas com teor médio de Na já é suficiente para aumentar a dispersão de argilas (Hillel, 1998).

A avaliação da qualidade das águas de irrigação quanto à salinidade é necessária para verificar a sua adequação ou limitação para a irrigação (Richards, 1954). A qualidade da água utilizada na irrigação tem relação com seus impactos negativos ao solo e aos vegetais e, frequentemente, são necessários diferentes manejos dessas áreas para atenuar o efeito dos sais (Ayers & Westcot, 1989). A razão de adsorção de sódio (RAS) (equação 1) é um indicador de qualidade de águas utilizadas na irrigação quanto ao potencial

salino, que expressa as proporções entre os teores dos íons Ca, Mg e Na; juntamente com os valores de condutividade elétrica (CE), é estabelecido o grau de adequação ou limitação da água (Richards, 1954). Em condições de alto teor de Na e baixos de Ca e Mg, o valor da RAS será alto, diminuindo a qualidade da água de irrigação. Caso ocorra alta proporção de sódio e também alta condutividade elétrica, a água de irrigação é enquadrada na classe C₄S₄ (Figura 1), com maior limitação para utilização no solo. Quatro classes de valores de RAS podem ser feitas para o potencial de salinização do solo. Valores até 10 de RAS apresentam baixo potencial, 10 a 18 risco médio, 18 a 26 risco forte e acima de 26 risco muito forte.

Equação 1.
$$RAS = \frac{Na}{\sqrt{(Ca+Mg)/2}}$$

(teores expressos em mmol_c L⁻¹)

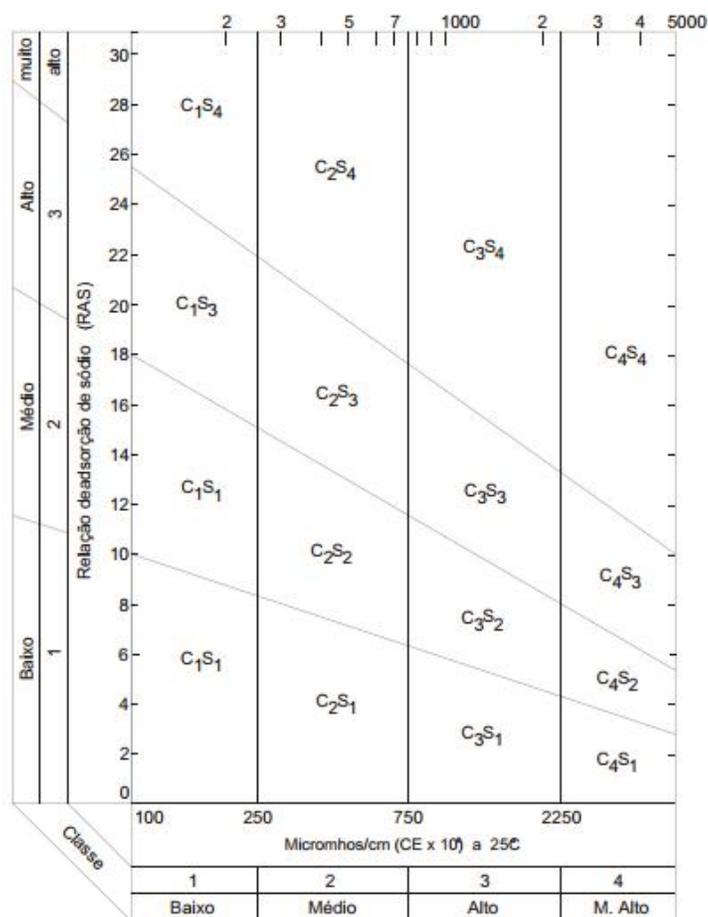


Figura 1. Figura de interpretação da RAS, indicador da qualidade da água para fins de irrigação agrícola. (Richards, 1954; adaptado de Cauduro & Dorfman, 1990).

A RAS é utilizada para avaliar a salinidade de águas. Já para o solo a percentagem de sódio trocável (PST) (Equação 2) é um importante indicador para avaliar-se a salinidade do solo. Esse indicador quantifica o sódio em relação à CTC a pH 7. Valores de PST maiores que 15% podem ser críticos para o desenvolvimento de plantas (Carmona et al., 2011).

Equação 2.

$$\text{PST} = [\text{S} + (\text{H} + \text{Al})]$$

2.6. Efeito de efluentes no desenvolvimento e na nutrição de plantas

Vários trabalhos abordam alterações na composição nutricional e no acúmulo de biomassa em plantas sob irrigação com efluentes (Feigin et al., 1991; Fonseca et al., 2007, Nichele 2009). Entre os principais aspectos verificados, destaca-se o aumento de nutrientes nos tecidos de plantas, principalmente o N, abundante nas águas residuárias assim como o Na (Pedrero et al., 2010).

Em trabalhos utilizando efluente doméstico tratado, observou-se o incremento de produção de matéria seca em milho forrageiro (Adekalu e Okunade, 2002; Mohammad e Ayadi, 2004). Conforme esses autores, o aporte de N e de outros nutrientes reduziu os efeitos negativos do sódio. Outros autores verificaram o incremento na produção de grãos de milho sob a aplicação de efluentes tratados (Vazquez-Montiel et al., 1996; Oron et al., 1999; Nichele, 2009) e o aumento no rendimento para silagem (Overman, 1981). No entanto, Feigin et al. (1991) observaram diminuição na eficiência do uso de nitrogênio, principalmente pelas grandes quantidades de N aportadas e grande parte não absorvida pelos vegetais. Já Fonseca et al. (2005), conduzindo experimento em casa-de-vegetação, não verificaram incremento de produção de matéria seca com efluente doméstico tratado da cidade de Lins-SP. Feigin et al. (1978) verificaram adição de 200 kg de N ha⁻¹ pela irrigação com efluentes e observaram também que essa quantidade supriu boa parte do N demandado pela cultura do algodão. Por outro lado, Feigin et al. (1991) verificaram aumentos nos teores de N no tecido de algodão e que esses altos

teores de N influenciaram negativamente a qualidade das fibras de algodão. Em grãos de oleaginosas, Al-Jaloud et al. (1996) verificaram o aumento nos teores de nutrientes em leguminosas sob irrigação com efluentes. Avaliando trigo sob irrigação com efluente tratado, Hussain et al. (1996) verificaram o aumento no rendimento de grãos, aumento da eficiência do uso de nitrogênio e redução no uso de 1/3 dos fertilizantes nitrogenados sem perda no rendimento de grãos. Em sorgo, Day & Tucker (1977) não verificaram diferenças entre irrigação com água e efluentes. Já Al-Jaloud et al. (1995) verificaram o aumento de N, Ca, Mg na biomassa de sorgo.

A irrigação com efluentes, na maioria dos casos, incrementa grandes teores de Na no solo (Leal et al., 2009; Blum et al., 2012), com aumento de Na no tecido das plantas (Herpin et al., 2007) e afeta o desenvolvimento de plantas (Fonseca et al., 2007). O crescimento lento e o atrofiamento são características de plantas afetadas por sais. Conforme Bressan et al. (1990), as plantas reduzem seu potencial osmótico em solos com alto teor de sais. A diminuição no potencial hídrico inibe o crescimento dessas plantas e as folhas são menos desenvolvidas apresentando maior espessura. A alteração osmótica da solução do solo e a toxidez iônica são os principais efeitos negativos da alta concentração de sais (Bernstein, 1975).

Em condições de altos teores de Na e baixos teores de Ca e Mg, ocorrem grandes desbalanços nutricionais (Taiz e Zeiger, 2004). As plantas ajustam-se, em dois ou três dias, e reduzem o seu potencial osmótico para dar continuidade ao fluxo de água em condições de baixo potencial osmótico da solução do solo (Bernstein, 1975). Altas concentrações de Na e Cl acumuladas no cloroplasto podem inibir a fotossíntese (Taiz e Zeiger, 2004). Como mecanismo de defesa, as plantas tolerantes a sais acumulam o Na em vacúolos. Outro grande mecanismo de resistência das plantas é a produção de solutos orgânicos, como betaína, sorbitol, prolina, manitol, sacarose e outros, que promovem a redução do potencial osmótico das células e assim possibilitam a absorção de água da solução do solo. Para produção desses solutos há um gasto de 10% do carbono da matéria seca da planta (Taiz e Zeiger, 2004).

2.7. Solos alagados

O cultivo de arroz irrigado tem grande importância no Rio Grande do Sul, onde são cultivados anualmente cerca de 1 milhão de ha (SOSBAI, 2012). Esse sistema de produção de grãos demanda em torno de $10.000\text{m}^3\text{ ha}^{-1}$ de água para irrigar durante todo o ciclo de cultivo. O suprimento hídrico adequado das lavouras é um problema frequente no planejamento das lavouras. Porém, a utilização de águas residuárias poderia reverter esse cenário, especialmente em zonas próximas a centros urbanos e industriais (Pedrero et al., 2010; Blum et al., 2012). Com essa prática, poderia-se reduzir a utilização de fontes de água potável e manter os níveis mínimos dos corpos hídricos para manutenção de suas funções ecológicas, além de reaproveitar a carga orgânica e de nutrientes das águas residuárias no solo além do tratamento final dos efluentes feito pelo sistema solo-planta (Fonseca et al., 2007; Pedrero et al., 2010).

Com o alagamento, ocorrem alterações de ordem biológica e química no solo (Ponnamperuma, 1972). O oxigênio é rapidamente consumido e passam a predominar microorganismos anaeróbios e facultativos (Camargo et al., 1999). Na ausência do oxigênio, os compostos oxidados passam a ser utilizados como aceptores de elétrons, sendo reduzidos nessa sequência preferencial NO_3^- , Mn^{3+} , Fe^{3+} , SO_4^{2-} e compostos orgânicos (Ponnamperuma, 1972; Camargo et al., 1999). As reações de redução provocam inúmeras alterações na solução do solo, como o aumento de Fe^{2+} , Mn^{2+} , e do pH e aumento indireto dos teores de P, Ca e Mg, assim como outras alterações. Além disso, o carbono orgânico dissolvido pode alterar a velocidade das reações redox (Camargo et al., 1999). Nesse sentido, a adição de águas residuárias ricas em N-NH_4^+ , carbono orgânico dissolvido e outros compostos, assim como sais, pode alterar as condições químicas da solução do solo e o desenvolvimento de plantas de arroz.

Existem poucos trabalhos que abordam a utilização de águas residuárias em solos alagados. Yoon & Kwun (2001) verificaram teores de 160 mg L^{-1} de N total na lâmina de irrigação do solo irrigado com efluente doméstico tratado. Segundo esses autores, esse efluente é adequado para a irrigação de arroz, no entanto é necessário o monitoramento de nutrientes na lâmina de irrigação e na solução do solo.

3. CAPÍTULO II - ATRIBUTOS DE SOLO, PERCOLADO E DE PLANTAS DE MILHO SOB IRRIGAÇÃO COM LIXIVIADO INDUSTRIAL TRATADO

3.1. Resumo

A utilização de efluentes tratados na irrigação de culturas pode aumentar os teores de nutrientes em solos degradados e o rendimento de culturas. No entanto, a salinidade do material pode alterar os atributos do solo e o desenvolvimento vegetal. Para testar esta hipótese, o presente trabalho teve por objetivo avaliar a dinâmica dos atributos químicos do percolado, e do solo e o desenvolvimento e a nutrição de plantas de milho irrigado com lixiviado industrial tratado, contendo 495 mg L^{-1} de Na. O experimento foi conduzido em casa-de-vegetação, utilizando-se como unidades experimentais colunas de PVC preenchidas com 11 kg de solo, em delineamento experimental em blocos casualizados, com três repetições. Os tratamentos constituíram-se de 8 tratamentos irrigados com água e com curvas de resposta a N e P; e outros 8 tratamentos com 4 proporções de lixiviado na irrigação (25%, 50%, 75% e 100%). As análises do percolado foram feitas aos 23, 47 e 60 dias após a emergência das plântulas. O tecido de milho e o solo foram analisados após o corte das plantas. A produção de biomassa de milho não foi alterada pela irrigação com o lixiviado. Os teores de N, P, K, S, Mn, Na, Cu e Zn aumentaram no tecido do milho sob irrigação com o lixiviado. A adição de lixiviado aumentou os teores de K, Ca, Mg, Na, S e NO_3^- e os valores de CE, RAS e DBO_5 no percolado e aumentou também os teores de P e Na e os valores de CE no solo, sem afetar os teores de argila dispersa em água. O lixiviado industrial tratado é uma alternativa de irrigação e fonte de nutrientes para solos

degradados. Porém, a calagem, a aplicação de gesso e as percolações de Na são importantes para evitar a sodicidade.

Palavras-chave: efluentes tratados, *Zea mays*, sódio, nutrientes

3.2. Introdução

A agricultura é a atividade que demanda a maior quantidade de água utilizada pelo homem, utilizando cerca de 70% do consumo total (Christofidis, 2001). Além do aporte hídrico, a aplicação de águas residuárias ao solo pode proporcionar menores custos de fertilização, pois o solo tem capacidade de adsorver alguns elementos nutricionais e eventuais contaminantes, reduzindo a necessidade de maior purificação desses efluentes e consequentemente os custos em tratamentos (Haruvy, 1997).

Em algumas regiões, há motivos mais relevantes para a utilização de águas residuárias no solo, como a grande concentração de complexos industriais e residenciais no entorno de mananciais hídricos de médio e pequeno porte, que estão com sua carga de lançamentos de efluentes excedida. Ou ainda, em áreas que estejam distantes de arroios e rios para o lançamento de efluentes tratados. Assim, a disposição no solo torna-se uma alternativa mais interessante tanto em aspectos agronômicos e/ou econômicos quanto ambientais (Fonseca et al., 2007).

A utilização do solo para disposição final de efluentes líquidos industriais é uma prática adotada em algumas situações. No estado do Rio Grande do Sul, esta forma de descarte de efluentes foi inicialmente implantada em grande escala no III° Pólo Petroquímico, localizado no município de Triunfo, em 1983, sendo utilizada até os dias atuais; conforme relatório técnico recente (Tedesco et al., 2004). O sistema encontra-se estabilizado e em operação, ocupando uma área de aproximadamente 150 ha.

Inúmeros trabalhos relacionam o aumento da salinidade do solo ao efeito salino do efluente aplicado (Leal et al., 2009). A salinidade é ocasionada pelo aumento na concentração dos íons Na^+ , Cl^- e HCO_3^- na solução do solo. Conforme Oron et al. (1999), efluentes com alto teor de sódio podem provocar um impedimento hidráulico no solo, além de reduzir a difusão de oxigênio. A relação entre o teor de sódio dos efluentes tratados e os íons divalentes (Ca e

Mg) é expressa pela Razão de Adsorção de Sódio (RAS), utilizada para avaliar a qualidade da água de irrigação (Richards, 1954; Bissani et al., 2008).

A aplicação de efluentes tratados promove o incremento de nutrientes no solo e o aumento do rendimento das culturas agrícolas (Fonseca et al., 2007; Nichele, 2009; Pedrero et al., 2010). Por outro lado, a irrigação com efluentes tratados pode aumentar os níveis de sodicidade e comprometer os atributos físicos (Halliwell et al., 2001) e os atributos químicos do solo (Leal et al., 2009; Blum et al., 2012), com diminuição no rendimento das culturas (Leal et al., 2009). Poucos trabalhos avaliam a dinâmica dos atributos químicos de solos tropicais sob a aplicação de efluentes com altos teores de sódio (Fonseca et al., 2007) e em solos degradados que somam cerca de 200 milhões de ha no Brasil, consequência de atividades como mineração e atividades agropecuárias inadequadas (Alves et al., 2012).

Assim, o objetivo desse trabalho foi avaliar os atributos químicos do percolado e do solo e teores de argila dispersa em água; assim como aspectos nutricionais e desenvolvimento de plantas de milho cultivadas em solo degradado irrigado com lixiviado industrial tratado.

3.3. Material e métodos

Foi conduzido um experimento em ambiente protegido (casa-de-vegetação) nas dependências do Departamento de Solos da Faculdade de Agronomia (UFRGS), utilizando como unidades experimentais vasos cilíndricos com volume de 10 litros e diâmetro de 20 cm. Foi utilizado o material degradado (solo subjacente à camada superficial retirada) coletado na área da UTRESA (central de resíduos industriais de Estância Velha-RS). O solo original da área teve os horizontes superficiais retirados pela exploração da argila. Consequentemente, os horizontes subsuperficiais remanescentes BC e C de baixa fertilidade e alta acidez foram enquadrados como solo degradado. A caracterização do mesmo é dada na Tabela 1. Pode-se observar que é um material ácido (pH=5,0), com teores médios de Al e de acidez potencial. É também um solo arenoso sem matéria orgânica. O teor de fósforo é muito baixo e o de potássio é médio.

Tabela 1. Caracterização do solo degradado antes da instalação do experimento

Determinação	Valor	Interpretação
Argila (%)	18,5	Classe 4
Matéria orgânica (%)	0,1	Muito baixo
pH em H ₂ O (1:1)	5,0	Muito baixo
Acidez potencial (cmol _c dm ⁻³)	9,8	Muito alto
Índice SMP	5,3	Baixo
Cálcio trocável (cmol _c dm ⁻³)	3,1	Médio
Magnésio trocável (cmol _c dm ⁻³)	3,0	Alto
CTC _{pH 7,0} (cmol _c dm ⁻³)	16,1	Médio
Saturação por bases (%)	39,0	Muito baixo
Alumínio trocável (cmol _c dm ⁻³)	2,5	Alto
Saturação por alumínio (%)	28,5	Alto
Potássio disponível (mg dm ⁻³)	63,0	Médio/alto
Fósforo disponível (mg dm ⁻³)	5,7	Médio

¹⁾Amostra coletada em 06/05/11.

²⁾Determinações e interpretações conforme metodologias adotadas pela CQFS-RS/SC (2004). Laboratório de Análises de Solo (Faculdade de Agronomia, UFRGS). Laudo 344/27-28.

A irrigação das plantas foi feita com água destilada e/ou com lixiviado industrial tratado (LIT) obtido na UTRESA. Os volumes de lixiviado aplicado (já consideradas as proporções) durante o ciclo foram de 4,2; 8,4; 12,6 e 16,8L vaso⁻¹ para o T0, T25, T50 e T100, respectivamente. O lixiviado é uma água residuária originada da decomposição dos resíduos sólidos, especialmente aparas de couro, contidos em células de aterro. Após geração os lixiviados são bombeados para a estação de tratamento de efluentes (ETE) onde recebem tratamentos primário e secundário. Na etapa subsequente, são contidos em lagoa de estabilização antes do lançamento nos corpos d'água, de onde foram coletados para aplicação nos experimentos. As principais características do lixiviado são dadas na Tabela 2. Pode-se observar que o mesmo apresenta pH levemente alcalino (7,9) e altos teores de amônio, sódio e cloretos. A condutividade elétrica também é alta (4,44 mS cm⁻¹). A classificação desse lixiviado para utilização na irrigação indica um material com alta salinidade e teor médio de RAS.

Tabela 2. Características, padrões de lançamento em corpos hídricos e especiação iônica do lixiviado industrial tratado

Parâmetro/unidade ¹⁾	Valor	Limite de detecção	Padrão de Lançamento ³⁾	Distribuição de espécies iônicas ⁴⁾
pH	7,9	-	6,0 - 9,0	-
COD ⁵⁾	60	0,10	-	COD (72,1%); Ca-COD (22,9%)
NH ₄ ⁺ (mg L ⁻¹)	182	0,10	-	NH ₄ ⁺ (96,1%); NH _{3(aq)} (3,6%)
NTK (mg L ⁻¹)	217	0,10	20	-
Ca (mg L ⁻¹)	30	0,10	-	Ca ²⁺ (80,9%); Ca-COD (13,2%)
Mg (mg L ⁻¹)	35	0,04	-	Mg ²⁺ (90,5%); MgCl ⁺ (5,6%)
K (mg L ⁻¹)	74	0,07	-	K ⁺ (98,7%); KCl _(aq) (1,1%)
P (mg L ⁻¹)	1,5	0,10	2,9	HPO ₄ ²⁻ (65,1%); H ₂ PO ₄ ⁻ (7,6%)
Na total (mg L ⁻¹)	495	0,20	-	Na ⁺ (98,8%); NaCl _(aq) (1,1%)
S (mg L ⁻¹)	20	0,10	-	SO ₄ ²⁻ (82,9%); NaSO ₄ ⁻ (4,8%)
Cloretos	1125	0,25	-	Cl ⁻ (98,9%); NaCl _(aq) (0,7%)
Cond.elét. (µs cm ⁻¹)	4440	-	-	-
DQO (mg L ⁻¹)	280	4,00	330	-
DBO ₅ (mg L ⁻¹)	100	0,20	110	-
Zinco (mg L ⁻¹)	0,008	0,001	2	Zn ²⁺ (52,9%); Zn-COD (34,3%)
Cobre (mg L ⁻¹)	0,002	0,001	0,4	Cu-COD (59,5%); Cu ²⁺ (14,3%)
Chumbo (mg L ⁻¹)	< 0,01	0,001	0,16	-
Níquel (mg L ⁻¹)	0,02	0,001	0,7	Ni ²⁺ (60,2%); Ni-COD (24,7%)
Cromo Total (mg L ⁻¹)	0,365	0,004	0,4	Cr(OH) _{3(aq)} (96,6%); Cr(OH) ₂ ⁺ (3,3%)
Cromo 6 ⁺ (mg L ⁻¹)	n.d.	0,003	0,08	-
RAS ²⁾ (mmol _c L ⁻¹)	14,5	-	-	-

¹⁾ Ensaio reconhecido pela Rede Metrológica/RS, conforme NBR ISSO/IEC 17025:2005.

²⁾ RAS: Classificação para uso agrícola (C₄S₂) conforme Richards (1954).

³⁾ Resolução CONSEMA 128 para arroio Cascalho, Utresa, Estância velha (Consema, 2006).

⁴⁾ Estimado pelo modelo Visual Minteq 3.0 (Anexo).

⁵⁾ COD: carbono orgânico dissolvido.

Os tratamentos utilizados, com três repetições, são apresentados na Tabela 3. Foi aplicado corretivo de acidez (calcário, na dose de 5,4 t ha⁻¹) gesso agrícola (na dose de 2,4 t ha⁻¹) e micronutrientes (Cu, Zn, B e Mo) em todos os tratamentos, (inclusive na testemunha). O tratamento n° 1 constitui a testemunha, sem adição de adubo mineral ou orgânico. Nos tratamentos 2 a 5 foi estudada a resposta das plantas à adubação nitrogenada (ureia, com 45 % de N, em solução), aplicada em três frações iguais, aos 5, 26 e 51 dias após a emergência das plântulas (16 de outubro/11), a segunda e terceira aplicações foram feitas após a primeira e a segunda coletas de percolado, respectivamente. As quantidades de N adicionadas via lixiviado até as datas de aplicação de ureia foram descontadas das quantidades de ureia aplicadas. Nos tratamentos 5 a 8 foi estudada a resposta das plantas à adubação fosfatada (superfosfato triplo, com 45% de P₂O₅) aplicado antes da semeadura do milho (*Zea mays*). Em alguns tratamentos foi também aplicado adubo potássico (cloreto de potássio, com 60% de K₂O), antes do início do cultivo. Como fonte de micronutrientes foi aplicado 28,7 kg ha⁻¹ da mistura contendo ácido bórico

(53%), sulfato de zinco (16%), sulfato de cobre (26%) e molibdato de amônio (5%).

Tabela 3. Tratamentos, tipos e doses de insumos e líquidos utilizados para irrigação

Nº	Tratamento	Fertilizantes solúveis ²⁾			Calcário ³⁾	S ⁴⁾	M ⁵⁾	Irrigação ⁶⁾	
		N	P ₂ O ₅	K ₂ O				Ad ¹⁾	Lx ¹⁾
		-----Doses-----							
1	Test. (1)	-	-	-	+ ⁸⁾	+	+	1	0
2	N ₀ P ₃ K	0	3	1	+	+	+	1	0
3	N ₁ P ₃ K	1	3	1	+	+	+	1	0
4	N ₂ P ₃ K	2	3	1	+	+	+	1	0
5	N ₃ P ₃ K	3	3	1	+	+	+	1	0
6	N ₃ P ₀ K	3	0	1	+	+	+	1	0
7	N ₃ P ₁ K	3	1	1	+	+	+	1	0
8	N ₃ P ₂ K	3	2	1	+	+	+	1	0
9	Test. (2) 1Lx	-	-	-	+	+	+	0	1
10	N ₃ P ₃ K 3Ad:1Lx	3	3	1	+	+	+	3	1
11	N ₃ P ₃ K 1Ad:1Lx	3	3	1	+	+	+	1	1
12	N ₃ P ₃ K 1Ad:3Lx	3	3	1	+	+	+	1	3
13	N ₃ P ₃ K 1Lx	3	3	1	+	+	+	0	1
14	OM ¹⁾ 1Ad:1Lx	-	-	-	+	+	+	1	1
15	O ¹⁾ 1Ad:1Lx	-	-	-	+	+	+	1	1
16	N ₃ P ₃ K 1Lx	3	3	1	+	+	+	0	1(Lx) ⁷⁾

1) Ad = água destilada; Lx = lixiviado; O. = adubo orgânico; O.M. = adubo organo-mineral.

2) N₁ = 70; N₂ = 140; N₃ = 200 kg de N ha⁻¹ (uréia);
P₁ = 50; P₂ = 100; P₃ = 200 kg de P₂O₅ ha⁻¹ (superfosfato triplo);
K = 160 kg de K₂O ha⁻¹ (cloreto de potássio).

3) CaCO₃ (3:1 em peso), (produto grau técnico), PRNT 100% (5,4 t ha⁻¹); Base de cálculo: 1 ha = 2x10⁶ L.

4) Gesso agrícola; 2,4 t ha⁻¹.

5) Mistura contendo Cu, Zn, B e Mo (descrição no texto).

6) Proporção entre a água destilada e o lixiviado (UTRESA) utilizada para irrigação das plantas.

7) Utilizado o lixiviado (UTRESA) para percolação; já nos tratamentos 1 a 15 foi utilizada água destilada para esta finalidade.

8) Sinal + indica a adição do insumo.

No tratamento n° 14 foi aplicado adubo organo-mineral, contendo 3% de N, 15% de P₂O₅ e 3% de K₂O, na quantidade de 1000 kg ha⁻¹ (base seca). No tratamento n° 15 foi aplicado adubo orgânico (cama de aviário), na quantidade de 10000 kg ha⁻¹ (base seca). O tratamento n° 9 constituiu outra testemunha (sem adubo solúvel), irrigado somente com lixiviado. Os adubos (minerais, orgânicos e organo-mineral) e os outros insumos (corretivo, gesso agrícola e micronutrientes) foram misturados ao solo do vaso, sendo a seguir semeadas seis sementes de milho e posteriormente iniciada a irrigação com água destilada, até a emergência das plantas. Após seis dias da semeadura (10/10/11) foi observada a emergência das plântulas, mantendo-se três plantas por vaso.

As plantas dos tratamentos 1 a 8 foram irrigadas com água destilada durante todo o período do experimento. A irrigação com as proporções de lixiviado e água nos tratamentos (9 a 16) (Tabela 3) iniciou quando as plantas estavam em estágio vegetativo V2-V3 e foi até 60 dias após a emergência de plântulas de milho. A irrigação sempre manteve a umidade próxima a capacidade de campo. A 23, 47 e 60 dias após emergência das plântulas, que ocorreu em 16/10/2011, foi feita a percolação. Adicionou-se água destilada 2L vaso⁻¹ (63,7mm) com solo na capacidade de campo, até a saturação do solo, com posterior coleta do percolado em um dreno na parte inferior do vaso, conforme ilustrado na Figura 2.

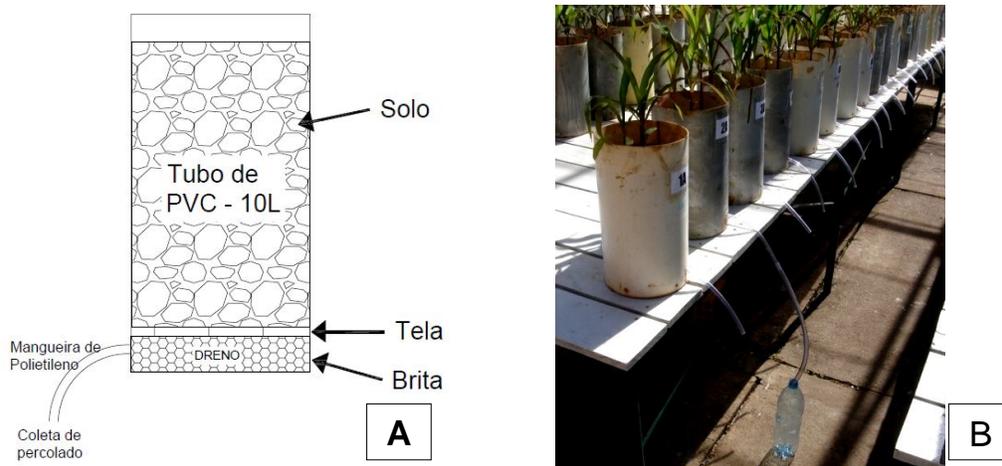


Figura 2. Unidade experimental de PVC com sistema de drenagem para coleta do percolado (A) e foto do experimento em coleta de percolado (B).

Após a última coleta de percolado (a 60 dias após a emergência das plântulas), a parte aérea do milho foi cortada, sendo seca, quantificada, e moída para análise. Foram também coletadas amostras de solo na profundidade de 0-20 cm. As amostras de plantas, percolados e solo foram analisadas conforme metodologia descrita por Tedesco et al. (1995), no Laboratório de Análises do Departamento de Solos (UFRGS). As amostras de tecidos foram secas, pesadas e digeridas com ácidos nítrico e perclórico. As amostras de solo foram secas, tamisadas em malha de 2 mm e para análise de P e K foi utilizado o extrator Mehlich-1 e para Ca, Mg e Na foi utilizado foi utilizado o extrator KCL 1 mol L⁻¹. Os elementos químicos foram determinados por espectrometria de emissão ótica com plasma induzido (ICP). Amônio e nitrato foram determinados por destilação (micro Kjeldahl). A análise de argila

dispersa em água seguiu a metodologia do hidrômetro (EMBRAPA, 1997). Os valores de DBO_5 foram determinados pelo método respirométrico 5210D (APHA, 2010).

Todos os dados foram estudados pela análise da variância a 5% de probabilidade e as médias dos tratamentos, quando significativas, foram avaliadas pelo teste de Scott Knott ($p < 0,05$).

3.4. Resultados e discussão

3.4.1. Rendimento de matéria seca e nutrição do milho

Na Figura 3 estão ilustradas as curvas de reposta da cultura do milho às adições de adubos minerais (N e P) e na Figura 4, todos os tratamentos, incluídos os irrigados com LIT. Verificou-se similaridade de produção de matéria seca entre os tratamentos irrigados com lixiviado e os irrigados com água. Esse fato é observado na comparação dos tratamentos 11,12 e 16, que tiveram produção de biomassa vegetal semelhante aos tratamentos 4 e 5 irrigados com água. Pode-se verificar na Figura 4 que, devido à utilização de um solo degradado e de baixa fertilidade, a aplicação dos fertilizantes mostrou grande aumento na produção de matéria seca da cultura. Observou-se também que a melhor resposta de produção de biomassa vegetal foi no tratamento 15, com adubação orgânica e 50% de lixiviado na irrigação. Em solo degradado, a adição de resíduos orgânicos, como a cama de aviário, é desejável, pois contribui para o aumento da CTC e da disponibilidade de nutrientes, estimula a atividade biológica e aumenta a retenção de água (Valadão et al., 2011). A grande quantidade de sódio adicionada pela irrigação com o lixiviado não afetou a produção de biomassa de milho (Figura 4). Já em trabalhos utilizando efluente doméstico tratado foi observado o incremento de produção de matéria seca em milho forrageiro (Adekalu e Okunade, 2002; Mohammad e Ayadi, 2004). Conforme esses autores, o aporte de N e de outros nutrientes reduziram os efeitos negativos do sódio.

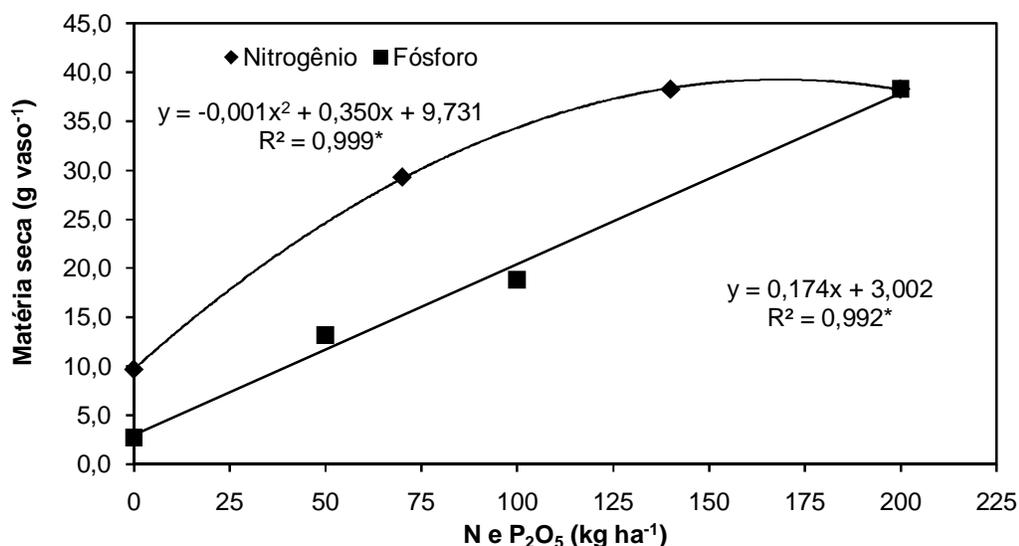


Figura 3. Curvas de resposta do milho às adições de adubos nitrogenado e fosfatado.* Tukey ($p < 0,05$).

Outros autores verificaram o incremento na produção de grãos de milho sob a aplicação de efluentes tratados (Vazquez-Montiel et al., 1996; Oron et al., 1999) e o aumento no rendimento para silagem (Overman, 1981). No entanto, Feigin et al. (1991) observaram diminuição na eficiência do uso de nitrogênio, principalmente pelas grandes quantidades de N aportadas e grande parte não absorvida pelas plantas, ocorrendo grandes perdas de N. Já Fonseca et al. (2005), conduzindo experimento em casa-de-vegetação não verificaram incremento de produção de matéria seca com efluente doméstico tratado da cidade de Lins-SP.

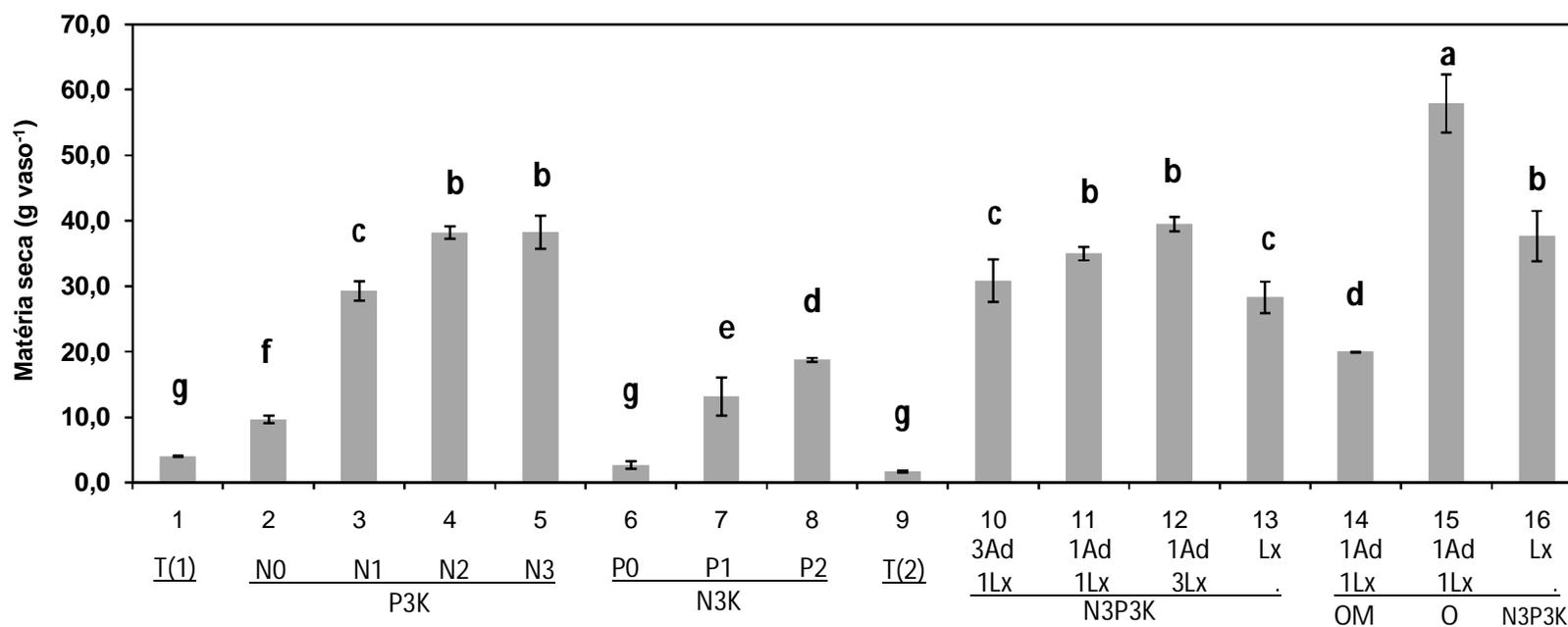


Figura 4. Rendimento de matéria seca da parte aérea de plantas de milho (médias de três repetições); letras diferentes indicam diferença significativa entre tratamentos. Tratamentos do 1 ao 9 indicam curvas de resposta ao N e P e do 9 ao 16 indicam tratamentos com diferentes proporções de lixiviado na irrigação (Scott Knott, $p < 0,05$).

O lixiviado industrial tratado aumentou os teores foliares de N, P, K, S, Mn e Na. Por outro lado não teve efeito nos teores de Ca, Mg e Fe (Tabela 4).

Os teores de N na biomassa da parte aérea do milho aumentaram devido à irrigação com lixiviado. Esses maiores teores estão associados às grandes quantidades de N-NH_4^+ adicionadas pelo lixiviado e a substituição parcial da adubação com ureia pelo N adicionado pelo lixiviado foi eficiente. Vários outros autores também observaram o aumento dos teores foliares de N em gramíneas anuais sob irrigação com efluente tratado (Al-Jaloud et al., 1995; Fonseca et al., 2005). O fósforo também apresentou aumento significativo sob aplicação do lixiviado. Embora esteja em baixas concentrações no lixiviado, possivelmente a sua constante aplicação e em formas prontamente disponíveis para as plantas (Sposito, 2008), como os verificados na especificação iônica do lixiviado (HPO_4^{2-} 65,1% e H_2PO_4^- , 7,6%) (Tabela 2), pode ter contribuído para o aumento dos teores de P no tecido de milho.

A irrigação com lixiviado também aumentou os teores de K em relação às médias dos tratamentos irrigados com água. Já os teores foliares de Ca e Mg, assim como o Fe e o Mn, não apresentaram efeito da irrigação com lixiviado. Os teores de enxofre no tecido de milho tiveram aumento nos tratamentos irrigados com lixiviado.

Vazquez-Montiel et al. (1996) verificaram maiores taxas de absorção de N e P em milho sob irrigação com águas residuárias tratadas, mesmo com fertilização mineral na semeadura como o presente estudo. Já Al-Jaloud et al. (1995) verificaram aumento nos teores de N, P, K, Mg, Na, Mn, Zn, Cu e Mo nas folhas de milho irrigado com efluente tratado. Fonseca et al (2005) avaliando o efeito da irrigação com efluente doméstico tratado em milho verificaram o aumento dos teores foliares de N e P.

Os teores de Na, por sua vez, tiveram grande relação com a aplicação de lixiviado. No tratamento 16, os teores foram altos, mais de 20 vezes superiores à concentração dos tratamentos irrigados com água. Esse fato deve-se essencialmente à irrigação ser feita com 100% de lixiviado e a percolação também ser feita com a própria água residuária, o que inibe uma maior redução dos teores de sais no solo e nas plantas.

Tabela 4. Teores de N, P, K, Ca, Mg, S, Fe, Mn e Na no tecido da parte aérea de plantas de milho

Tratamento	g kg ⁻¹						mg kg ⁻¹		
	N	P	K	Ca	Mg	S	Fe	Mn	Na
1-Test (1)	10,8 d*	0,7 d*	8 c*	8 b*	9 a*	2,3 b*	267,5 b*	83,7 c*	67 e*
2-N ₀ P ₃ K	2,0 e	1,2 c	23 a	4 d	3 e	0,6 d	106,1 b	86,3 c	23 e
3-N ₁ P ₃ K	4,5 e	1,0 c	18 a	3 d	3 e	0,6 d	66,0 b	38,2 d	15 e
4-N ₂ P ₃ K	6,3 e	1,0 c	13 b	4 d	4 d	0,8 d	71,3 b	41,7 d	7 e
5-N ₃ P ₃ K	8,8 d	1,1 c	15 b	4 d	4 d	1,0 d	68,1 b	41,5 d	12 e
6-N ₃ P ₀ K	26,9 a	0,7 d	23 a	9 b	7 b	2,9 a	585,6 a	111,5 b	73 e
7-N ₃ P ₁ K	17,5 c	1,2 c	27 a	5 c	5 c	1,6 c	135,8 b	67,8 c	35 e
8-N ₃ P ₂ K	17,3 c	1,1 c	22 a	5 c	5 c	1,4 c	101,4 b	57,3 d	14 e
9-Test (2) 1Lx	22,1 b	0,7 d	15 b	11 a	9 a	2,9 a	800,4 a	154,9 a	3866 a
10-N ₃ P ₃ K 3Ad:1Lx	13,0 c	1,4 b	21 a	4 c	6 c	1,2 c	113,8 b	74,8 c	173 d
11-N ₃ P ₃ K 1Ad:1Lx	14,8 c	1,6 b	21 a	4 d	5 c	1,2 c	101,8 b	83,6 c	232 d
12-N ₃ P ₃ K 1Ad:3Lx	13,2 c	1,5 b	22 a	3 d	5 c	1,3 c	117,5 b	83,4 c	1082 c
13-N ₃ P ₃ K 1Lx	18,2 c	2,0 a	22 a	5 c	6 c	1,7 c	103,5 b	118,9 b	1633 c
14-O M 1Ad:1Lx	7,7 d	1,6 b	12 b	5 c	6 c	1,3 c	179,3 b	85,6 c	302 d
15-O 1Ad:1Lx	5,6 e	1,3 b	23 a	2 d	4 d	0,8 d	79,4 b	77,3 c	637 d
16-N ₃ P ₃ K 1Lx (c/lx.)	16,6 c	1,8 a	26 a	4 d	5 c	1,5 c	110,7 b	113,1 b	2933 b
CV (%)	22	16	16	14	11	19	77	18	55
Média (T0) ²	8,8b	1,0 b	19,0 b	4,2	4,2	1,1 b	88,5	49,3 b	16,6 c
Média (T50)	10,3 b	1,5 a	19,2 b	3,5	4,2	1,1b	118,6	80,3 a	336,0 b
Média (T100)	16,0 a	1,8 a	23,3 a	3,7	5,3	1,5 a	110,6	105,4 a	1882,7 a

¹ Médias seguidas por letras minúsculas iguais nas colunas não diferem entre si. * Scott Knott, p<0,05.

² Para o cálculo das médias considerou-se: T0, média dos tratamentos irrigados com água (3, 4, 5, 7 e 8); T50, tratamentos irrigados com 25% e 50% de LIT (10, 11, 14 e 15) e T100, tratamentos com 75 e 100% de LIT (12,13 e 16). Os tratamentos 1, 2, 6 e 9 foram descartados das médias devido a baixa produção de matéria seca. A concentração nutricional desses tratamentos, possivelmente iria superestimar alguns teores. Para dos teores médios de N foi considerado apenas o tratamento 5; para os teores médios de P os tratamentos 7 e 8 foram descartados.

Os altos teores foliares de sódio são frequentes em culturas sob irrigação com efluentes tratados (Fonseca et al., 2007; Herpin et al., 2007). No entanto, a elevada sodicidade e os altos percentuais de sódio no solo podem provocar disfunções nutricionais e diminuir a absorção de nutrientes em plantas, como o Ca e, principalmente o K que compete pelos mesmos sítios de absorção que o Na (Obata et al., 2007).

Tabela 5. Teores de Cu, Zn, Cd, Cr, Ni, e Pb no tecido da parte aérea de plantas de milho, após o corte das plantas

Tratamento	Cu	Zn	Cd	Cr	Ni	Pb
	-----mg kg ⁻¹ -----					
1-Test	6,3 b*	50,1 b*	<0,2	2,5 b*	1,3 b*	1,5
2-N ₀ P ₃ K	3,8 b	19,6 d	<0,2	1,4 b	0,8 c	<2
3-N ₁ P ₃ K	4,1 b	18,2 d	<0,2	0,7 b	0,3 c	<2
4-N ₂ P ₃ K	6,6 b	25,0 d	<0,2	0,7 b	0,3 c	<2
5-N ₃ P ₃ K	4,9 b	21,6 d	<0,2	0,7 b	0,3 c	<2
6-N ₃ P ₀ K	7,3 a	54,0 b	<0,2	5,7 a	2,5 a	2,4
7-N ₃ P ₁ K	7,9 a	51,1 b	<0,2	1,0 b	0,4 c	<2
8-N ₃ P ₂ K	5,9 b	37,5 c	<0,2	0,5 b	0,2 c	<2
9-N ₃ P ₃ K 1Lx	7,8 a	70,1 a	<0,2	5,2 a	1,4 b	3,9
10-N ₃ P ₃ K 3Ad:1Lx	6,8 b	38,7 c	0,3	1,0 b	0,4 c	<2
11-N ₃ P ₃ K 1Ad:1Lx	6,6 b	36,0 c	<0,2	1,0 b	0,4 c	<2
12-N ₃ P ₃ K 1Ad:3Lx	7,8 a	43,0 b	<0,2	1,5 b	0,8 c	<2
13-N ₃ P ₃ K 1Lx	9,9 a	49,2 b	1,5	1,2 b	0,5 c	10,3
14-O M 1Ad:1Lx	9,4 a	53,6 b	<0,2	0,7 b	0,3 c	9,6
15-O 1Ad:1Lx	5,9 b	22,9 d	<0,2	1,7 b	0,9 c	<2
16-N ₃ P ₃ K 1Lx (P/lx.)	8,9 a	50,1 b	<0,2	1,3 b	0,6 c	<2
CV (%)	26,1	20,2	-	94,5	87,5	-
Média (T0) ²	5,9 b	30,7 c	-	0,7	0,3	-
Média (T50)	7,2 b	37,8 b	-	1,1	0,5	-
Média (T100)	8,9 a	47,4 a	-	1,3	0,6	-

¹Valores seguidos pela mesma letra, na coluna, não diferem estatisticamente pelo teste de Scott Knott, p<0,05.

² Para o cálculo das médias considerou-se: T0, média dos tratamentos irrigados com água (3, 4, 5, 7 e 8); T50, tratamentos irrigados com 25% e 50% de LIT (10, 11, 14 e 15) e T100, tratamentos com 75 e 100% de LIT (12,13 e 16). Os tratamentos 1, 2, 6 e 9 foram descartados das médias devido a baixa produção de matéria seca desses tratamentos. A concentração nutricional desses tratamentos, possivelmente iria superestimar alguns teores.

3.4.2. Composição do percolado

Os valores de pH não apresentaram efeito da irrigação com o lixiviado industrial tratado. Por outro lado, os valores de condutividade elétrica e os teores de potássio aumentaram sob irrigação com lixiviado (Tabela 6).

Os valores de pH foram todos próximos aos valores da neutralidade, efeito da aplicação do calcário na implantação do experimento. Vários autores verificaram o aumento dos valores de pH do solo e atribuem em grande parte à alcalinidade e à quantidade de cátions básicos dos efluentes além das maiores taxas de a desnitrificação que ocorre no solo (Falkiner & Smith, 1997; Fonseca et al., 2005). Já outros autores corroboram os dados verificados, indicando que a grande capacidade tampão do solo inibe alterações no pH (Bouwer & Idelovitch, 1987). Contrariamente, outros autores observaram redução no pH do solo e atribuem esse efeito, em grande parte, à nitrificação do NH_4^+ adicionado pelos efluentes (Qian & Mecham, 2005; Kiziloglu et al. 2008) e pela produção de CO_2 e ácidos orgânicos gerados pelo carbono orgânico dissolvido adicionado ao solo pelos efluentes (Bouwer & Chaney, 1974).

Os valores de condutividade elétrica (CE) do percolado tiveram relação proporcional com a adição de lixiviado (Tabela 6). Os valores iniciais de CE foram altos, inclusive nos irrigados com água devido à adição de fertilizantes e corretivos no solo. No entanto, os maiores valores de condutividade nas três amostragens foram verificados sob irrigação com lixiviado e os teores de Na adicionados pelo lixiviado foram os que mais contribuíram para esse aumento. Leal et al. (2009), avaliando a sodicidade de um Latossolo no sudeste do Brasil, verificaram o aumento da CE do solo com 16 meses de irrigação com efluente doméstico tratado. Já Nelson & Ham (2000) observaram a redução de 10% nos rendimentos de cana-de-açúcar com o aumento de $0,9 \text{ mS cm}^{-1}$ na camada de 0-80 cm devido à irrigação com efluentes tratados.

Os teores de potássio do percolado aumentaram com adição do lixiviado (Tabela 6). O teor de K do lixiviado aplicado de 74 mg L^{-1} , possivelmente foi o principal fator por esse aumento. Aos 47 dias, embora não se verifique diferença estatística, os teores de K apresentaram tendência de aumento com adição do lixiviado. O K possui baixa afinidade pelas cargas negativas da fase sólida do solo, sendo facilmente lixiviado do perfil do solo (Epstein & Bloom, 2005). Além disso, o sódio adicionado pelo lixiviado pode favorecer a dessorção e lixiviação do K (Pereira et al., 2011) ou o Ca adicionado pelo gesso agrícola e pelo calcário pode ter efeito semelhante (Blum et al., 2011).

Tabela 6. Valores de pH, condutividade elétrica e teores de potássio do percolado coletado a 23, 47 e 60 dias após a emergência das plântulas de milho

Tratamento	pH			Condutividade elétrica			Potássio		
	23d	47d	60d	23d	47d	60d	23d	47d	60d
	-----mg L ⁻¹ -----			-----mS cm ⁻¹ -----			-----mg L ⁻¹ -----		
1-Test (1)	6,2	7,1	7,1	3,0 c ¹	0,94 b	0,63 b	0,6 b	0,2	0,3 c
2-N ₀ P ₃ K	6,9	7,2	7,1	3,4 c	1,40 b	0,80 b	1,0 b	0,8	5,1 c
3-N ₁ P ₃ K	6,4	7,2	7,0	3,9 c	1,00 b	0,62 b	1,3 b	0,3	1,3 c
4-N ₂ P ₃ K	6,7	7,2	6,8	4,2 c	1,60 b	0,63 b	1,1 b	0,4	2,9 c
5-N ₃ P ₃ K	6,6	7,1	6,8	3,6 c	1,74 b	1,41 b	0,8 b	0,5	4,1 c
6-N ₃ P ₀ K	6,3	7,2	7,0	4,4 c	2,19 b	1,54 b	2,0 b	1,4	4,0 c
7-N ₃ P ₁ K	6,8	7,2	6,6	3,7 c	1,45 b	0,89 b	1,2 b	4,9	6,2 c
8-N ₃ P ₂ K	6,8	7,3	6,8	3,6 c	2,20 b	0,13 b	1,4 b	4,5	7,0 c
9-Test (2)1Lx	6,6	7,1	7,2	5,1 b	2,63 b	1,33 b	2,4 b	5,4	9,5 c
10-N ₃ P ₃ K 3Ad:1Lx	6,5	7,4	7,3	4,2 c	3,42 b	1,83 b	2,4 b	2,8	40,1 a
11-N ₃ P ₃ K 1Ad:1Lx	6,6	7,3	6,6	5,1 b	2,94 b	1,37 b	2,4 b	2,9	5,3 c
12-N ₃ P ₃ K 1Ad:3Lx	6,7	7,5	6,7	4,8 b	8,17 a	0,94 b	6,5 b	8,0	4,6 c
13-N ₃ P ₃ K 1Lx	6,4	7,1	6,9	5,6 b	1,46 b	0,23 b	8,0 b	7,4	26,9 b
14-O. M. 1Ad:1Lx	6,7	7,0	6,6	4,3 c	0,58 b	0,14 b	1,9 b	1,9	1,3 c
15-O. 1Ad:1Lx	6,8	7,0	7,0	3,7 c	3,84 b	3,41 b	97,7 a	6,8	6,8 c
16-N ₃ P ₃ K 1Lx (P/lx.)	6,8	7,2	7,1	7,0 a	11,02 a	9,24 a	11,0 b	5,4	37,1 b
CV (%)	6	7	2	17	64	89	158	87	129
Média (T0) ²	6,7	7,2	6,8	3,8 b	1,6 b	0,7 b	1,2 b	2,1	4,3 b
Média (T50)	6,6	7,2	6,9	4,3 a	2,7 b	1,7 b	26,1a	3,6	13,4 a
Média (T100)	6,6	7,3	6,9	5,8 a	6,9 a	3,5 a	8,5a	6,9	22,9 a

¹⁾ Valores seguidos pela mesma letra, na coluna, e por coleta, não diferem estatisticamente (Scott Knott, p<0,05).

²⁾ Para o cálculo das médias considerou-se: T0, média dos tratamentos irrigados com água (3, 4, 5, 7 e 8); T50, tratamentos irrigados com 25% e 50% de LIT(10, 11, 14 e 15) e T100, tratamentos com 75 e 100% de LIT (12,13 e 16). Os tratamentos 1, 2, 6 e 9 foram descartados das médias devido a baixa produção de matéria seca.

Porém, no presente estudo, é possível que as grandes adições do K pela irrigação contrabalancearam os efeitos antagonistas no solo (Blum et al., 2012). O potássio presente nas águas residuárias contribui para a fertilidade, especialmente de solos tropicais com baixa CTC e baixa fertilidade natural (Fonseca et al., 2005). Feigin et al. (1991) verificaram aumento nos teores de K no solo e que essas adições foram suficientes para suprir 100% da demanda da cultura do algodão.

Na Tabela 7, ilustra-se um balanço do sódio na média dos tratamentos nos compartimentos do solo, percolado e planta. Verifica-se que a grande quantidade de Na adicionada é retirada pela percolação, entre 60-70% no T100. Já no solo, foi onde ficaram os restantes 30% de Na adicionados pela irrigação. As plantas, mesmo que conduzidas por um período de 65 dias, cerca de metade do ciclo, retiraram quantidades menores do que 1% do Na adicionado pela irrigação com o lixiviado. Blum et al. (2012), em Latossolo paulista sob irrigação com efluente doméstico tratado, também verificou grande lixiviação do Na, com aplicação de gesso agrícola e estações chuvosas bem definidas.

Tabela 7. Adição de sódio pela irrigação como lixiviado, sódio retido no solo, no percolado, absorvido pelas plantas e somatório de Na nas médias dos tratamentos (T0, T50 e T100)

Variável	T0	T50	T100
	-----mg vaso ⁻¹ -----		
Na adicionado ¹⁾	0	4158	8316
Na solo ²⁾	710	1220	2920
Na percolado	81	1845	6066
Na Planta	0,6	13,4	75,3
Na (solo+percolado+planta)	791,6	3078,4	9061,3

¹⁾Para o cálculo do Na adicionado foi considerado volume de 16,8 L o volume de irrigação durante o experimento e o teor médio de 495 mg L⁻¹ de Na.

²⁾Para o solo, percolado e planta, utilizaram-se os teores médios de T0, T50 e T100.

A irrigação com o lixiviado aumentou os teores de Ca, Mg e Na no percolado (Tabela 8). Os teores de Ca foram maiores na média do T100 nas três amostragens. Possivelmente o teor de Ca do lixiviado (30 mg L⁻¹), sendo 86,9% na forma de Ca²⁺, contribuiu para o aumento desse elemento em solução. O aumento de outros sais adicionados pelo lixiviado podem contribuir para deslocar o Ca da fase sólida, tornando-o mais disponível em solução (Ribeiro et al., 2009). Esses dados corroboram com os verificados por Blum et al. (2012). Os teores de Ca foram maiores nas amostragens aos 23 dias por

ocasião da calagem feita no início do experimento e pela aplicação de gesso agrícola. Constatou-se também diminuição nos teores de Ca e Mg ao longo das coletas. Esse efeito deve-se à grande mobilidade do Ca e Mg em solos de baixa CTC (Caires et al., 1998; Blum et al., 2011).

A irrigação com o lixiviado aumentou os teores de Mg do percolado possivelmente devido ao teor de 35 mg L^{-1} contido na água residuária, verificado também por Rana et al (2010). Além disso, é provável que as maiores quantidades de Mg^{2+} em solução reagiram com o SO_4^{2-} do gesso agrícola aplicado em todos os tratamentos o que aumentou a mobilidade do Mg^{2+} no solo (Zambrozi et al., 2007). Outros autores verificaram que a aplicação de efluentes associada à aplicação de gesso agrícola aumenta a lixiviação de Mg^{2+} (Blum et al., 2012).

Os teores de sódio no percolado tiveram relação proporcional com a quantidade de lixiviado utilizada na irrigação (Tabela 8). Nos tratamentos irrigados com água, na média, os teores de Na no percolado foram inferiores a 10 mg L^{-1} . Já no T50, os teores foram no mínimo 10 vezes superiores ao irrigado com água e a média do T100 alcançou valores próximos a 700 mg L^{-1} aos 47 dias. Os altos teores de sódio são uma das principais preocupações na aplicação de efluentes tratados no solo (Feigin, 1991; Fonseca et al., 2007). Esse elemento pode ocasionar problemas nas propriedades físicas dos solos (Halliwell et al., 2001). Por outro lado o Na é facilmente lixiviado no solo, principalmente por ter a menor afinidade dentre os cátions do solo ($\text{Al}^{3+} = \text{H}^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+ = \text{NH}_4^+ > \text{Na}^+$) que é devido a sua valência 1^+ e seu grande raio iônico hidratado (Epstein & Bloom, 2005) além da baixa afinidade do Na pelas cargas do solo. As lâminas de percolação ($2 \text{ L vaso}^{-1} = 63,7 \text{ mm}$) foram importantes na lixiviação do sódio do solo. Vários autores verificaram que a irrigação com efluentes tratados aumentam as concentrações de Na no solo (Feigin et al., 1991; Fonseca et al., 2007; Leal et al., 2009). Porém a capacidade de retenção de sódio em solos brasileiros é bastante baixa (Blum et al., 2012), pois as chuvas intensas lixiviam e diminuem a acumulação do Na em solos tropicais (Leal et al., 2009; Pereira et al., 2011).

Tabela 8. Teores de cálcio, magnésio e sódio do percolado coletado a 23, 47 e 60 dias após a emergência das plântulas de milho

Tratamento	Cálcio			Magnésio			Sódio		
	23d	47d	60d	23d	47d	60d	23d	47d	60d
	-----mg L ⁻¹ -----			-----mg L ⁻¹ -----			-----mg L ⁻¹ -----		
1-Test (1)	296 b	101 b	61 b	220	79 c	51 b	5 e	3 d	2 b
2-N ₀ P ₃ K	330 b	160 b	75 b	232	105 b	54 b	10 e	10 d	5 b
3-N ₁ P ₃ K	385 b	119 b	61 b	267	79 c	43 b	10 e	2 d	2 b
4-N ₂ P ₃ K	433 a	191 b	80 b	274	119 b	57 b	11 e	1 d	1 b
5-N ₃ P ₃ K	347 b	208 b	160 b	242	131 b	44 b	7 e	2 d	2 b
6-N ₃ P ₀ K	405 b	228 b	127 b	260	139 b	90 a	13 e	11 d	5 b
7-N ₃ P ₁ K	394 b	144 b	55 b	243	104 b	31 b	10 e	14 d	1 b
8-N ₃ P ₂ K	372 b	245 b	48 b	246	133 b	25 b	11 e	12 d	3 b

9-Test (2)1Lx	444 a	156 b	88 b	267	116 b	70 b	169 c	248 c	206 b
10-N ₃ P ₃ K 3Ad:1Lx	387 b	320 b	164 b	239	149 b	96 a	49 d	121 c	62 b
11-N ₃ P ₃ K 1Ad:1Lx	494 a	242 b	84 b	285	139 b	59 b	74 d	198 c	107 b
12-N ₃ P ₃ K 1Ad:3Lx	438 a	727 a	54 b	266	236 a	66 b	178 c	751 b	46 b
13-N ₃ P ₃ K 1Lx	462 a	96 b	48 b	274	120 b	48 b	239 b	145 c	72 b
14-O. M. 1Ad:1Lx	389 b	43 b	30 b	260	32 c	60 b	67 d	40 d	15 b
15-O. 1Ad:1Lx	242 b	242 b	161 b	206	173 a	105 a	232 b	343 c	334 b
16-N ₃ P ₃ K 1Lx (P/lx.)	559 a	594 a	397 a	301	210 a	148 a	295 a	1171 a	1148 a
CV (%)	18	53	76	12	31	53	40	50	99

Média (T0) ²	386 b	181 b	81 b	255	113 b	40 b	10 c	6 c	2 b
Média (T50)	378 b	212 b	110 b	247	123 b	80 a	105 b	175 b	130 a
Média (T100)	486 a	472 a	166 a	280	189 a	87 a	237 a	689 a	422 a

¹⁾Valores seguidos pela mesma letra, na coluna, e por coleta, não diferem estatisticamente (Scott Knott, p<0,05).

²⁾Para o cálculo das médias considerou-se: T0, média dos tratamentos irrigados com água (3, 4, 5, 7 e 8); T50, tratamentos irrigados com 25% e 50% de LIT(10, 11, 14 e 15) e T100, tratamentos com 75 e 100% de LIT (12,13 e 16). Os tratamentos 1, 2, 6 e 9 foram descartados das médias devido a baixa produção de matéria seca.

Além de ocorrer uma estação intensa de chuvas para diminuir os teores de Na no solo é importante também não irrigar além do necessário com efluentes com altos teores de Na (Leal et al, 2009; Blum et al., 2012). É possível que o gesso também tenha aumentado a lixiviação de Na no perfil do solo. Embora tenha sido adicionado a todos os tratamentos, possivelmente nos irrigados com lixiviado, o Na em maiores concentrações foi substituído do complexo sorbido pelo Ca do gesso e ligado ao SO_4^{2-} conferindo maior mobilidade do Na no solo (Blum et al., 2012). Os maiores teores de Na no percolado podem contribuir para o aumento da sodicidade de águas subterrâneas. O Na não apresenta grandes problemas de toxicidade ambiental, no entanto, conforme a WHO (2004) valores superiores a 200 mg L^{-1} podem diminuir a aceitabilidade da água para consumo humano.

Os teores de sulfato e nitrato do percolado aumentaram devido à irrigação com o lixiviado. Já os teores de amônio não apresentaram alterações sob aplicação da água residuária (Tabela 9).

Os teores de sulfato foram maiores nos tratamentos irrigados com o lixiviado. É provável que os teores de S (82,9% de SO_4^{2-}) do lixiviado tenham grande contribuição para esse aumento, além das formas de S orgânicas adicionadas pelo lixiviado. Foram verificados maiores valores de sulfato na coleta de 24 dias com diminuição aos 47 e 60 dias. Esse maior teor de SO_4^{2-} é atribuído à aplicação de gesso agrícola feita na instalação do experimento (Blum et al., 2012). Pereira et al. (2011) verificaram maior lixiviação de SO_4^{2-} devido ao aumento das cargas negativas pela elevação do pH do solo sob irrigação com efluente tratado. Além disso, os íons bicarbonatos adicionados pelos efluentes são preferencialmente adsorvidos pelos óxidos do solo deslocando o SO_4^{2-} que se liga ao Na^+ , sendo lixiviados no perfil do solo (Blum et al., 2012).

Os teores de amônio não tiveram grandes alterações devido à irrigação com o lixiviado. Como o lixiviado possui altos teores de amônio (Tabela 2), possivelmente poderia aumentar os teores de NH_4^+ em solução e posteriormente no percolado, sendo o NH_4^+ a forma predominante de N na maioria dos efluentes tratados (Fonseca et al., 2007).

Tabela 9. Teores de sulfato, amônio e nitrato do percolado coletado a 23, 47 e 60 dias após a emergência das plântulas de milho

Tratamento	Sulfato			Amônio			Nitrato		
	23d	47d	60d	23d	47d	60d	23d	47d	60d
	-----mg L ⁻¹ -----			-----mg L ⁻¹ -----			-----mg L ⁻¹ -----		
1-Test (1)	792	274 b	58 b	0,1	0,1	0,1 b	1,4	1,2 b	0,1 b
2-N ₀ P ₃ K	842	398 b	44 b	0,2	0,1	0,1 b	0,2	0,1 b	0,4 b
3-N ₁ P ₃ K	983	271 b	24 b	0,1	0,2	0,1 b	2,2	0,1 b	0,1 b
4-N ₂ P ₃ K	1054	554 a	69 b	1,8	0,2	0,1 b	3,6	0,1 b	1,0 b
5-N ₃ P ₃ K	831	643 a	175 a	1,8	1,3	0,1 b	3,9	0,2 b	7,9 a
6-N ₃ P ₀ K	1023	365 b	36 b	0,8	0,9	1,0 b	5,1	2,3 b	10,7 a
7-N ₃ P ₁ K	928	273 b	10 b	0,2	0,5	0,8 b	7,0	5,3 a	5,0 b
8-N ₃ P ₂ K	875	404 b	16 b	16,0	0,7	0,4 b	7,4	2,2 b	6,3 b

9-Test (2)1Lx	930	276 b	32 b	1,7	2,0	0,9 b	1,7	11,1 a	23,5 a
10-N ₃ P ₃ K 3Ad:1Lx	870	630 a	53 b	0,2	0,3	9,2 b	4,2	1,7 b	8,6 b
11-N ₃ P ₃ K 1Ad:1Lx	1020	382 b	56 b	0,2	0,1	0,1 b	6,6	7,2 a	5,4 b
12-N ₃ P ₃ K 1Ad:3Lx	921	1201 a	60 b	1,2	0,1	0,4 b	6,8	2,0 b	3,6 b
13-N ₃ P ₃ K 1Lx	940	158 b	125 a	0,8	0,2	3,9 b	16,7	8,1 a	9,3 a
14-O. M. 1Ad:1Lx	928	108 b	10 b	0,3	1,8	0,9 b	4,7	1,2 b	0,5 b
15-O. 1Ad:1Lx	372	760 a	60 b	1,0	0,9	0,9 b	4,7	0,9 b	0,9 b
16-N ₃ P ₃ K 1Lx (P/lx.)	712	593 a	200 a	0,2	1,9	24,8 a	7,2	2,3 b	10,3 a
CV (%)	27	61	54	90	82	74	80	82	76

Média (T0) ²	934	429 b	59 b	4,0	0,6	0,3 b	4,8	1,6 b	4,1 b
Média (T50)	798	470 b	37 b	0,7	0,8	2,8 b	5,0	2,7 b	3,9 b
Média (T100)	858	651 a	128 a	0,7	0,7	9,7 a	10,2	4,1 a	7,7 a

¹⁾ Valores seguidos pela mesma letra, na coluna, e por coleta, não diferem estatisticamente (Scott Knott, p<0,05).

²⁾ Para o cálculo das médias considerou-se: T0, média dos tratamentos irrigados com água (3, 4, 5, 7 e 8); T50, tratamentos irrigados com 25% e 50% de LIT(10, 11, 14 e 15) e T100, tratamentos com 75 e 100% de LIT (12,13 e 16). Os tratamentos 1, 2, 6 e 9 foram descartados das médias devido a baixa produção de matéria seca.

No entanto, quando aplicado ao solo, uma parcela é absorvida pelas plantas e, em condições aeradas, em poucos dias é oxidado a nitrato (Feigin et al., 1991). Já os teores de NO_3^- no percolado tiveram influência direta da aplicação de lixiviado no solo (Tabela 9). Assim como o SO_4^{2-} , o N-NO_3^- também acompanha os cátions básicos como Na^+ e K^+ quando lixiviados no perfil do solo (Di & Cameron, 2002). Hook & Kardos (1978) verificaram teores de N-NO_3^- de 15 mg L^{-1} e 10 mg L^{-1} de nitrato em áreas de mata e campo, respectivamente, com aplicação de efluente tratado. Além da contribuição do N amoniacal, a mineralização do N orgânico dos efluentes pode contribuir para os teores de formas minerais no solo (Feigin et al., 1991). O NO_3^- é uma das principais formas de absorção de N pelos vegetais e o aumento desse íon no solo é uma das importantes alterações pela irrigação com efluentes (Fonseca et al., 2007). Porém, o monitoramento de NO_3^- em percolados e águas subterrâneas é fundamental, pois o do NO_3^- está relacionado a sérios problemas de saúde humana, como a metahemoglobinemia “síndrome do bebê azul” (Powlson et al., 2008), além de problemas relacionados com eutrofização de corpos hídricos e a formação de substâncias carcinogênicas como as nitrosaminas e nitrosamidas (Bouchard et al., 1992).

Os valores de RAS e da DBO_5 do percolado aumentaram devido à aplicação do lixiviado industrial tratado no solo degradado (Tabela 10).

Os valores de RAS verificados na avaliação aos 24 dias foram menores. A calagem feita na instalação do experimento e o gesso aplicado contribuíram para os aumentos de Ca e Mg no solo e reduziram os teores da RAS. Já na amostragem feita aos 47 dias percebeu-se aumento nos valores da RAS devido ao aumento dos teores de Na e diminuição dos teores de Ca e Mg. Já na amostragem aos 60d houve diminuição da RAS devido à diminuição dos teores de sódio na terceira coleta. As classificações da RAS conforme Richards (1954) também foram afetadas pela aplicação de lixiviado. O C da classificação está relacionado aos valores de condutividade e o S valores de RAS. Assim os tratamentos irrigados com água apresentaram baixos valores de condutividade (C_1) e baixos valores de RAS (S_1). Já os tratamentos irrigados com lixiviado sem diluição, como o tratamento 16 aos 47 dias foi classificado como C_3S_2 que apresenta maior potencial de salinização e sodificação do solo. Os altos teores de RAS, pela irrigação com águas residuárias, podem aumentar o teor de argila

dispersa, obstruir poros, dificultar a penetração radicular, diminuir a condutividade hidráulica do solo e afetar negativamente o desenvolvimento de plantas (Halliwell et al., 2001; Coppola et al., 2004; Rana et al., 2010). Valores de RAS acima de 10 são críticos e acima de 20 são classificados como altamente críticos quanto à salinidade e então as águas residuárias não são indicadas para utilização na agricultura (Richards, 1954). Segundo Hamilton et al. (2007) efluentes tratados possuem valores médios de RAS na faixa de 4,5 a 8 e valores de RAS acima de 3 podem afetar negativamente as características do solo, especialmente quando a condutividade elétrica do solo for menor do que 1 mS cm^{-1} . Pois a menor condutividade elétrica do solo anteriormente a irrigação com efluentes implica em menores concentrações de íons divalentes como Ca e Mg no complexo sortivo, podendo ocasionar implicações nos atributos físicos do solo e desbalanços nutricionais em plantas (Hillel, 1998).

Os valores de DBO_5 também aumentaram sob irrigação com o lixiviado industrial tratado (Tabela 10). Os maiores valores de DBO_5 verificados aos 60 dias são em decorrência do maior teor de carbono orgânico dissolvido adicionado pela irrigação com o lixiviado (Fonseca et al., 2007). Embora os valores de DBO_5 sejam maiores nos tratamentos irrigados com lixiviado, verificou-se grande diminuição dos valores de DBO_5 do lixiviado para os teores do percolado. Wang et al. (2007) também verificaram baixos valores de DBO_5 e diminuição em maiores profundidades. Esses autores atribuem essa diminuição à capacidade da biota do solo em degradar os compostos orgânicos dissolvidos em água. A degradação da carga orgânica dissolvida no solo também é acelerada pela formação de biofilmes na rizosfera (Bertoncini, 2008).

Tabela 10. Razão de adsorção de sódio (RAS), classificação para uso na irrigação e demanda biológica de oxigênio (DBO₅) do percolato coletado a 23, 47 e 60 dias após a emergência das plântulas de milho

Tratamento	RAS			Classificação			DBO ₅
	23d	47d	60d	23d	47d	60d	60d
							mg L ⁻¹
1-Test (1)	0,1 d	0,1 e	0,1 d	C ₂ S ₁	C ₁ S ₁	C ₁ S ₁	6,8 c ¹⁾
2-N ₀ P ₃ K	0,1 d	0,2 e	0,1 d	C ₂ S ₁	C ₁ S ₁	C ₁ S ₁	9,4 c
3-N ₁ P ₃ K	0,1 d	0,1 e	0,1 d	C ₂ S ₁	C ₁ S ₁	C ₁ S ₁	15,9 b
4-N ₂ P ₃ K	0,1 d	0,1 e	0,1 d	C ₂ S ₁	C ₁ S ₁	C ₁ S ₁	11,5 c
5-N ₃ P ₃ K	0,1 d	0,1 e	0,1 d	C ₂ S ₁	C ₁ S ₁	C ₁ S ₁	12,4 c
6-N ₃ P ₀ K	0,1 d	0,2 e	0,1 d	C ₂ S ₁	C ₁ S ₁	C ₁ S ₁	10,5 c
7-N ₃ P ₁ K	0,1 d	0,3 e	0,1 d	C ₂ S ₁	C ₁ S ₁	C ₁ S ₁	11,4 c
8-N ₃ P ₂ K	0,1 d	0,2 e	0,2 d	C ₂ S ₁	C ₁ S ₁	C ₁ S ₁	7,6 d

9-Test (2)1Lx	1,8 b	4,3 c	4,7 b	C ₂ S ₁	C ₂ S ₁	C ₁ S ₁	14,3 b
10-N ₃ P ₃ K 3Ad:1Lx	0,6 c	1,6 e	1,5 c	C ₂ S ₁	C ₂ S ₁	C ₁ S ₁	24,9 a
11-N ₃ P ₃ K 1Ad:1Lx	0,8 c	2,9 d	2,4 c	C ₂ S ₁	C ₂ S ₁	C ₁ S ₁	11,3 c
12-N ₃ P ₃ K 1Ad:3Lx	1,9 b	6,7 b	1,9 c	C ₂ S ₁	C ₃ S ₁	C ₁ S ₁	10,8 c
13-N ₃ P ₃ K 1Lx	2,5 a	3,3 d	3,5 b	C ₂ S ₁	C ₂ S ₁	C ₁ S ₁	25,6 a
14-O. M. 1Ad:1Lx	0,8 c	1,4 e	0,9 c	C ₂ S ₁	C ₂ S ₁	C ₁ S ₁	12,3 c
15-O. 1Ad:1Lx	3,1 a	4,8 c	5,9 a	C ₂ S ₁	C ₂ S ₁	C ₂ S ₁	12,0 c
16-N ₃ P ₃ K 1Lx (P/lx.)	2,9 a	12,2 a	1,0 c	C ₂ S ₁	C ₃ S ₂	C ₃ S ₁	17,3 b
CV (%)	37	36	69	-	-	-	40

Média (T0) ²⁾	0,1 c	0,2 c	0,1 b	-	-	-	11,8 b
Média (T50)	1,3 b	2,7 b	2,7 a	-	-	-	15,1 a
Média (T100)	2,4 a	7,4 a	2,1 a	-	-	-	17,9 a

¹⁾ Valores seguidos pela mesma letra, na coluna, e por coleta, não diferem estatisticamente (Scott Knott, p<0,05).

²⁾ Para o cálculo das médias considerou-se: T0, média dos tratamentos irrigados com água (3, 4, 5, 7 e 8); T50, tratamentos irrigados com 25% e 50% de LIT (10, 11, 14 e 15) e T100, tratamentos com 75 e 100% de LIT (12, 13 e 16). Os tratamentos 1, 2, 6 e 9 foram descartados das médias devido a baixa produção de matéria seca.

3.4.3. Solo

A irrigação com o lixiviado afetou alguns atributos químicos do solo (Tabela 11). Houve aumento do P disponível e do Na, assim como da condutividade elétrica do solo, devido à irrigação com o lixiviado. Porém os teores de K, Ca, Mg, assim como o pH do solo, não apresentaram efeito da irrigação com o lixiviado no solo.

Os teores de P verificados com irrigação intermediária de lixiviado foram semelhantes à irrigação com água. Já a irrigação com lixiviado sem diluição (100%) aumentou os teores de P disponíveis. Embora o teor de P do lixiviado seja baixo, os grandes volumes adicionados podem ter contribuído para o aumento do mesmo no solo. Além disso, o P orgânico adicionado pelo lixiviado também pode contribuir para o aumento do P disponível (Herpin et al., 2007). Os dados verificados corroboram com os resultados de Barreto et al. (2013), que constataram aumento dos teores de P disponível em um Neossolo do Nordeste brasileiro irrigado com efluentes domésticos tratados. Herpin et al. (2007) e Kiziloglu et al. (2008) também observaram o incremento de P disponível, em curto período de aplicação, em solos submetidos à irrigação com águas residuárias tratadas. Esses autores atribuem o aumento de P disponível nos solos às quantidades e formas de P adicionadas pelos efluentes tratados, especialmente na forma orgânica. Experimentos de longa duração também verificaram o aumento de teores de P disponível (Rusan et al., 2007).

O teor de potássio trocável não teve influência pela irrigação com o lixiviado. Mesmo com alto teor de K, como o verificado no lixiviado (Tabela 2), não contribuiu para o aumento do elemento no solo. Possivelmente, as maiores perdas de K nas percolações foram equivalentes às quantidades de K aportadas pelo lixiviado. O K está entre os cátions que possuem as ligações mais fracas com as cargas negativas do solo e é facilmente lixiviado no perfil do solo (Sposito, 2008). Esses dados corroboram com Pereira et al., (2011) que utilizou irrigação com efluente doméstico tratado. Por outro lado, Feigin et al. (1991) verificaram o aumento dos teores trocáveis de K sob irrigação com efluente doméstico tratado.

Os teores de Ca e Mg no solo também não tiveram efeito da irrigação com o lixiviado. Possivelmente as quantidades de Ca e Mg

adicionadas pelo lixiviado industrial não foram suficientes para alterar os teores da fase sólida. Como os teores de Ca e Mg do percolado foram superiores com aplicação do lixiviado, possivelmente as quantidades de Ca e Mg adicionados pelo lixiviado também saíram na percolação, possivelmente pela baixa CTC e baixa adsorção. Os dados corroboram estudo conduzido por Duan et al. (2010), que não constataram alterações nos teores de Ca e Mg em Latossolo cultivado com grama bermuda e irrigado com efluente doméstico tratado. Para esses autores, a manutenção de teores de Ca e Mg no solo é importante para minimizar o efeitos dispersivos do sódio aportado no solo pelas águas residuárias.

Os teores de Na no solo tiveram efeito proporcional à irrigação com lixiviado. Embora as percolações tenham retirado grandes quantidades de Na do solo, as mesmas não foram suficientes para percolar todo Na adicionado pela irrigação com o lixiviado. Os maiores teores de Na no solo também se refletiram em maiores valores de CE (Tabela 11). Os maiores valores de CE também foram verificados por outros autores sob irrigação com efluentes domésticos tratados (Fonseca et al., 2007; Leal et al., 2009) e atribuem esse aumento a grande adição de sais. O aumento nos teores de Na e CE também foram verificados por outros autores utilizando efluentes domésticos tratados (Fonseca et al., 2005; Leal et al., 2009).

Os valores de pH e índice SMP do solo não tiveram efeito pela aplicação do lixiviado (Tabela 11) similar ao pH do percolado. Esses dados corroboram outros autores (Varallo et al., 2010). Por outro lado, Stewart et al. (1990) relatam o aumento do pH do solo em função da alcalinidade do efluente aplicado e dos cátions básicos adicionados ao solo. Pequenas alterações foram verificadas por Leal et al. (2009) em Latossolo cultivado com cana e irrigado com efluente tratado. Herpin et al. (2007) observaram aumento nos valores do pH do solo e destacam também que as altas concentrações de íons HCO_3^- dos efluentes são importantes na redução da acidez do solo.

Tabela 11. Teores de P, K, Ca, Mg e Na e valores de pH, SMP e CE do solo após o corte das plantas de milho (73 dias após a emergência das plântulas)

Tratamento	P	K	Ca	Mg	Na	pH	SMP	CE
	-----mg L ⁻¹ -----	-----cmol _c L ⁻¹ -----	-----cmol _c L ⁻¹ -----	-----cmol _c L ⁻¹ -----	mg L ⁻¹			
1-Test (1)	0,8 d	14,3 b	3,9	3,7	5 d	7,0	7,2	59 c
2-N ₀ P ₃ K	9,5 a	82,3 a	3,6	3,3	5 d	7,1	7,2	73 c
3-N ₁ P ₃ K	8,0 b	36,7 b	3,8	3,3	5 d	6,9	7,1	58 c
4-N ₂ P ₃ K	8,1 b	42,0 b	3,6	3,2	5 d	6,9	7,1	64 c
5-N ₃ P ₃ K	8,6 b	59,0 a	3,3	2,7	5 d	7,0	7,1	59 c
6-N ₃ P ₀ K	0,9 d	94,3 a	2,9	2,6	3 d	7,1	7,2	87 c
7-N ₃ P ₁ K	3,1 c	61,7 a	3,7	3,2	4 d	7,1	7,2	108 c
8-N ₃ P ₂ K	4,4 c	50,7 a	3,3	2,8	3 d	7,0	7,2	64 c
9-Test (2)1Lx	0,8 d	40,3 b	3,4	3,1	154 b	7,1	7,3	172 b
10-N ₃ P ₃ K 3Ad:1Lx	10,5 a	31,7 b	3,4	2,9	70 c	7,0	7,2	103 c
11-N ₃ P ₃ K 1Ad:1Lx	7,4 b	24,0 b	3,2	2,6	93 c	7,0	7,1	96 c
12-N ₃ P ₃ K 1Ad:3Lx	9,1 b	67,0 a	2,8	2,4	146 b	6,9	7,1	207 b
13-N ₃ P ₃ K 1Lx	11,1 a	34,3 b	3,5	3,1	255 a	7,0	7,2	348 a
14-O. M. 1Ad:1Lx	4,1 c	15,7 b	3,4	3,1	140 b	7,1	7,2	188 b
15-O. 1Ad:1Lx	10,2 a	29,0 b	3,8	3,1	69 c	7,1	7,1	101 c
16-N ₃ P ₃ K 1Lx (P/lx.)	9,8 a	67,3 a	2,8	2,5	280 a	6,9	7,0	320 a
CV (%)	16	37	17	19	40	2	1	31
Média (T0) ²	8,2 b	50,0	3,5	3,0	4 c	7,0	7,1	71 b
Média (T50) ²	8,0 b	25,1	3,4	2,9	93 b	7,0	7,1	122 b
Média (T100) ²	10,0 a	56,2	3,0	2,7	227 a	6,9	7,1	292 a

¹⁾Valores seguidos pela mesma letra, na coluna, e por coleta, não diferem estatisticamente (Scott Knott, p<0,05).

²⁾ Para o cálculo das médias considerou-se: T0, média dos tratamentos irrigados com água (3, 4, 5, 7 e 8); T50, tratamentos irrigados com 25% e 50% de LIT(10, 11, 14 e 15) e T100, tratamentos com 75 e 100% de LIT (12,13 e 16). Os tratamentos 1, 2, 6 e 9 foram descartados das médias pela baixa produção de matéria seca. Para o teor médio de P no solo foi desconsiderado os tratamentos 7 e 8.

3.4.4. Argila dispersa em água

Não se verificou diferença significativa nos teores de argila dispersa entre os tratamentos em cada solo (Figura 5). Possivelmente o aumento dos teores de Na poderiam causar aumentos nos teores de argila dispersa em água. No entanto, é possível que a calagem tenha aumentado os teores de íons divalentes no solo e os valores de pH próximo à neutralidade tenham atenuado o efeito dispersante do Na. Pois, para ocorrer a dispersão de argila é necessário grande concentração de íons monovalentes na CTC como o Na, aumento do pH e da RAS (Hillel, 1998). A dispersão de partículas em solos cauliniticos depende em grande parte dos valores do pH. Com baixos valores de pH há uma atração das cargas elétricas negativas e positivas das arestas das caulinitas, ocasionando a floculação. Com o aumento do pH, a fraca interação dessas cargas favorece a dispersão de partículas (Churchman et al., 1993). Leal et al. (2007) observaram aumento nos teores de Na, RAS e consequente aumento dos valores de argila dispersa em água em Latossolo do sudeste do Brasil irrigado com efluente doméstico tratado. O aumento dos teores de argila dispersa provoca o selamento do solo, diminuindo as trocas gasosas, a infiltração de água e o desenvolvimento de plantas (Halliwell et al., 2001; Menneer et al., 2001).

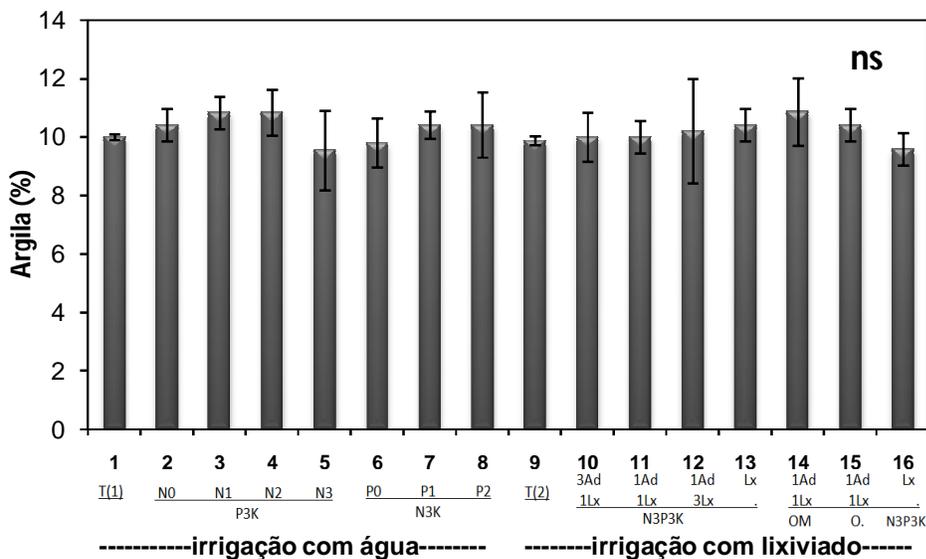


Figura 5. Teor de argila dispersa em água após aplicação de lixiviado industrial tratado em diferentes tratamentos. (Scott Knott, $p < 0,05$).

3.5. Conclusões

1 - A irrigação com lixiviado industrial tratado não altera a produção de biomassa de milho cultivado em solo degradado.

2 - Os teores de N, P, K, S, Mn, Na, Cu e Zn aumentam no tecido da parte aérea de milho sob irrigação com lixiviado industrial tratado.

3 - A adição de lixiviado ao solo aumenta os valores de CE, RAS e DBO₅ bem como os teores de K, Ca, Mg, Na, S e NO₃⁻ do percolado, sendo a percolação com água importante na redução da sodicidade do solo.

4 - Os teores de P e Na e os valores de condutividade elétrica do solo aumentam sob irrigação com o lixiviado industrial tratado.

5 - A irrigação com o lixiviado industrial não altera os teores de argila dispersa em água do solo degradado.

6 - O lixiviado pode ser utilizado até mesmo sem diluição na irrigação de milho em solo degradado, porém a calagem e aplicação de gesso agrícola são importantes evitar os altos níveis de Na no solo.

4. CAPÍTULO III – RENDIMENTO E ABSORÇÃO DE NUTRIENTES PELO ARROZ IRRIGADO COM LIXIVIADO INDUSTRIAL TRATADO

4.1. Resumo

Efluentes industriais tratados possuem altos teores de nutrientes e matéria orgânica dissolvida. A utilização destes efluentes na irrigação do arroz por alagamento pode aumentar a absorção de nutrientes e o rendimento de grãos. Para testar esta hipótese, o presente trabalho teve por objetivo avaliar os teores de nutrientes na biomassa da parte aérea e no grão e os componentes do rendimento da cultura do arroz irrigado por alagamento com lixiviado industrial tratado (LIT), contendo 820 mg L^{-1} de Na. O experimento foi conduzido em casa-de-vegetação, utilizando-se como unidades experimentais vasos preenchidos com 20kg de solo, em delineamento experimental em blocos casualizados, com três repetições. Os tratamentos foram: controle (irrigação com água destilada) e quatro proporções de lixiviado (25%, 50%, 75% e 100%) de lâmina de irrigação. Os teores de nutrientes foram avaliados na biomassa da parte aérea e no grão ao fim do ciclo da cultura (126 dias), assim como a esterilidade e o peso de grãos. Os outros componentes do rendimento foram determinados no estágio vegetativo da cultura. A irrigação com o lixiviado aumentou os teores de macro e micro nutrientes na biomassa da parte aérea e no grão, à exceção do potássio e do ferro. A irrigação com o lixiviado industrial diminuiu o perfilhamento, aumentou o teor de clorofila e a

esterilidade e diminuiu o rendimento de grãos devido ao maior aporte de sódio presente no lixiviado.

Palavras-chave: efluente, *Oriza sativa*, sódio, clorofila, esterilidade.

4.2. Introdução

O aumento das atividades industriais, nas últimas décadas, no Estado do Rio Grande do Sul acarretou também no aumento da geração de grandes volumes de resíduos e efluentes e dos problemas ambientais relacionados. As regiões do Delta do Jacuí, do Vale dos Sinos e da Serra são responsáveis por quase 60% do potencial poluidor no Estado (FEE, 2009). Como consequência, o IBGE (2010) relatou que o Rio Grande do Sul tem 3 dos 10 rios mais poluídos do Brasil, todos desaguando na Região Metropolitana de Porto Alegre (Rio dos Sinos, 4º lugar; Rio Gravataí, 5º lugar; Rio Cai, 8º lugar). O impacto desta poluição industrial poderia ser diminuído com a reutilização de águas residuárias na agricultura (USEPA, 2005), uma vez que a demanda por água para a atividade agrícola é muito grande neste estado, especialmente para a cultura do arroz irrigado por inundação (Christofidis, 2001; Hespanhol, 2002).

O Estado do Rio Grande do Sul é o principal produtor de arroz do Brasil, com 20% da área cultivada e 60% da produção (SOSBAI, 2012). A alta produtividade média do arroz irrigado ($7,2 \text{ t ha}^{-1}$) está relacionada ao sistema de irrigação por inundação, que não permite déficit hídrico, demandando um grande volume de água para irrigar a cultura ($10.000 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$) (SOSBAI, 2012). Além do problema de déficit hídrico, a maioria dos rios encontra-se com um alto índice de poluição, especialmente na Região Metropolitana do Delta do Jacuí e no Vale dos Sinos (IBGE, 2010), com graves consequências para a qualidade da água para consumo humano (FEPAM, 2001).

A utilização de efluentes tratados no solo pode reduzir a exploração de reservas hídricas de água doce, diminuindo o volume de efluentes lançados em cursos d'água (Feigin et al., 1991; Fonseca et al., 2005), além de diminuir o risco de eutrofização e outros desequilíbrios em mananciais hídricos, promovendo a reciclagem da carga orgânica e dos nutrientes no solo (Yadav et

al., 2002; Fonseca et al, 2005). Apesar da recomendação do uso de águas residuárias para a irrigação, pode ocorrer contaminação ambiental em algumas situações (Herpin et al., 2007). Entre os problemas mais comuns destaca-se a contaminação do lençol freático por nitrato e o aumento da salinização do solo, em especial a sodicidade e as suas consequências na deterioração da estrutura do solo, a diminuição da permeabilidade da água e a redução do rendimento das culturas por efeitos tóxicos e alterações osmóticas (Oster & Schainberg, 2001; Halliwell et al., 2001).

Diversos autores verificaram que a irrigação com águas residuárias aumenta a absorção de nutrientes e incrementa o rendimento das culturas (Fonseca et al., 2007). Componentes como sais, nitrogênio em formas minerais e carbono orgânico dissolvido (COD) encontram-se em altas concentrações em efluentes tratados (Fonseca et al, 2005). Os altos teores de Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} e K^+ determinados nos efluentes também modificam a composição da solução e podem afetar o desenvolvimento de plantas de arroz. A avaliação da produtividade, da absorção de nutrientes e dos componentes de rendimento da cultura do arroz irrigado por alagamento com lixiviado industrial tratado em diferentes concentrações foi o objetivo deste trabalho.

4.3. Material e métodos

O experimento foi conduzido em casa-de-vegetação, nas instalações do Departamento de Solos da Faculdade de Agronomia (UFRGS). As unidades experimentais foram constituídas por vasos com capacidade de 20 litros e preenchidos com 20 kg de solo. Foi utilizado delineamento de blocos casualizados, com três repetições. Os tratamentos consistiram de composições de irrigação com as seguintes proporções: controle (100% de água destilada e 0% de lixiviado), T25 (75% de água destilada e 25% de lixiviado), T50 (50% de água destilada e 50% de lixiviado), T75 (25% de água destilada e 75% de lixiviado) e T100 (0% de água destilada e 100% de lixiviado). O solo utilizado foi classificado como Gleissolo Háplico (Embrapa, 2006), que, após coletado, foi analisado química e fisicamente conforme metodologia descrita por Tedesco et al., (1995). Este solo apresentou 17% de argila, pH (H_2O) de 4,7 e 2,3 % de matéria orgânica. Os teores de Ca, Mg, Al e Mn extraídos por KCl (1 mol.L^{-1}) e o valor de $\text{H}+\text{Al}$ em $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ foram respectivamente de 1,3; 0,3; 0,9; 0,2 e

4,4. Os teores de P e K disponíveis extraídos pela solução de Mehlich-1 e S extraível por CaHPO_4 com 500 mg L^{-1} de P foram de 9,1; 47 e $17,0 \text{ mg dm}^{-3}$, respectivamente.

O lixiviado industrial tratado (Tabela 12) foi coletado na central de recebimento de resíduos industriais UTRESA, localizada em Estância Velha-RS. O lixiviado é uma água residuária originada da decomposição dos resíduos sólidos, especialmente aparas de couro, contidos em células de aterro. Após geração, os lixiviados são bombeados dos drenos das células para a estação de tratamento de efluentes (ETE), onde recebem tratamentos primário e secundário. Na etapa subsequente são contidos em lagoa de estabilização antes do lançamento nos corpos d'água.

Tabela 12. Características do lixiviado industrial tratado (LIT) e padrões para lançamento em corpos hídricos

Parâmetro/unidade	Valor	Padrão de Lançamento ³
Ph	7,9	6,0 - 9,0
N Total Kjeldahl (mg L^{-1})	217	20
Ca (mg L^{-1})	37	-
Mg (mg L^{-1})	47	-
K (mg L^{-1})	120	-
Na total (mg L^{-1})	820	-
S (mg L^{-1})	21	-
P total (mg L^{-1})	1,0	2,9
Fe (mg L^{-1})	n.d. ⁴⁾	10
Mn total (mg L^{-1})	0,8	1,0
Cu (mg L^{-1})	n.d.	0,4
Zn (mg L^{-1})	0,08	2,0
Cr total (mg L^{-1})	0,365	0,4
Ni (mg L^{-1})	0,02	0,7
Cd total (mg L^{-1})	n.d.	0,03
Condutividade elétrica ($\mu\text{s cm}^{-1}$)	6810	-
DQO (mg L^{-1})	280	330
DBO ₅ (mg L^{-1})	100	110
RAS ¹	21,1	-
Classificação ²	C ₄ S ₂	-

¹⁾ RAS (Relação de Adsorção de sódio). $\text{RAS} = \text{Na} / \sqrt{(\text{Ca} + \text{Mg})/2}$, onde Na, Ca e Mg são expressos em mmol L^{-1} .

²⁾ Classificação para uso agrícola conforme Richards (1954).

³⁾ Resolução CONSEMA 128/2006 para arroio Cascalho, Utresa, Estância velha (CONSEMA, 2006).

⁴⁾ Não detectado.

O solo coletado foi corrigido com a adição de dose equivalente a $1,3 \text{ t ha}^{-1}$ de corretivo ($\text{CaCO}_3 + \text{MgCO}_3$ na proporção em massa de 3:1) para aumentar o valor de pH para 5,5; conforme recomendações da CQFS-RS/SC (2004). Após o tempo médio de reação e estabilização de 30 dias, foi efetuada a adubação na base, com a aplicação de 50 kg ha^{-1} de P_2O_5 (superfosfato triplo) e 100 kg ha^{-1} de K_2O (KCl); quando as plantas estavam em estágio V4

(quatro folhas completamente expandidas) foi aplicado 2/3 da dose recomendada ($150 \text{ kg de N ha}^{-1}$, na forma de uréia) e 1/3 em V6-V7 (SOSBAI, 2012). As adubações foram feitas em todos os tratamentos. Foram semeadas 10 sementes de arroz (cultivar IRGA 424) e após a completa germinação, as plântulas foram desbastadas, deixando-se as três mais vigorosas por vaso. As plântulas foram irrigadas com água destilada, à capacidade de campo, até o estágio V3-V4. Em seguida, foram aplicados os tratamentos, concomitantemente ao início da utilização da lâmina de irrigação até o final do experimento. Para simular a retirada do sal que ocorreria em uma situação de campo, aos 18 e 46 dias após o alagamento, foi aplicada uma quantidade de água destilada equivalente a 100 mm de chuva (7 L vaso^{-1}), sendo o mesmo volume de chuva retirado por sifonamento. Na irrigação dos vasos foi mantida sempre uma lâmina de 10cm. Na Figura 6 são apresentados os volumes de irrigação em cada tratamento. A diferença de volume entre os tratamentos foi devida às diferenças no desenvolvimento das plantas. As quantidades de fertilizantes adicionados pela irrigação foram calculadas pelos volumes de irrigação de cada tratamento e pelo teor dos elementos no lixiviado industrial tratado (Tabela 12). Nos cálculos, foi considerada a massa de $2.000.000 \text{ kg ha}^{-1}$.

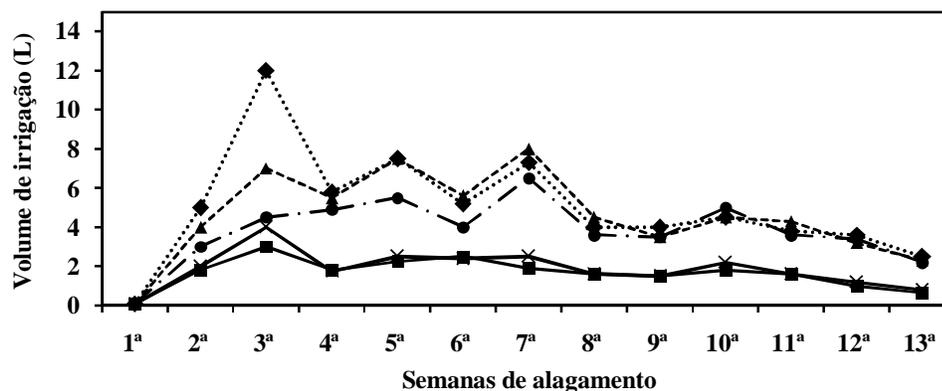


Figura 6. Volume de irrigação em 13 semanas de alagamento com diferentes proporções de lixiviado. (··♦··) T0, (-▲-) T25, (-●-) T50, (-x-) T75 e (-■-) T100, (médias de três repetições).

O número de perfilhos de cada planta foi contado no estágio vegetativo V7-V8. O teor de clorofila foi determinado na folha bandeira no final do estágio vegetativo, utilizando-se o clorofilômetro Minolta (SPAD-62), em 15 folhas por vaso. A esterilidade foi determinada por ocasião da colheita, a 126

dias após a emergência das plântulas, quando foram coletadas todas as panículas dos vasos, e, em seguida, separadas as espiguetas cheias das vazias. Contou-se o número de grãos vazios e calculou-se o percentual. Para o peso de mil grãos, contou-se ao acaso oito repetições de 100 grãos. O valor dessa determinação foi obtido multiplicando-se o peso médio de 100 grãos por 10, e expresso em gramas. A biomassa seca da parte aérea e os grãos foram secos (60°C), pesados, moídos e analisados conforme metodologia descrita por Tedesco et al. (1995) e os elementos determinadas por espectrometria de emissão atômica por plasma indutivamente acoplado (ICP).

Os resultados foram estudados pela análise da variância a 5% de probabilidade e as médias, quando apresentaram diferenças significativas, foram comparadas pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

4.4. Resultados e discussão

4.4.1. Nutrientes de plantas e Na adicionados pelo LIT

As quantidades de nutrientes (N, P, K, Ca, Mg e S) e de Na adicionados pelo lixiviado são apresentados na Tabela 13. As quantidades de nutrientes adicionadas foram calculadas com base no volume de lixiviado utilizado na irrigação e o teor médio de cada elemento no lixiviado. Observa-se que as quantidades de N e de K adicionadas pelo lixiviado, em qualquer uma das proporções, foram maiores que as recomendadas pela SOSBAI (2012). As quantidades de P adicionadas, entretanto, foram muito baixas (3 a 5 kg ha⁻¹) devido ao baixo teor do mesmo no lixiviado (Tabela 12).

Observa-se que o lixiviado, independentemente da dose adicionada, aportou grandes quantidades de nitrogênio e potássio para a o solo, muito além do considerado necessário para a obtenção de altos rendimentos da cultura (SOSBAI, 2012). Este aumento generalizado dos nutrientes adicionado pela irrigação pode explicar os altos valores de matéria seca quando da adição do lixiviado (Tabela 14). Diversos autores observaram que a aplicação de águas residuárias possibilitou maior adição de alguns nutrientes minerais do que a adubação convencional, podendo ser observado maior rendimento das culturas (Feigin et al., 1991; Fonseca et al., 2005).

Tabela 13. Quantidades totais (kg ha^{-1}) de nutrientes adicionados pela irrigação com o LIT durante o período experimental comparadas à recomendação regional (SOSBAI, 2012)

Trat.	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	CaO	MgO	S	Na	RAS
-----(kg ha^{-1})-----								
T25	330	3	300	78	117	32	1230	12,5
T50	547	5	498	129	194	52	2041	14,8
T75	398	4	316	94	141	38	1485	18,3
T100	465	5	422	110	165	44	1734	21,1
SOSBAI ¹	150	70	105	-	-	-	-	-

¹ Recomendações de adubação conforme a Sociedade Sul Brasileira de Arroz Irrigado (SOSBAI, 2012) para muito alta expectativa de rendimento de grãos.

4.4.2. Rendimento de plantas e componentes da produção

A adição do lixiviado industrial tratado afetou os componentes da produção, conforme sua concentração na água de irrigação (Tabela 14). A adição de 25% do lixiviado diluído aumentou a produção de matéria seca do arroz em 104% comparado ao T0, ao passo que na dose de 50% do lixiviado o aumento foi de 28%. Com maior adição de lixiviado, entretanto, o rendimento de matéria seca decresceu em relação à testemunha (T0).

A adição de lixiviado na água de irrigação reduziu o rendimento de grãos de $100,1 \text{ g vaso}^{-1}$ na testemunha (T0) para $1,6 \text{ g vaso}^{-1}$ no tratamento com adição de lixiviado sem diluição (T100) (Tabela 14). A esterilidade aumentou inversamente, de 6% no tratamento testemunha (T0) para 93% no tratamento com adição de lixiviado sem diluição (T100) (Tabela 14). O número de perfilhos por plantas diminuiu a aproximadamente quatro vezes no T100. A principal causa desta redução foi o aumento dos teores de sódio adicionados pela irrigação com o lixiviado, que afetam o equilíbrio osmótico e diminuem a disponibilidade de águas as plantas, além de provocar toxidez direta na disfunção e síntese de proteínas e enzimas do metabolismo vegetal (Taiz & Zeiger, 2004).

A campo provavelmente este decréscimo poderia ser menor, devido à possível traslocação da solução salina da irrigação para camadas de solo subjacente às raízes das plantas.

A esterilidade dos grãos pode ter sido o componente que mais contribuiu para o efeito negativo do lixiviado no arroz (Tabela 14), observado pela relação entre a mesma e o rendimento de grãos ($y=0,766x + 23,13$; $r^2=0,92$). O aumento da esterilidade devido à salinidade pode ocorrer pela redução da capacidade fotossintética, diminuição do acúmulo de assimilados

nos grãos e redução no enchimento de grãos pela oferta insuficiente de carboidratos as panículas, conforme relatado por Carmona et al (2011). As plantas sob estresse salino também fazem ajustes osmóticos com a produção de solutos orgânicos nas células das folhas para diminuir o componente osmótico e aumentar a absorção de água (Taiz & Zeiger, 2004). No entanto, para produzir esses solutos há uma grande demanda de fotoassimilados que seriam utilizados na produção de grãos. À medida que as plantas se desenvolvem ocorre maior evapotranspiração e há maior tendência de acumulação de sais na zona das raízes (Gratan et al., 2002). Essa situação pode ter ocorrido nos tratamentos T25 e T50, embora tenham produzido altas quantidades de fitomassa; no entanto, a esterilidade reduziu o rendimento de grãos.

A relação de adsorção de sódio (RAS), calculada conforme Richards (1954); da água de irrigação contendo LIT aumentou de 12,5 no tratamento T25 para 14,8 no tratamento T50 e 18,3 no tratamento T75, atingindo 21,1 no tratamento com adição de LIT sem diluição (Tabela 13).

O arroz irrigado por inundação do solo é uma cultura moderadamente sensível a salinidade, devendo a água de irrigação apresentar valores menores que 6 mS cm^{-1} (Bissani et al., 2008). Com base nos resultados da análise do lixiviado (Tabela 12), a água de irrigação utilizada no tratamento T25 poderia ser da classe C_3S_2 (salinidade alta – $1,7 \text{ mS cm}^{-1}$) e médio teor de Na (Richards, 1954), justificando-se, portanto, o decréscimo de 22% no rendimento de grãos, em relação a testemunha (T0). Já os demais tratamentos com maiores proporções de lixiviado na irrigação e maiores valores de CE e RAS apresentaram maiores reduções no rendimento de grãos.

Tabela 14. Rendimento de matéria seca da parte aérea e de grãos, esterilidade, peso de mil grãos, número de perfilhos e teor de clorofila (SPAD) de arroz irrigado com lixiviado industrial tratado em diferentes diluições

Trat.	Matéria Seca (g vaso ⁻¹)	Rendimento de grãos (g vaso ⁻¹)	Esterilidade (%)	Peso de mil grãos (g)	Número de perfilhos	Clorofila (SPAD)
T0	81,8 b*	100,1 a*	6,3 d*	22,5 a*	3,9 a*	19,1 c*
T25	167,7 a	78,3 b	24,0 c	17,0 b	3,7 a	39,9 b
T50	105,4 b	30,5 d	54,2 b	16,6 b	2,8 b	42,1 b
T75	70,4 c	8,5 c	71,1ab	15,8 b	2,3 bc	44,6ab
T100	27,5 d	1,6 d	92,3 a	15,6 b	1,1 c	48,1 a
CV (%)	22	7	7	10	8	4

*Médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente, (Tukey, $p < 0,05$).

Na Tabela 14, pode-se observar uma relação inversamente proporcional entre número de perfilhos e a concentração de lixiviado na irrigação. Os perfilhos de arroz são inibidos em altas concentrações salinas (Rodrigues et al., 2005; Melo et al., 2006) e também há relação linear com a ocorrência de perfilhos não produtivos (Castillo et al., 2007). O aumento do teor de clorofila e sua relação com o aumento do nitrogênio na folha do arroz confirma que possivelmente este nutriente tenha sido o principal responsável pelas maiores quantidades de matéria seca do arroz quando foi aplicado o lixiviado nos tratamentos T25 e T50 (Tabela 14). No T75 e T100, mesmo com diminuição na produção de matéria seca e de grãos, houve aumento nos teores de clorofila. O peso de mil grãos também diminuiu pela adição crescente de lixiviado. Estes resultados não confirmam a hipótese inicial do trabalho de que o lixiviado aumenta o rendimento da cultura.

4.4.3. Nutrientes e sódio absorvidos pelas plantas

Na Tabela 15, são apresentados os teores de macronutrientes (N, P, K, Ca, Mg e S) e de sódio na parte aérea das plantas de arroz. À exceção do potássio, pode-se observar um aumento da concentração dos mesmos com acréscimo do lixiviado na composição da água de irrigação. Estes aumentos podem ser devidos ao menor crescimento das plantas, indicando que a absorção de íons é menos prejudicada pela salinidade que a formação de tecidos vegetais.

O aumento dos teores de Ca e Mg no tecido do arroz também foi verificado por outros autores utilizando efluentes tratados na irrigação (Falkiner & Smith, 1997). Embora tenha sido feita calagem em todos os tratamentos, os irrigados com lixiviado apresentaram maiores teores de Ca e Mg no tecido.

Os teores de P nos tratamento com até 50% de lixiviado na água de irrigação foram inferiores aos teores considerados adequados pela CQFS-RS/SC (2004). Esse fato pode ser atribuído aos baixos teores de P no lixiviado (Tabela 12). No entanto, foram observados aumentos nos teores de P na fitomassa da parte aérea e do grão nas menores proporções do lixiviado na irrigação. Mesmo que a quantidade adicionada pelas proporções de irrigação seja baixa, o teor de 1 mg L^{-1} presente no lixiviado é considerado alto para a nutrição de plantas.

Convém salientar que os valores orientadores utilizados pela CQFS-RS/SC (2004) referem-se aos teores da folha bandeira, coletado no início do florescimento, em que os teores são maiores do que a biomassa total na colheita. O mesmo pode ser observado para os teores de nitrogênio.

Observou-se também que os teores de sódio foram altos nos tratamentos com adição de lixiviado devido à elevada salinidade (RAS).

As quantidades de macronutrientes absorvidos na biomassa da parte aérea das plantas são dadas na Tabela 15. Pode-se observar que, para todos os nutrientes, as quantidades absorvidas diminuíram com o aumento do lixiviado utilizado na irrigação. Este fato é devido à redução do crescimento da biomassa da parte aérea das plantas com aumento da proporção de lixiviado na irrigação.

Na Tabela 16 são mostrados os teores de macronutrientes (N, P, K, Ca, Mg e S) e de sódio nos grãos de arroz. Foram observados grandes translocações de N e P para os grãos; os teores de N foram semelhantes aos determinados na parte aérea das plantas, enquanto os teores de P foram maiores nos grãos do que na parte aérea das plantas.

Os nutrientes Ca, Mg, K e S e mesmo o Na foram pouco translocados para os grãos. Nos tratamentos com adição do LIT, os teores médios de K e de Na na parte aérea foram de 18 e 47 g kg^{-1} , respectivamente, enquanto nos grãos foram de 5 e 2 g kg^{-1} , respectivamente.

Tabela 15. Teores e quantidades absorvidas de macronutrientes e de sódio na biomassa da parte aérea de arroz irrigado com lixiviado industrial tratado em diferentes diluições

Trat	Teores (g kg ⁻¹)						
	N	Ca	K	Mg	Na	P	S
T0	4,8 d*	4,7 b**	16,8 ^{ns}	3,6 c**	3,3 c**	1,5 c**	0,8 d**
T25	16,4 c	6,7 a	15,8	5,8 b	41,3 b	1,7 bc	2,2 c
T 50	20,4 bc	7,6 a	16,7	6,5 ab	50,4 a	1,8 bc	2,9 bc
T75	25,1 ab	7,3 a	19,3	6,7 ab	48,5 a	2,8 ab	3,3 ab
T100	28,7 a	7,1 a	20,1	7,1 a	47,6 a	3,1 a	3,6 a
CV (%)	10	7	13	7	15	18	9
CQFS***	26-42	2,5-4,0	15-40	1,5-3,0	-	2,5-4,8	2-3

Trat	Quantidades absorvidas (mg vaso ⁻¹)						
	N	Ca	K	Mg	Na	P	S
T0	392e	382 d	1374c	294 d	270 e	123 c	65 c
T25	2750 a	1123 a	2650 a	973 a	6926 a	285 a	369 a
T 50	2150 b	801 b	1760 b	685 b	5312 b	190 b	306 a
T75	1767c	513 c	1359 c	472 c	3414 c	197 b	232 b
T100	764d	195 e	553 d	195 e	1301 d	85 d	99 c
CV (%)	13	17	22	18	30	28	23

* Tukey (0,01 =< p < 0,05).

** Tukey (p < 0,01).

*** Faixas de suficiência de macro e micronutrientes no tecido foliar para arroz irrigado (CQFS, 2004).

Tabela 16. Teores e quantidades absorvidas de macronutrientes e de sódio nos grãos de arroz irrigado com lixiviado industrial tratado em diferentes diluições

Trat	Teores (g kg ⁻¹)						
	N	Ca	K	Mg	Na	P	S
T0	11,1 c	0,3 c**	4,2	1,2 b**	1,1 b	3,2 b**	0,9 b**
T25	24,1 b	0,4 ab	5,8	1,8 a	2,0 a	4,2 a	1,4 a
T 50	26,3 ab	0,5 a	5,1	1,7 a	1,8 a	4,1 a	1,5 a
T75	27,7 a	0,6 a	5,0	1,8 a	1,4 b	3,9 ab	1,3 a
T100	28,2 a	0,6 a	5,0	1,8 a	2,2 a	4,0 a	1,3 a
CV (%)	5	14	12	10	23	7	5

Trat	Quantidades absorvidas (mg vaso ⁻¹)						
	N	Ca	K	Mg	Na	P	S
T0	1111 b	30 a	329 b	120b	110b	320 a	90 a
T25	1887 a	31 a	454 a	140a	157 a	329 a	110 a
T 50	802 c	15 b	168 c	52c	55 c	125 b	46 b
T75	235 d	5 c	42 d	15d	12 d	33 c	11 c
T100	45 e	2 c	6 e	3e	3 e	6 d	2 c
CV (%)	29	18	18	4	25	33	39

* Tukey (0,01 =< p < 0,05).

** Tukey (p < 0,01).

Os teores de alguns micronutrientes (Cu, Zn, Fe e Mn) na biomassa da parte aérea e dos grãos de arroz são apresentados na Tabela 17. Pode-se observar que, em geral, os teores determinados situaram-se na faixa de variação normal na parte aérea das plantas de arroz (CQFS-RS/SC, 2004). Estas variações são bastante amplas para Fe e Mn (70-300 e 30-600,

respectivamente) devido à solubilização de compostos do solo com a manutenção de ambiente de redução do solo pela irrigação (Bissani et al., 2008).

A translocação dos dois nutrientes para os grãos, entretanto é baixa; na média dos tratamentos T0 e T25 foram determinados teores de 35 e 55 mg kg⁻¹ de Fe e Mn, respectivamente. Os teores de Zn e de Cu, nas médias dos tratamentos T0 e T25, foram semelhantes entre os determinados na biomassa da parte aérea e os grãos das plantas de arroz (42 e 32; 3,2 e 4,2; respectivamente, para Zn e Cu, e entre biomassa e grãos) (Tabela 17).

Tabela 17. Teores de micronutrientes (Fe, Mn, Cu e Zn) e de alguns metais na biomassa da parte aérea e nos grãos de arroz irrigado com lixiviado industrial tratado em diferentes diluições

	Parte aérea						
	-----g kg ⁻¹ -----						
	Fe	Mn	Cu	Zn	Cr	Ni	Cd
T0	270 b**	165 c**	1,5	41,5 b**	11,5	6,0 a**	nd
T25	380 a	450 b	5,0	42,0 b	9,5	3,0 b	nd
T 50	335 ab	735 a	8,5	48,0 a	17,0	3,0 b	nd
T75	290 ab	735 a	7,0	47,0 a	17,5	3,5 b	nd
T100	310 ab	575ab	5,5	36,5 b	21,5	3,5 b	nd
CV (%)	12	15	29	11	32	13	
CQFS**	70-300	30-600	5-20	20-100	-	-	-

	Grãos						
	-----g kg ⁻¹ -----						
	Fe	Mn	Cu	Zn	Cr	Ni	Cd
T0	40	35 c**	2,5 c**	25,0 c**	3,5 a**	2,5 a**	nd
T25	30	75 b	6,0 b	38,0 b	1,0 b	0,5 b	nd
T 50	30	95 ab	8,5 a	47,5 a	1,0 b	0,5 b	nd
T75	25	115 a	8,5 a	47,0 a	1,0 b	0,5 b	nd
T100	25	115 a	7,0 ab	46,0 a	0,5 b	0,5 b	nd
CV (%)	19	10	11	4	50	32	

* Tukey (0,01 =< p < 0,05).

** Tukey (p < 0,01).

*** Faixas de suficiência de macro e micronutrientes no tecido foliar para arroz irrigado (CQFS, 2004).

nd Não detectado. Menor que 0,01mg kg⁻¹.

4.4.4. Teores de nutrientes e condutividade elétrica (CE) do solo após cultivo do arroz

Em relação ao solo, a irrigação com lixiviado tratado promoveu o aumento de alguns nutrientes do solo (Tabela 18). No T25 e T50, observaram-se os menores teores de P no solo e possivelmente o maior desenvolvimento das plantas e a maior exportação de nutrientes contribuíram para esta

diminuição, pois as quantidades de P_2O_5 adicionadas pelo lixiviado foram baixas. Herpin et al. (2007), em Latossolo cultivado com café e irrigado com efluente tratado contendo 6 mg L^{-1} de P, verificaram aumento nos teores de P disponíveis no solo. Para o K, observou-se que a irrigação com o lixiviado aumentou os teores de K trocáveis. No entanto, os teores de K na fitomassa do arroz não diferiram estatisticamente ($p>0,05$), reafirmando a hipótese do antagonismo do Na. Os teores de Ca e Mg trocáveis não apresentaram diferença estatística ($p>0,05$) (Tabela 18). Possivelmente no T50, onde se constatou maior adição de CaO e MgO a maior saída desses elementos no percolado e a exportação pela maior produção de matéria seca contrabalançaram as maiores adições destes nutrientes. Entretanto, Herpin et al.(2007) verificaram o aumento dos teores de Ca, Mg e Falkiner & Smith (1997) constaram aumento de K em solos com aplicação de águas residuárias domésticas tratadas.

As altas adições de Na pela irrigação (Tabela 12) promoveram aumento nos teores de Na no solo, acompanhado de aumentos nos valores de condutividade elétrica (Tabela 18). Devido à maior concentração de lixiviado no T100 esperavam-se maiores quantidades adicionados durante o ciclo e consequentemente maiores teores de Na no solo. No entanto, o alto teor inicial de Na no T75 e T100 inibiu o crescimento e diminuiu a transpiração das plantas, consequentemente demandando menor volume de irrigação e menor adição final de Na. Conforme Leal et al. (2009), as águas residuárias podem aumentar a sodicidade dos solos, causar desbalanços nutricionais em plantas e afetar atributos físicos do solo, como dispersão de argila e infiltração de água no solo. Segundo Herpin et al, (2007) e Leal et al.(2009), é importante a adição de íons divalentes em solos com disposição de águas residuárias via calagem ou gessagem. Estes íons promovem a aproximação e floculação das partículas do solo, atenuando o risco de dispersão de argilas, e diminuem os desbalanços nutricionais ocasionados pela alta salinidade.

Tabela 18. Teores de P, K, Ca e Mg e Na e valor de CE no solo após ciclo de 126 dias de arroz irrigado por alagamento com lixiviado industrial tratado em diferentes proporções

Trat.	P	K	Ca	Mg	Na	CE
	-----mg dm ⁻³ -----		-----cmol _c dm ⁻³ -----		mg dm ⁻³	μS cm ⁻¹
T0	22 ab ¹ (A)	16 c ¹ (B)	2,9 (A)	1,7 (A)	42 c ¹	94 b ¹
T25	16 b (M)	99 b (MA)	2,7 (A)	2,0 (A)	887 ab	622 a
T50	18 b (M)	136 ab (MA)	2,7 (A)	2,1 (A)	1033 a	786 a
T75	30 a (A)	151 a (MA)	2,9 (A)	2,2 (A)	740 b	501 a
T100	30 a (A)	162 a (MA)	3,1 (A)	2,3 (A)	688 b	586 a
CV(%)	15	12	12	15	15	32

* Tukey (p < 0,05).

¹⁾ Interpretação conforme a CQFS-RS/SC(2004): MA = muito alto; A = alto; M = médio e B = baixo.

4.5. Conclusões

1 - A irrigação com o lixiviado industrial nas proporções intermediárias (25 e 50%) aumenta a produção de matéria seca pelo maior aporte de macro e micronutrientes; diminuindo, entretanto, o rendimento de grãos.

2 - A elevada esterilidade dos grãos de arroz está relacionada à elevada salinidade provocada pelo maior aporte de sódio proveniente da irrigação com lixiviado.

3 - Os componentes da produção e o rendimento de grãos de arroz são afetados pelo aporte de lixiviado industrial devido ao efeito do sódio no solo e ao aumento da salinidade.

4 - O lixiviado deve ser aplicado em proporções inferiores a 25% para evitar altos níveis de sodicidade e a diminuição dos rendimentos de grãos, garantindo uma alternativa de disposição de efluentes de menores impactos negativos a sodicidade do solo e que beneficie a nutrição de plantas.

5. CAPÍTULO IV - ALTERAÇÕES ELETROQUÍMICAS E DINÂMICA DE NUTRIENTES EM SOLUÇÃO DE SOLO CULTIVADO COM ARROZ IRRIGADO COM LIXIVIADO INDUSTRIAL TRATADO

5.1. Resumo

A utilização de efluentes industriais tratados na irrigação do arroz por alagamento pode provocar alterações eletroquímicas e aumentar o teor de nutrientes na solução do solo. Para testar esta hipótese, o presente trabalho teve por objetivo avaliar a dinâmica dos atributos químicos e eletroquímicos da solução do solo sob cultivo de arroz irrigado com lixiviado industrial tratado, contendo 820 mg L^{-1} de Na. O experimento foi conduzido em casa-de-vegetação, utilizando-se como unidades experimentais vasos preenchidos com 20 kg de solo, em delineamento experimental em blocos casualizados, com três repetições. Os tratamentos foram: controle (irrigação com água destilada) e quatro proporções do lixiviado (25%, 50%, 75% e 100%). As coletas de solução do solo foram feitas semanalmente a partir do quarto dia após o início do alagamento (DAA) até 84 DAA, com intervalo de sete dias entre as coletas. A solução do solo foi amostrada em coletores de PVC com 50 mm de diâmetro e profundidade de 10 cm e analisada para os principais nutrientes e o sódio, bem como para a demanda bioquímica de oxigênio (DBO), relação de absorção de sódio (RAS), condutividade elétrica (CE) e potencial redox (E_H). A irrigação com o lixiviado aumentou os teores de potássio, cálcio, magnésio, enxofre, fósforo, amônio, nitrato e o Na, assim como os valores da RAS e o valor da condutividade elétrica, esta em níveis considerados danosos para as plantas. Foi observada diminuição do potencial redox na solução do solo pela irrigação com lixiviado industrial tratado. Os teores de DBO_5 e o amônio

diminuíram com o tempo de alagamento. Em proporções menores que 25% o lixiviado industrial tratado pode aumentar os teores de nutrientes em solução sem que o sódio atinja níveis críticos para as plantas.

Palavras-chave: águas residuárias, *Oriza sativa*, potencial redox, nitrogênio, DBO₅

5.2. Introdução

Os efluentes industriais tratados inadequadamente estão entre os principais responsáveis pela contaminação hídrica do delta do Jacuí, onde deságuam três dos dez rios mais poluídos do Brasil (IBGE, 2010). Observa-se grande contribuição de fontes pontuais e difusas de poluição, com destaque para as águas residuárias e o alto teor de carbono orgânico dissolvido, altos teores de N, sais e outros compostos (Fonseca et al., 2007). Nestas condições, verifica-se a diminuição nos teores de oxigênio dissolvido nas águas e os problemas decorrentes como morte de peixes e outros desequilíbrios nos mananciais hídricos (Feigin et al., 1991; Al-Omari & Fayyad, 2003).

Alternativas para a disposição de águas residuárias são necessárias para a redução dos desequilíbrios em corpos d'água (Hamilton et al., 2007). O uso agrícola dos efluentes industriais tratados têm grande potencial (Feigin et al., 1991), pois os nutrientes presentes nessas águas podem favorecer o desenvolvimento de plantas como o arroz. Esta cultura é um cereal de importância econômica, produzido em solos de várzea sob irrigação por alagamento, predominantemente nos estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina (SOSBAI, 2012). A irrigação com águas residuárias aumenta a absorção de N, P, K e outros elementos pelas plantas com aumento no rendimento das culturas (Fonseca et al., 2007). Em contrapartida, alguns sais e elementos, como o sódio, encontram-se em altas concentrações em efluentes tratados e podem atuar como agentes dispersantes da estrutura do solo e comprometem o desenvolvimento de plantas (Leal et al., 2007; Blum et al., 2011). Deve se levar em conta ainda que os ambientes de várzeas encontram-se próximos dos rios e do lençol freático e exigem um monitoramento constante dos potenciais contaminantes aplicados com as águas residuárias.

Além dos possíveis problemas da disposição de águas residuárias para a irrigação do arroz, o alagamento também altera características eletroquímicas da solução do solo. Com a inundação ocorre rápido consumo de oxigênio e uma transição da população microbiana aeróbia para anaeróbia com redução dos compostos oxidados, utilizados como aceptores de elétrons, alterando a dinâmica dos íons em solução (Ponamperuma 1972; Sousa, 2001). Elementos como sais, nitrogênio em formas minerais e carbono orgânico dissolvido (COD) encontram-se em altas concentrações em efluentes tratados (Fonseca et al., 2005) e este último altera a velocidade das reações redox do solo (Camargo et al., 1993). Os altos teores de Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} e K^+ encontrados nos efluentes, também modificam a composição da solução e podem afetar o desenvolvimento de plantas de arroz. Com base nestas constatações, o presente trabalho teve por objetivo avaliar as alterações eletroquímicas e de nutrientes na solução do solo sob cultivo de arroz irrigado por inundação com lixiviado industrial tratado em diferentes diluições.

5.3. Material e métodos

O experimento foi conduzido em casa-de-vegetação nas instalações do Departamento de Solos da Faculdade de Agronomia (UFRGS). As unidades experimentais foram constituídas por vasos com 20 L de capacidade e preenchidos com 20 kg de solo. Os tratamentos foram delineados em blocos casualizados, com três repetições e consistiram de composições de irrigação com as seguintes proporções: controle (100% de água destilada e 0% de lixiviado), T25 (75% de água destilada e 25% de lixiviado), T50 (50% de água destilada e 50% de lixiviado), T75 (25% de água destilada e de 75% lixiviado) e T100 (0% de água destilada e 100% lixiviado). O solo utilizado foi classificado como Gleissolo Háplico (Embrapa, 2006), que após coletado foi analisado química e fisicamente de acordo com Tedesco et al., (1995). Este solo continha 17% de argila, pH (H_2O) de 4,7 e 2,3 g kg^{-1} de matéria orgânica. Os teores de Ca, Mg, Al e Mn trocáveis em KCl (1 mol L^{-1}) e o valor H+Al expressos em $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ foram respectivamente de 1,3; 0,3; 0,9; 0,2 e 4,4. Os valores de P e K disponível (Mehlich-1) e S disponível (CaHPO_4) foram de 9,1; 47 e 17,0 mg dm^{-3} , respectivamente.

O lixiviado industrial tratado (Tabela 19) foi coletado na central de recebimento de resíduos industriais UTRESA localizada em Estância Velha-RS. O lixiviado é uma água residuária originada da decomposição dos resíduos sólidos, especialmente aparas de couro, contidos em células de aterro. Após geração os lixiviados são bombeados para a estação de tratamento de efluentes (ETE) onde recebem tratamentos primário e secundário. Na etapa subsequente, são contidos em lagoa de estabilização antes do lançamento nos corpos d'água, de onde foram coletados para aplicação nos experimentos.

O solo coletado foi corrigido com a adição de dose equivalente a $1,3 \text{ t ha}^{-1}$ de corretivo ($\text{CaCO}_3 + \text{MgCO}_3$ na proporção 3:1) para aumentar o pH a 5,5; conforme recomendações da CQFS-RS/SC (2004). Após o tempo médio de reação e estabilização de 30 dias, foi efetuada a adubação na base, com a aplicação de 50 kg ha^{-1} de P_2O_5 (superfosfato triplo) e 100 kg ha^{-1} de K_2O (KCl) e quando a planta estava em estágio V4 (quatro folhas completamente expandidas) foi aplicado 2/3 da dose recomendada ($150 \text{ kg de N ha}^{-1}$, na forma de uréia) e 1/3 em V6-V7 (SOSBAI, 2012) em todos os tratamentos. As adubações foram feitas em todos tratamentos. Foram semeadas 10 sementes de arroz, cultivar IRGA 424, e após a completa germinação as plântulas foram desbastadas deixando as três mais vigorosas por vaso. As plântulas foram irrigadas com água destilada, à capacidade de campo, até o estágio V3-V4. Em seguida, foram aplicados os tratamentos, concomitantemente ao início da aplicação da lâmina de irrigação, até o final do experimento. Para simular a retirada de sal que ocorreria em uma situação de campo, aos 18 e 46 dias após o alagamento (DAA) foi aplicada quantidade equivalente a 100 mm de chuva (7 L vaso^{-1}), sendo o mesmo volume de solução do solo retirado na parte inferior do vaso por sifão. A irrigação dos vasos sempre manteve uma lâmina de 10 cm. Na Figura 7 são apresentados os volumes de irrigação em cada tratamento. A diferença de volume entre os tratamentos se deve às diferenças no desenvolvimento das plantas. As quantidades de fertilizantes adicionados pela irrigação foram calculadas pelos volumes de irrigação de cada tratamento e pelo teor médio dos elementos no lixiviado industrial tratado. Posteriormente se estimou as doses considerando a massa de $2.000.000 \text{ kg ha}^{-1}$ de solo.

Tabela 19. Características do lixiviado industrial tratado (LIT) e padrões para lançamento em corpos hídricos

Parâmetro/unidade	Valor	Padrão de Lançamento ³
pH	7,9	6,0 - 9,0
N Total Kjeldahl (mg L ⁻¹)	217	20
Ca (mg L ⁻¹)	37	-
Mg (mg L ⁻¹)	47	-
K (mg L ⁻¹)	120	-
Na total (mg L ⁻¹)	820	-
S (mg L ⁻¹)	21	-
P total (mg L ⁻¹)	1,0	2,9
Condutividade elétrica (µs cm ⁻¹)	6810	-
DQO (mg L ⁻¹)	280	330
DBO ₅ (mg L ⁻¹)	100	110
RAS ¹	21,1	-
Classificação ²	C ₄ S ₂	-

¹) RAS (relação de adsorção de sódio). $RAS = Na / \sqrt{(Ca + Mg) / 2}$, onde Na, Ca e Mg são utilizados em mmol L⁻¹.

²) Classificação para uso agrícola conforme Richards (1954).

³) Resolução CONSEMA 128/2006 para arroio Cascalho, Utresa, Estância Velha - RS (CONSEMA, 2006).

Coletores de solução do solo foram instalados nos vasos na profundidade de 10 cm. Os coletores consistiram de mangueiras de PVC de 5 mm de diâmetro conectadas a tubos coletores de PVC de 50 mm de diâmetro e 40 mm de comprimento, recobertos nas extremidades com tela de nylon (Silva et al., 2003). Pela extremidade superior da mangueira, extraíam-se, aproximadamente 40 mL de solução utilizando-se uma seringa de 10 mL. As coletas de solução do solo foram realizadas a partir do quarto dia após o alagamento (DAA), até 88 DAA, num intervalo de sete dias entre as coletas. A solução do solo foi coletada com seringa em um frasco isolado do contato com o ar onde foi determinado o potencial redox com eletrodo de platina (Mettler Toledo SG2) aferido com soluções tampão de pH 4,0 e 7,0 e convertida para E_H pelo software do equipamento conforme manual de operação. Logo após a coleta, no laboratório, foram determinados os valores de pH com eletrodo de vidro e condutor Ag/AgCl (Digimed DM20) calibrado com solução tampão de pH 4,0 e 7,0. A condutividade elétrica foi determinada com eletrodo de platina (Digimed DM31) calibrado com solução padrão de 1412 µS cm⁻¹. Posteriormente, as amostras da solução do solo foram analisadas conforme metodologia descrita por Tedesco et al. (1995) e determinadas por espectrometria de emissão atômica por plasma indutivamente acoplado (ICP). O cálculo da razão de adsorção de sódio foi determinado conforme Richards (1954). Os valores de DBO₅ foram determinados pelo método respirométrico 5210D (APHA, 2010).

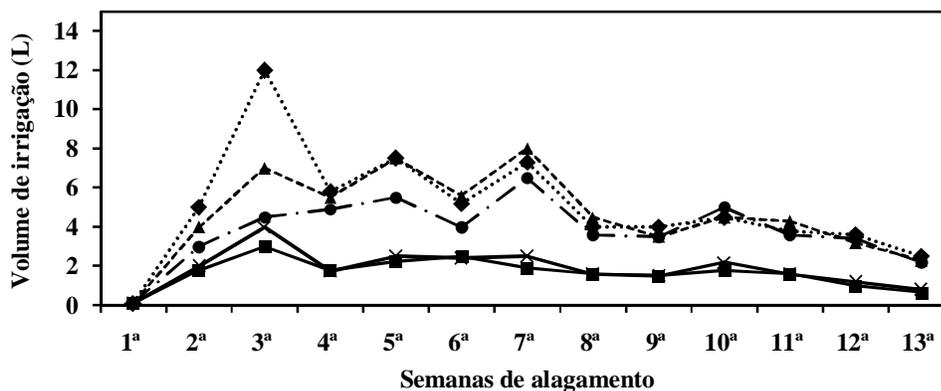


Figura 7. Volume de irrigação em 13 semanas de alagamento com diferentes proporções de lixiviado. (·♦·) T0, (-▲-) T25, (-●-) T50, (-x-) T75 e (-■-) T100. (média de três repetições).

Os resultados foram estudados pela análise da variância a 5% de probabilidade e as médias, quando significativas, foram comparadas pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

5.4. Resultados e discussão

A irrigação com o lixiviado alterou significativamente ($p < 0,05$) os indicadores eletroquímicos e a dinâmica dos nutrientes avaliados e estes resultados estão relacionados às quantidades de carbono orgânico dissolvido e de nutrientes aportados pela irrigação (Tabela 20; Figuras 8, 9, 10 e 11). Os maiores teores de nutrientes foram observados quando foram adicionadas menores quantidades de lixiviado, devido provavelmente ao fato que o sódio inibiu as plantas quando foi adicionado mais lixiviado. Nesta condição verificou-se a diminuição da evapotranspiração, e conseqüentemente demandou um menor volume de irrigação, comparado a adição de 25% do lixiviado tratado. O lixiviado aportou quantidades elevadas de nutrientes para o solo, muito além do considerado necessário para a obtenção de altos rendimentos da cultura (SOSBAI, 2012). Os valores de carbono orgânico dissolvido adicionados situaram-se entre 110 a 183 kg ha⁻¹, com uma média de 153 kg ha⁻¹ e não variando muito entre os tratamentos. Observou-se que além dos nutrientes, as quantidades de sódio adicionada foram considerados tóxicos ou deletérios para a cultura (Fonseca et al., 2005; Leal et al., 2009) (Tabela 20).

Tabela 20. Quantidade total de fertilizantes minerais, carbono orgânico dissolvido (COD) e de sódio adicionados pela irrigação com o LIT durante o período experimental comparado a recomendação regional (SOSBAI, 2012)

Trat.	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	CaO	MgO	S	COD	Na
-----kg ha ⁻¹ -----								
T25	330	3	300	78	117	32	110	1230
T50	547	5	498	129	194	52	183	2041
T75	398	4	316	94,5	141	38	165	1485
T100	465	5	422	110	165	44	155	1734
SOSBAI ²	150	70	105	-	-	-	-	-

¹Doses estimadas a partir das unidades experimentais, com 20L de solo para 1 ha (2.000.000 kg).

² Recomendações de adubação segundo a Sociedade Sul Brasileira de Arroz Irrigado (SOSBAI) paramuito alta expectativas de rendimentos de grãos.

Em relação aos principais macronutrientes, a irrigação com o lixiviado aumentou os teores de fósforo, enxofre, amônio e nitrato em solução (Figura 8). O tratamento controle (T0) apresentou teores de P menores que 0,3 mg L⁻¹ ao passo que onde foi adicionado o lixiviado os teores de fósforo situaram-se entre 0,3 e 0,8 mg L⁻¹ na maioria do período de alagamento (Figura 8A). O teor de P do lixiviado (Tabela 19) pode ter sido o responsável direto por estes valores, bem como indiretamente pela redução de óxidos de ferro e liberação de P, decorrente do alagamento (não avaliado no presente trabalho). Apesar do maior aporte de P pelo lixiviado, estes valores ainda são muito abaixo do que o recomendado para a cultura.

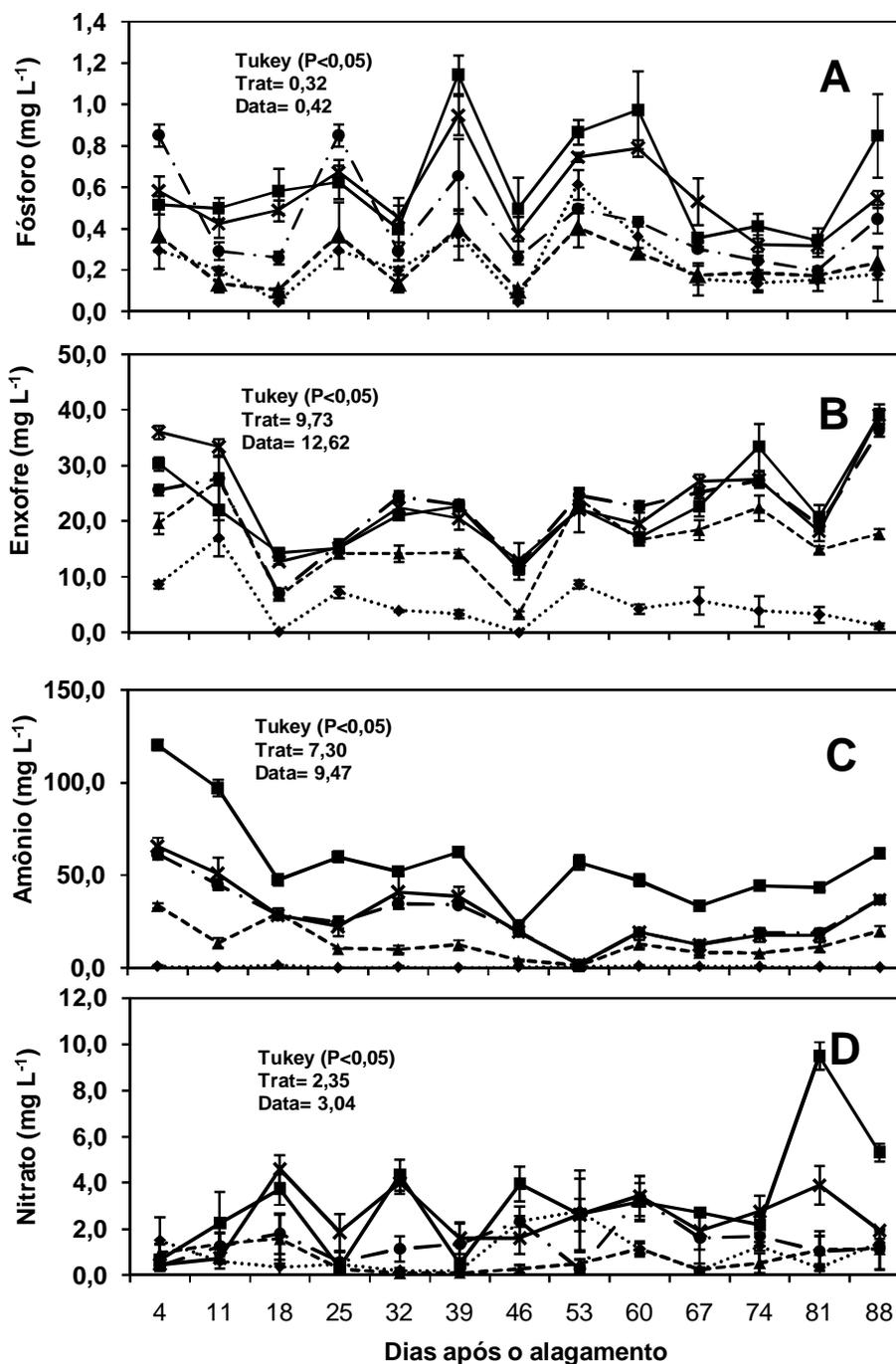


Figura 8. Valores de fósforo (A), enxofre (B), amônio (C) e nitrato (D) na solução do solo sob irrigação com lixiviado industrial tratado (LIT) em diferentes proporções, em 88 dias de alagamento. (◊) T0, (▲) T25, (●) T50, (×) T75 e (■) T100. Barras verticais indicam erro padrão. Os valores de trat e data nos gráficos indicam os valores de diferença mínima significativa (dms) para os tratamentos e datas, respectivamente, pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

Os teores de enxofre na solução do solo irrigado com lixiviado também aumentaram e tiveram grande contribuição pelo lixiviado que continha 21 mg L^{-1} de S. Os valores de enxofre decresceram nas primeiras semanas de alagamento, estabilizando posteriormente e aumentando no final, principalmente nos tratamentos onde o lixiviado foi adicionado (Figura 8B). Este decréscimo pode estar relacionado à redução de formas oxidadas de enxofre (SO_4^{2-}), que na sequência termodinâmica pode ter sido utilizado como eletroceptor na respiração anaeróbia dos microrganismos. Na ausência de outros aceptores mais oxidados como o nitrato, a redução do S pode ocorrer, principalmente em pH 5-9,0, gerando gases como o ácido sulfídrico (H_2S). Em baixas concentrações, este gás é altamente tóxico para plantas de arroz irrigado (Camargo et al., 1993).

Em relação aos teores de amônio, verificaram-se os maiores valores no início do alagamento e a diminuição posterior com o alagamento (Figura 8C). Este decréscimo pode estar relacionado à absorção pelas plantas, a oxidação na rizosfera e a difusão para a zona reduzida, com posterior desnitrificação para formas gasosas. O maior enraizamento das plantas na metade final do alagamento pode ter aumentado as reações de desnitrificação e também causado uma maior absorção de amônio e nitrato pelas plantas. Além desses fatores, é possível que o menor volume de irrigação (Figura 7) no período final de alagamento também contribuiu para a diminuição dos teores de amônio em solução.

Observou-se também pequeno aumento nos teores de nitrato nos tratamentos irrigados com lixiviado (Figura 8D). A maioria dos valores observados situaram-se na faixa de 1 a 4 mg L^{-1} , enquanto no tratamento controle os teores foram inferiores a 1 mg L^{-1} . Em solos alagados, os teores de nitrato são baixos (Ponnamperuma, 1972), no entanto, é provável que a disponibilidade de amônio constante pela irrigação com o lixiviado nas zonas oxidadas como a rizosfera e a camada superficial do solo contribuiu para a nitrificação e aumento dos teores de NO_3^- . Holzschuh et al. (2011) verificaram que o nitrato, embora em proporção menor que o amônio, tem função importante na absorção de N em arroz irrigado.

A dinâmica de nutrientes importantes como o potássio, cálcio e o magnésio presentes na solução do solo também foi avaliada (Figura 9), bem

como o sódio, abundante no lixiviado e principal problema para a cultivo do arroz. Os teores de potássio na solução do solo (Figura 9A) são significativamente maiores nos tratamentos irrigados com o lixiviado e estes valores estão relacionados às grandes quantidades totais de K_2O adicionadas nos tratamentos irrigados com lixiviado (Tabela 20). Aos 18 e 46 dias após o alagamento (DAA), por efeito da simulação de chuva, de 100 mm em cada data, verificou-se uma redução acentuada dos íons em solução devido ao efeito da diluição causada pelo incremento de água nos vasos (Figura 7). A incidência de chuva é um ponto chave em solos que recebem disposição de águas residuárias, pois reduzem, em parte, o efeito salino, especialmente do sódio (Fonseca et al., 2005; Leal et al., 2009). O potássio presente nas águas residuárias contribui para a fertilidade, especialmente de solos tropicais com baixa CTC e baixa fertilidade natural (Fonseca et al., 2005). Os aumentos dos teores de Fe^{2+} e Mn^{2+} ocasionado pela redução dos óxidos podem ter deslocado maiores quantidades de K do complexo sortivo (Ponampereuma, 1972). Além do teor de K do lixiviado, é possível que os altos teores de Na em solução adicionados pelo lixiviado tenham deslocado, também, parte do K dos sítios de troca e contribuído para o aumento do K em solução (Ribeiro et al., 2009). À exceção das simulações de chuva, os teores de K em solução não apresentaram grandes oscilações nas datas de coleta, verificando-se teores na faixa de 50 a 200 $mg L^{-1}$ nos tratamentos irrigados com lixiviado e menor que 20 $mg L^{-1}$ no T0.

A irrigação com lixiviado também aumentou os teores de cálcio na solução (Figura 9B) devido às altas quantidades de Ca adicionados pela irrigação com lixiviado (Tabela 20). Nos tratamentos irrigados com lixiviado os teores observados situaram-se na faixa de 200 a 400 $mg L^{-1}$, enquanto que o T0 foi de 100 a 200 $mg L^{-1}$. A partir dos 53DAA os teores de cálcio observados no T25 e T50 foram maiores que o T100. Sugere-se que esse efeito seja pelo maior desenvolvimento das plantas irrigadas com concentrações intermediárias de lixiviado (T25 e T50) resultando em maior transpiração e volume de irrigação (Figura 7). Os altos teores de Na em solução também podem deslocar o Ca^{2+} dos sítios de troca (Ribeiro et al., 2009).

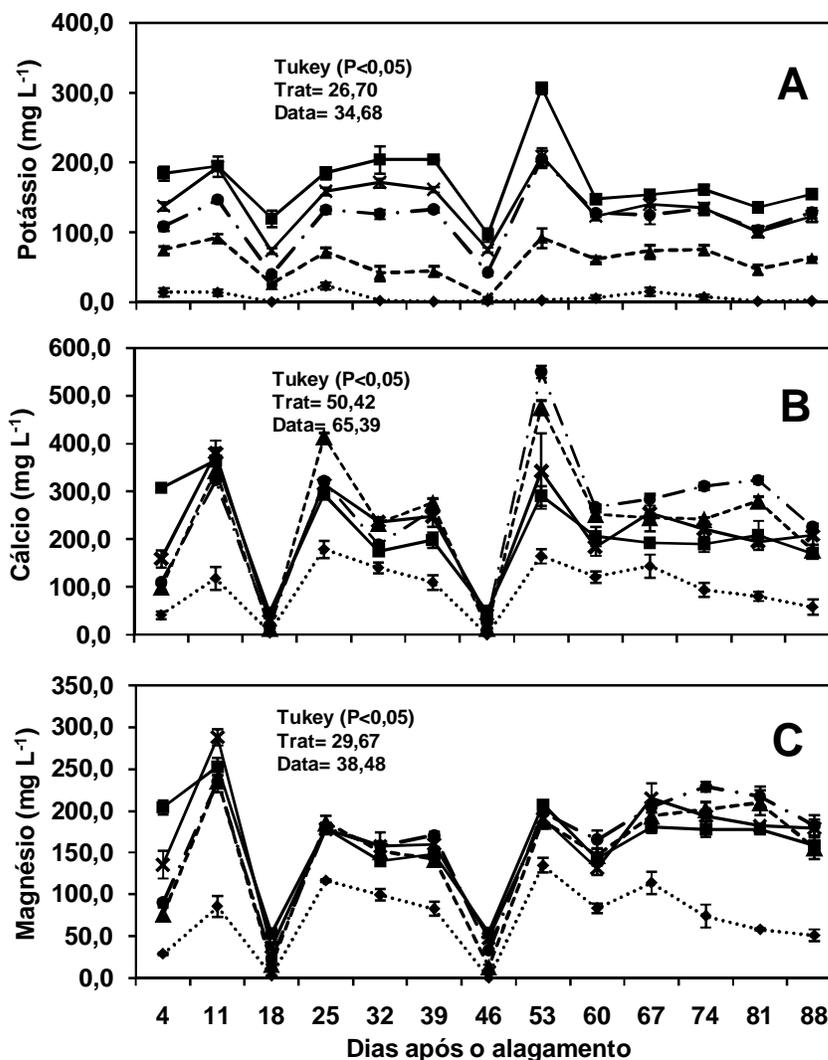


Figura 9. Teores de potássio (A), cálcio (B) e magnésio (C) na solução do solo sob irrigação com lixiviado industrial tratado (LIT) em diferentes proporções durante 88 dias de alagamento. (·◆·) T0, (-▲-) T25, (-●-) T50, (-x-) T75 e (-■-) T100. Barras verticais indicam erro padrão. Os valores de trat e data nos gráficos indicam os valores de diferença mínima significativa (dms) para os tratamentos e datas, respectivamente, pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

A irrigação com lixiviado também aumentou os teores de Mg^{2+} em solução (Figura 9C), de forma semelhante ao cálcio. Nos tratamentos com irrigação de água residuária, foram observados teores na faixa de 150 a 230 $mg L^{-1}$, com exceção da primeira semana e das datas de simulação de chuva e no T0 teores na faixa de 50 a 130 $mg L^{-1}$. Além da adição do magnésio pelo lixiviado, os altos teores de Na^{+} por efeito de massa podem ter contribuído para deslocar o Mg^{2+} do complexo de troca, bem como para os demais cátions

(Ribeiro et al., 2009). Outros trabalhos também relatam os aumentos dos teores de Ca^{2+} e Mg^{2+} no solo a partir da irrigação com águas residuárias (Fonseca et al., 2005; Rana et al. 2008; Blum et al., 2012).

Os teores de sódio em solução também aumentaram sob irrigação com o lixiviado (Figura 10A). Até os 18 DAA, os maiores teores foram observados no T100. Após esse período, constataram-se maiores teores de Na nos tratamentos com diluição intermediária (T25 e T50) devido ao maior volume de irrigação, conforme observado para o Ca e Mg. No início da irrigação com lixiviado, independente da diluição, observaram-se teores próximos a 1500 mg L^{-1} . As simulações de chuva aos 18 e 46 DAA não diminuíram o efeito salino da irrigação com o lixiviado. Assim, sob irrigação contínua, os teores de sódio observados aos 56 DAA foram próximos a 3000 mg L^{-1} , sendo considerados prejudiciais ao desenvolvimento de plantas (Kirk, 2001; Rana et al., 2010). Vários autores têm verificado que a adição de águas residuárias ao solo contribui para o aumento da sodicidade do solo (Fonseca et al., 2005; Rana et al., 2010; Blum et al., 2012).

A razão de adsorção de sódio (RAS) observada foi o reflexo dos altos teores de sódio (Figura 10B). Nos tratamentos irrigados com lixiviado, as RAS's, na grande maioria, foram superiores a 20, indicando o alto teor salino da solução do solo irrigado com esse lixiviado tratado. Embora tenham sido feitas simulações de chuva aos 18 e 46 DAA, as mesmas não foram suficientes para reduzir os teores de Na^+ . Os altos teores de Na^+ , pela irrigação com águas residuárias, podem aumentar o teor de argila dispersa, obstruir poros, dificultar a penetração radicular, diminuir a condutividade hidráulica do solo e afetar negativamente o desenvolvimento de plantas (Coppola et al., 2004; Rana et al., 2010).

Valores de RAS maiores que 10 são críticos e acima de 20 são classificados como altamente críticos quanto à salinidade e essas águas residuárias não indicadas para utilização na agricultura (Richards, 1954). Conforme Hamilton et al. (2007) efluentes tratados industriais e domésticos possuem valores médios de RAS's na faixa de 4,5 a 8 e valores de RAS acima de 3 podem afetar negativamente as características do solo, especialmente quando a condutividade elétrica do solo for menor do que 1 mS cm^{-1} .

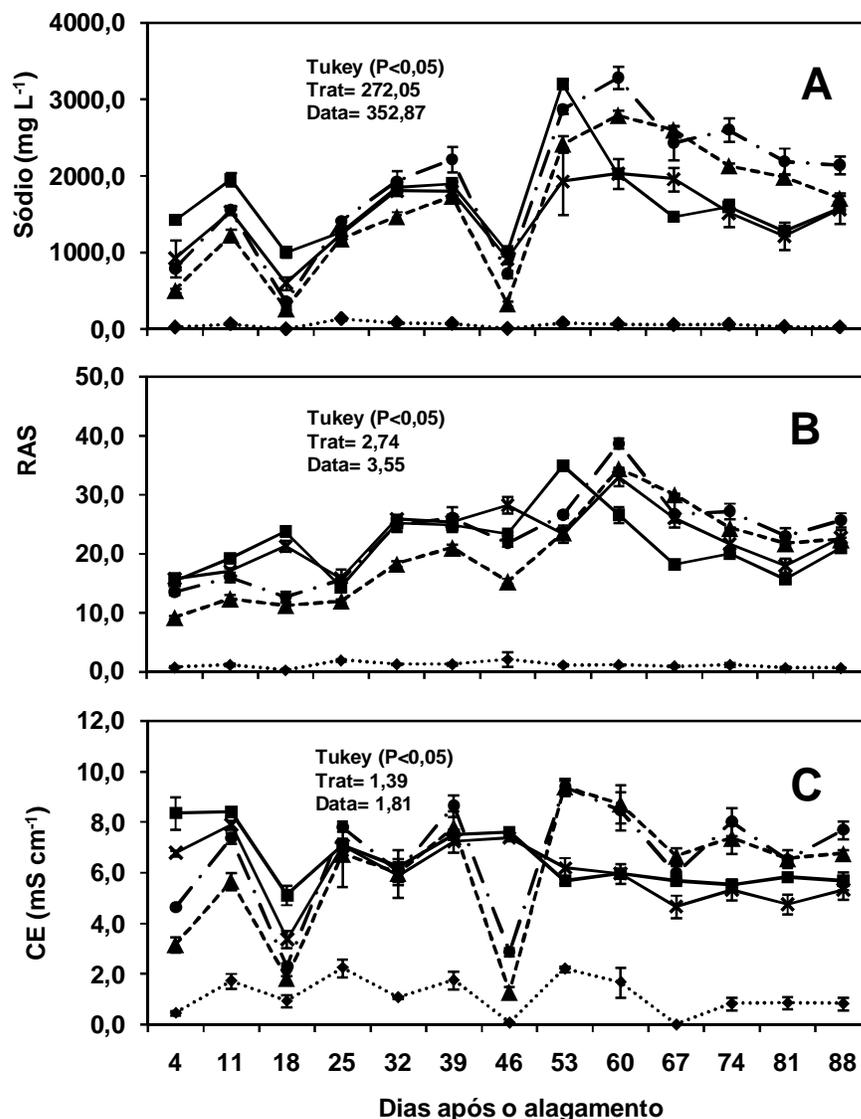


Figura 10. Valores de sódio (A) razão de adsorção de sódio (B) e condutividade elétrica (C) na solução do solo sob irrigação com lixiviado industrial tratado (LIT) em diferentes proporções durante 88 dias de alagamento. ($\cdots \diamond \cdots$) T0, ($-\triangle-$) T25, ($-\bullet-$) T50, ($-x-$) T75 e ($-■-$) T100. Barras verticais indicam erro padrão. Os valores de trat e data nos gráficos indicam os valores de diferença mínima significativa (dms) para os tratamentos e datas, respectivamente, pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

Os valores de condutividade elétrica (CE) foram maiores nos tratamentos irrigados com o lixiviado (Figura 10C). Esse efeito ocorreu devido ao alto teor de sais adicionados pelo lixiviado na irrigação, principalmente o sódio (Tabela 20). A partir dos 46DAA, verificou-se aumento nos valores de CE no T25 e T50. Esse efeito deve-se à maior concentração de íons em solução como K, Ca, Mg e, principalmente, o Na, que aumentam a condutividade

elétrica. Muitos autores atribuem valores limitantes de CE para o adequado desenvolvimento de plantas de arroz (Khatun & Flowers, 1995; Carmona et al., 2011). Valores de CE maiores que 2 mS cm^{-1} comprometem o desenvolvimento de plantas de arroz, com diminuição do perfilhamento, menor produção de fitomassa, alta esterilidade de grãos e menor rendimento de grãos (Carmona et al., 2011).

O pH da solução do solo foi influenciado pela irrigação com o lixiviado (Figura 11A). Os maiores valores de pH foram verificados nos tratamentos com lixiviado adicionado na irrigação. Foram observados no início do alagamento valores entre 5,5 e 6,3 e após 88 dias de alagamento os valores situaram-se próximos a 7,4 para os solos irrigados com lixiviado e 6,5 no T0. Possivelmente o grande alcalinidade do lixiviado e o alto teor de carbono orgânico dissolvido do lixiviado (Tabela 19) que acelera as reações redox foram os responsáveis pelos aumentos do pH. Sousa (2001), avaliando o efeito da adição de resíduos de aveia, ervilhaca e azevém em um Planossolo, verificou os maiores valores de pH de 6,4 com 35 dias de alagamento. Dynia & Barbosa Filho (1993), avaliando a calagem em um Gleissolo, verificaram valores de pH na solução do solo corrigida próximos a 7,0 com 8 semanas de inundação.

Os valores de potencial redox nos tratamentos irrigados com lixiviado foram próximos a -300 mV aos 39 DAA, enquanto que solos no T0, na mesma data, verificaram-se potencial redox próximo a -100 mV (Figura 11B). Estes valores estão associados ao grande aporte de material orgânico pelo lixiviado, sendo a matéria orgânica, neste, caso a principal fonte de elétrons, intensificando as reações de redução no ambiente anaeróbico (Camargo et al., 1999). Após 74 DAA, constatou-se um aumento nos valores de E_H , devido provavelmente ao maior volume de raízes característico do início do estágio reprodutivo e, conseqüentemente, maior difusão de oxigênio via aerênquima, promovendo maior oxidação do solo rizosférico (Al-Omari & Fayad, 2003).

Os valores de DBO_5 nos tratamentos irrigados com LIT foram altos e proporcionais à quantidade de lixiviado na irrigação até 46 DAA (Figura 11C). Verificou-se uma diminuição nos teores de DBO_5 ao longo dos dias de alagamento. Essa diminuição é normal, pois os microrganismos presentes na água e no solo metabolizam as moléculas orgânicas e mesmo que a irrigação com o lixiviado reponha a carga orgânica haverá diluição pela lâmina d'água já

estabelecida com menores teores de carbono dissolvido e menor DBO_5 (Silva, 2007). Além disso, após os 46 dias de alagamento, houve diminuição nos volumes de irrigação e aumento no volume de raízes devido ao maior porte das plantas, possibilitando maior difusão de oxigênio na rizosfera (Holzschuh et al., 2011) e acelerando a degradação do carbono orgânico dissolvido.

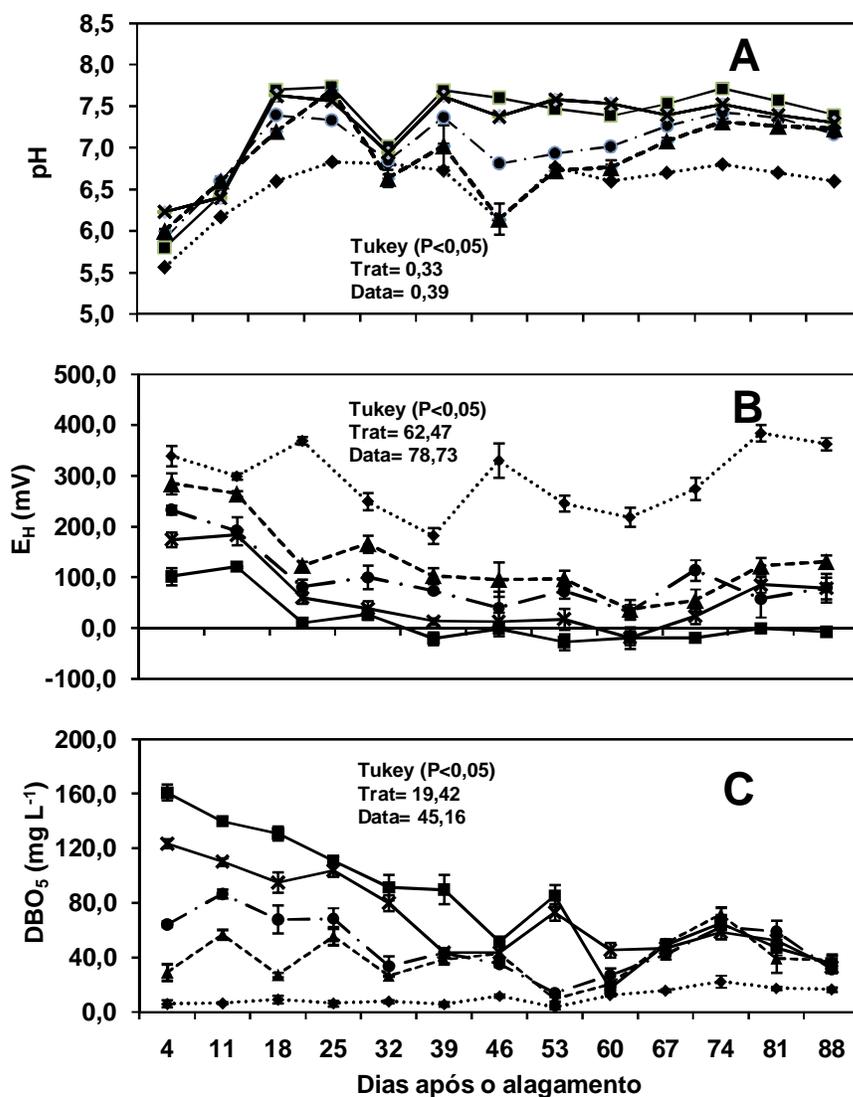


Figura 11. Valores de pH (A) E_H (B) e DBO_5 (C) na solução do solo sob irrigação com lixiviado industrial tratado (LIT) em diferentes concentrações durante 88 dias de alagamento. (··◆··) T0, (-▲-) T25, (-●-) T50, (-x-) T75 e (-■-) T100. Barras verticais indicam erro padrão. Os valores de trat e data nos gráficos indicam os valores de diferença mínima significativa (dms) para os tratamentos e datas, respectivamente, pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

O carbono orgânico dissolvido facilmente decomponível verificado pela alta demanda bioquímica de oxigênio (DBO_5) (Tabela 19) e pelo alto valor aportado pela irrigação com o lixiviado (Tabela 2), é um dos principais fatores que aceleraram as reações de oxi-redução constatadas. A natureza da matéria orgânica, a quantidade de eletroceptores (NO_3^- , Mn(IV), Fe(III), SO_4^-), temperatura e tempo de alagamento influenciam as reações redox do solo (Camargo et al., 1999). As altas temperaturas no período de condução do experimento, baixo teor de óxidos de Fe e de Mn no solo, período de alagamento de 88 dias e a alta DBO_5 contribuíram para os valores extremos do potencial redox nos tratamentos irrigados com o lixiviado.

Os altos teores de amônio, nitrato e DBO_5 das águas residuárias melhoram a fertilidade dos solos e a nutrição de plantas (Fonseca et al., 2007). No entanto, devido aos altos desequilíbrios, como a eutrofização de corpos hídricos e a fragilidade ambiental (proximidade do lençol freático e corpos hídricos) dos solos de cultivo de arroz, é necessário monitoramente desses compostos. Poucos trabalhos abordam a aplicação de efluentes tratados em arroz irrigado em que avaliam a dinâmica da DBO_5 e de formas minerais de nitrogênio na solução do solo. Yoon & Kwun (2001) verificaram teores de 160 mg L^{-1} de N total na lâmina de irrigação do solo irrigado com efluente doméstico tratado. Conforme esses autores esse efluente é adequado para a irrigação de arroz, no entanto, é necessário o monitoramento das águas de irrigação e da solução do solo. Conforme os dados obtidos, verificou-se grande influência negativa do sódio adicionado pela irrigação com o lixiviado. Logo, proporções inferiores a 25% são indicadas utilizar na irrigação. Pois diminuem os efeitos salinos e ainda mantém a adição de nutrientes via irrigação além de garantir uma alternativa de disposição de efluentes de menores impactos em corpos hídricos.

5.5. Conclusões

1 - Os teores de potássio, cálcio, magnésio, fósforo, amônio, nitrato e enxofre aumentam na solução do solo sob irrigação com lixiviado industrial tratado.

2 - A irrigação com lixiviado industrial tratado aumenta os teores de sódio e RAS, assim como valores de condutividade elétrica na solução do solo em níveis considerados prejudiciais para o desenvolvimento de plantas.

3 - O potencial redox da solução do solo decresce para potenciais negativos e os valores de pH aumentam quando irrigado com lixiviado industrial tratado.

4 - A demanda bioquímica de oxigênio e o amônio da solução do solo aumentam sob irrigação com lixiviado industrial tratado e diminui com o tempo de alagamento.

5 – Proporções inferiores a 25% de lixiviado são recomendadas na irrigação de arroz, pois diminui potenciais contaminantes como a DBO_5 e NH_4^+ , reduz, em parte, a sodicidade e ainda aumenta os teores de nutrientes em solução.

6. Capítulo V - ATRIBUTOS QUÍMICOS DE SOLOS DO RIO GRANDE DO SUL E ASPECTOS NUTRICIONAIS DE PLANTAS DE MILHETO SOB IRRIGAÇÃO COM LIXIVIADO INDUSTRIAL TRATADO

6.1. Resumo

Lixiviados industriais tratados podem ser fonte de nutrientes para o sistema solo-planta, desde que o sódio presente na irrigação não afete o solo e o desenvolvimento vegetal. Para testar esta hipótese, o presente trabalho teve por objetivo avaliar atributos químicos de três solos representativos do RS, os teores de nutrientes foliares do milho e os teores de argila dispersa em água sob irrigação com lixiviado industrial tratado (LIT), contendo 820 mg L^{-1} de Na. O experimento foi conduzido em área experimental, a céu aberto, utilizando-se como unidades experimentais colunas de PVC, preenchidas com 5 kg de solo, em delineamento experimental em blocos casualizados, com três repetições. Os tratamentos foram: controle (irrigação com água destilada), duas concentrações do lixiviado (50% e 100%) além de um tratamento irrigado com 100% de lixiviado e aplicação de gesso agrícola no solo. Foram utilizados três solos: LVd (Passo Fundo), PVd (São Jerônimo) e PVAd (Itapoã). A irrigação com lixiviado aumentou os teores de K e Na no solo e no tecido vegetal, não alterou os teores de P no solo e na planta e aumentou os teores foliares de N. Por outro lado, diminuiu os teores de Ca trocável e foliar no T100 e também reduziu o pH no LVd e PVd. As chuvas entre abr e out/13 lixiviaram o sódio adicionado pela irrigação. A adição de lixiviado não alterou o desenvolvimento das plantas de milho e não aumentou o teor de argila dispersa em água. O

lixiviado industrial tratado pode ser uma fonte de N e K, desde que sejam monitorados os níveis de sódio no solo.

Palavras-chave: efluente, *Pennisetum glaucum*, salinidade, nutrientes.

6.2. Introdução

O Brasil é um país emergente, onde o planejamento inadequado da urbanização e de algumas atividades econômicas ocasionaram graves problemas ao ambiente (Hespanhol, 2002). No caso do Rio Grande do Sul, destaca-se a poluição de aquíferos ocasionada pela atividade industrial e urbana na região do vale dos Sinos. O Rio do Sinos ocupa a 4^o colocação entre os rios mais poluídos do país, devido principalmente à presença de um amplo polo industrial que não trata adequadamente seus efluentes e pelo esgoto doméstico, com menos de 20% de tratamento em relação ao total lançado (FEPAM, 2001; IBGE, 2012). Iniciativas públicas e privadas foram executadas na bacia do Rio do Sinos para aumentar o tratamento das águas residuárias. No entanto, esse rio e seus afluentes não conseguem mais depurar as cargas orgânicas e nutrientes remanescentes das águas residuárias tratadas, devido ao crescente volume de lançamentos irregulares (Naime & Fagundes, 2005).

A crescente degradação dos recursos hídricos, os desequilíbrios ecológicos e a diminuição na qualidade das águas utilizadas para o abastecimento público são os principais fatores que exigem novas alternativas para disposição de efluentes tratados. Entre estas alternativas destaca-se a irrigação de plantas com efluentes tratados. Esta prática promove aporte de água, de carbono orgânico dissolvido e de nutrientes e, conseqüentemente, o aumento no rendimento das culturas agrícolas (Fonseca et al., 2007). Alguns problemas como a lixiviação de nitratos para o lençol freático e, principalmente, os problemas associados à sodicidade são freqüentes em solos sob irrigação com águas residuárias tratadas (Leal et al., 2007; Blum et al., 2011).

Os efeitos da irrigação com águas residuárias variam conforme as características do solo. A textura, a CTC e a mineralogia são atributos relevantes dos solos quanto a sua capacidade de receber de águas residuárias (Fonseca et al., 2005; Leal et al., 2009). O RS possui uma grande variedade de

classes de solos que são formados da interação de diferentes materiais de origem, clima, organismos e relevo durante o tempo (Streck et al., 2008). No Planalto há o predomínio de solos ácidos, de baixa fertilidade natural, textura argilosa, altos teores de óxidos de Fe e matéria orgânica, sob mata. Na Depressão Central encontram-se solos originados de sedimentos, com teores intermediários de matéria orgânica, textura franca (20 a 30% de argila) e de baixa fertilidade natural. Na Planície Costeira, predominam solos originados de sedimentos de arenitos e argilitos, originados das transgressões marinhas (Streck et al., 2008). Desta forma, devido às diferentes características dos solos do RS, o objetivo desse trabalho foi avaliar os atributos químicos de três solos, o desenvolvimento e a nutrição de plantas de milho sob irrigação com lixiviado industrial tratado em diferentes proporções, com e sem a aplicação de gesso agrícola.

6.3. Material e métodos

O experimento foi conduzido em área experimental, a céu aberto, do Departamento de Solos da Faculdade de Agronomia (UFRGS). As unidades experimentais foram constituídas por colunas cilíndricas de PVC com 150 mm de diâmetro e altura de 40 cm, totalizando um volume de 7 litros. Os tratamentos foram dispostos em delineamento em blocos casualizados, com três repetições e consistiram de combinações de irrigação com as seguintes proporções: controle T0 (100% água destilada e 0% lixiviado), T50 (50% água destilada e 50% lixiviado), T100 (100% lixiviado) e T100G (100% lixiviado com adição de gesso agrícola ao solo), conforme descrito na Tabela 21.

Tabela 21. Tratamentos, tipos e doses de insumos e líquidos utilizados para irrigação

Tratamento		Fertilizantes solúveis			Calcário ³⁾	S ⁴⁾	Irrigação ⁵⁾	
		N	P ₂ O ₅	K ₂ O			Ad ¹⁾	Lx ¹⁾
Nº	Sigla							
Cont.	T0	+	+	+	+ ⁶⁾	-	1	0
1	T50	+	+	+	+	-	1	1
2	T100	+	+	+	+	-	0	1
3	T100G	+	+	+	+	+	0	1

1) Ad = água destilada, Lx = lixiviado,

2) N = 200 kg de N ha⁻¹ (uréia);

P = 200 kg de P₂O₅ ha⁻¹ (superfosfato triplo);

K = 160 kg de K₂O ha⁻¹ (cloreto de potássio);

3) CaCO₃ (3:1 em peso), (produto grau técnico), PRNT 100%. Base de cálculo: 1 ha = 2x10⁶ kg.

4) Gesso agrícola (S);

5) Proporção entre a água destilada e o lixiviado (UTRESA) utilizada para irrigação das plantas;

6) Sinal + indica a adição do insumo.

Foram utilizados três solos, classificados como Latossolo Vermelho distrófico–LVd (UM Passo Fundo); Argissolo Vermelho distrófico típico–PVd (UM São Jerônimo) e Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico típico–PVAd (UM Itapoã) (Streck et al., 2008). Foram retiradas sub-amostras de cada solo (camada de 0-20 cm), secas em estufa a 60°C e tamisadas em malha de 2 mm. Em seguida, foram caracterizadas química e fisicamente de acordo com Tedesco et al.(1995) (Tabela 22). O lixiviado industrial tratado (LIT) foi coletado na central de recebimento de resíduos industriais (UTRESA) e a caracterização química é apresentada na Tabela 23.

Tabela 22. Atributos dos três solos antes da instalação do experimento

Atributo	LVd	PVd	PVAd
Argila, (%)	40,0	33	13
Matéria orgânica, (%)	4,7	3,5	1,8
pH-H ₂ O (1:1)	5,2	4,9	5,3
Acidez potencial, cmol _c dm ⁻³	7,7	6,2	1,7
Índice SMP	5,5	5,7	6,8
Cálcio trocável ⁽¹⁾ , cmol _c dm ⁻³	8,0	2,0	1,1
Magnésio trocável ⁽¹⁾ , cmol _c dm ⁻³	3,6	1,2	0,6
CTC _{pH 7,0} , cmol _c dm ⁻³	19,7	9,7	3,6
Saturação por bases, %	61	36	50
Alumínio trocável ⁽¹⁾ , cmol _c dm ⁻³	0,2	0,4	0,1
Saturação por alumínio, %	1,6	10,0	5,2
Potássio disponível ⁽²⁾ , mg dm ⁻³	167	140	27
Fósforo disponível ⁽²⁾ , mg dm ⁻³	3,2	4,2	3,0

⁽¹⁾ Ca, Mg, Al e Mn trocáveis (KCl 1 mol L⁻¹); ⁽²⁾ P e K disponível (Mehlich-1);

Tabela 23. Características do lixiviado industrial tratado (LIT) e padrões para lançamento em corpos hídricos

Parâmetro/unidade	Valor	Padrão de Lançamento ³
pH	7,9	6,0 - 9,0
N Total Kjeldahl (mg L ⁻¹)	217	20
Ca (mg L ⁻¹)	37	-
Mg (mg L ⁻¹)	47	-
K (mg L ⁻¹)	120	-
Na total (mg L ⁻¹)	820	-
S (mg L ⁻¹)	21	-
P total (mg L ⁻¹)	1,0	2,9
Condutividade elétrica (ms cm ⁻¹)	6,8	-
DQO (mg L ⁻¹)	280	330
DBO ₅ (mg L ⁻¹)	100	110
RAS ¹	19,4	-
Classificação ²	C ₄ S ₂	-

¹⁾ RAS (Relação de Adsorção de sódio). RAS = $Na / \sqrt{(Ca + Mg) / 2}$, onde Na, Ca e Mg são utilizados em mmol L⁻¹.

²⁾ Classificação para uso agrícola conforme Richards (1954).

³⁾ Resolução 128/2006 do CONSEMA para arroio Cascalho, Utresa, Estância Velha - RS (CONSEMA, 2006).

Os solos foram corrigidos conforme indicações da CQFS-RS/SC (2004). O LVd, o PVd e o PVAd foram corrigidos com adição das doses equivalentes de 6,1; 4,8 e 0,3 t ha⁻¹ de corretivo (CaCO₃ + MgCO₃ na proporção em massa 3:1), respectivamente. Após o tempo médio de reação e estabilização de 30 dias, foi efetuada a adubação na base, com a aplicação de 150, 100 e 100 Kg ha⁻¹ de P₂O₅ (superfosfato triplo) e 100Kg ha⁻¹ de K₂O (KCl) no LVd, PVd e PVAd, respectivamente. As doses de N aplicadas foram 100, 150 e 200 kg ha⁻¹ de N, na forma de uréia para o LVd, PVd e PVAd,

respectivamente (CQFS-RS/SC, 2004). Foi aplicado 50% da dose de N no início do perfilhamento do milho e o restante após o primeiro corte no estágio ED4. As adubações foram feitas nos três cortes de set-out de 2012 (1º cultivo), de nov/2012-mar/2013 (1º cultivo) e de set-nov/13 (2º cultivo). No inverno de 2012 foi cultivada aveia preta (*Avena sativa*) com adubação de base, nos três solos, de 50 kg ha⁻¹ de P₂O₅ (superfosfato triplo) e 100 kg ha⁻¹ de K₂O (KCl), respectivamente. A quantidade de gesso agrícola aplicado foi calculada a partir das recomendações da Embrapa conforme Sousa et al. (2005). A quantidade em kg ha⁻¹ aplicada foi 50 vezes o teor de argila de cada solo. As quantidades foram de 2.000 kg ha⁻¹, 1650 kg ha⁻¹ e 650 kg ha⁻¹ para o LVd, PVd e PVAd, respectivamente.

O milho (*Pennisetum glaucum*) foi a espécie vegetal escolhida por ser uma gramínea C4 de verão, com alta produção de fitomassa e de grande demanda de nitrogênio, presente em grande concentração no lixiviado. Foram semeadas oito sementes de milho cultivar BRS 1501 e, após a completa germinação, as plântulas foram desbastadas deixando as duas plântulas visualmente mais vigorosas por vaso. As plântulas foram irrigadas com água destilada, à capacidade de campo, até estágio V2. Em seguida, foram aplicados os tratamentos até o final do experimento. As amostras de solo foram coletadas após cada ciclo do milho, a partir de três sub amostras coletadas com trado calador na camada de 0 – 20 cm. As plantas de milho foram cortadas no estágio de emissão da folha bandeira (ED4) para retardar o florescimento e prolongar o período vegetativo. A coleta da biomassa da parte aérea do milho ocorreu no estágio de emborrachamento (ED5), onde se cortou toda biomassa vegetal a 2 cm acima da superfície do solo. As análises do solo e tecidos seguiram a metodologia descrita por Tedesco et al. (1995). A análise de argila dispersa em água seguiu a metodologia do hidrômetro (EMBRAPA, 1997).

A irrigação do experimento teve início em setembro de 2012 com a primeira coleta de solo e de tecido vegetal feita no final de outubro de 2012. A irrigação permaneceu até março de 2013 quando se fez nova coleta de solo e da biomassa da parte aérea das plantas de milho. No período de março de 2013 a novembro de 2013 foi suspensa a irrigação dos tratamentos com o LIT devido os altos teores de sódio e os volumes de chuva no outono e inverno de

2013, avaliando-se em novembro de 2013, e efeito residual da irrigação com o LIT. A irrigação foi feita para suprir 100% da evapotranspiração das plantas e manter a umidade na capacidade de campo. O monitoramento da umidade foi feito pela pesagem periódica dos vasos. As lâminas de irrigação acumuladas de cada mês de irrigação são mostradas na Tabela 24.

Tabela 24. Quantidades de chuva e irrigação com lixiviado industrial tratado durante o período de condução do experimento no município de Porto Alegre-RS, Brasil

Mês	Chuva	Irrigação ¹			
		T0	T50	T100	T100G
		----- mm -----			
Setembro-12	163	-	42,8	85,7	85,7
Outubro-12	130	-	71,5	143	143
Novembro-12	30	-	85,5	171	171
Dezembro-12	125	-	85,2	190,4	190,4
Janeiro-13	90	-	92,3	184,6	184,6
Fevereiro-3	86	-	85,7	171,4	171,4
Março-13	55	-	75,4	150,8	150,8
Abril-13	110	-	0	0	0
Maio-13	67	-	0	0	0
Junho-13	155	-	0	0	0
Julho-13	102	-	0	0	0
Agosto-13	310	-	0	0	0
Setembro-13	150	-	0	0	0
Outubro-13	182	-	0	0	0
Novembro-13	207	-	0	0	0
Total	1962	-	538,4	1096,9	1096,9

¹Lâmina de lixiviado aplicada. Todos tratamentos receberam o mesmo volume de água na irrigação, inclusive o T0. As diferentes lâminas nos tratamentos foram calculadas devido aos diferentes percentuais de lixiviado utilizados na irrigação.

Todos os resultados foram estudados pela análise da variância a 5% de probabilidade e as médias, quando significativas, foram comparadas pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

6.4. Resultados e discussão

6.5. Atributos químicos do solo

O lixiviado industrial tratado influenciou significativamente ($p < 0,05$) a maioria dos atributos químicos do solo (Tabela 26) como reflexo das adições de nutrientes e Na pela irrigação (Tabela 25). Nas duas primeiras avaliações, out/12 e mar/13 e nos três solos observou-se aumento nos teores K e Na trocáveis que refletiu em aumento nos valores de soma de bases do solo. Não se verificou incrementos nos teores de P no solo com a adição de lixiviado. Por outro lado, os teores trocáveis de Ca diminuíram no T100 no LVd e no PVd, e os teores de Mg diminuíram com aplicação do gesso agrícola. O pH teve seus valores reduzidos seguidos do aumento da acidez potencial no PVd e LVd. Em nov/13, onde se avaliou o efeito residual da irrigação com o lixiviado, verificou-se grande lixiviação e diminuição do Na e do K trocáveis, atingindo valores próximos ao tratamento controle.

Observou-se que a irrigação com o lixiviado contribuiu para o incremento dos nutrientes do solo (Tabela 25). As adições de N e K ao solo são altas e superiores as recomendadas pela CQFS (2004) para altos rendimentos de milho, principalmente devido aos altos teores desses elementos no lixiviado. Já os teores de P no lixiviado são menores que os de N e K, e conseqüentemente menores são as quantidades de P aplicados via irrigação com o LIT. Para o sódio se observou grandes quantidades de Na adicionados ao solo. O sódio no solo é indesejável do ponto de vista agrônômico, porém está presente em altas concentrações na maioria dos efluentes tratados utilizados em sistemas de irrigação (Fonseca et al., 2007; Leal et al., 2007; Blum et al., 2011). Observou-se que a irrigação com LIT no tratamento T100 adicionou quantidades superiores a 7 t ha^{-1} de Na no período de out/12 a mar/13 (Tabela 25). As quantidades de Ca e Mg adicionadas também foram elevadas. Herpin et al. (2007) verificaram em Latossolo do sudeste brasileiro menores adições mensais de nitrogênio e potássio e maiores aportes de fósforo e cálcio em irrigação com efluente doméstico tratado.

Tabela 25. Quantidade total de fertilizantes minerais aplicados durante o período experimental comparado à recomendação regional (CQFS-RS/SC, 2004)

Trat.	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	CaO	MgO	Na	
-----kg ha ⁻¹ -----							
ago- out/13	T50	229 ¹	3	165	59	89	937
	T100	457	5	329	119	178	1875
	T100G	457	5	329	119	178	1875
nov/12- mar/13	T50	868	10	625	226	339	3560
	T100	1736	20	1250	451	677	7119
	T100G	1736	20	1250	451	677	7119
CQFS- RS/SC ²	200	120	120	-	-	-	

¹Doses estimadas a partir das lâminas de irrigação para 1 ha (10.000m²).

² Recomendações de adubação segundo a Comissão de Química e Fertilidade do Solo dos estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina (CQFS-RS/SC, 2004) para alta expectativa de rendimento de matéria seca de milho (8 t ha⁻¹).

Os teores de P no solo não foram afetados pela aplicação do lixiviado (Tabela 26). O fósforo disponível é um dos principais limitantes ao desenvolvimento de plantas em solos tropicais (Herpin et al., 2007). É provável que a baixa concentração de P nesse lixiviado com baixas adições (Tabela 25) e o curto prazo de aplicação não contribuíssem para o aumento do P no solo. Estes dados não corroboram os relatados por Blum et al. (2011), que verificaram o aumento de P com o tempo de irrigação e em profundidade em um Latossolo, utilizando um efluente com teor médio de 8mg L⁻¹, superior ao do presente estudo.

Os teores K trocáveis dos três solos tiveram relação direta com a irrigação com lixiviado nos três solos. Em nov/13, os teores de K no solo diminuíram devido à suspensão da irrigação com o lixiviado (Tabela 26). Os valores de K, na maioria dos tratamentos e datas, foram menores no PVAd, intermediários no PVd e maiores no LVd. Vários autores observaram a contribuição do K das águas residuárias para o aumento do K trocável e em solução (Fonseca et al., 2005; Herpin et al., 2007). Por outro lado, Stewart et al. (1990) e Pereira et al. (2011) verificaram que a aplicação de águas residuárias diminuiu o teor de potássio trocável, devido aos altos teores de Na das águas residuárias que deslocam o K da fase sólida, sendo facilmente lixiviado. Recomenda-se em solos tropicais de baixa fertilidade natural e baixa CTC, sob aplicação de águas residuárias tratadas, aplicações de fertilizações minerais complementares (Fonseca et al., 2005). No presente estudo, as

fertilizações minerais consistiram em importantes entradas de K (150 kg K₂O ha ano⁻¹) (milheto+aveia) e, assim como a irrigação com o lixiviado, contribuíram para a manutenção dos teores de K no solo e a nutrição do milheto (Tabela 27).

O teor cálcio trocável foi significativamente menor no T100 no PVd e no LVd nas três datas em comparação ao T0. Por outro lado, não se observou diferença no teor de Ca no PVAd nos tratamentos irrigados com o lixiviado em relação ao T0. Nos três solos, os teores de Ca foram maiores em out/12 comparado a mar/13 e nov/13 (Tabela 26). Em relação ao teor de Mg, verificou-se que foi maior no T100 e T100G no Argissolo PVAd em out/12 e mar/13, enquanto que no PVd e no LVd, verificou-se menor teor de Mg no T100G, nas três coletas.

Embora tenham sido adicionadas grandes quantidades de CaO e MgO pela irrigação (Tabela 25), possivelmente o Ca diminuiu no T100 em relação ao T0 no LVd em mar/13 devido aos altos teores de Na que deslocaram o Ca da CTC diminuindo o teor desse elemento. Já os altos teores de Ca e Mg foram constatados em out/12 por ocasião da calagem feita na instalação do experimento em ago/12. Observou-se que em out/12 a calagem aumentou a soma de bases e diminuiu a acidez potencial (H+Al). Em mar/13 observou-se diminuição significativa dos teores de Ca e Mg nos três solos e em todos tratamentos, principalmente devido a grande mobilidade do Ca e do Mg em solos tropicais (Caires et al., 1998), pelo fato do corretivo aplicado ser de alta reatividade (PRNT 100%) e na forma de pó fino além da exportação do Ca e Mg pelas plantas (Bissani et al., 2008). Segundo Richards (1954), um alto teor de Na, elemento dispersante no solo, e baixos teores de Ca e Mg, floculantes, podem salinizar o solo com alterações no potencial osmótico da solução do solo e efeitos negativos em atributos físicos do solo.

Com relação ao efeito do gesso agrícola, observou-se diminuição nos teores de Mg no T100G em out/12 e mar/13 no PVd e no LVd. A aplicação de gesso agrícola pode aumentar o teor de Ca que desloca o Mg da CTC (Oliveira & Pavan, 1996). O Mg associado ao SO₄²⁻ é mais móvel e facilmente lixiviado do perfil do solo do que o íon sozinho (Zambrozi et al., 2007). Em relação ao pH, a irrigação com o LIT (T100 e T100G) diminuiu os valores no LVd e no PVd em out/12 e mar/13, enquanto que o PVAd não apresentou

diferença significativa (Tabela 26). Já entre mar/13 e nov/13 não se verificou alterações no pH, à exceção do Latossolo que apresentou aumento do pH nos tratamentos irrigados com LIT e com gesso. Já os maiores valores de pH do solo verificados em out/12 foram por ocasião da calagem feita em ago/13.

A nitrificação do amônio, após aplicação do lixiviado no solo, pode ser uma importante fonte de acidez do solo (Blum et al., 2011). Na maioria dos trabalhos com aplicação de efluentes tratados no solo, verifica-se que a alcalinidade do efluente é superior à quantidade de H^+ gerados na nitrificação do NH_4^+ (Qian & Mecham, 2005; Blum et al., 2011). No entanto, o teor de amônio (220 mg L^{-1}) do lixiviado é bastante superior a média dos experimentos conduzidos no mundo ($10\text{-}50 \text{ mg L}^{-1}$) (Fonseca et al., 2007). Então, possivelmente, a nitrificação do amônio nos tratamentos sob irrigação com LIT no PVd e no LVd foi superior ao potencial alcalinizante do lixiviado e acidificou os solos. Esse efeito de acidificação não foi constatado no PVAd pois a dose inicial de calcário indicada pela CQFS-RS/SC (2004) não foi suficiente para aumentar o pH do solo a 6. Kiziloglu et al. (2008) também verificou a diminuição do pH do solo cultivado com brássicas e atribuiu esse efeito, em parte, ao alto teor médio de N no efluente com 1100 mg L^{-1} de N. Além disso, conforme Bouwer & Chaney (1974) a produção de CO_2 e ácidos orgânicos pela degradação dos resíduos orgânicos adicionados ao solo pelos efluentes tratados também pode contribuir para a acidificação do solo com aumento dos teores de H^+ (Tabela 26).

As concentrações de sódio sob irrigação com o LIT, nos três solos, em out/12 e mar/13, foram superiores em comparação com os solos anteriormente a instalação do experimento (Tabelas 22 e 26). Observou-se os teores mais altos de sódio, independente do tipo de solo em out/12, com tendência de diminuição em mar/13 e redução significativa em nov/13, à exceção do tratamento T0, que não teve seus teores de Na alterados (Tabela 26). O LVd apresentou os maiores teores de Na, seguido pelo PVd, e o PVAd teve os menores teores, sendo proporcionais à CTC de cada solo (Tabela 22). A aplicação de gesso (T100G) não foi eficiente para aumentar a lixiviação do Na. Altas concentrações de sais em águas de irrigação, principalmente o Na, podem diminuir a eficiência do gesso agrícola na remoção do Na do solo

(Singh & Bajwa, 1991). Porém, Leal et al.(2009) e Blum et al. (2011) constataram maior lixiviação de Na no solo quando feita a gessagem.

A suspensão da irrigação com o LIT em mar/13 e, principalmente, o grande volume de chuvas verificados entre mar/13 e nov/13 (Tabela 24) foram determinantes na diminuição dos teores de sódio no solo. O sódio é um dos principais elementos indesejáveis presente em águas residuárias (Fonseca et al., 2007), provoca alterações no componente osmótico da solução do solo (Taiz & Zeiger, 2004) e pode afetar negativamente os atributos físicos do solo (Halliwell et al., 2001). No entanto, sua valência (1^+) e o grande raio iônico hidratado conferem a esse elemento uma baixa afinidade pela superfície de troca sendo facilmente lixiviado no perfil do solo (Meurer, 2008; Sposito, 2008). Nesse sentido, alguns autores verificaram que em áreas sob irrigação com águas residuárias tratadas com altos teores de Na não há grandes acumulações de sódio no solo, pois as chuvas intensas de clima tropical promovem a lixiviação do Na (Leal et al., 2009; Pereira et al., 2011; Blum et al., 2011).

O comportamento do Na no solo depende principalmente do balanço entre precipitação e evapotranspiração, bem como os processos de desorção e sorção (Gloaguen et al., 2007). No RS, com grandes volumes de chuvas, especialmente no inverno, torna o saldo de precipitação positivo em relação à evapotranspiração, promovendo a migração do Na no perfil do solo. As características dos solos também influenciaram na dinâmica do Na. O LVd, solo caulinitico de textura argilosa, alto teor de C orgânico, alta área superficial específica e alta CTC reteve em maiores quantidades o Na, mesmo após o período de intensa lixiviação entre mar e nov/13. Por outro lado, o PVAd, solo de origem sedimentar, com predominância de matérias originados de sedimentos aluviais, de baixa área superficial específica e baixa CTC (Streck et al., 2008) (Tabela 22) teve baixa retenção de Na e o mesmo foi facilmente deslocado do solo no período de mar a nov/13. As grandes entradas de Na no solo e a sua fácil lixiviação aumentam as quantidades de Na nos corpos hídricos subterrâneos. Não existem valores limitantes para o Na em corpos hídricos e na água para o consumo, no entanto, segundo a WHO (2004), valores altos de Na ($>200 \text{ mg L}^{-1}$) podem diminuir a aceitabilidade da água potável.

Tabela 26. Características químicas ao longo do tempo de três solos Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico arênico (PVAd), Argissolo Vermelho distrófico típico (PVd) e Latossolo vermelho(LVd) sob irrigação com lixiviado em diferentes proporções

	Trat.	P (mg kg ⁻¹) ²			K (cmol _c kg ⁻¹)			Ca (cmol _c kg ⁻¹)			Mg (cmol _c kg ⁻¹)		
		Out-2012	Mar-2013	Nov-2013	Out-2012	Mar-2013	Nov-2013	Out-2012	Mar-2013	Nov-2013	Out-2012	Mar-2013	Nov-2013
PVAd	T0	29,2aB ¹	30,8aB	66,4aA	0,1cA ¹	0,1bA	0,1aA	1,1aA	0,8aB	0,9abB	0,4bA	0,2cB	0,2aB
	T50	16,9aB	22,6aB	58,4abA	0,5bA	0,3bAB	0,1aB	1,0abA	0,5bB	1,0aA	0,5bA	0,3cbB	0,2aB
	T100	23,9aB	35,6aA	47,0abA	1,2aA	0,9aA	0,1aB	0,9bA	0,6abB	0,7bAB	0,7aA	0,5aB	0,2aC
	T100G	24,4aA	44,9aA	38,6bA	1,1aA	0,8aA	0,1aB	1,0abA	0,7abB	0,8abB	0,7aA	0,5aB	0,2aC
PVd	T0	10,7aB	27,1cA	30,9cA	0,1cA	0,3cA	0,1aA	4,1bA	3,2aB	3,6aB	4,0aA	1,7aB	1,7aB
	T50	9,9aC	20,2cB	31,8bcA	1,2bA	1,3bA	0,1aB	3,8bA	2,4bB	3,4abA	3,8aA	1,5abB	1,6aB
	T100	15,4aB	42,9aA	43,0aA	2,5aA	1,9aB	0,2aC	4,1bA	2,5bB	1,9cB	4,3aA	1,9aB	1,3abC
	T100G	13,0aB	35,7bA	38,3abA	2,4aA	1,9aB	0,1aC	5,3aA	2,7abB	2,9bcB	2,9bA	1,1bB	0,9bB
LVd	T0	18,3aB	31,1aA	29,0bA	0,1dA	0,2cA	0,2aA	10,2aA	6,1aC	7,1aB	5,5aA	2,5aB	2,7aB
	T50	15,0aC	26,4abB	37,3aA	1,3cA	1,5bA	0,3aB	9,3bA	5,9aC	6,6bB	5,1bA	2,5aB	2,5abB
	T100	15,1aC	22,4bB	27,9bA	2,4bA	1,9aB	0,4aC	7,3cA	4,2cC	5,1dB	4,4cA	2,4aB	2,3bB
	T100G	13,7aB	30,3aA	30,9bA	3,0aA	2,2aB	0,2aC	9,3bA	5,2bC	6,0cB	3,8dA	2,0bB	2,0cB
		SB (%)			pH			H+Al (cmol _c kg ⁻¹)			Na (cmol _c kg ⁻¹)		
		Out-012	Mar-2013	Nov-2013	Out-2012	Mar-2013	Nov-2013	Out-2012	Mar-2013	Nov-2013	Out-2012	Mar-2013	Nov-2013
PVAd	T0	1,7bA	1,2bA	1,3aA	5,5aA	4,8aB	5,0abB	1,6 ^{ns}	1,0	2,1	0,1cA	0,1bA	0,1aA
	T50	2,7bA	1,5bB	1,3aB	5,5aA	4,8aB	4,8bB	1,3	0,9	2,2	0,9bA	0,5bAB	0,1aB
	T100	4,6aA	3,6aA	1,2aB	5,3aA	4,6aB	5,4aA	1,3	1,0	2,1	2,0aA	1,6aA	0,1aB
	T100G	4,7aA	3,4aB	1,2aC	5,4aA	4,7aB	4,8bB	1,3	1,0	2,3	1,9aA	1,4aA	0,1aB
PVd	T0	8,4cA	5,7cB	5,4aB	6,4aA	5,7aB	5,6aB	1,7aB	1,2bB	3,6bA	0,2cA	0,5cA	0,1aA
	T50	10,8bA	7,6bB	5,4aC	6,1bB	5,3bB	5,5aB	1,9aB	1,5abB	4,1bA	2,0bA	2,3bA	0,2aB
	T100	15,2aA	9,6aB	4,5aC	5,8cA	5,0cB	5,2bB	2,2aB	2,0aB	5,7aA	4,3aA	3,2aB	0,3aC
	T100G	14,8aA	9,0aB	4,1aC	5,7cA	4,8dB	4,9cB	1,9aB	1,8abB	6,0aA	4,1aA	3,3aB	0,2aC
LVd	T0	16,1bA	8,9bB	10,3aB	6,2aA	5,3aB	5,5aB	2,8aB	2,8bB	6,2cA	0,1dA	0,2cA	0,2aA
	T50	19,1abA	12,2aB	9,8aB	5,7bA	5,3aA	5,4aA	3,1aB	2,5bB	6,9bcA	2,4cA	2,9bA	0,6aB
	T100	18,9abA	11,1aB	9,3aB	5,6bcA	4,9bB	5,4aA	3,1aC	4,2aB	7,8bA	4,1bA	3,0abB	0,7aC
	T100G	22,1aA	13,0aB	8,4aC	5,3cA	4,8bB	5,3aA	3,9aB	3,6abB	9,0aA	5,0aA	3,7aB	0,4aC

¹ Valores seguidos pela mesma letra minúscula, na coluna e maiúscula, na linha, não diferem entre si estatisticamente (Tukey, p<0,05).

² Teores convertidos para kg utilizando os valores de densidade dos solos.

6.6. Crescimento vegetal

Os teores de nutrientes e sódio na biomassa do milho tiveram grande relação com os elementos adicionados pela irrigação com o lixiviado (Tabela 27). Os teores foliares de fósforo, assim como no solo, não foram influenciados pela irrigação com o lixiviado. O potássio e o nitrogênio tiveram grandes aportes (Tabela 25), resultando em altos teores na biomassa da parte aérea (Tabela 27). Os teores de Ca diminuíram com aplicação do lixiviado e o teor foliar de Mg reduziu sob aplicação de gesso agrícola. Os teores de sódio no tecido do milho tiveram grande relação com a aplicação do lixiviado. Nas amostragens de nov/13, com a suspensão da irrigação, boa parte dos aumentos de nutrientes e sódio verificados anteriormente foram reduzidos.

A CQFS/RS-SC (2004) recomenda que os teores de P foliares de milho estejam entre 2-3 g kg⁻¹. Em out/12, os teores de P foram todos abaixo do recomendado. Já em mar/13 e nov/13 os teores foliares - nos três solos, independente do tratamento, foram superiores ao recomendado. Os aumentos foliares em mar e nov/13 estão relacionados ao aumento dos teores de P disponível no solo; esses, por sua vez, aumentaram, principalmente, pelas fertilizações minerais feitas no início de cada ciclo. Já Kiziloglu et al. (2008) verificaram aumento nos teores de P, N e K em brássicas em 10 anos de aplicação de efluente doméstico tratado.

Em out/12 e mar/13 observaram-se altos teores foliares de N sob irrigação com o LIT (Tabela 27), sugerindo que o grande aporte de nitrogênio do lixiviado (Tabela 25) contribuiu para o suprimento de N para o milho. Fonseca et al. (2005) verificaram resultados semelhantes para o milho sob irrigação com efluentes domésticos tratados. Herpin et al. (2007), utilizando efluente domésticos tratados na irrigação de café também perceberam efeito similar. No tratamento controle (T0), verificaram-se baixos teores de N na biomassa do milho. Apesar de ter sido feita adubação de N-mineral, sugere-se que as precipitações de altas intensidades no verão na área experimental (Tabela 24) tenham causado lixiviação do NO₃⁻ e indisponibilizado o mesmo para absorção pelas plantas (Herpin et al., 2007). A irrigação com águas residuárias possibilita um aporte constante de N, pois fornece o N de forma contínua e prontamente disponível, em solução, para absorção pelos vegetais

(Feigin et al., 1991; Fonseca et al., 2005). Conforme a CQFS/RS-SC (2004), os teores foliares de N ideais para o milho são de 20 a 35 g kg⁻¹. Observaram-se teores de N foliares, nos tratamentos irrigados com lixiviado em out/12 e mar/13, acima da faixa recomendada nos três solos. O alto teor de N em gramíneas forrageiras é benéfico, pois aumenta o valor nutricional dessas plantas (Fonseca et al., 2007). Em nov/13, houve diminuição dos teores de N nos tratamentos irrigados com 100% de lixiviado pela suspensão da irrigação.

Os teores foliares de K tiveram estreita relação com os teores adicionados pela irrigação com o lixiviado (Tabela 27). Conforme a CQFS-RS/SC (2004), os teores foliares de K ideais para o milho são de 25 a 40 g kg⁻¹. Nos tratamentos controle (T0) nas três datas, à exceção do PVd em out/12 e nov/13, os teores foliares de K foram inferiores aos recomendados mesmo sendo feitas adubações de base. Em mar/13, com maior período de aplicação e maior adição de K pelo lixiviado (Tabela 25), constataram-se no T100 e no T100G maiores teores de K na biomassa do milho do que os recomendados pela CQFS-RS/SC (2004). Russan et al. (2007), avaliando a cultura da cevada sob 10 anos de irrigação com efluente tratado, verificaram aumento nos teores de K, P e N e também o incremento de produção de biomassa.

Os teores foliares de Ca reduziram nos tratamentos irrigados com lixiviado nos três solos em mar/13, já os teores de Mg no tecido de milho reduziram no T100 e T100G no PVd e LVd em mar/13 (Tabela 27). Possivelmente, as relações Na/Ca e Na/Mg aumentaram nesse período, ocasionando desequilíbrio nutricional na biomassa da parte aérea do milho. A alta concentração de Na no solo promove uma competição por absorção com cálcio, magnésio e potássio, resultando em desbalanços nutricionais nas plantas (Naidu & Rengasamy, 1993). Em out/12 não se constatou essa alteração nutricional, provavelmente pelo fato da calagem ser recente e os teores de cálcio e magnésio, assim como as relações Ca/Na e Mg/Na, serem altos. Conforme Herpin et al. (2007), a aplicação de fertilizantes minerais e calcário é importante para deslocar o Na da superfície de troca e diminuir os efeitos negativos da salinidade.

Tabela 27. Teores de macronutrientes e sódio da biomassa da parte aérea de milho cultivado sob irrigação com lixiviado industrial tratado em três solos: Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico arênico (PVAd), Argissolo Vermelho distrófico típico (PVd) e Latossolo Vermelho distrófico (LVd) com amostragens feitas em outubro de 2012, março de 2013 e novembro de 2013

Trat.	N (g kg ⁻¹)			P (g kg ⁻¹)			K (g kg ⁻¹)			
	Out-2012	Mar-2013	Nov-2013	Out-2012	Mar-2013	Nov-2013	Out-2012	Mar-2013	Nov-2013	
PVAd	T0	27,7 cA	30,2 cA	32,0 abA	1,4 aC	4,8 aA	3,1 aB	13,9 bB	18,1 bA	18,0 aA
	T50	35,3 bA	37,2 bA	34,0 aA	1,5 aB	3,2 cA	3,0 aA	14,2 bB	20,8 bA	18,1 aA
	T100	42,7 aA	44,1 aA	33,7 abB	1,4 aB	3,3 bcA	3,1 aA	19,3 aB	26,3 aA	20,0 aB
	T100G	45,7 aA	47,2 aA	29,3 bB	1,4 aC	3,6 bA	2,8 aB	17,8 abB	26,6 aA	19,8 aB
PVd	T0	22,7 cB	24,3 cB	31,7 aA	1,4 bC	2,8 aA	2,3 bB	27,8 bA	19,1 bB	29,0 aA
	T50	33,0 bA	34,8 bA	29,7 aA	2,0 aB	2,9 aA	2,2 bB	33,9 aA	22,2 abB	23,3 aB
	T100	43,0 aA	44,4 aA	32,7 aB	1,7 abB	2,9 aA	2,5 aA	32,0 aA	25,8 aB	26,7 aB
	T100G	40,3 aA	41,6 aA	30,7 aB	1,5 bB	3,0 aA	2,6 aA	34,0 aA	26,7 aB	30,0 aAB
LVd	T0	33,7 bA	35,2 bA	32,3 aA	0,9 aC	3,1 bA	2,1 aB	24,8 bA	14,3 cB	16,0 bB
	T50	36,7 bA	37,9 bA	35,7 aA	0,9 aC	3,0 bA	2,3 aB	24,9 bA	21,4 bB	19,0 abB
	T100	46,7 aA	48,1 aA	32,7 aB	1,2 aC	3,5 aA	2,2 aB	32,7 aA	29,8 aA	21,0 aB
	T100G	42,3 aA	43,8 aA	34,0 aB	1,0 aC	3,5 aA	2,3 aB	29,1 aA	26,9 aA	18,7 abB

Trat.	Ca (g kg ⁻¹)			Mg (g kg ⁻¹)			Na (g kg ⁻¹)			
	Out-2012	Mar-2013	Nov-2013	Out-2012	Mar-2013	Nov-2013	Out-2012	Mar-2013	Nov-2013	
PVAd	T0	3,0 abB	4,3 aA	2,8 aB	2,6 aB	3,9 bA	2,7 aB	0,8 cA	0,6 cA	0,6 aA
	T50	2,4 bA	2,6 bA	3,0 aA	2,9 aB	4,8 aA	2,8 aB	2,6 bcB	9,5 bA	0,8 aB
	T100	2,9 abA	2,7 bA	3,1 aA	2,8 aB	3,9 bA	2,8 aB	6,6 aB	12,7 bA	1,0 aC
	T100G	3,5 aA	3,0 bA	3,0 aA	2,6 aB	3,7 bA	2,9 aB	8,6 aB	18,2 aA	0,9 aC
PVd	T0	3,4 bB	4,9 aA	3,3 bB	4,0 bB	6,5 aA	4,0 aB	0,6 bA	0,5 cA	0,5 aA
	T50	4,4 aA	4,1 bB	3,7 aC	4,9 aB	6,7 aA	4,1 aC	0,8 bA	4,8 bA	0,7 aB
	T100	3,6 bB	4,3 bA	3,6 aB	3,9 bB	4,5 cA	4,2 aAB	2,2 aB	10,2 aA	0,9 aB
	T100G	4,3 aA	4,2 bA	3,6 aB	4,1 bB	5,0 bA	4,3 aB	3,9 aB	7,1 aA	0,9 aB
LVd	T0	4,0 bB	6,1 aA	4,1 aB	3,6 bB	6,0 aA	3,6 cB	0,7 bA	0,2 cA	0,2 aA
	T50	4,2 bB	4,9 bA	4,3 aB	3,2 cC	5,5 bA	3,8 bcB	1,2 bB	6,5 bA	0,4 aB
	T100	5,0 aA	5,1 bA	4,4 aB	4,1 aA	3,9 cA	4,0 abA	3,2 aB	9,5 aA	0,5 aB
	T100G	4,9 aA	5,0 bA	4,3 aB	3,1 cB	3,3 dB	4,3 aA	5,0 aB	12,0 aA	0,8 aC

¹ Valores seguidos pela mesma letra, minúscula, na coluna, e maiúscula, na linha, não diferem estatisticamente (Tukey, p<0,05).

Para o Mg, no T100G, possivelmente a diminuição do Mg pode ter sido também pela diminuição do teor de Mg do solo pela maior percolação no perfil com o SO_4^{2-} proveniente do gesso agrícola (Tabela 27). Por outro lado, Gadallah (1995) verificou o aumento dos teores foliares de Ca e Mg em girassol irrigado com efluente doméstico tratado.

Os teores Na no tecido do milho aumentaram com a aplicação do lixiviado e foram reflexo dos altos teores de Na no solo (Tabela 27). No período de mar/13 a nov/13, observou-se diminuição nos teores foliares de Na em razão da diminuição dos teores de Na no solo. Embora tenha se observado altos teores de Na, não se verificou efeito antagônico do Na com o K nesse trabalho, como é relatado por outros autores (Obata et al., 2007). Al-Jaloud et al. (1995), em experimento de irrigação de sorgo com efluente doméstico tratado, verificaram aumento dos teores foliares de Na, N, Ca e Mg com diminuições nos teores de P e K. Herpin et al. (2007) também verificaram o aumento de Na, K, Ca, Mg em folhas de café irrigadas com efluente doméstico tratado.

Não foram observadas diferenças significativas nos períodos avaliados, nos tipos de solo e entre os tratamentos para produção de biomassa da parte aérea de milho (Figura 12). Porém, vários trabalhos constataram o aumento do rendimento de culturas agrícolas quando submetidos à irrigação com efluentes tratados (Feigin, 1991; Fonseca et al., 2007; Herpin et al., 2007). Esses autores atribuem o aumento no rendimento ao aporte hídrico e de nutrientes no solo como os principais fatores. Por outro lado, alguns autores citam que o aumento de alguns indesejáveis pode contribuir negativamente na qualidade do solo e no rendimento das culturas (Leal et al., 2007; Tilman & Supareni, 2002). Sugere-se que a alta salinidade do solo pode ter afetado negativamente as plantas, no entanto, o intenso aporte de nutrientes, especialmente o N, que é bastante demandado por gramíneas, pode ter contrabalançado o efeito prejudicial do Na (Al-Jaloud et al., 1995).

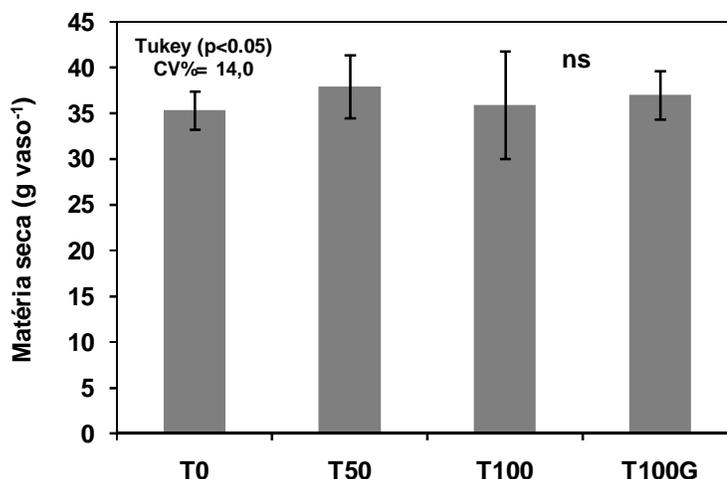


Figura 12. Produção de biomassa vegetal de milho em diferentes proporções de lixiviado industrial tratado. Médias dos três solos e dos três cortes com três repetições. Barras verticais indicam erro padrão da média. ns - não se observou diferença estatística entre os tratamentos (Tukey<0,05).

6.4.1. Argila dispersa em água

Não se verificou diferença significativa nos teores de argila dispersa entre os tratamentos dentro de cada solo (Figura 13). No LVd, como era de se esperar, os teores de argila dispersa em água foram maiores, obviamente pelo fato de seus teores de argila serem maiores que o PVd e este, por sua vez, maior que o PVAd. Os processos de dispersão de argila estão associados aos fenômenos que ocorrem na dupla camada difusa (Hillel, 1998). A floculação ocorre quando há a compressão da dupla camada e a dispersão é ocasionada pela expansão da dupla camada. A floculação ocorre com o aumento do potencial eletrolítico (CE) especialmente de íons divalentes ou de maior valência. Para ocorrer a dispersão de argila é necessário grande concentração de íons monovalentes, como o Na, na troca, aumento do pH e da RAS (Hillel, 1998). A dispersão de partículas em solos caulíníticos depende em grande parte dos valores do pH. Com baixos valores de pH há uma atração das cargas elétricas negativas e positivas das arestas das caulinitas ocasionando a floculação. Com o aumento do pH, a fraca interação dessas cargas favorece a dispersão de partículas (Churchman et al., 1993).

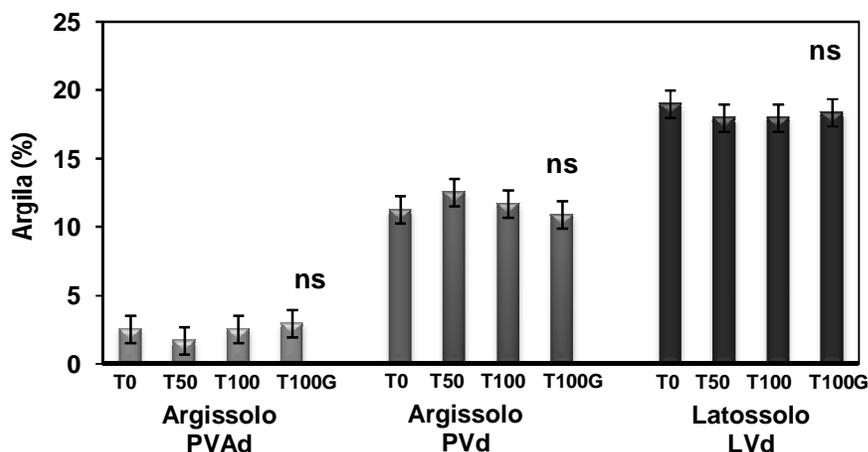


Figura 13. Teor de argila dispersa em água após aplicação de lixiviado industrial tratado (out/2012) em tratamentos com diferentes diluições nos três solos. Teste de Tukey a 5% de significância. Barras verticais indicam erro padrão da média.

Devido aos altos teores de caulinita no PVd e no LVd, associado aos grandes teores de Na verificados em out/12, esperava-se maiores teores de argila dispersa em água nos tratamentos sob irrigação com o LIT. Entretanto, devido à redução dos valores de pH nesses solos sob irrigação com o LIT e os altos valores de íons divalentes como o Ca e o Mg, não se constatou diferença significativa ($p < 0,05$) nos teores de argila dispersa em água. Em estudo conduzido por Leal et al. (2009) constatou-se aumento nos teores de Na, do pH e consequente aumento dos valores de argila dispersa em água em Latossolo do sudeste do Brasil. O aumento do teor de argila dispersa é prejudicial ao solo, pois essas partículas obstruem poros reduzindo a condutividade hidráulica, circulação de ar, penetração de raízes, afetando negativamente o rendimento das culturas (Menneer et al., 2001).

6.7. Conclusões

1 - A irrigação com lixiviado industrial tratado aumenta os teores de K e Na nos três solos, assim como os teores dos mesmos no tecido de milho.

2 - A aplicação do lixiviado tratado, em curto prazo, aumenta os teores de N na biomassa de milho, e não altera os teores de P no solo e no tecido de milho.

3 - O gesso agrícola não aumenta a lixiviação de Na nos três solos sob irrigação com lixiviado industrial tratado.

4 - A irrigação com o lixiviado industrial tratado diminui os teores de Ca no solo e na biomassa de milho e diminui o pH no LVd e no PVd.

5 - Grandes volumes de chuva promovem a percolação de Na e a diminuição da salinidade ocasionada pela irrigação com o lixiviado, sendo mais intensa nos Argissolos com menor CTC.

6 - As alterações nos atributos químicos do solo e na nutrição de plantas de milho são mais pronunciadas nos solos LVd e PVd, pois apresentam maior CTC e conseqüente maior retenção de cátions.

7 - A irrigação com lixiviado industrial tratado, em curto prazo, não altera o teor de argila dispersa em água nos três solos e também não altera a produção de biomassa vegetal de milho nos três solos estudados.

7. CONCLUSÕES GERAIS

Em vários estudos conduzidos no mundo, a irrigação com águas residuárias é uma alternativa ecológica que possibilita a ciclagem de matéria orgânica e nutrientes em solos agrícolas, com aumento da nutrição de plantas e diminuição da degradação de corpos hídricos. No presente trabalho foi verificada a grande contribuição do lixiviado industrial tratado para o aumento de alguns nutrientes nos solos e também no tecido das plantas avaliadas. Porém, nem só aspectos positivos são verificados com a aplicação de lixiviado industrial tratado. Alguns indesejáveis como os altos teores de sais e principalmente o sódio são observados em grande parte dos trabalhos que utilizam irrigação com efluentes tratados. Vários trabalhos também verificam alterações nos atributos do solo, principalmente nos físicos com diminuição da agregação, selamento, aumento da densidade, diminuição da infiltração de água entre outros.

No presente trabalho, a dispersão de argila foi o atributo físico avaliado e não apresentou alterações. No entanto, o curto período de irrigação e as adições de íons divalentes via calagem e gessagem, em parte, podem ter reduzido os efeitos dispersivos dos altos teores de Na verificados nos solos. Por outro lado, no experimento com aplicação de lixiviado industrial tratado na cultura do arroz se verificou um grande aumento da sodicidade do solo e a relação direta com os aumentos de esterilidade e diminuição dos rendimentos de grãos. Obviamente, mesmo que feita as simulações de chuva, não se conseguiu reproduzir as condições que ocorrem no campo, onde o Na é facilmente lixiviado no perfil do solo. Mesmo em Planossolos que possuem um horizonte B textural de baixa condutividade hidráulica a lixiviação de Na, possivelmente, seria maior. Nos outros experimentos, a sodicidade foi também

alta, no entanto, as quantidades de Na adicionada via irrigação foram menores que no experimento do arroz. Logo, não diminuiu a produção de biomassa vegetal nas culturas do milho e do milheto. O aumento da nutrição, principalmente de N e K foram as responsáveis por contrabalançar os efeitos negativos do Na. Vários outros autores que foram citados ao longo desse trabalho também chegaram a constatação semelhante. Com relação ainda a sodicidade, uma hipótese de que o Na tem grande mobilidade no solo se confirmou. Nas percolações do 1º estudo e nas chuvas ocorridas no 4º estudo, ficou evidente que em solos com aplicação de águas residuárias tratadas é fundamental a incidência de chuvas intensas. O Rio Grande do Sul tem um inverno chuvoso de temperaturas amenas que favorecem o saldo de precipitação contra a evapotranspiração e a consequente lixiviação do Na.

8. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os experimentos conduzidos tiveram um enfoque agrônomo. Entretanto, se avaliados os teores de potenciais contaminantes como amônio e DBO_5 verificados em altas concentrações no lixiviado e depois compara-los aos teores na solução do solo cultivado com arroz, ou nos teores do percolado do solo degradado pode-se observar uma grande capacidade de depuração do sistema solo-planta.

Todos os experimentos foram conduzidos em casa de vegetação ou em área experimental. Os dados obtidos nesses ensaios são de grande importância e base para novos estudos. Entretanto, para próximos estudos é interessante conduzir experimentos em condições de campo onde mais variáveis podem ser consideradas e avaliadas.

O esboço inicial deste trabalho surgiu de um problema real da central de resíduos Utresa, de Estância Velha-RS. Esta empresa por anos esteve vinculada a alguns desequilíbrios ambientais, principalmente em corpos hídricos. A partir de um anseio do novo corpo técnico da empresa em 2010 surgiu uma parceria de pesquisa entre a Utresa e o Departamento de Solos da Faculdade de Agronomia da UFRGS. Os problemas da empresa eram grandes passivos ambientais como lagoas com grandes volumes de lixiviado que não podiam ser lançados nos arroios próximos (Cascalho e Portão) devido ao pequeno porte dos mesmos e à capacidade excedida para lançamento de efluentes. Assim o primeiro trabalho foi a execução de um banhado construído (wetlands) com objetivo de diminuir os contaminantes, principalmente NH_4^+ e DBO_5 do lixiviado. Devido, também, aos altos teores de Na as plantas do banhado construído não se desenvolveram satisfatoriamente e não apresentaram eficiência na redução dos compostos avaliados. Assim,

passaram a ser executados experimentos nas dependências do departamento de solos da UFRGS. Sendo a irrigação com lixiviado em solo degradado (1º estudo) o primeiro experimento conduzido com início em 2011 e que serviu de base para um atual licenciamento junto à FEPAM de áreas vizinhas da Utesa para aplicação do lixiviado tratado no solo.

Um dos grandes desafios da irrigação com águas residuárias é a aceitação pública, principalmente de efluentes industriais. Pois são grandes as dúvidas quanto aos potenciais perigos ao meio ambiente e à saúde humana. Porém, deve-se sempre fazer uma avaliação adequada dos efluentes a serem utilizados. No RS, por exemplo, a aplicação de efluentes da suinocultura é amplamente difundida bem como os trabalhos e pesquisas conduzidos. Porém, no geral os teores de metais como Cu e Zn e os potenciais de contaminação desses efluentes, em muitas situações, são muito maiores que o do lixiviado utilizado no trabalho, quando dispostos no solo.

Por fim, o lixiviado industrial tratado tem grande potencial de ser aplicado no solo, com reaproveitamento da carga de nutrientes diminuindo os desequilíbrios nos corpos hídricos. No entanto, alguns manejos diferenciados devem ser feitos nessas áreas, como aplicação em maior frequência de calcário, gesso, rotação de áreas de irrigação, suspensão da irrigação em alguns períodos e, principalmente, quantificar adequadamente os volumes de lixivios aplicados e limita-los com base nas quantidades de Na adicionadas. Além desses fatores, o monitoramento constante dos teores de Na no solo é fundamental para evitar níveis críticos de sodicidade e as suas consequências negativas.

Pelos resultados obtidos, em curtos intervalos de irrigação os solos já apresentaram altos teores de Na. Logo, a rotação temporária de áreas sob aplicação do lixiviado industrial tratado é fundamental para se evitar o acúmulo de Na.

As plantas, de maneira geral, devido as grandes quantidades de nutrientes e Na adicionadas pela irrigação com o lixiviado, não conseguiram absorver percentuais significativos em relação as quantidades totais adicionadas. Assim, além do Na, as quantidades de NH_4^+ adicionadas pela irrigação bem como as formas e concentrações de N no solo devem ser monitoradas,

principalmente, devido aos altos teores de amônio no lixiviado industrial tratado.

Para estudos posteriores indica-se a avaliação do efeito do Na em sub superfície, seus impactos nas camadas subjacentes de solo e suas consequências na qualidade das águas de corpos hídricos subterrâneos e de superfície.

9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AATSE (Australian Academy of Technological Sciences and Engineering). **Overview of the Australian Guidelines for Water Recycling: Managing Health and Environmental Risks**. Victoria, Australia. 2006. 16p.

ADEKALU, K. O.; OKUNADE, D. A. Effects of pond water and sewage effluent treatments on yield and nutrient uptake of maize. **Tropical Agriculture**, Oxford, v.79, n.2, p.120-124, 2002.

AGENDA 21, 1992, Rio de Janeiro. **Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento**. Brasília: Senado Federal, 1996. 585p.

AGUNWAMBA, J.C. Analysis of socioeconomic and environmental impacts of waste stabilization pond and unrestricted wastewater irrigation: interface with maintenance. **Environmental Management**, New York, v.27, p.463-476, 2001.

ALVES, M.C.; NASCIMENTO, V.; SOUZA, Z.M. Recuperação em área de empréstimo usada para construção de usina hidrelétrica. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.16, n.8, p.887–893, 2012.

AL-JALOUD, A.A. et al. Effect of wastewater irrigation on mineral composition of corn and sorghum plants in a pot experiment. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v.18, p.1677-1692, 1995.

AL-JALOUD, A.A. et al. Effect of irrigation and nitrogen on yield and yield components of two rapeseed cultivars. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v.30, p.57-68, 1996.

AL-OMARI, A.; FAYYAD, M. Treatment of domestic wastewater by subsurface flow constructed wetlands in Jordan. **Desalination**, Swansea, v. 155, p.27-39, 2003.

ARTIOLA, J.F.; PEPPER, I.L. Longterm influence of liquid sewage sludge on the organic carbon and nitrogen content of a furrowirrigated desert soil. **Biology and Fertility of Soils**, Berlin, v.14, p.30-36, 1992.

APHA (AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION). **Standard Methods for the Examination of Water and wastewater**. 181th ed.. Washington, DC : American Public Health Association, 2005. 541p.

ASANO, T., LEVINE, A.D. Wastewater reclamation, recycling and reuse: past, present and future. **Water Science and Technology**, Vienna, v.33, p.10–11, 1996.

AYERS, R.S., WESTCOT, D.W., **Water quality for agriculture**. Rome, FAO, 1989. 174p. (FAO Irrigation and Drainage Paper n. 29)

BALKS, M.R.; BOND, W.J.; SMITH, C.J. Effects of sodium accumulation on soil physical properties under an effluent-irrigated plantation. **Australian Journal of Soil Research**, Melbourne, v.36, p.821-830, 1998.

BARRETO, A.B. et al. Changes in chemical attributes of a Fluvent cultivated with castor bean and irrigated with wastewater. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.17, n.5, p.480–486, 2013.

BERTONCINI, E.I. Tratamento de efluentes e reuso da água no meio agrícola. **Revista Tecnologia & Inovação Agropecuária**, São Paulo, v.1, n.1, p.152-169, 2008.

BARTON, L. et al. Land application of domestic effluent onto four soil types: plant uptake and nutrient leachig. **Journal of Environmental Quality**, Madison, v.34, p.635-643, 2005.

BERNSTEIN, L. Effects of salinity and sodicity on plant growth. **Annual Review of Phytopathology**, Palo Alto, v.13, p.295-312, 1975.

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

BLUM, J. et al. Soil chemical attributes and grape yield as affected by gypsum application in southern Brazil. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v.42, 1434–1446, 2011.

BLUM, J. et al. Soil properties in a sugarcane plantation after the application of treated sewage effluent and phosphogypsum in Brazil. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v.115, p.203– 216, 2012.

BLUM, J. et al. Nitrogen and phosphorus leaching in a tropical Brazilian soil cropped with sugarcane and irrigated with treated sewage effluent. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 117, p. 115-122, 2013.

BOND, W.J. Effluent irrigation – an environmental challenge for soil science. **Australian Journal of Soil Research**, Melbourne, v.36, p.543-555, 1998.

BOUCHARD, D.C.; WILLIAMS, M.K.; SURAMPALLI, R.Y. Nitrate contamination of ground water: sources and potencial health effects. **Journal of the American Water Works Association**, Denver, v.84, p.85-90,1992.

BOUWER, H.; CHANEY, R.L. Land treatment of wastewater. **Advances in Agronomy**, San Diego, v.26, p.133-176, 1974.

BOUWER, H; IDELOVITCH, E. Quality requirements for irrigation with sewage water. **Journal of irrigation and Drainage Engineering**, New Delhi, v. 113, p.516-535, 1987.

BRASIL. Ministério do Planejamento, Orçamento e Gestão. **Censo demográfico 2000**: características da população e dos domicílios: resultados do universo. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2001. 519p.

BRESSAN, R.A. et al. Reduced cell expansion and changes in cell walls of plant cells adapted to NaCl. In: ENVIRONMENTAL injury to plants. San Diego : Academic Press, 1990. Cap.7, p.137-171.

CAIRES, E.F. et al. Changes in soil chemical characteristics by surface application of lime and gypsum and soybean response in no-tillage system. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.22, p.27-34, 1998.

CAMARGO, F.A.O.; SANTOS, G.A.; ROSSIELLO, R.O.P. Produção de ácidos orgânicos voláteis pela planta de arroz sob condições anaeróbias. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.17, p.337-342, 1993.

CAMARGO, F.A.O.; SANTOS, G.A.; ZONTA, E. Alterações eletroquímicas em solos inundados. **Ciência do Solo**, Santa Maria, v.29, p.171-180, 1999.

CARMONA, F.C. et al. Attributes of irrigated rice as affected by soil sodicity and potassic fertilizer application. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.35, p.889-897, 2011.

CASTILLO, E.G. et al. Response to salinity in rice: comparative effects of osmotic and ionic stresses. **Plant Production Science**, Tóquio, v.10, p.159-170, 2007.

CAUDURO, F. A., DORFMAN, R. **Manual de ensaios de laboratório e de campo para irrigação e drenagem**. Porto Alegre: IPH/UFRGS, 1990. 216 p.

CONSEMA. **Resolução CONSEMA 128/2006**. Dispõe sobre a fixação de padrões de emissões de efluentes líquidos para fontes de emissão que lancem seus efluentes em águas superficiais no Estado do Rio Grande do Sul. Secretaria do Meio Ambiente. Porto Alegre, 2006. 9p.

CQFS-RS/SC (Comissão de Química e Fertilidade do Solo dos Estados do RS E SC). **Manual de adubação e calagem para os Estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina**. 10^a ed. Porto Alegre: SBCS - Núcleo Regional Sul, 2004. 400p.

CHRISTOFIDIS, D. Os recursos hídricos e a prática da irrigação no Brasil e no mundo. **Irrigação e Tecnologia Moderna**, Brasília, v.49, p.8-13, 2001.

CHURCHMAN, G.J.; SKJEMSTAD, J.O.; OADES, J.M. Influence of clay minerals and organic matter on effects of sodicity on soils. **Australian Journal of Soil Research**, Melbourne, v.31, p.779-800, 1993.

COPPOLA, A. et al. Methodological approach for evaluating the response of soil hydrological behavior to irrigation with treated municipal wastewater. **Journal of Hydrology**, Wellington, v.292, p.114–134, 2004.

DAY, A.D.; TUCKER, T.C. Effects of treated municipal waste water on growth, fiber, protein, and amino acid content of sorghum grain. **Journal of Environmental Quality**, Madison, v.6, p.325-327, 1977.

DI, H.J.; CAMERON, K.C. Nitrate leaching in temperate agroecosystems: sources, factors and mitigating strategies. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, Dordrecht, v.64, p.237-256, 2002.

DUAN, R.; SHEPPARD, C. D.; FEDLER, C. B. Short-term effects of wastewater land application on soil chemical properties. **Water, Air and Soil Pollution**, Amsterdam, v.211, p.165-176, 2010.

DYNIA, J.F.; BARBOSA FILHO, M.P. Alterações de pH, Eh e disponibilidade de micronutrientes para arroz irrigado em um solo de várzea tratado com calcário e palha de arroz em casa de vegetação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 17, n.1, p. 67-74, 1993.

EMBRAPA. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos. **Manual de métodos de análise de solo**. 2 ed. Rio de Janeiro, 1979.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos (Rio de Janeiro, RJ). **Manual de métodos de análise de solo**. Rio de Janeiro, 2ª ed. Rio de Janeiro, 1997. 212 p.

EMBRAPA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 2ª ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2006. 306p.

EPSTEIN, E.; BLOOM, A.J. **Mineral nutrition of plants: principles and perspectives**. Massachusetts: Sinauer Associates, Massachusetts, 2005. 380p.

FALKNER, R.A.; SMITH, C.J. Changes in soil chemistry in effluent- irrigated *Pinus radiata* and *Eucalyptus grandis*. **Australian Journal of Soil Research**, Melbourne, v.35, p.131-147, 1997.

FALKNER, R.A.; POLGLASE, P.J. Transport of phosphorus through soil in an effluent-irrigated tree plantation. **Australian Journal of Soil Research**, Melbourne, v.35, p.385-397, 1997.

FEIGIN, A.; RAVINA, I.; SHALHEVET, J. **Irrigation with treated sewage effluent: management for environmental protection**. Berlin : Springer-Verlag, 1991. 224p.

FEIGIN, A. et al. The nitrogen factor in the management of effluent-irrigated soils. **Soil Science**, Baltimore, v.125, p.248-254, 1978.

FONSECA, A. F.; MELFI, A. J.; MONTES, C. R. Maize growth and changes in soil fertility after irrigation with treated sewage effluent. in soil acidity, exchangeable cations, and sulfur, boron and heavy metals availability.

Communications in Soil Science and Plant Analysis, New York, v.36, p.1983-2003, 2005.

FONSECA, A.F. et al. Agricultural use of treated sewage effluents: agronomical - environmental implications and perspectives for Brazil. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v.64, p.194–209, 2007.

FEPAM (Fundação Estadual de Proteção Ambiental Henrique Roessler). **Diagnóstico da poluição hídrica na região hidrográfica do Guaíba**. Porto Alegre, FEPAM, 2001. 83p.

FRIEDEL, J.K. et al. Effects of longterm waste water irrigation on soil organic matter, soil microbial biomass and its activities in central Mexico. **Biology and Fertility of Soils**, Berlin, v.31, p.414-421, 2000.

FUNDAÇÃO DE ECONOMIA E ESTATÍSTICA. **Índice de desenvolvimento de socioeconômico** (IDESE). Porto Alegre, 2009. 85p. (Relatório técnico)

GADALLAH, M.A.A. Effects of industrial and sewage waste water on the concentration of soluble carbon, nitrogen, and some mineral elements in sunflower plants. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v.17, p.1369-1384, 1994.

GRATTAN, S.R. et al. Rice is more sensitive to salinity than previously thought. **California Agriculture**, Richmond, v.56, p.189-195, 2002.

GLOAGUEN, T.V. et al. Composição química da solução do solo nas diferentes classes de poro do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.33, p.1105-1113, 2009.

HALLIWELL, D.J.; BARLOW, K.M.; NASH, D.M.; A review of the effects of wastewater sodium on soil physical properties and their implications for irrigation systems. **Australian Journal of Soil Research**, Melbourne, v.39, p.1259–1267, 2001.

HAMILTON, A.J. et al. Wastewater irrigation: the state of play. **Vadose Zone Journal**, Madison, v.6, p.823–840, 2007.

HARUVY, N. Agricultural reuse of wastewater: nation-wide costbenefit analysis. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, Amsterdam, v.66, p.133-119, 1997.

HERPIN, U. et al. Chemical effects on the soil-plant system in a secondary treated wastewater irrigated coffee plantation - a pilot field study in Brazil. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v.89, p.105-115, 2007.

HESPANHOL, I. Potencial de reuso de água no Brasil – agricultura, indústria, municípios e recarga de aquíferos. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v.7, p,75-95, 2002.

HILLEL, D. **Environmental Soil Physics**. San Diego: Academic Press, 1998. 771p.

HOLZSCHUH, M.J. et al. Absorção de nutrientes e crescimento do arroz com suprimento combinado de amônio e nitrato. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.35, p.1357-1366, 2011.

HOOKE, J.E.; KARDOS, L.T. Nitrate leaching during long-term spray irrigation for treatment of secondary sewage effluent on woodland sites. **Journal of Environmental Quality**, Madison, v.7, p.30-34, 1978.

HUSSAIN, G.; AL-JALOOD, A.A.; KARIMULLA, S. Effect of treated effluent irrigation and nitrogen on yield and nitrogen use efficiency of wheat. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v.30, p.175-184, 1996.

IBGE. **Indicador de desenvolvimento sustentável**. Estudos e Pesquisas. Rio de Janeiro: IBGE, 2010. 443p. (Informações Geográficas No. 7)

IBGE. **Indicadores de desenvolvimento sustentável**. Rio de Janeiro, 2012. 350p. v.9.

JANSSEN, B.H.; BOESVELD, H.; JUSTO RODRIGUEZ, M. Some theoretical considerations on evaluating wastewater as a source of N, P, and K for crops. **Irrigation and Drainage**, New Delhi, v.54, p.S35-S47, 2005.

JOHNS, G.G.; McCONCHIE, D.M. Irrigation of bananas with secondary treated sewage effluent. I. Field evaluation of effect on plant nutrients and additional elements in leaf, pulp and soil. **Australian Journal of Agricultural Research**, Melbourne, v.45, p.1601-1617, 1994.

KHATUN, S. J.; FLOWERS. Effects of salinity on seed set in rice. **Plant Cell Environmental**, Oxford, v.18, p.61-67, 1995.

KIRK, G.J.D. Plant-mediated processes to acquire nutrients: nitrogen uptake by rice plants. **Plant and Soil**, Dordrecht, v.232, p.129-134, 2001.

KIZILOGLU, F. M. et al. Effects of untreated and treated wastewater irrigation on some chemical properties of cauliflower (*Brassica oleracea* L. var. botrytis) and red cabbage (*Brassica oleracea* L. var. rubra) grown on calcareous soil in Turkey. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v.95, p.716-724. 2008.

LEAL, R.M.P. et al. Sodicty and salinity in a Brazilian oxisol cultivated with sugarcane irrigated with wastewater. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v.96, p.307-316, 2009.

MANCINO, C.F.; PEPPER, I.L. Irrigation of turfgrass with secondary sewage effluent: soil quality. **Agronomy Journal**, Madison, v.84, p.650-654, 1992.

McLAIN, J.E.T.; MARTENS, D.A. N₂O production by heterotrophic N transformations in a semiarid soil. **Applied Soil Ecology**, Belfield, v.32, p.253-263, 2006.

MELO, P.C.S. et al. Seleção de genótipos de arroz tolerantes a salinidade na fase de germinação. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.36, p.58-64, 2006.

MENNEER, J.C.; MCLAY, C.D.A.; LEE, R. Effects of sodiumcontaminated wastewater on soil permeability of two New Zealand soils. **Australian Journal of Soil Research**. Melbourne, v.39, p.877–891, 2001.

MEURER, E. J. (Ed.). **Fundamentos de Química do Solo**. Porto Alegre: Evangraf, 2008. 280p.

MIELNICZUK, J. et al. Manejo de solo e culturas e sua relação com os estoques de carbono e nitrogênio do solo. **Tópicos em ciência do solo**, Viçosa, v.3, p.209–248, 2003.

MOHAMMAD, M.J; AYADI, M. Forage yeld and nutrient uptake as influenced by secondary treated wastewater. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v.27, p.351-364, 2004.

MOHAMMAD, M.J.; MAZAHREH, N. Changes in soil fertility parameters in response to irrigation of forage crops with secondary treated wastewater. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v.34, 1281-1294, 2003.

NAIDU, R.; RENGASAMY, P. Ion Interactions and constraints to plant nutrition in Australian sodic soils. **Australian Journal of Soil Research**, Melbourne, v.31, p.801-819, 1993.

NAIME, R.; FAGUNDES, R.S. Controle da qualidade do Arroio Portão, RS. **Pesquisas em Geociências**, Porto Alegre, v.32, p.27-35, 2005.

NELSON, P.N.; HAM, G.J. Exploring the response of sugar caneto sodic and saline conditions through natural variation in the field. **Field Crop Research**, Wageningen, v.66, p. 245-255, 2000.

NICHELE, J. **Utilização de efluentes sanitários tratados para o suprimento de nutrientes à cultura do milho e modificações em propriedades químicas do solo**. 2009. 76f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 2009.

NURK, K. et al. Microbial characteristics and nitrogen transformation in planted soil filter for domestic wastewater treatment. **Journal of Environmental Science and Health Part A – Toxic/Hazardous Substances & Environmental Engineering**, Philadelphia v.40, p.1201-1214, 2005.

OBATA, T. et al. Rice shaker potassium channel OsKAT1 confers tolerance to salinity stress on yeast and rice cells. **Plant Physiology**, Waterbury, v.144, p.1978-1985, 2007.

OLIVEIRA, E.L.; PAVAN, M.A. Control of soil acidity in no-tillage system for soybean production. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v.38, p.47–57, 1996.

ORON, G. et al. Wastewater treatment, renovation and reuse for agricultural irrigation in small communities. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v.38, p.223-234, 1999.

ORSI, C. Água de 20 capitais tem contaminantes emergentes. **Jornal da Unicamp**, Campinas, n.576, p.3, 2013.

OSTER, J.D., SHAINBERG, I. Soil responses to sodicity and salinity: challenges and opportunities. **Australian Journal of Soil Research**, Melbourne, v.39, p.1219–1224. 2001.

OVERMAN, A.R. Irrigation of corn with municipal effluent. **Transactions of the American Society of Agricultural Engineers**, St. Joseph, v.24, p.74-80, 1981.

PEDRERO, F. et al. Use of treated municipal wastewater in irrigated agriculture – Review of some practices in Spain and Greece. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v.97. 1233-1241, 2010.

PEREIRA, B.F.F. et al. Reclaimed wastewater: impact on soil–plant system under tropical conditions. **Journal of Hazardous Materials**, Amsterdam, v.192, p.54–61, 2011.

PETTYGROVE, G.S., ASANO, T. **Irrigation with Reclaimed Municipal Wastewater - A Guidance Manual**. Chelsea, MI: Lewis Publishers, 1985. 186p.

POLLICE, A. et al. Tertiary filtered municipal wastewater as alternative water source in agriculture: a field investigation in Southern Italy. **Science of the Total Environment**, Amsterdam v.324, p.201-210, 2004.

POWLSON, D. S. et al. “When does nitrate become a risk for humans?” **Journal of Environmental Quality**, Madison, v. 37, n.2, p. 291–295, 2008.

PONNAMPERUMA, F.N. The chemical of submerged soils. **Advances in Agronomy**, San Diego, v.24, p. 29-96, 1972.

QADIR, M. et al. Agricultural use of marginal-quality water—opportunities and challenges. In: MOLDEN, D. (Ed.) **Water for food; water for life**. A Comprehensive Assessment of Water Management in Agriculture. London: [S.n.], 2007. p. 425–457.

QIAN, Y.L.; MECHAM, B. Long-term effects of recycled wastewater irrigation on soil chemical properties on golf course fairways. **Agronomy Journal**, Madison, v.97, p.717–721, 2005.

QUIN, B.F.; WOODS, P.H. Surface irrigation of pasture with treated sewage effluent. I. Nutrient status of soil and pastures. **New Zealand Journal of Agricultural Research**, Wellington, v.21, p.419-426, 1978.

RAMIREZ-FUENTES, E. et al. Characteristics, and carbon and nitrogen dynamics in soil irrigated with wastewater for different lengths of time. **Bioresource Technology**, Philadelphia, v.85, 179-187, 2002.

RANA, L.; DHANKHAR, R.; CHHIKARA, S. Soil characteristics affected by long term application of sewage wastewater. **International Journal of Environmental Research**, Tehran, v.4, p.513–518, 2010.

RENGASAMY, P.; OLSSON, K.A. Sodicity and soil structure. **Australian Journal of Soil Research**, Amsterdam, v.29, n.6, p.935-952, 1991.

REUNIÃO TÉCNICA DA CULTURA DO ARROZ IRRIGADO, 29., 2012, Gravatal – SC. **Arroz irrigado: recomendações técnicas da pesquisa para o Sul do Brasil/28**. Itajaí : SOSBAI, 2012. 176 p.

RIBEIRO, M. R.; BARROS, M. F. C.; FREIRE, M.B.G.S. Química dos solos salinos e sódicos. In: QUÍMICA e mineralogia do solo. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2009. v.2, p.449-484.

RICHARDS, L.A. **Diagnosis and improvement of saline and alkali soils**. Washington: US Department of Agriculture, 1954. 160p. (USDA Agricultural Handbook, 60)

RODRIGUES, L.N. et al. Produção de arroz em condições de salinidade a partir de mudas formadas com e sem estresse salino. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.9, p.95-100, 2005.

RUSAN, M. J. M.; HINNAWI, S.; ROUSAN, L. Long term effect of wastewater irrigation of forage crops on soil and plant quality parameters. **Desalination**, Swansea, v.215, p.143-152, 2007.

SALGOT, M., VERGE'S, C., ANGELAKIS, A.N. Risk assessment in wastewater recycling and reuse. **Water Science and Technology: water supply**, London, v.3, n.4, p.301–309, 2003.

SCHIPPER, L.A. et al. Impact of land-applied tertiary-treated effluent on soil biochemical properties. **Journal of Environmental Quality**, Madison, v.25, p.1073-1077, 1996.

SHAHALAM, A.; ZAHRA, B.M.A.; JARADAT, A. Wastewater irrigation effect on soil, crop and environment: a pilot scale study at Irbid, Jordan. **Water, Air, and Soil Pollution**, Dordrecht, v.106, p.425-445, 1998.

SHEIKH, B. et al. Monterrey wastewater reclamation study for agriculture. **Research Journal of the Water Pollution Control Federation**, Washington, v.62, n.3, p.216-226, 1990.

SILVA, L.S.; SOUSA, R.O.; BOHNEN, H. Alterações nos teores de nutrientes em dois solos alagados, com e sem plantas de arroz. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.33, p.487-490, 2003.

SILVA, S.C. **“Wetlands construídos” de fluxo vertical com meio suporte de solo natural modificado no tratamento de esgotos domésticos**. 2007. 231f. Tese (Doutorado) - Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, 2007.

SINGH, H., BAJWA, M.S. Effect of sodic irrigation and gypsum on the reclamation of sodic soil and growth of rice and wheat plants. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v.20, p.163–171, 1991.

SMITH, C.J.; FRENEY, J.R.; BOND, W.J. Ammonia volatilization from soil irrigated with urban sewage effluent. **Australian Journal of Soil Research**, Melbourne, v.34, p.789-802, 1996.

SOUSA, D. M. G.; LOBATO, E.; REIN, T. **Uso de gesso agrícola nos solos do cerrado**. Planaltina-DF: Embrapa Cerrados, 2005. 19p.(Circular técnica, 32)

SOUSA, R.O. **Oxirredução em solos alagados afetada por resíduos vegetais**. 2001. 164f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 2001.

SOUZA, C.N. **Tratamento primário de efluentes brutos de curtume quimicamente aprimorado por sedimentação**. 2007. 85f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Campo Grande, 2007.

SPEIR, T.W. et al. Soil and stream–water impacts of sewage effluent irrigation onto steeply sloping land. **Journal of Environmental Quality**, Madison, v.28, p.1105–1114. 1999.

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

STEVENSON, F.J. **Cycles of soil: carbon, nitrogen, phosphorus, sulfur, micronutrients**. New York: John Wiley & Sons, 1986. 427p.

STEWART, H.T.L.; HOPMANS, P.; FLINN, D.W. Nutrient accumulation in trees and soil following irrigation with municipal effluent. **Environmental Pollution**, London, v.63, p.155–177, 1990.

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

SU, J.J.; YEH, K.S.; TSENG, P.W. A strain of *Pseudomonas* sp. Isolated from piggery wastewater treatment systems with heterotrophic nitrification capability in Taiwan. **Current Microbiology**, New York, v.53, p.77-81, 2006.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. Porto Alegre. 4. Ed. Artmed, 2004. 820 p.

TANJI, K.K. Irrigation with marginal quality waters: issues. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, Newark, v.123, p.165-169, 1997.

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

TEDESCO, M. J.; GIANELLO, C.; GIASSON, E. Avaliação do sistema de disposição final no solo de efluente líquido produzido pelo SITEL/CORSAN.

Relatório técnico de consultoria para CSD (Geoclock) Ltda. Porto Alegre, 2004. 34p.

TILLMAN, R.W.; SURAPANENI, A. Some soil-related issues in the disposal of effluent on land. **Australian Journal of Experimental Agriculture**, Melbourne, v.42, p.225–235, 2002.

USEPA. **Technologies and costs document for the final long term 2 enhanced surface water treatment rule and final stage 2 disinfectants and disinfection byproducts rule**. Washington, 2005. p.5-13. (Office of Water, (4606M) - EPA 815-R-05-013)

VALADÃO, F.C.A. et al. Variação nos atributos do solo em sistemas de manejo com adição de cama de frango. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.35, 2073-2082, 2011.

VARALLO, A. C. T. et al. Alterações nos atributos de um Latossolo Vermelho-Amarelo irrigado com água de reúso. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.14, p.372-377, 2010.

VAZQUEZ-MONTIEL, O.; HORAN, N.J.; MARA, D.D. Management of domestic wastewater for reuse in irrigation. **Water Science and Technology**, Vienna, v.33, p.355-362, 1996.

WANG, Z. et al. Assessing the soil quality of long-term reclaimed wastewater-irrigated cropland. **Geoderma**, Amsterdam, v.114, p.261-278, 2003.

WANG, J.F.; WANG, G.X.; WANYAN H. Treated wastewater irrigation effect on soil, crop and environment: wastewater recycling in the loess area of China. **Journal of Environmental Science**, China, v.19, p.1093–1099. 2007.

WESTCOT, D.W.; AYERS, R.S. Irrigation water quality criteria. In: PETTYGROVE, G.S.; ASANO, T. (Ed.). **Irrigation with Reclaimed Municipal Wastewater - A Guidance Manual**. Chelsea: Lewis Publishers, 1985. 4p.

WESTCOT, D.W. **Quality control of wastewater for irrigated crop production**. Rome: Food and Agriculture Organization, 1997. 97p. (Water Reports, 10)

WHO (World Health Organization). **Guidelines for the safe use of wastewater, excreta and greywater**. Geneva, 2006. 114p. V.2 - Wastewater use in agriculture.

WHO (World Health Organization). **Guidelines for drinking water quality**. 3^a ed. Geneva, 2004. 540p. v. 1

YADAV, R.K. et al. Post-irrigation impact of domestic sewage effluent on composition of soils, crops and ground water—a case study. **Environmental International**, Oxford, v.28, p. 481–486. 2002.

YAN, F.; SCHUBERT, S.; MENGEL, K. Soil pH increase due to biological decarboxylation of organic anions. **Soil Biology & Biochemistry**, Oxford, v.28, p.617-624, 1996.

YOON, C.G.; KWUN, S.K. Feasibility study of reclaimed wastewater irrigation to paddy rice culture in Korea. In: INTERNATIONAL WORKSHOP ON WASTEWATER REUSE MANAGEMENT, 19., 2001, Seoul, Rep. Korea. **[Peppers]**. Seoul, 2001. 10p. Disponível em: http://www.nerc-wallingford.ac.uk/research/cairoworkshop/papers/WASTEWATER/ws2_16.PDF. Acesso em: 20 fev. 2014.

ZAMBROSI, F.C.B.; ALLEONI, L.R.F.; CAIRES, E.F. Nutrient concentration in soil water extracts and soybean nutrition in response to lime and gypsum applications to an acid oxisol under no-till system. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, Dordrecht, v.79, p.169–179, 2007.

10. APÊNDICE

Para especiação iônica dos elementos químicos contidos no lixiviado utilizou-se o programa Visual MINTEQ. Os teores médios dos elementos foram adicionados em mg L^{-1} e o pH fixado em 7,9. Os resultados da distribuição das espécies químicas são apresentadas na Tabela 28. O carbono orgânico dissolvido foi fixado no programa em 60 mg L^{-1} , e foi atribuída a sigla DOM (*dissolved organic carbon*).

Apêndice 1. Percentual de distribuição das espécies químicas presentes no lixiviado industrial tratado.

Componente	Concentração (%)	Espécie Química	
DOM1	72,1	DOM1	
	0,0	H DOM1	
	22,9	Ca DOM1	
	4,9	Mg DOM1	
	0,0	Ni DOM1	
	0,0		
NH ₄ ⁺¹	96,1	NH ₄ ⁺¹	
	0,3	NH ₄ SO ₄ ⁻	
	3,6	NH ₃ (aq)	
Ca ⁺²	80,9	Ca ⁺²	
	13,2	Ca DOM1	
	3,1	CaCl ⁺	
	2,3	CaSO ₄ (aq)	
	0,0	CaNH ₃ ⁺²	
	0,3	CaHPO ₄ (aq)	
	0,1	CaPO ₄ ⁻	
	Mg ⁺²	90,5	Mg ⁺²
		1,5	Mg DOM1
		0,0	MgOH ⁺
5,6		MgCl ⁺	
2,0		MgSO ₄ (aq)	
0,4		MgHPO ₄ (aq)	
K ⁺¹	98,7	K ₊₁	
	1,1	KCl (aq)	
	0,2	KSO ₄ ⁻	

Apêndice 1. continuação

	0,0	KHPO_4^-
PO_4^{-3}	0,2	NaH_2PO_4 (aq)
	65,2	HPO_4^{-2}
	7,6	H_2PO_4^-
	0,0	MgPO_4^-
	12,9	MgHPO_4 (aq)
	4,3	CaHPO_4 (aq)
	1,1	CaPO_4^-
	0,1	$\text{CaH}_2\text{PO}_4^{4+}$
	8,0	NaHPO_4^-
	0,5	KHPO_4^-
	0,0	KH_2PO_4 (aq)
	0,1	Na_2HPO_4 (aq)
Na^{+1}	98,8	Na^{+1}
	1,1	NaCl (aq)
	0,1	NaSO_4^-
	0,0	NaHPO_4^-
SO_4^{-2}	82,9	SO_4^{-2}
	4,7	MgSO_4 (aq)
	2,8	CaSO_4 (aq)
	4,8	NaSO_4^-
	0,5	KSO_4^-
	4,3	NH_4SO_4^-
Cl^{-1}	98,9	Cl^{-1}
	0,1	CaCl^+
	0,3	MgCl^+
	0,1	KCl (aq)
	0,7	NaCl (aq)
Zn^{+2}	52,9	Zn^{+2}
	34,4	Zn DOM1
	2,5	ZnOH^+
	2,1	Zn(OH)_2 (aq)
	2,4	ZnCl^+
	0,1	ZnCl_2 (aq)
	1,4	ZnSO_4 (aq)
	0,0	$\text{Zn(NH}_3)_3^{+2}$
	0,2	$\text{Zn(NH}_3)_2^{+2}$
	3,2	ZnNH_3^{+2}
	0,8	ZnHPO_4 (aq)
Cu^{+2}	3,7	Cu^{+2}
	59,5	Cu DOM1
	5,4	CuOH^+
	0,7	Cu(OH)_2 (aq)
	0,1	CuCl^+
	0,1	CuSO_4 (aq)

Apêndice 1. continuação

	0,1	$\text{Cu}(\text{NH}_3)_4^{+2}$
	3,0	$\text{Cu}(\text{NH}_3)_3^{+2}$
	12,6	$\text{Cu}(\text{NH}_3)_2^{+2}$
	14,4	CuNH_3^{+2}
	0,4	CuHPO_4 (aq)
Ni^{+2}	60,2	Ni^{+2}
	24,7	Ni DOM1
	0,4	NiOH^+
	0,0	$\text{Ni}(\text{OH})_2$ (aq)
	0,3	NiCl^+
	1,5	NiSO_4 (aq)
	0,0	$\text{Ni}(\text{NH}_3)_3^{+2}$
	11,9	NiNH_3^{+2}
	0,6	$\text{Ni}(\text{NH}_3)_2^{+2}$
	0,4	NiHPO_4 (aq)
$\text{Cr}(\text{OH})_2^{+1}$	3,3	$\text{Cr}(\text{OH})_2^{+1}$
	0,1	CrOH^{+2}
	96,6	$\text{Cr}(\text{OH})_3$ (aq)
	0,0	$\text{Cr}(\text{OH})^{4-}$
DOC (Gaussian DOM)	100,0	DOC (Gaussian DOM)
