

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
CÂMPUS DE JABOTICABAL
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E VETERINÁRIAS

EFEITOS NO SOLO E EM PLANTAS DE
CANA-DE-AÇÚCAR CULTIVADAS COM LODO
DE ESGOTO E VINHAÇA

Fábio Camilotti
Engenheiro Agrônomo

JABOTICABAL – SP – BRASIL
2006

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JULIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E VETERINÁRIAS
CÂMPUS DE JABOTICABAL

EFEITOS NO SOLO E EM PLANTAS DE
CANA-DE-AÇÚCAR CULTIVADAS COM
LODO DE ESGOTO E VINHAÇA

Fábio Camilotti

Orientador: Prof. Dr. Itamar Andrioli

Co-Orientador: Prof. Dr. Marcos Omir Marques

Tese apresentada à Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – Unesp, Câmpus de Jaboticabal, como parte das exigências para a obtenção do título de Doutor em Agronomia (Produção Vegetal).

JABOTICABAL – SÃO PAULO – BRASIL

Dezembro de 2006

Camilotti, Fábio
C183e Efeitos no solo e em plantas de cana-de-açúcar cultivadas com
 lodo de esgoto e vinhaça / Fábio Camilotti. -- Jaboticabal, 2006
 x, 79 f. ; 28 cm

 Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de
Ciências Agrárias e Veterinárias, 2006
 Orientador: Itamar Andrioli
 Banca examinadora: Aílto Antonio Casagrande, José Frederico
Centurion, Jairo Antonio Mazza, Fábio Luis Ferreira Dias.
 Bibliografia

 1. Metais pesados. 2. Produtividade agrícola. 3. Propriedades
físicas. 4. Variáveis tecnológicas. I. Título. II. Jaboticabal-Faculdade
de Ciências Agrárias e Veterinárias.

 CDU 633.61: 631.43

Ficha catalográfica elaborada pela Seção Técnica de Aquisição e Tratamento da Informação – Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação - UNESP, Câmpus de Jaboticabal.

DADOS CURRICULARES DO AUTOR

FÁBIO CAMILOTTI — nascido em 21 de fevereiro de 1978, na cidade de Jaboticabal (SP). Iniciou suas atividades agrícolas formando no Colégio Técnico Agropecuário “José Bonifácio” da UNESP de Jaboticabal-SP em 1995. Graduiu-se Engenheiro Agrônomo em 2000 pela Faculdade de Ciências Agrárias da Universidade de Marília. Em 2001 iniciou suas atividades pós-graduandas e se especializou em Manejo do Solo na ESALQ/USP de Piracicaba-S.P. no mesmo ano. Em 2003 obteve o título de Mestre em Agronomia (Área de Concentração em Ciência do Solo) na FCAVJ/UNESP, tendo orientações do Prof. Dr. Itamar Andrioli e do Dr. Fábio Luis Ferreira Dias. Durante o curso de mestrado foi Diretor Técnico Científico da Associação dos Pós-Graduandos além de Representante Titular Discente do curso de Agronomia em Ciência do Solo. Em 2003 ingressou no curso de Doutorado em Agronomia (Área de Concentração em Produção Vegetal) na FCAVJ/UNESP, tendo as orientações do Prof. Dr. Itamar Andrioli e do Prof. Dr. Marcos Omir Marques o qual faz parte deste trabalho. Atualmente, além das atividades acadêmicas é produtor rural.

“Tudo o que vividamente imaginamos, ardentemente desejamos, sinceramente
acreditamos e entusiasticamente colocamos em ação,
inevitavelmente torna-se-á realidade”

Anônimo

Aos meus pais,

Sérgio e Madalena, pelo amor, incentivo e apoio.

À minha irmã,

Renata, pela amizade e companheirismo.

AGRADECIMENTOS

À Deus, pelo conforto nas horas difíceis.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Itamar Andrioli pela orientação, ensino e principalmente pela paciência.

Ao Prof. Dr. Marcos Omir Marques pela co-orientação deste trabalho.

À Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias pela oportunidade oferecida.

À Capes, pelo apóio financeiro.

À Destilaria Santa Inês pela liberação da área experimental.

Aos Professores e membros das bancas examinadoras Aílto Antônio Casagrande, José Frederico Centurion, Jairo Antonio Mazza, Fábio Luis Ferreira Dias e Amauri Nelson Beutler.

Ao **amigo** Pantaneiro (Alysson Roberto da Silva) pela amizade e companheirismo nestes 5 anos de convivência.

Aos funcionários do Departamento de Solos: Djair, Nenê, Gomes, Luiz, Cheirinho, Hoster, Marta, Célia, Maria Inês, Cláudia, Mauro e Adolfo, por terem suportado tanto estress.

À minha namorada Ariane Pereira de Godoy pelo amor, companheirismo e amizade.

Aos funcionários do Departamento de Tecnologia: Wladi, Zé Carlos, Chelli, Bete e Renata.

À colega de trabalho Carla Bellintani Pereira pela ajuda nas análises laboratoriais.

À bibliotecária Tieko Sugahara pelas correções bibliográficas.

Ao meu cunhado Alexsandro Camargo pela sugestão da epígrafe.

À todos que direta e indiretamente colaboraram na execução deste trabalho.

SUMÁRIO

	Páginas
Resumo	ix
Summary	x
 Capítulo 1- CONSIDERAÇÕES GERAIS.....	 01
Introdução	01
Revisão bibliográfica	02
Efeito da vinhaça e do lodo de esgoto nas propriedades físicas do solo	02
Efeito da vinhaça e do lodo de esgoto e na produtividade e nas características tecnológicas da cana-de-açúcar.....	06
Efeito do lodo de esgoto e da vinhaça em metais pesados no solo e nas plantas de cana-de-açúcar	11
Referências	16
 Capítulo 2 – ATRIBUTOS FÍSICOS DE UM LATOSSOLO CULTIVADO COM CANA-DE-AÇÚCAR APÓS APLICAÇÕES DE LODO DE ESGOTO E VINHAÇA .	 27
Resumo	27
Introdução	28
Material e Métodos	29
Resultados e Discussão	33
Conclusão	47
Referências	47
 Capítulo 3 – PRODUTIVIDADE E QUALIDADE AGROINDUSTRIAL DA CANA-DE-AÇÚCAR CULTIVADA COM LODO DE ESGOTO E VINHAÇA E ADUBOS MINERAIS.....	 54
Resumo	54
Introdução	55

Material e Métodos	55
Resultados e Discussão	59
Conclusão	63
Referências	63

**Capítulo 4 – EFEITO DA ADUBAÇÃO COM LODO DE ESGOTO E VINHAÇA
PARA CANA-DE-AÇÚCAR NOS TEORES DE METAIS PESADOS NO SOLO E
NA PLANTA.....**

	65
Resumo	65
Introdução	66
Material e Métodos	67
Resultados e Discussão	70
Conclusões.....	76
Referências	76

EFEITOS NO SOLO E EM PLANTAS DE CANA-DE-AÇÚCAR CULTIVADAS COM LODO DE ESGOTO E VINHAÇA

RESUMO – O objetivo deste trabalho foi avaliar se aplicação anual de lodo de esgoto e vinhaça, resíduos empregados com a finalidade exclusiva de fornecer a quantidade necessária de N e K para cana-de-açúcar, causaria alterações nas propriedades físicas, teores totais de metais pesados no solo e na planta, produtividade agrícola e variáveis agroindustriais. O solo da área experimental foi classificado como Latossolo Vermelho distroférico textura argilosa, que já estava sendo cultivado com cana-de-açúcar (variedade SP81-3250). O experimento foi conduzido em blocos ao acaso com três repetições. Os tratamentos consistiram em: (i) dose de lodo de esgoto para suprir 100% do N exigido pela cultura; (ii) dose de lodo de esgoto para suprir 200% do N exigido; (iii) dose de vinhaça para suprir 100% do K exigido; (iv) dose de vinhaça para suprir 200% do K exigido; (v) combinação dos tratamentos (i) e (iii); (vi) combinação dos tratamentos (ii) e (iv); (vii) adubação mineral recomendada. Os somatórios das doses dos resíduos foram de 39 e 51 t ha⁻¹ de lodo de esgoto e de 532 e 1064 m³ ha⁻¹ de vinhaça até o 3º e 4º cortes, respectivamente. Os resultados indicam que o lodo de esgoto, como fonte de N, e a vinhaça como fonte de K, não causaram alterações nos atributos físicos do solo, nos teores totais de metais pesados do solo e da planta, na produtividade agrícola e nas características tecnológicas.

Palavras-chave: metais pesados, produtividade agrícola, propriedades físicas, variáveis tecnológicas.

EFFECTS ON THE SOILS AND ON THE PLANTS SUGARCANE CULTIVATED WITH SEWAGE SLUDGE AND VINASSE

SUMMARY – The objective this work was to evaluate if annual application of sewage sludge and vinasse, residues employed with exclusive purpose to supply N and K to sugar cane, would cause alteration on some physical attributes, on the totals heavy metals on the soil and on the plant, on the cane yield and technological characteristics. Soil from the experimental area was classified as clay Haplustox, which already has been cultivated with sugar cane (variety SP81-3250). The experiment was carried out in a complete randomized block design with three replications. The treatments were: (i) rate of sewage sludge to supply 100% of the N required by the crop; (ii) dose rate of sewage sludge to supply 200% of the N required; (iii) rate of vinasse to supply 100% of the K required; (iv) rate of vinasse to supply 200% of the K required; (v) combination of the treatments (i) and (iii); (vi) combination of the treatments (ii) and (iv); (vii) without sewage sludge and vinasse application. Sums of rates of the residues were of 39 and 51 t ha⁻¹ of sewage sludge and of 532 and 1064 m³ ha⁻¹ of vinasse until 3rd and 4th cuts, respectively. The results indicate that sewage sludge as N source and vinasse as K source, did not cause alteration on the soil physical attributes, on the totals heavy metals on the soil and the plant, on the cane yield and technological characteristics.

Keywords: cane yield, metals heavy, physical attributes, technological characteristics.

CAPÍTULO 1 – CONSIDERAÇÕES GERAIS

Introdução

O Brasil é o maior produtor mundial de cana-de-açúcar. Segundo dados do ANUÁRIO BRASILEIRO DA CANA-DE-AÇÚCAR (2005), na safra 05/06, o Brasil produziu 440 milhões toneladas de cana-de-açúcar em 5,923 milhões hectares o que representa uma produtividade média de 74 toneladas por hectare. Deste total são produzidos 17 bilhões de litros de álcool (hidratado, anidro e neutro), o que representa uma geração média de 221 milhões m³ de vinhaça por ano.

Desta forma a vinhaça é amplamente utilizada como substituta parcial ou total de adubos minerais. A composição química da vinhaça de cana-de-açúcar é variável e difere principalmente do tipo de mosto, entre eles o de melaço, misto e de caldo. Dentre os diversos elementos essenciais às plantas merece destaque o potássio. Por ser o elemento majoritário se constitui no elemento limitante para a definição da dose de vinhaça a ser aplicada nos solos. A maior parte da área com cana-de-açúcar pode receber vinhaça através da operação denominada fertirrigação, que conforme a resolução da CETESB (2005) deverá ser calculada em função da capacidade de troca de cátions e concentração de potássio no solo e na vinhaça. Trabalhos disponíveis na literatura mencionam a necessidade de se proceder à suplementação da vinhaça, principalmente com nitrogênio.

Ao mesmo tempo, o crescimento populacional e o aumento do desenvolvimento industrial geram quantidades crescentes de resíduos, entre os quais se destaca o lodo de esgoto. Na região metropolitana de São Paulo, com uma população equivalente a 6.500.000 pessoas, são produzidas aproximadamente 84.000 toneladas de lodo de esgoto por ano (SABESP, 2006). Este resíduo também apresenta em sua composição vários elementos químicos, em que se destacam aqueles considerados essenciais ao desenvolvimento normal das plantas. No caso específico, o nitrogênio é o elemento que se destaca devendo-o levar em consideração para a definição da dose agrônômica a

ser empregada, bem como os outros elementos que se fazem presentes no lodo de esgoto. Entre esses, aqueles classificados como metais pesados chamam atenção na medida em que podem se acumular nas plantas, em suas diferentes partes, tornando imperativa a adoção de procedimentos criteriosos quando da sua aplicação em solos agrícolas.

Considerando que, quando no solo a vinhaça e o lodo de esgoto são fontes potenciais de potássio e nitrogênio para as plantas e que esses resíduos são produzidos em grandes quantidades, este trabalho teve por objetivo avaliar os efeitos da aplicação de lodo de esgoto e vinhaça nas propriedades físicas do solo, nos teores totais de metais pesados no solo e nas plantas de cana-de-açúcar, bem como a produtividade agrícola e as variáveis agroindustriais da cultura.

Revisão bibliográfica

Efeito da vinhaça e do lodo de esgoto nas propriedades físicas do solo

O impacto do uso do lodo de esgoto e da vinhaça na agricultura é primariamente associado ao solo. Adição de resíduos orgânicos pode resultar em aumento de matéria orgânica no solo (GLÓRIA & ORLANDO FILHO, 1984 e ALBIACH et al, 2000 citado por MELO, 2006).

Neste contexto MELO et al. (1994) estudando a aplicação de 32 t ha⁻¹ lodo de esgoto em Latossolo Vermelho cultivado com cana-de-açúcar, encontraram aumento dos teores de C orgânico. Aumento dos teores de matéria orgânica também são observados por NAVAS et al. (1998) com aplicações de 320 t ha⁻¹ de lodo de esgoto. Por outro lado SILVA et al. (1996) aplicando doses de 0 a 40 t ha⁻¹ de lodo de esgoto em solo cultivado com cana-de-açúcar, por dois anos consecutivos, não encontraram aumento dos teores de matéria orgânica no solo.

Em relação à vinhaça, CANELLAS et al. (2003) encontraram aumento do teor de carbono pela aplicação de cerca de 120 m³ ha⁻¹ por 35 anos em um Cambissolo

cultivado com cana-de-açúcar. Com incremento do teor de matéria orgânica, o estado de agregação do solo aumenta e como consequência seus atributos físicos podem ser alterados (KIEHL, 1979; TISDALL & OADES, 1982; BAYER & MIELNICZUK, 1999; DOMINY et al., 2002).

Diversos são os trabalhos de pesquisas que estudaram o efeito da vinhaça e do lodo de esgoto nas propriedades físicas dos solos. Por ser um resíduo utilizado há mais tempo a vinhaça mereceu as primeiras considerações por parte das pesquisas.

Dentro deste contexto RANZANI (1955/56) citado por FREIRE & CORTEZ (2000), em condições de laboratório, aplicou doses crescentes de vinhaça ao solo (50 a $1000 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$) e concluiu que a porosidade total do solo aumentou em 17%.

CAMARGO et al. (1983) avaliaram as características físicas de um Latossolo Vermelho Escuro, textura média, da Usina São Martinho, tratadas por longo tempo com diferentes quantidades de vinhaça intercaladas com períodos de repouso do solo e comparadas com áreas que não recebeu vinhaça. Verificaram desta forma que não houve diferenças na densidade do solo, porosidade total e no diâmetro aritmético médio.

A aplicação de doses crescentes de vinhaça (0 , 250 , 300 , 600 e $1200 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$) nas avaliações das propriedades físicas de um Latossolo Vermelho textura média foram estudados por ANDRIOLI (1986). O autor verificou que a densidade do solo, a porosidade total, a macroporosidade e a microporosidade não foram influenciadas pela aplicação de vinhaça, o que foi atribuído a não variação nos teores de matéria orgânica do solo.

PEIXOTO et al. (1986) aplicaram cinco doses de vinhaça (0 , 110 , 220 , 330 e $440 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$) em solo argiloso após a colheita do 1º corte da cultura da cana-de-açúcar. A densidade do solo foi avaliada após a aplicação dos tratamentos e antes das colheitas de 1º e 2º cortes nas profundidades de $0-15$ e $15-30$ cm. Os resultados obtidos mostraram que a densidade do solo não foi influenciada pelas aplicações de vinhaça nas diferentes doses testadas.

SILVA & SILVA (1986) fazendo um estudo exploratório da utilização agrícola da vinhaça concluíram que, do ponto de vista físico, a ação direta da vinhaça aumenta a resistência à erosão, aglutinando as partículas do solo e melhorando a porosidade.

Amostras de dois solos (Latossolo Roxo e Latossolo Vermelho Escuro, textura média) cultivados com cana-de-açúcar foram tratados em laboratório com vinhaça nas doses correspondentes a 0, 50, 100, 150, 200 e 500 m³ ha⁻¹. As misturas de vinhaça e solos deixados em repouso durante 11 dias, mostraram que não houve efeito na densidade do solo em ambos os solos estudados (AGUIAR et al., 1992).

LONGO et al. (1996), avaliando os efeitos da vinhaça nas propriedades físicas de um Latossolo Vermelho Amarelo cultivado com cana-de-açúcar em comparação com um ecossistema natural (cerrado), concluíram que o emprego da vinhaça promoveu diminuição da densidade do solo e aumento da porosidade total e na estabilidade de agregados, observações feitas principalmente na camada superficial.

LOBATO et al. (1998), trabalhando com amostras de um Latossolo Roxo sob condições de laboratório, verificaram diminuição na permeabilidade do solo com aplicações a partir 800 m³ ha⁻¹ de vinhaça.

Avaliando a densidade do solo, porosidade total, macro e microporosidade CASAGRANDE et al. (1999) não encontraram alterações destes atributos entre 0-50 cm pela aplicação de vinhaça em um Latossolo Vermelho cultivado com cana-de-açúcar.

Estudos paralelos com o uso da vinhaça concentrada também têm mostrado benefícios nas propriedades físicas dos solos.

Desta forma, FREIRE & ROLIM (1997) avaliaram o efeito da vinhaça concentrada (19%) na densidade do solo. A vinhaça foi aplicada na dosagem de 0, 12, 16 e 20%, em duas diferentes amostras de solos (arenoso e argiloso). A aplicação de doses crescentes de vinhaça concentrada não provocou qualquer alteração no solo arenoso. Entretanto para o solo argiloso a densidade do solo sofreu acréscimo nos tratamentos com 16 e 20% quando comparados com a testemunha.

Ensaio de laboratórios com dois solos (areno-argiloso e argiloso-siltoso), foram tratados com diferentes doses de vinhaça concentrada, 0, 5,5, 11, 16,5 e 22%, em relação ao peso do solo seco. Os resultados mostraram que, após 30 dias de repouso,

as misturas (solo e vinhaça) apresentaram menor densidade para ambos os solos e um aumento de agregados na classe 0,25 mm no solo argiloso-siltoso (FREIRE & AGUIAR, 1993).

Desta forma a vinhaça pode promover alterações nas propriedades físicas dos solos principalmente quando são observados aumentos dos teores de matéria orgânica do solo e a sua dose aplicada de maneira criteriosa.

O lodo de esgoto, mais recente que a vinhaça, também mereceu destaque por parte das pesquisas, sendo estudadas nas mais diversas formas. Avaliações nas propriedades físicas dos solos não se passaram por despercebidas.

Dentro deste contexto JORGE et al. (1991) avaliaram os atributos físicos de um Latossolo Vermelho Escuro argiloso, aplicando 0, 40 e 80 t ha⁻¹ de lodo de esgoto, com e sem adição de calcário, cultivado por quatro anos consecutivos. A aplicação de 40 e 80 t ha⁻¹ de lodo de esgoto de uma só vez favoreceu a formação de macroporos e a de 80 t ha⁻¹ fracionada favoreceu o aumento de microporos. A porosidade total, a densidade do solo e a densidade de partículas não foram afetadas pelos tratamentos.

Em um Cambissolo de textura argilosa, FIEST et al. (1998) estudaram a aplicação de doses de 3,2 a 9,6 t ha⁻¹ de lodo de esgoto (base seca) nas propriedades físicas do solo e concluíram que a densidade do solo foi maior na dosagem de 3,2 t ha⁻¹ do resíduo. Não foram observadas alterações na densidade de partículas, na macroporosidade, microporosidade e na porosidade total.

Em um Latossolo Amarelo cultivado com cana-de-açúcar, MARCIANO et al. (2001) aplicaram 0, 33, 66 e 99 t ha⁻¹ no primeiro ano e 0, 20, 40 e 60 t ha⁻¹ no segundo ano de lodo de esgoto, base seca. Ao final do primeiro e do segundo ciclo da cultura determinaram a condutividade hidráulica. Assim foram encontrados aumentos lineares deste atributo no segundo ano de avaliação.

Avaliando os efeitos de dois anos de aplicação de lodo de esgoto (6, 12 e 18 t ha⁻¹) nas propriedades físicas de um Latossolo Vermelho, BARBOSA et al. (2002) encontraram aumento da densidade de partículas (36 t ha⁻¹) e da permeabilidade do solo (18 t ha⁻¹) e menor resistência do solo a penetração (12 t ha⁻¹) pela aplicação do resíduo. A densidade do solo, macroporosidade, microporosidade, o diâmetro médio

ponderado e o diâmetro médio geométrico não foram influenciados pelos tratamentos testados.

MELO et al. (2004) utilizaram doses acumuladas de lodo de esgoto (0,0; 25,0; 47,5; e 50,0 t ha⁻¹, base seca) em cinco anos nos atributos físicos de um Latossolo Vermelho distrófico (LVd) e um Latossolo Vermelho eutrófico (LVef) nas camadas de 0-10, 10-20 e 20-30 cm. Os autores concluíram que a macroporosidade foi superior a partir de 47,5 e 50,0 t ha⁻¹ de lodo de esgoto, no LVd e LVef, respectivamente, e a densidade do solo foi inferior na dose de 50,0 t ha⁻¹ no LVd na camada de 0-10 cm. A aplicação de 50,0 t ha⁻¹ de lodo de esgoto não alterou a porosidade total, a microporosidade e a retenção de água nos dois solos.

Com o objetivo de avaliar o efeito do lodo de esgoto na estabilidade de agregados e resistência do solo à penetração de um Latossolo Vermelho de textura média e um Latossolo Vermelho eutrófico argiloso, SOUZA et al. (2005) utilizaram as doses de 0,0; 25,0; 47,5 e 50 t ha⁻¹ (base seca) de lodo de esgoto. Segundo os autores o diâmetro médio geométrico foi maior na camada de 0-10 cm a partir de 47,5 t ha⁻¹ de lodo de esgoto nos dois solos estudados. Concluíram ainda que a aplicação do resíduo não influenciou a resistência do solo à penetração e a umidade nos dois solos.

Assim como a vinhaça, o lodo de esgoto pode melhorar as propriedades físicas dos solos, sendo indicado como fonte de matéria orgânica.

Efeito da vinhaça e do lodo de esgoto na produtividade e nas características tecnológicas da cana-de-açúcar

A vinhaça e o lodo de esgoto são fontes de nutrientes e matéria orgânica, e desta forma podem promover benefícios às plantas. Entretanto, avaliações na produtividade e na qualidade agroindustrial da cana-de-açúcar são necessárias. Esta cultura ainda é uma das poucas atividades agrícolas que são remuneradas pela sua qualidade, no que se refere ao acúmulo de açúcares nos colmos da cana-de-açúcar.

Desta forma, diversos trabalhos de pesquisas foram iniciados em várias unidades agroindustriais. MAGRO & GLÓRIA (1977) efetuaram experimentos em dois solos (Latossolo Roxo) com $35 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ de vinhaça. No primeiro experimento a vinhaça isolada e complementada com superfosfato triplo ou DAP foi aplicada após o 2º corte da cana-de-açúcar (var. NA 56-62). No segundo experimento a vinhaça isolada e complementada com superfosfato triplo (3 doses) ou DAP (3 doses) foi aplicada após o 2º corte da cana-de-açúcar (var. CB 47-355). Os resultados de ambos os experimentos mostraram que não houve diferença entre os tratamentos, em termos de produtividade e qualidade tecnológica (t Pol ha^{-1}).

Dois talhões de propriedade da Usina da Pedra foram escolhidos para pesquisar a prática da aplicação da vinhaça. Um talhão recebeu adubação na soqueira com 413 kg ha^{-1} da fórmula 10-10-10. O outro recebeu irrigação com a mistura de resíduos (torta de filtro, vinhaça e águas poluentes). Apesar de não ter sido possível determinar a quantidade empregada em função da desuniformidade na distribuição dos resíduos, MAGRO (1978) concluiu que a aplicação de resíduos aumentou a produtividade da cultura durante os quatro cortes da cana-de-açúcar em relação à adubação mineral. A Pol % cana avaliada somente no 1º e 2º cortes foi maior no talhão no qual recebeu aplicações dos resíduos.

O efeito da complementação mineral da vinhaça na produtividade e qualidade tecnológica da cana-de-açúcar (var. CB 41-76) foram estudados por SILVA et al. (1980). Os tratamentos aplicados em uma Terra Roxa Estrutura (TE) e um Latossolo Vermelho Escuro (LEa) constaram de $80 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ de vinhaça complementadas com diferentes combinações de doses e fertilizantes minerais. Para a TE a aplicação de vinhaça diminuiu a produtividade da cultura o que não ocorreu para o LEa. Quanto à qualidade tecnológica na TE a complementação nitrogenada fez-se necessário o que não ocorreu com o LEa.

Dois ensaios foram instalados em um Latossolo Vermelho Escuro (LE) e um Latossolo Vermelho Escuro utilizando $60 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ de vinhaça complementadas com adubações líquidas e fertilizantes minerais. As variedades de cana-de-açúcar utilizadas foram NA 56-79 (2º corte no solo LE) e IAC 48/65 (3º corte no solo LEa). As maiores

produtividades nos dois solos foram obtidas quando a vinhaça foi complementada com 200 kg ha^{-1} de uréia. Quanto à qualidade tecnológica, as complementações minerais da vinhaça não interferiram na Pol% cana (MAGRO et al., 1981).

SILVA et al. (1983) estudando a aplicação de vinhaça seca e cinzas de caldeira complementadas com diferentes combinações de doses e fertilizantes minerais em um Latossolo Roxo cultivado com cana-de-açúcar (var. CB 41-76) observaram que a vinhaça seca aumentou a produtividade do 2º corte da cana-de-açúcar. No entanto não foram observadas diferenças nos açúcares redutores (AR) e na Pol% cana.

Treze experimentos foram instalados em cana soca utilizando doses crescentes de vinhaça (0 a $210 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$) complementadas ou não com N (40 kg ha^{-1}) e NP (40 e 20 kg ha^{-1}). Assim os resultados mostraram que a vinhaça proporcionou aumento de produção da cana soca e açúcar em t ha^{-1} . A complementação com N e NP beneficiou a produtividade da cultura na maioria dos ensaios e a Pol % cana não foi influenciada pela aplicação de vinhaça na maioria dos ensaios (ROBAINA et al., 1983/84).

MELO et al. (1984) aplicaram $150 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ de vinhaça em um Podzólico Vermelho Amarelo e encontraram aumento na produtividade em torno 6 t ha^{-1} em 3º corte com a variedade Co 413.

FURLANI NETO et al. (1985) em um Latossolo Vermelho Escuro estudando formas de cultivo de soqueira de cana-de-açúcar, compararam a aplicação de $100 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ de vinhaça com 517 kg ha^{-1} da formula 12-0-24. Dos resultados obtidos os autores concluíram que nas soqueiras de terceiro corte tratadas com vinhaça houve certa tendência para melhores respostas em produtividade quando comparadas com a adubação mineral.

Foram aplicadas cinco doses de vinhaça (0 , 110 , 220 , 330 e $440 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$) em solo argiloso após a colheita de 1º corte da cultura da cana-de-açúcar. As produtividades do 2º corte, t pol ha^{-1} onze meses após a aplicação dos tratamentos foram avaliadas por PEIXOTO et al. (1986). Dos resultados obtidos pode-se inferir que a testemunha (dose 0 de vinhaça) apresentou as menores médias para todas as variáveis analisadas. O tratamento na dose de $330 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ apresentou as melhores médias entre os tratamentos com aplicação de vinhaça.

Solos de tabuleiros costeiros e solos de encostas (áreas declivosas) foram tratados com diferentes níveis de vinhaça e suplementação mineral. Desta forma SILVA & SILVA (1986) concluíram que o incremento de produtividades é da ordem de 15 e 39,3 t ha⁻¹ para as áreas de tabuleiros e declivosas, respectivamente.

Em um Latossolo Vermelho Amarelo de textura média, que recebeu grandes volumes de vinhaça (1030 m³ ha⁻¹), NUNES JR (1987) estudou o comportamento agroindustrial de 10 variedades de cana-de-açúcar. As variedades foram plantadas com 450 kg ha⁻¹ de termofosfato, sendo que nas soqueiras somente complementou-se com 60 kg ha⁻¹ de N. Após o 1º corte aplicou-se novamente 400 m³ ha⁻¹ de vinhaça. Dos resultados até o 4º corte, concluiu-se que a excessiva presença de vinhaça provocou um vigoroso desenvolvimento vegetativo com maiores teores de sacarose a partir do 3º corte.

Aplicando-se doses crescentes de vinhaça (0, 50, 100 e 150 m³ ha⁻¹) e/ou nitrogênio (0, 50, 100 e 150 kg ha⁻¹) nos solos Latossolo Vermelho Amarelo (SP70-1143, 3º corte) e Latossolo Roxo (SP71-1406, 2º corte) PENATTI et al. (1988) verificaram que a vinhaça promoveu aumento significativo na produtividade até a dose de 150 m³ ha⁻¹ para ambos os solos. Nas doses de 50 e 100 m³ ha⁻¹ de vinhaça, houve resposta linearmente significativa para a complementação nitrogenada. Quanto a Pol % cana e a t açúcar ha⁻¹ não foram observadas diferenças entre os tratamentos.

Em um ensaio de campo com Areia Quartzosa cultivado com cana-de-açúcar (var. RB72454) foram aplicadas três doses de vinhaça 150, 300 e 600 m³ ha⁻¹ e comparadas com duas diferentes testemunhas. As produtividades indicaram que os tratamentos com vinhaça foram similares ao tratamento com fertilizante mineral e superior a testemunha. A Pol % cana decresceu nos tratamentos que receberam vinhaça e a fibra % cana foi menor no tratamento com 600 m³ ha⁻¹ quando comparando com a fertilização mineral (ORLANDO FILHO et al., 1995).

PENATTI et al. (2001) em Latossolo Vermelho Amarelo aplicaram quatro doses de vinhaça (0, 100, 200 e 300 m³ ha⁻¹) combinadas com quatro doses de nitrogênio (0, 50, 100 e 150 kg ha⁻¹) em soqueira (2º corte) de cana-de-açúcar (var. RB72454) durante 4 anos consecutivos. As maiores produtividades (média de 4 safras) foram

obtidas pela aplicação de $300 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ de vinhaça complementada com 100 kg ha^{-1} de nitrogênio.

Procurando melhorar o manejo deste resíduo, BARBOSA et al. (2006) utilizaram vinhaça concentrada em doses equivalentes a 0, 180 e 270 kg ha^{-1} de K combinada com diversas doses e fórmulas de adubos minerais em Latossolo Vermelho Amarelo. Desta forma os autores concluíram que a utilização da vinhaça resultou em acréscimos de produtividade e de açúcar por área colhida, no entanto as variáveis tecnológicas Pol cana, pureza, AR e fibra não apresentaram diferenças significativas entre os tratamentos.

Dentro destes trabalhos de pesquisas, observa-se que a vinhaça tem um papel fundamental no manejo da cultura da cana-de-açúcar em busca de maior produtividade com melhor qualidade agroindustrial.

Por sua vez o lodo de esgoto começa a despertar interesse também por parte das pesquisas com o objetivo de avaliar a produtividade e as características tecnológicas da cultura da cana-de-açúcar.

SILVA et al. (1996) utilizando doses 0 a 40 t ha^{-1} de lodo de esgoto aplicado por dois anos consecutivos verificaram que o tratamento com a menor dose do resíduo apresentou a menor produtividade e menores teores de Pol na variedade RB72454.

A produtividade e as características tecnológicas na cultura da cana-de-açúcar (var. RB72454), foram avaliadas por SILVA et al. (1998). Os tratamentos foram constituídos pela combinação de três doses de lodo de esgoto (0, 15 e 30 t ha^{-1}), com e sem complementação mineral. Os resultados obtidos mostraram ter havido ganho de produtividade de colmos sem prejuízo de sua qualidade tecnológica medida pelo Brix, Pol e ATR.

Observa-se que os trabalhos de pesquisas com lodo de esgoto na produtividade e na qualidade da cana-de-açúcar ainda são escassos. Por outro lado à utilização destes resíduos (vinhaça e lodo de esgoto) começa a serem estudados de forma conjunta.

Assim, utilizando três tipos de resíduos (lodo de esgoto, vinhaça e lodo de esgoto + vinhaça), dois modos de aplicação (linha e área total) e duas doses (100 % e 200 %

de N ou K necessários à cultura), e um tratamento com adubação mineral, FRANCO (2003) avaliou a produtividade e as características tecnológicas do 1º e 2º cortes da cana-de-açúcar (var. SP81-3250). Dos resultados obtidos concluiu-se que: (i) as maiores produtividades de colmo e de açúcar foram obtidas com o uso de lodo de esgoto juntamente com a vinhaça ou complementado com KCl, (ii) a aplicação de lodo de esgoto juntamente com a vinhaça, localizados ou em área total, resultou em produtividade de colmos e de açúcar semelhante à adubação mineral.

Efeito do lodo de esgoto e da vinhaça em metais pesados no solo e nas plantas de cana-de-açúcar

O termo “metal pesado” pode ser atribuído aos elementos químicos que apresentam massa específica superior a 5 g cm^{-3} (MELO et al. 1997). Entre esses, encontram-se mais de 20 elementos que, em relação aos seres vivos, podem ou não ter importância. Elementos como cádmio e chumbo, até o momento não tiveram demonstrado qualquer relação de importância. Níquel e cromo, de outra forma, podem trazer benefícios em determinadas circunstâncias (MARQUES et al. 2002).

Na natureza os metais pesados originam-se das rochas. Os solos são resultantes de processos de intemperismo de rochas e, dessa forma, acabam por conter os metais pesados herdados da rocha matriz (FASSBENDER, 1980). Entretanto, nos solos cultivados os fertilizantes minerais também podem se constituir em possíveis fontes (FASSBENDER, 1980 e SIMONETE, 2001). Além disso, o uso de resíduos orgânicos como fertilizantes, também podem contribuir para a geração de metais pesados (DIAS et al., 2001; KONRAD & CASTILHOS, 2002; CASTILHOS et al., 2002; MARQUES et al. 2002; GATTO, 2003).

LAKE (1987) relaciona elementos metálicos pesados, seus intervalos de níveis de ocorrência em solos agrícolas e valores de maior frequência. Segundo esse autor, o cádmio ocorre nos solos em teores variando de $0,01\text{-}0,7 \text{ mg kg}^{-1}$; para o cromo os teores variam de 5 a 1000 mg kg^{-1} ; para o níquel, de 5 a 500 mg kg^{-1} e para o chumbo o

intervalo de 2 a 200 mg kg⁻¹ é mencionado. Para BARCELÓ e POSCHENRIEDER (1992) os teores normais nos solos são Cd 0,4; Cr 50 e Pb 14 mg kg⁻¹.

A absorção de metais pesados, dependendo das condições, pode ocorrer em quantidades suficientes para o surgimento de sintomas de fitotoxicidade. A seguir estão apresentados os teores de metais pesados, em plantas, capazes de proporcionar o surgimento de sintomas de toxicidade (Tabela 1).

Tabela 1. Teores de metais pesados, em plantas, capazes de proporcionar o surgimento de sintomas de toxicidade.

	LAKE, 1987	BARCELÓ e POSCHENRIEDER, 1992	MELO, 1997
Cd	10	5-30	2-8
Cr	10	5-30	75-100
Ni	11	nd ⁽¹⁾	100
Pb	35	5-10	100-400

⁽¹⁾ nd: não determinado.

Vários autores têm estudado diversos efeitos de acumulo metais pesados em diferentes solos e plantas. ROVERS et al. (1983) estudando a ocorrência natural de teores totais de níquel em solos do Estado de São Paulo encontraram valores menores que 10 a 127 mg kg⁻¹. Concluíram que os solos derivados de sedimentos arenosos apresentaram os mais baixos teores, e os derivados de rochas básicas, os maiores teores totais de níquel.

Utilizando doses de 0, 20 e 40 t ha⁻¹ de lodo de esgoto em dois anos, SILVA et al. (1996) encontraram aumento nos teores de Cd no solo (0-20 cm) e na planta de cana-de-açúcar (folha +3) o que não ocorreu com os elementos Cr, Ni e Pb.

Os teores de metais pesados no solo (0-20 cm) e nas plantas de cana-de-açúcar (var. RB72454) foram avaliadas por SILVA et al. (1998). Os tratamentos foram constituídos pela combinação de três doses de lodo de esgoto (0, 15 e 30 t ha⁻¹), com e sem complementação mineral. O lodo de esgoto foi aplicado em um sulco com 15 cm de profundidade e distando de 40 cm da linha da cana-de-açúcar. Os teores de metais pesados no solo após 144 e 400 dias da aplicação de lodo de esgoto foram, respectivamente: Cd 0,17 e 0,07; Cr 0,19 e 0,09; Ni 1,2 e 1,0 e Pb 1,34 e 0,50 mg kg⁻¹.

A exportação de Ni na colheita da parte área da cana-de-açúcar foi de 15, 18 e 24 g ha⁻¹ nas doses de 0, 15 e 30 t ha⁻¹ respectivamente.

Teores totais de metais pesados, em solos repetidamente tratados com lodo de esgoto (dose total de 388 t ha⁻¹, base seca), foram extraídos de um Latossolo Amarelo (LA) e um Latossolo Vermelho (LV) e variaram entre: Cd 4,00 e 6,49, Cr 28,97 e 181,47, Ni 31,95 e 53,91 mg kg⁻¹. Os teores de Pb (com e sem lodo de esgoto), Cr no LA (sem lodo) e Ni no LA e LV, (sem adição de lodo de esgoto), estiveram abaixo do limite de detecção pelo método analítico utilizado (ANJOS & MATIAZZO, 2000).

PIERANGELI et al. (2001) estudando os teores totais de Pb em 17 latossolos no Brasil, encontraram os maiores teores de Pb nas regiões sul e sudeste quando comparados com as regiões norte e nordeste.

No que se refere à potencialidade do lodo de esgoto de atuar como fonte de metais pesados, RIBEIRO FILHO et al. (2001), trabalhando com um Latossolo Vermelho Amarelo, encontraram teores de 156 mg kg⁻¹ de Cd e 551 mg kg⁻¹ de Pb.

Com o objetivo de avaliar os teores de metais pesados de um Argissolo Vermelho Amarelo cultivado com cana-de-açúcar, SILVA et al. (2001) aplicaram 0, 20 e 40 t ha⁻¹ de lodo de esgoto, na presença e ausência de fertilizante mineral. Aos 272 dias após a aplicação do lodo de esgoto, os autores encontraram teores de 0,5; 40,5; 19,0 e 9,8 mg kg⁻¹ de Cd, Cr, Ni e Pb, respectivamente. Concluíram ainda que o lodo de esgoto aumentou os teores de metais pesados no solo apesar dos mesmos estarem dentro dos teores máximos aceitáveis no solo.

OLIVEIRA & MATTIAZZO (2001a) avaliando os efeitos de aplicações sucessivas de lodo de esgoto sobre o acúmulo de metais pesados em um Latossolo Amarelo e em plantas de cana-de-açúcar, concluíram que o lodo de esgoto proporcionou, em dois anos agrícolas consecutivo aumento linear nos teores Cr variando de 15,55 a 27,19 mg kg⁻¹. O níquel foi detectado apenas no segundo ano, nas maiores doses de lodo de esgoto. Os teores de Cd e Pb no solo e Cd, Cr, Ni e Pb nas folhas, colmos desfibrados e caldo apresentaram-se em concentrações abaixo do limite de determinação pelo método analítico.

A mobilidade de metais pesados no perfil de um Latossolo Vermelho Amarelo oriundo da aplicação de lodo de esgoto foi estudada por OLIVEIRA & MATTIAZZO (2001b). Os teores totais de Cr variaram entre 15,55 e 27,19 mg kg⁻¹ em dois anos agrícolas estudados, no entanto os autores concluíram que os resultados do presente trabalho não foram suficientemente claros para atestar a movimentação do Cr em profundidade. Os teores totais de Cd, Ni e Pb estiveram abaixo do nível de detecção pelo método analítico.

SILVA et al. (2002) estudaram a adição de metais pesados pela aplicação de 54 t ha⁻¹ de lodo de esgoto (base úmida) como fornecedor de fósforo para a cultura do milho. Desta forma, concluíram que para atingir os limites cumulativos críticos dos elementos metálicos Cd e Pb, seriam necessárias, respectivamente, 325 e 1000 aplicações da dose estudada de lodo de esgoto.

Amostras de um Latossolo Vermelho acrescido de lodo de esgoto contaminado com Cd (0, 2500 e 5000 mg kg⁻¹) e Pb (2500 e 5000 mg kg⁻¹) foram cultivados com milho (JULIATTI et al., 2002). Desta forma foram encontradas concentrações de até 41,84 mg kg⁻¹ de Cd no solo (extrator nitro-perclórico) na camada de incorporação, não havendo lixiviação do elemento. A concentração de 12,16 mg kg⁻¹ de Cd não foi suficiente para provocar sintomas de fitotoxicidade de Cd nas plantas. O Pb, por sua vez, quando adicionado com o Cd, não apresentou interferência no sistema solo-planta.

OLIVEIRA et al. (2003) contaminaram lodo de esgoto com Cd e Pb e adicionaram em amostras superficiais (0-20 cm) de dois solos (Latosolo Vermelho Amarelo e Argissolo Vermelho Amarelo). Estas amostras de solo com lodo de esgoto contaminado (0, 20, 40 e 80 t ha⁻¹) foram incubadas por 4, 8, 16, 24 e 160 semanas. Desta forma os autores verificaram que os teores de Cd e Pb sofreram decréscimos com o tempo de incubação.

Estudando os teores totais de metais pesados em um Latossolo Vermelho Amarelo, SANTOS et al. (2003) encontraram teores de Cd entre 1,5 a 4,0; Ni 14,5 a 31,1 e Pb entre 34,1 e 59,0 mg kg⁻¹.

NASCIMENTO et al. (2004), estudaram a disponibilidade de metais pesados em doses crescentes de 0 a 60 t ha⁻¹ de lodo de esgoto em dois tipos de solos (Argissolo

Vermelho Amarelo textura média e Espodossolo de textura arenosa). Os autores concluíram que o Pb no lodo, nos solos e nas plantas de milho e feijão se apresentou em teores abaixo dos limites estabelecidos para utilização agrícola, o que permitiria sua aplicação sem maiores riscos ao ambiente.

Aplicando doses crescentes de lodo de esgoto (0; 10; 20; 40 e 60 t ha⁻¹) com presença e ausência de corretivo em dois solos, (Neossolo Quartzarênico e Latossolo Vermelho argiloso) BORGES & COUTINHO (2004) encontraram teores nos solos de 0,01 a 0,87 mg kg⁻¹ de Ni e 0,17 a 1,27 mg kg⁻¹ de Pb para os tratamentos estudados.

GALDOS et al. (2004) estudando a aplicação de 3 doses de lodo de esgoto (0; 10,2 e 20,5 t ha⁻¹) em dois anos agrícolas em um Latossolo Vermelho, encontraram aumento nos teores de Ni no solo na camada de 0-10 cm. Nos dois anos de ensaios os teores de Ni variaram entre 0,20 a 0,90 mg kg⁻¹.

Teores de Cd em Neossolo entre 0,57 e 27,90 mg kg⁻¹ foram obtidos por ACCIOLY et al. (2004) estudando níveis de contaminação em solo contaminado.

OLIVEIRA et al., (2005) em experimento com doses crescentes de lodo de esgoto durante cinco anos em um Latossolo Vermelho distrófico e um Latossolo Vermelho eutroférico avaliaram teores totais de metais pesados nas camadas de 0-20 e 20-40 cm. Os teores totais de Pb variaram de 8,54 a 10,45 mg kg⁻¹ no Latossolo Vermelho distrófico e 15,06 a 18,20 mg kg⁻¹ no Latossolo Vermelho distrófico. Para o Ni os teores totais variaram entre 4,23 e 7,12 mg kg⁻¹ e 12,44 a 16,03 mg kg⁻¹ no Latossolo Vermelho eutroférico. Os autores concluíram que os metais pesados geralmente acumularam na profundidade de 0-20 cm em ambos os solo, não ultrapassaram os níveis críticos legais.

Dentro desta revisão bibliográfica não foram encontrados trabalhos de pesquisas em conjunto com vinhaça e metais pesados, provavelmente por ser a vinhaça um resíduo que reconhecidamente não contém metais pesados. Porém, GATTO (2003) encontrou em uma amostra desse resíduo 0,06 mg kg⁻¹ de Cd, 0,05 mg kg⁻¹ de Cr, 0,20 mg kg⁻¹ de Ni e 0,03 mg kg⁻¹ de Pb (base seca). Embora sejam teores baixos, aplicações de elevadas doses de vinhaça por um longo período poderiam aumentar os teores de metais pesados no solo.

Desta forma as utilizações criteriosas de lodo de esgoto e vinhaça podem promover benefícios às propriedades do solo e conseqüentemente aumentar a produtividade e a qualidade das características tecnológicas da cana-de-açúcar sem provocar prejuízos ao meio ambiente.

Referências

ACCIOLY, A. M. A.; SIQUEIRA, J. O.; CURI, N.; MOREIRA, F. M. S. Amenização do calcário na toxidez de zinco e cádmio para mudas de *Eucalyptus camaldulensis* cultivadas em solo contaminado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, n. 4, p. 775-783, 2004.

AGUIAR, M. A.; FREIRE, W. J.; ALBUQUERQUE, P. J. R. Caracterização química e física de solos tratados com vinhaça. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 21, SIMPÓSIO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA DO CONE SUL, 1., 1992, Santa Maria. **Anais**. Santa Maria: Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola, 1992. p. 1067-1077.

ALBIACH, R.; CANET, R.; POMARES, F.; INGELMO, F. Microbial biomass content and enzymatic activities after the application of organic amendments to a horticultural soil. **Bioresource Technology**, Texas, v. 75, n. 1, p. 43-48, 2000.

ANDRIOLI, I. **Efeitos da vinhaça em algumas propriedades químicas e físicas de um latossolo vermelho escuro textura média**. 1986. 85 f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1986.

ANJOS, A. R. M.; MATTIAZZO, M. A. Metais pesados em plantas de milho cultivadas em latossolos repetidamente tratados com biossólido. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v. 57, n. 4, p. 769-776, 2000.

ANUÁRIO BRASILEIRO DA CANA-DE-AÇÚCAR 2005. Santa Cruz do Sul: Gazeta Santa Cruz, 2005. 136 p.

BARBOSA, G. M. C.; TAVARES FILHO, J.; FONSECA, I. C. B. Avaliações de propriedades físicas de um latossolo vermelho eutroférico tratado com lodo de esgoto por dois anos consecutivos. **Sanare**, Curitiba, v. 17, n. 17, p. 94-101, 2002.

BARBOSA, V; DURIGAN, A. M. P. R.; GLÓRIA, N. A.; MUTTON, M. A. Uso de vinhaça concentrada na adubação de soqueira de cana-de-açúcar. **STAB: Açúcar, Alcool e Subprodutos**, Piracicaba, v. 34, n. 6, p. 26-31, 2006.

BARCELO, J.; POSCHENRIEDER, CH Respuestas de las plantas a la contaminacion por metales pesados. **Suelo y Planta**, Madrid, v. 2, n. 2, p. 345-361, 1992.

BAYER, C.; MIELNICZUK, J. Dinâmica e função da matéria orgânica. In: SANTOS, G.A.; CAMARGO, F.A.O. (Ed.). **Fundamentos da matéria orgânica do solo**. Porto Alegre: Genesis, 1999. p. 9-26.

BORGES, M. R.; COUTINHO, E. L. M. Metais pesados do solo após aplicação de biossólido. II - Disponibilidade. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, n. 3, p. 557-568, 2004.

CAMARGO, O. A.; VALADARES, J. M. A. S.; GERALDI, R. N. **Características químicas e físicas de solo que recebeu vinhaça por longo tempo**. Campinas: Instituto Agrônomo, 1983. 30 p. (Boletim Técnico, 76).

CANELLAS, L. P.; VELLOSO, A. C. X.; MARCIANO, C. R.; RAMALHO, J. F. G. P.; RUMJANEK, V. M.; REZENDE, C. E.; SANTOS, G. A. Propriedades químicas de um Cambissolo cultivado com cana-de-açúcar, com preservação do palhiço e adição de vinhaça por longo tempo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 27, n. 5, p. 935-944, 2003.

CASAGRANDE, A. A.; ANDRIOLI, I.; BUZOLIN, P. R. S.; MUTTON, M. A.; CAMPOS, M. S. BARBOSA, J. C. Atributos físicos de um solo manejado no sistema mecanizado de cana crua e cana queimada. In: CONGRESSO NACIONAL DA SOCIEDADE DOS TÉCNICOS AÇUCAREIROS E ALCOOLEIROS DO BRASIL, 7., 1999, Londrina. **Anais**. Piracicaba: STAB, 1999. p. 187-190.

CASTILHOS, D. D.; TEDESCO, M. J.; VIDOR, C. Rendimentos de culturas e alterações químicas do solo tratado com resíduos de curtume e crômio hexavalente. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 26, n. 4, p. 1083-1092, 2002.

CETESB. **Vinhaça – Critérios e Procedimentos para Aplicação no Solo Agrícola**. Norma Técnica P4.231. São Paulo, 2005. (Manual Técnico).

DIAS, N. M. P.; ALLEONI, L. R. F.; CASAGRANDE, J. C.; CAMARGO, O. A. Adsorção de cádmio em dois latossolos ácricos e um nitossolo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 25, n. 2, p. 297-304, 2001.

DOMINY, C. S.; HAYNES, R. J.; ANTWERPEN, R. van. Loss of soil organic matter and related soil properties under long-term sugarcane production on two contrasting soils. **Biology and Fertility of Soils**, Berlin, v. 36, n. 5, p. 350-356, 2002.

FASSBENDER, H. W. **Química de suelos com énfasis em suelos de América Latina**. San José: Matilde de la Cruz, 1980. 398 p.

FIEST, L. C.; ANDREOLI, C. V.; MACHADO, M. A. M. Efeitos da aplicação do lodo de esgoto nas propriedades físicas do solo. **Sanare**, Curitiba, v. 9, n. 9, p. 48-57, 1998.

FRANCO, A. **Cana-de-açúcar cultivada em solo adubado com lodo de esgoto e vinhaça: nitrogênio no sistema solo-planta, produtividade e características tecnológicas**. 2003. 90 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2003.

FREIRE, W. J.; AGUIAR, M. A. Incorporação da vinhaça concentrada em dois solos distintos: Características químicas, físicas e mecânicas da mistura obtida. **Engenharia Agrícola**, Campinas, v. 13, p. 85-96, 1993.

FREIRE, W. J.; CORTEZ, L. A. B. **Vinhaça de cana-de-açúcar**. Guaíba-RS: Agropecuária, 2000. v. 1, 203 p.

FREIRE, W. J.; ROLIM, M. M. Efeito da vinhaça concentrada sobre a resistência mecânica do solo. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 16, n. 3, p. 77-83, 1997.

FURLANI NETO, V. L.; MAGRO, J. A.; SELAGATO, S. L.; ROSENFELD, U.; STOLF, R.; CERQUEIRA LUZ, P. H. Formas de cultivo da cana-soca – Associação à utilização agrícola da vinhaça com adubação mineral. **STAB: Açúcar, Álcool e Subprodutos**, Piracicaba, v. 3, n. 6, p. 46-52, 1985.

GALDOS, M. V.; MARIA, I. C.; CAMARGO, O. A. Atributos químicos e produção de milho em um latossolo vermelho eutroférico tratado com lodo de esgoto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, n. 3, p. 569-577, 2004.

GATTO, R. H. **Lodo de esgoto e vinhaça como fonte de cálcio, magnésio e potássio para a cultura da cana-de-açúcar**. 2003. 107 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2003.

GLÓRIA, N. A.; ORLANDO FILHO, J. Aplicação de vinhaça: um resumo e discussão sobre o que foi pesquisado. **Álcool & Açúcar**, São Paulo, v. 4, n. 15, p. 22-31, 1984.

JORGE, J. A.; CAMARGO, O. A.; VALADARES, J. M. A. S. Condições físicas de um Latossolo Vermelho-Escuro quatro anos após aplicação de lodo de esgoto e calcário. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 15, n. 3, p. 237-240, 1991.

JULIATTI, M. A.; PRADO, R. M.; BARRIQUELO, M. F.; LENZI, E. Cádmio em latossolo vermelho cultivado com milho em colunas: Mobilidade e biodisponibilidade. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 26, n. 4, p. 1075-1081, 2002.

KIEHL, E. J. **Manual de edafologia**. São Paulo: Editora Agronômica Ceres, 1979. 264 p.

KONRAD, E. E.; CASTILHOS, D. D. Alterações químicas e crescimento do milho decorrentes da adição de lodos de curtume. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 26, n. 1, p. 257-265, 2002.

LAKE, D. L. Sludge disposal to land. In: J. N. **Heavy metals in wastewater and sludge treatment process**. Boca Raton: CRC Press, 1987. v. 2, p. 91-130.

LOBATO, E. J. V.; LIBARDI, P. L.; CAMARGO, O. A. Condutividade hidráulica de amostras remoldadas de um latossolo roxo distrófico tratado com água/vinhaça. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 22, n. 2, p. 181-188, 1998.

LONGO, R. M.; BONI, N. R.; ESPÍNDOLA, C. R. Efeito da *in vinhaça* e biodigerida em propriedades físicas de um solo cultivado com cana-de-açúcar. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 25. 1996, Bauru. **Resumos...**Bauru: Unesp/Sbea, 1996.

MAGRO J.A. Uso da vinhaça em cana de açúcar na Usina da Pedra - Serrana. **Brasil Açucareiro**, Rio de Janeiro, v. 92, n. 4, p. 40-48, 1978.

MAGRO J. A.; GLÓRIA, N. A. Adubação de soqueira de cana-de-açúcar com vinhaça complementação com nitrogênio e fósforo. **Brasil Açucareiro**, Rio de Janeiro, v. 90, n. 6, p. 31-34, 1977.

MAGRO, J. A.; SILVA, L. C. F.; ZAMBELLO JR. E.; ORLANDO FILHO, J. Estudo da complementação mineral de vinhaça com trator de eixo alto. **Saccharum**, São Paulo, v. 4, n. 14, p. 28-30, 1981.

MARCIANO, C. R.; MORAES, S. O.; OLIVEIRA, F. C. MATIAZZO, M. E. Efeito do lodo de esgoto e do composto de lixo urbano sobre a condutividade hidráulica de um latossolo amarelo saturado e não saturado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 25, n. 1, p. 1-9, 2001.

MARQUES, M. O.; MELO, W. J.; MARQUES, T. A. Metais pesados e o uso de biossólido na agricultura. In: TSUTIYA, M. T.; COMPARINI, J. B.; ALEM SOBRINHO, P.; HESPANHOL, I.; CARVALHO, P. C. T.; MELFI, A. J.; MELO, W. J.; MARQUES, M. O. **Biossólidos na agricultura**. 2. ed. São Paulo: ABES/SP, 2002. p. 365-403.

MELO, I. S.; PEREIRA, J. R. A.; GALVÃO, A. S.; LAVORENTI, N. A.; TOLEDO, T. L. Cultivo mecânico de soqueira em podzólico vermelho-amarelo em áreas tratadas com e sem vinhaça. **Saccharum**, São Paulo, v. 7, n. 35, p. 41-48, 1984.

MELO, V. P. **Carbono, nitrogênio e atividade biológica em latossolos cultivados com milho, no sexto ano de aplicação de lodo de esgoto.** 2006. 93 f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2006.

MELO, V. P.; BEUTLER, A. N.; SOUZA, Z. M.; CENTURION, J. F.; MELO, W. J. Atributos físicos de Latossolos adubados durante cinco anos com biossólido. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 39, n. 1, p. 67-72, 2004.

MELO, W. J.; MARQUES, M. O.; SANTIAGO, G.; CHELLI, R. A.; LEITE, S. A. S. Efeito de doses crescentes de lodo de esgoto sobre frações da matéria orgânica e ctc de um Latossolo cultivado com cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 18, n. 3, p. 449-455, 1994.

MELO, W. J.; MARQUES, M. O.; SILVA, F. C. BOARETTO. A. E. Uso de resíduos sólidos urbanos na agricultura e impactos ambientais. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 26., 1997, Rio de Janeiro. Campinas: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1997. **1 CD-ROM.**

NASCIMENTO, C. W. A.; BARROS, D. A. S.; MELO, E. E. C.; OLIVEIRA, A. B. Alterações químicas em solos e crescimento de milho e feijoeiro após aplicação de lodo de esgoto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, n. 2, p. 385-392, 2004.

NAVAS, A.; BERMÚDEZ, F.; MACHÍN, J. Influence of sewage sludge application on physical and chemical properties of Gypsisols. **Geoderma**, Amsterdam v. 87, n. 1-2, p. 123-135, 1998.

NUNES JR, D. **Efeitos da elevada deposição de vinhaça sobre variedades de cana-de-açúcar**. São Paulo, 1987, p. 38-44. (Boletim Técnico da Coopersucar, 37).

OLIVEIRA, C.; SOBRINHO, N. M. B. A.; MARQUES, V. S.; MAZUR, N. Solubilidade de metais pesados em solos tratados com lodo de esgoto enriquecido. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 27, n. 1, p. 171-181, 2003.

OLIVEIRA, F. C.; MATTIAZZO, M. A. Metais pesados em latossolo tratado com lodo de esgoto e em plantas de cana-de-açúcar. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v. 58, n. 3, p. 581-593, 2001a.

OLIVEIRA, F. C.; MATTIAZZO, M. A. Mobilidade de metais pesados em um latossolo amarelo distrófico tratado com lodo de esgoto e cultivado com cana-de-açúcar. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v. 58, n. 4, p. 807-812, 2001b.

OLIVEIRA, K. W.; MELO, W. J.; PEREIRA, G. T.; MELO, V. P.; MELO, G. M. P. Heavy metals in oxisols amended with biosolids and cropped with maize in a long-term experiment. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v. 62, n. 4, p. 381-388, 2005.

ORLANDO FILHO, J.; BITTENCOURT, V. C.; ALVES, M. C. Aplicação de vinhaça em solo arenoso do Brasil e poluição do lençol freático com nitrogênio. **STAB: Açúcar, Álcool e Subprodutos**, Piracicaba, v. 13, n. 6, p. 14-16, 1995.

PEIXOTO, A. A.; BERTO, P. N. A.; THURLER, A. M.; ROCHA, J. P. S. M.; DELGADO, F. R. M. C. R. Efeitos de tratos culturais em cana-soca, em solo argiloso com vinhaça aplicada por caminhão. **STAB: Açúcar, Álcool e Subprodutos**, Piracicaba, v. 4, n. 6, p. 45-50, 1986.

PENATTI, C. P.; CAMBRIA, S.; BONI, P. S.; ARRUDA, F. C. O.; MANOEL, L. A. **Efeitos da aplicação de vinhaça e nitrogênio na soqueira da cana-de-açúcar**. São Paulo, 1988. p. 32-38. (Boletim Técnico da Coopersucar, 44).

PENATTI, C. P.; ARAÚJO, J. V.; FORTI, J. A.; RIBEIRO, R. Doses de vinhaça e nitrogênio aplicadas em cana-soca durante quatro safras em solo LV – Usina São José da Estiva. **STAB: Açúcar, Álcool e Subprodutos**, Piracicaba, v. 19, n. 5, p. 38-41, 2001.

PIERANGELI, M. A. P.; GUILHERME, L. R. G.; CURI, N.; SILVA, M. L. N.; OLIVEIRA, L. R.; LIMA, J. L. Teor total e capacidade máxima de adsorção de chumbo em latossolos brasileiros. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 25, n. 2, p. 279-288, 2001.

RANZANI, G. Conseqüências da aplicação do restilo ao solo. **Anais da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”**, v. 12-13, p. 57-68, 1955/56.

RIBEIRO FILHO, M. R.; SIQUEIRA, J. O.; CURI, N.; SIMÃO, J. B. P. Fracionamento e biodisponibilidade de metais pesados em solo contaminado, incubado com materiais orgânicos e inorgânicos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 25, n. 2, p. 495-507, 2001.

ROBAINA, A. A.; VIEIRA, J. R.; AZEREDO, D. F.; BOLSANELLO, J.; MANHÃES, M. S. Doses e complementação mineral da vinhaça em socas de cana-de-açúcar. **Brasil Açucareiro**, Rio de Janeiro, v. 102, n. 1, p. 26-33, 1983/84.

ROVERS, H.; CAMARGO, O. A.; VALADARES, J. M. A. S. Níquel total e solúvel em DTPA em solos do estado de São Paulo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 2, n. 3, p. 217-220, 1983.

SABESP. **Sabesfértil** Disponível em:
http://www.sabesp.com.br/o_que_fazemos/coleta_e_tratamento/tratamento_metropolitano_numerossistemaprincipal.htm. Acesso: 1 maio 2006.

SANTOS, F. S.; SOBRINHO, N. M. B. A.; MAZUR, N. Conseqüências do manejo do solo na distribuição de metais pesados em um agrossistema com feijão-de-vagem (*Phaseolus vulgaris* L.). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 27, n. 1, p. 191-198, 2003.

SILVA, F. C.; FANTE JÚNIOR, L.; RODRIGUES, J. A.; PILOTTO, J. E.; BOARETTO, A. E.; OLIVEIRA, J. C. M.; BERTON, R. S.; ZOTELLI, H. B. Efeitos do lodo de esgoto na distribuição radicular e nos teores de metais pesados em cana-de-açúcar. **Revista Biociências**, Taubaté, v. 2, n. 2, p. 125-139, 1996.

SILVA, F. C.; BOARETTO, A. E.; BERTON, R. S.; ZOTELLI, H. B.; PEXE, C. A.; MENDONÇA, E. Cana-de-açúcar cultivada em solo adubado com lodo de esgoto: nutrientes, metais pesados e produtividade. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 33, n. 1, p. 1-8, 1998.

SILVA, F. C.; BOARETTO, A. E.; BERTON, R. S.; ZOTELLI, H. B.; PEXE, C. A.; BERNARDES, E. M. Efeito de lodo de esgoto na fertilidade de um argissolo vermelho-amarelo cultivado com cana-de-açúcar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 36, n. 5, p. 831-840, 2001.

SILVA, J. E.; RESCK, D. V. S.; SHARMA, R. D. Alternativa agronômica para o biossólido produzido no Distrito Federal. I-Efeito na produção de milho e na adição de metais pesados em latossolo no cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 26, n. 2, p. 487-495, 2002.

SILVA, L. C. F.; ALONSO, O.; ZAMBELLO JR. E.; ORLANDO FILHO, J. Efeito da complementação mineral da vinhaça na fertilização da cana-de-açúcar. **Saccharum**, São Paulo, v. 3, n. 11, p. 40-44, 1980.

SILVA, L. C. F.; ZAMBELLO JR. E.; ORLANDO FILHO, J.; ARRUDA FILHO, H. C. Utilização da vinhaça seca e das cinzas de caldeira como fertilizantes na cultura da cana-de-açúcar. **STAB: Açúcar, Álcool e Subprodutos**, Piracicaba, v. 1, n. 6, p. 35-41, 1983.

SILVA, M. A.; SILVA, G. L. Utilização agrícola da vinhaça e demais efluentes líquidos. **Álcool & Açúcar**, São Paulo, v. 6, n. 31, p. 12-25, 1986.

SIMONETE, A. A. **Alterações nas propriedades químicas de um Argissolo adubado com lodo de esgoto e desenvolvimento e acúmulo de nutrientes em plantas de milho**. 2001. 89 f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2001.

SOUZA, Z. M.; BEUTLER, A. N.; MELO, V. P.; MELO, W. J. Estabilidade de agregados e resistência à penetração em Latossolos adubados por cinco anos com biossólido. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 29, n. 1, p. 117-123, 2005.

TISDALL, J. M.; OADES, J. M. Organic matter and water stable aggregates in soils. **Journal of Soil Science**, Oxford, v. 33, p. 141-163, 1982.

CAPÍTULO 2 – ATRIBUTOS FÍSICOS DE UM LATOSSOLO CULTIVADO COM CANA-DE-AÇÚCAR APÓS APLICAÇÕES DE LODO DE ESGOTO E VINHAÇA

RESUMO – Resíduos orgânicos podem alterar a condição física de um solo dependendo da quantidade e frequência com que são aplicados. O objetivo deste trabalho foi avaliar se aplicação anual dos resíduos lodo de esgoto e vinhaça, empregados com a finalidade exclusiva de fornecer a quantidade necessária de N e K para cana-de-açúcar, causaria alteração em alguns atributos físicos de um Latossolo Vermelho distroférico argiloso após as colheitas do 3º e 4º cortes da cultura. O experimento foi conduzido em blocos ao acaso com três repetições. Os tratamentos foram: (i) dose de lodo de esgoto para suprir 100% do N exigido pela cultura; (ii) dose de lodo de esgoto para suprir 200% do N exigido; (iii) dose de vinhaça para suprir 100% do K exigido; (iv) dose de vinhaça para suprir 200% do K exigido; (v) combinação dos tratamentos (i) e (iii); (vi) combinação dos tratamentos (ii) e (iv); (vii) adubação mineral recomendada. Os somatórios das doses dos resíduos foram de 39 e 51 t ha⁻¹ de lodo de esgoto e de 532 e 1064 m³ ha⁻¹ de vinhaça até o 3º e 4º cortes, respectivamente. Amostras de solo foram retiradas nas camadas de 0-10, 10-20, 20-30, 30-40 e 40-50 cm de profundidade, determinando-se o teor de matéria orgânica e os seguintes atributos físicos: porosidade total, macroporosidade, microporosidade, densidade do solo, densidade de partícula, resistência do solo à penetração, teor de água gravimétrico, grau de flocculação, estabilidade de agregados e permeabilidade do solo. As aplicações de lodo de esgoto e vinhaça não causaram modificações nos atributos físicos do solo.

Palavras-Chave: matéria orgânica do solo, propriedades físicas, resíduos orgânicos, *Saccharum*.

Introdução

A fabricação de álcool a partir da cana-de-açúcar gera um resíduo orgânico fluido conhecido como vinhaça, material rico em potássio (ORLANDO FILHO et al., 1983). Como meio de destinação, a vinhaça vem sendo usada como fonte de K para cana-de-açúcar. Já o tratamento de esgoto urbano gera um resíduo orgânico pastoso denominado lodo de esgoto, material rico em nitrogênio (MELO et al., 2001) e pesquisas atuais demonstram que o lodo de esgoto pode ser empregado como fonte de N para a cultura. FRANCO (2003) constatou que esses resíduos foram tão eficientes quanto às fontes minerais (uréia e KCl) na produção de colmos e qualidade da matéria-matéria para a agroindústria canavieira.

Os benefícios do uso da vinhaça e do lodo de esgoto na agricultura são primariamente associado ao solo. Adição de resíduos orgânicos pode resultar em aumento de matéria orgânica no solo, podendo alterar seus atributos físicos (KIEHL, 1979; TISDALL & OADES, 1982; BAYER & MIELNICZUK, 1999; DOMINY et al., 2002). Pesquisas demonstram que aplicação de lodo de esgoto em solos tropicais resulta em aumento da macroporosidade (MELO et al., 2004) e diminuição da resistência do solo pelo penetrômetro de impacto (BARBOSA et al., 2002). Em contraste, estudos mostram que a aplicação de vinhaça não alterou a densidade do solo (CAMARGO et al., 1983 e CASAGRANDE et al., 1999), porosidade total, macroporosidade e microporosidade (ANDRIOLI, 1986 e CASAGRANDE et al., 1999), devido ao fato de não ter ocorrido aumento de matéria orgânica do solo. Entretanto aplicações sucessivas de vinhaça

(120 m³ ha⁻¹) por um longo período (35 anos) podem aumentar o teor de matéria orgânica (CANELLAS et al., 2003) e com isso melhorar a condição física do solo.

Assim, aplicações de vinhaça e lodo de esgoto podem melhorar as condições físicas de solos, que estão sujeitos a desagregação, provocada por determinados implementos, e compactação mecânica, causada pela pressão exercida por máquinas que trafegam intensamente na área (CAMILOTTI et al., 2005). Ainda que seja válido do ponto de vista ambiental, aplicar tais resíduos somente com a finalidade agronômica de melhorar a estruturação do solo pode ser antieconômico. Em contrapartida, minimizam-se os riscos econômicos quando os resíduos são aplicados para fornecer nutrientes às culturas.

Diante do exposto, o objetivo deste foi avaliar se aplicação anual de lodo de esgoto e vinhaça, resíduos empregados com a finalidade exclusiva de fornecer a quantidade necessária de N e K para cana-de-açúcar, causaria alteração em alguns atributos físicos de um Latossolo Vermelho distroférico argiloso após as colheitas do 3º e 4º cortes da cultura.

Material e Métodos

O estudo foi desenvolvido em área da Destilaria Santa Inês Ltda, município de Pontal, SP. O solo da área foi classificado como Latossolo Vermelho distroférico argiloso cujas características para fins de fertilidade estão apresentadas na Tabela 1. O clima da região é do tipo Cwa pela classificação de Köppen.

O plantio da cana-de-açúcar (variedade SP81-3250) ocorreu em abril de 2000. Anteriormente, a área estava sendo cultivada com cana-de-açúcar e milho para silagem, na reforma do canavial. O preparo de solo da respectiva área foi realizada com gradagem pesada (grade aradora com discos recortados de 80 mm), aração de aivecas e uma gradagem de nivelamento (grade niveladora com discos de 70 mm).

Tabela 1. Caracterização química e granulométrica do solo (0-20 cm).

pH CaCl ₂	MO g dm ⁻³	P resina mg dm ⁻³	K	Ca	Mg	H+Al mmol _c dm ⁻³	SB	CTC	V %	Areia	Silte	Argila
5,0	25	20	1,2	20	6	28	27,2	55,2	49	380	110	510

O experimento constou de sete tratamentos com três repetições distribuídas em delineamento em blocos ao acaso. A área total de cada unidade experimental (parcela) foi de 75 m² (5 linhas de cana-de-açúcar, cada uma com comprimento de 10 m, e espaçamento entrelinhas de 1,5 m).

Os tratamentos consistiram em duas doses de lodo de esgoto e duas doses de vinhaça, sendo os resíduos aplicados separadamente ou em conjunto (Tabela 2). O lodo de esgoto foi aplicado anualmente para fornecer 100% ou 200% de todo N requerido pela cana-de-açúcar, conforme recomendação de SPIRONELLO et al. (1997), ou seja, 100 ou 200 kg ha⁻¹ de N, respectivamente. Da mesma forma, a vinhaça foi aplicada anualmente para fornecer 100% ou 200% de todo K requerido pela cana-de-açúcar, conforme recomendação de SPIRONELLO et al. (1997), ou seja, 130 ou 260 kg ha⁻¹ de K₂O, respectivamente. Vários são os fatores que interferem na porcentagem de N disponível para as plantas presente no lodo de esgoto: sistema de tratamento a que foi submetido o esgoto, sistema de estabilização do lodo gerado, porcentagem de N-NO₃⁻ e N-NH₄⁺ e método de aplicação no solo (FRANKLIN, 2004). Na maior parte dos casos, esse valor oscila entre 30 e 35%, mas pode chegar até 50% em casos isolados. Neste trabalho, considerou-se de 33% a porcentagem de N disponível às plantas presentes no lodo empregado. O lodo de esgoto foi obtido na Estação de Tratamento de Esgoto da Sabesp de Franca, SP, e a vinhaça foi obtida na Destilaria Santa Inês (Tabela 3). Nos tratamentos com um só tipo de resíduo orgânico, quando se usou lodo de esgoto como fonte de N, o K foi suplementado com KCl, enquanto que, quando se usou vinhaça como fonte de K, o N foi suplementado com uréia. Nos tratamentos com os dois resíduos, uréia e KCl não foram empregados. Na testemunha, todo N e todo K requeridos pela cana-de-açúcar foram fornecidos com uréia e KCl, respectivamente. Os resíduos orgânicos foram aplicados em área total no plantio e após cada colheita da

cultura. As soqueiras foram cultivadas com cultivador de uma haste com ponteiros aletados (30 cm de profundidade). A colheita da cana queimada foi realizada através de corte manual e carregamento semi-mecanizado, portanto houve tráfego de máquinas nas parcelas experimentais (Trator Valmet 885S acoplado com carregadeira motocana).

Tabela 2. Doses acumuladas de lodo de esgoto (base seca) e vinhaça até o 3º e 4º cortes da cana-de-açúcar em função dos tratamentos.

Tratamento	1º corte		Até o 2º corte		Até o 3º corte		Até o 4º corte	
	Lodo de esgoto	Vinhaça	Lodo de esgoto	Vinhaça	Lodo de esgoto	Vinhaça	Lodo de esgoto	Vinhaça
	t ha ⁻¹	m ³ ha ⁻¹	t ha ⁻¹	m ³ ha ⁻¹	t ha ⁻¹	m ³ ha ⁻¹	t ha ⁻¹	m ³ ha ⁻¹
Le 1 ⁽¹⁾	5		12		19,5		25,5	
Le 2 ⁽²⁾	10		24		39		51	
V 1 ⁽³⁾		125		255		379		532
V 2 ⁽⁴⁾		250		510		758		1064
Le 1 ⁽¹⁾ + V 1 ⁽³⁾	5	125		255	19,5	379	25,5	532
Le 2 ⁽²⁾ + V 2 ⁽⁴⁾	10	250		510	39	758	51	1064
Testemunha ⁽⁵⁾	-	-	-	-	-	-	-	-

⁽¹⁾ Le 1: somatório das doses de lodo de esgoto aplicadas anualmente para fornecer 100% do N requerido pela cultura. ⁽²⁾ Le 2: somatório das doses de lodo de esgoto aplicadas anualmente para fornecer 200% do N requerido pela cultura. ⁽³⁾ V 1: somatório das doses de vinhaça aplicadas anualmente para fornecer 100% do K requerido pela cultura. ⁽⁴⁾ V 2: somatório das doses de vinhaça aplicadas anualmente para fornecer 200% do K requerido pela cultura. ⁽⁵⁾ Sem aplicação de lodo de esgoto e vinhaça.

Tabela 3. Caracterização dos resíduos utilizados no experimento.

Resíduos	M.O		N		K ₂ O	
	g kg ⁻¹	Kg m ⁻³	g kg ⁻¹	kg m ⁻³	g kg ⁻¹	kg m ⁻³
			1º corte			
Lodo de esgoto	220,45		79,5		0,63	
Vinhaça		4,46		0,28		1,20
			2º corte			
Lodo de esgoto	237,18		52,0		1,96	
Vinhaça		3,97		0,31		1,15
			3º corte			
Lodo de esgoto	197,75		39,80		0,50	
Vinhaça		5,07		0,36		1,05
			4º corte			
Lodo de esgoto	198,47		52,00		0,60	
Vinhaça		6,11		0,40		0,85

Amostras de solo foram retiradas no meio das entrelinhas, nas camadas de 0-10, 10-20, 20-30, 30-40 e 40-50 cm de profundidade, com trado ou com anel volumétrico, após as colheitas do 3^o (sem cultivo de soqueira) e 4^o cortes (com cultivo de soqueiras) e antes da reaplicação dos resíduos.

As amostras retiradas com trado foram usadas para determinação do teor de matéria orgânica segundo RAIJ et al. (2001), para obtenção da densidade de partícula pelo método do picnômetro (BLAKE & HARTGE, 1986) e para a determinação do grau de flocculação (EMBRAPA, 1997).

As amostras indeformadas, retiradas com anéis volumétricos, foram utilizadas para determinação da densidade do solo, porosidade total, macroporosidade e microporosidade segundo EMBRAPA (1997). A densidade do solo foi calculada pela relação entre a massa da amostra de solo do anel volumétrico seca a 110°C durante 24 h e o volume do mesmo anel. A porosidade total foi obtida pela diferença entre a massa do solo saturado e a massa do solo seco em estufa a 110°C durante 24 h. A microporosidade foi determinada pelo método da mesa de tensão com uma coluna de água de 60 cm de altura. Pela diferença entre a porosidade total e a microporosidade obteve-se a macroporosidade.

A resistência do solo à penetração foi avaliada nas camadas de 0-10, 10-20, 20-30, 30-40 e 40-50 cm de profundidade por meio de penetrômetro de impacto, modelo IAA/Planalsucar – STOLF (STOLF et al., 1983), sendo os cálculos realizados segundo STOLF (1991). Nas mesmas camadas, determinou-se o teor de água gravimétrico do solo, segundo EMBRAPA (1997).

Para determinação da estabilidade de agregados, as amostras foram secas ao ar e passadas na peneira de 7,93 mm. As mesmas foram umedecidas com álcool e submetidas à agitação lenta em água durante 15 minutos, utilizando peneiras com abertura de malha de 4,00; 2,00; 1,00; 0,50; 0,25 e 0,125 mm (EMBRAPA, 1997). Estes mesmos dados foram utilizados para a determinação do DMP e DMG conforme cálculos sugeridos por KIEHL (1979).

A permeabilidade do solo foi avaliada no campo pela taxa constante de infiltração de água a 20 cm de profundidade no meio da entrelinha da cultura com duas cargas

hidráulicas 3 e 6 cm de coluna d'água, utilizando permeâmetro de Gueph (REYNOLDS et al., 1992).

As análises de variância dos atributos avaliados foram feitas para cada profundidade.

Resultados e Discussão

A análise de variância efetuada para cada profundidade revelou que os atributos do solo, avaliados após as colheitas da cana-de-açúcar de 3^o e 4^o cortes, não foram afetados pela aplicação cumulativa de lodo de esgoto e/ou vinhaça desde o plantio da cultura (Tabelas 4 a 7, 10, 11 e Figuras 1 a 5).

TABELA 4. Efeito de tratamentos nos valores médios de matéria orgânica (g Kg⁻¹), para diferentes profundidades, na avaliação após a colheita do 3^o corte de cana-de-açúcar.

Tratamentos	cm				
	0-10	10-20	20-30	30-40	40-50
Le 1 ⁽¹⁾	21	23	23	18	17
Le 2 ⁽²⁾	24	23	22	19	18
V 1 ⁽³⁾	23	23	21	18	17
V 2 ⁽⁴⁾	22	24	21	19	18
Le 1 ⁽¹⁾ + V 1 ⁽³⁾	24	24	21	18	17
Le 2 ⁽²⁾ + V 2 ⁽⁴⁾	23	24	22	18	17
Adubação Mineral ⁽⁵⁾	23	23	22	18	17
Teste F	1,63 ^{NS(6)}	0,27 ^{NS}	0,66 ^{NS}	0,89 ^{NS}	1,06 ^{NS}
CV ⁽⁷⁾	5,95	4,47	5,62	5,62	5,12

⁽¹⁾ Le: lodo de esgoto (19,5 t ha⁻¹). ⁽²⁾ Le: lodo de esgoto (39 t ha⁻¹). ⁽³⁾ V: vinhaça (379 m³ ha⁻¹). ⁽⁴⁾ V: vinhaça (758 m³ ha⁻¹). ⁽⁵⁾ Sem aplicação de lodo de esgoto e vinhaça. ⁽⁶⁾ NS: não-significativo ($P > 0,05$). ⁽⁷⁾ CV: coeficiente de variação.

TABELA 5. Efeito de tratamentos nos valores médios de matéria orgânica (g Kg^{-1}), para diferentes profundidades, na avaliação após a colheita do 4º corte de cana-de-açúcar.

Tratamentos	cm				
	0-10	10-20	20-30	30-40	40-50
Le 1 ⁽¹⁾	22	24	23	18	17
Le 2 ⁽²⁾	25	24	22	19	17
V 1 ⁽³⁾	23	21	21	18	16
V 2 ⁽⁴⁾	22	21	21	19	16
Le 1 ⁽¹⁾ + V 1 ⁽³⁾	22	22	21	18	15
Le 2 ⁽²⁾ + V 2 ⁽⁴⁾	22	21	22	18	17
Adubação Mineral ⁽⁵⁾	22	21	22	18	15
Teste F ⁽¹⁾	1,20 ^{NS(6)}	2,95 ^{NS}	1,92 ^{NS}	2,80 ^{NS}	1,01 ^{NS}
CV ⁽⁷⁾	7,08	5,87	7,96	10,96	8,65

⁽¹⁾ Le: lodo de esgoto ($25,5 \text{ t ha}^{-1}$). ⁽²⁾ Le: lodo de esgoto (51 t ha^{-1}). ⁽³⁾ V: vinhaça ($532 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$). ⁽⁴⁾ V: vinhaça ($1064 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$). ⁽⁵⁾ Sem aplicação de lodo de esgoto e vinhaça. ⁽⁶⁾ NS: não-significativo ($P > 0,05$). ⁽⁷⁾ CV: coeficiente de variação.

A matéria orgânica do solo não aumentou mesmo com aplicações que acumularam, ao longo de quatro anos, 51 t ha^{-1} de lodo de esgoto, base seca (Tabelas 4 e 5), confirmando a constatação de MARQUES (1996), que empregou até 160 t ha^{-1} do resíduo, base úmida. Por outro lado, incrementos no teor de matéria orgânica do solo (0-10 cm) têm sido obtidos após 5 aplicações repetidas de lodo de esgoto (MELO et al., 2004) ou após um curto período (4 meses) de aplicação de quantidade extremamente elevada (320 t ha^{-1} , base úmida) do resíduo (NAVAS et al., 1998). O resultado do atual estudo é explicado primariamente pela aplicação anual de doses moderadas de lodo de esgoto ($\leq 15 \text{ t ha}^{-1}$) que apresentou teores relativamente baixos de matéria orgânica (Tabela 3). Acredita-se também que o tempo decorrido entre a aplicação de lodo de esgoto e a retirada das amostras de solo (em torno de 1 ano) tenha sido suficiente para decomposição da matéria orgânica possivelmente formada. ABRAHÃO (1992) observou que o teor de matéria orgânica aumentou com aplicação de lodo de esgoto, mas foi diminuindo progressivamente com o tempo (170 dias). Finalmente, a impossibilidade de se detectar efeito do resíduo em tal atributo do solo pode ter tido influência da profundidade mínima de amostragem que, no caso, foi de 0-10 cm. Neste último aspecto, AMARAL et al. (2004) verificam que a variação no teor

de carbono orgânico do solo, causada pela deposição de diferentes tipos de resíduos vegetais, foi mais evidente na camada de 0-2,5 cm de profundidade.

A aplicação de vinhaça não acarretou alteração no teor de matéria orgânica do solo (Tabelas 4 e 5), assim como observou ANDRIOLI (1986), que empregou doses do resíduo de até 1.200 m³ ha⁻¹ em Latossolo. Em contraste, CANELLAS et al. (2003) constataram que um Cambissolo cultivado com cana-de-açúcar teve aumento de carbono orgânico depois de 35 anos de aplicação de vinhaça. Isso sugere que a matéria orgânica do solo pode aumentar após aplicações sucessivas do resíduo por período de tempo maior do que o considerado neste trabalho (quatro anos).

TABELA 6. Resumo da análise de variância (ANOVA) para as variáveis: porosidade total (Pt), macroporosidade (Macro), microporosidade (Micro), densidade do solo (Ds), densidade de partícula (Dp), resistência do solo à penetração (Rp), umidade gravimétrica (Ug) e grau de floculação (Gf) para diferentes profundidades, na avaliação após a colheita do 3º corte de cana-de-açúcar.

ANOVA	Pt	Macro	Micro	Ds	Dp	Rp	Ug	Gf
0-10 cm								
Teste F	1,54 ^{NS(1)}	2,61 ^{NS}	2,49 ^{NS}	1,30 ^{NS}	0,30 ^{NS}	2,13 ^{NS}	1,41 ^{NS}	1,67 ^{NS}
CV (%) ⁽²⁾	1,42	13,58	5,08	4,46	2,05	13,77	4,36	9,67
10-20 cm								
Teste F	0,79 ^{NS}	0,98 ^{NS}	0,51 ^{NS}	0,48 ^{NS}	0,69 ^{NS}	2,27 ^{NS}	1,39 ^{NS}	0,74 ^{NS}
CV (%)	4,31	30,66	9,20	9,52	1,94	7,49	2,07	10,59
20-30 cm								
Teste F	0,34 ^{NS}	0,34 ^{NS}	0,17 ^{NS}	0,07 ^{NS}	0,36 ^{NS}	1,62 ^{NS}	0,59 ^{NS}	0,60 ^{NS}
CV (%)	7,74	53,54	17,57	12,35	2,03	8,27	2,41	11,17
30-40 cm								
Teste F	0,37 ^{NS}	1,12 ^{NS}	1,28 ^{NS}	0,42 ^{NS}	0,34 ^{NS}	0,84 ^{NS}	1,14 ^{NS}	0,64 ^{NS}
CV (%)	4,35	35,43	10,44	9,12	2,08	13,21	1,56	10,00
40-50 cm								
Teste F	1,38 ^{NS}	0,73 ^{NS}	0,83 ^{NS}	0,61 ^{NS}	0,46 ^{NS}	0,82 ^{NS}	1,68 ^{NS}	0,53 ^{NS}
CV (%)	5,93	39,96	12,64	8,97	1,63	13,52	4,17	8,18

⁽¹⁾ NS: não-significativo ($P > 0,05$). ⁽²⁾ CV: coeficiente de variação.

TABELA 7. Resumo da análise de variância (ANOVA) para as variáveis: porosidade total (Pt), macroporosidade (Macro), microporosidade (Micro), densidade do solo (Ds), densidade de partícula (Dp), resistência do solo à penetração (Rp), umidade gravimétrica (Ug) e grau de floculação (Gf) para diferentes profundidades, na avaliação após a colheita do 4º corte de cana-de-açúcar.

ANOVA	Pt	Macro	Micro	Ds	Dp	Rp	Ug	Gf
0-10 cm								
Teste F	1,26 ^{NS(1)}	1,10 ^{NS}	0,53 ^{NS}	0,74 ^{NS}	0,57 ^{NS}	1,02 ^{NS}	0,82 ^{NS}	1,65 ^{NS}
CV (%) ⁽²⁾	4,85	19,84	14,31	8,30	0,52	26,51	6,99	9,67
10-20 cm								
Teste F	0,54 ^{NS}	0,86 ^{NS}	0,92 ^{NS}	0,94 ^{NS}	1,31 ^{NS}	1,35 ^{NS}	1,30 ^{NS}	0,74 ^{NS}
CV (%)	2,75	33,54	10,61	6,58	0,44	26,61	4,83	10,59
20-30 cm								
Teste F	0,86 ^{NS}	1,21 ^{NS}	1,19 ^{NS}	1,32 ^{NS}	0,57 ^{NS}	2,75 ^{NS}	2,50 ^{NS}	0,60 ^{NS}
CV (%)	4,69	20,89	8,12	4,04	0,85	6,56	1,39	11,16
30-40 cm								
Teste F	1,04 ^{NS}	0,62 ^{NS}	0,94 ^{NS}	2,07 ^{NS}	0,99 ^{NS}	1,26 ^{NS}	0,62 ^{NS}	0,84 ^{NS}
CV (%)	2,58	30,19	9,80	3,32	0,96	17,22	2,34	9,64
40-50 cm								
Teste F	1,63 ^{NS}	2,31 ^{NS}	1,26 ^{NS}	0,76 ^{NS}	1,38 ^{NS}	1,09 ^{NS}	0,91 ^{NS}	0,53 ^{NS}
CV (%)	2,58	18,94	6,84	4,76	0,67	24,12	2,46	8,18

⁽¹⁾ NS: não-significativo ($P > 0,05$). ⁽²⁾ CV: coeficiente de variação.

A porosidade total, macroporosidade e microporosidade nas diferentes camadas do solo não foram alteradas com aplicações de lodo de esgoto e/ou vinhaça (Tabelas 6 a 9). Com relação ao lodo de esgoto, MELO et al. (2004) obtiveram resultados parcialmente semelhantes ao do presente trabalho, constatando que adições de até 50 t ha⁻¹ do resíduo sólido (base seca) durante cinco anos não causaram nenhum efeito na porosidade total e na microporosidade de dois Latossolos, mas promoveram aumento da macroporosidade na camada de 0-10 cm. Com relação à vinhaça, ANDRIOLI (1986) também não observou efeito de doses de até 1.200 m³ ha⁻¹ do resíduo fluído na porosidade total, macroporosidade e microporosidade, associando os resultados ao fato de não ter havido aumento de matéria orgânica no solo, situação análoga à deste trabalho (Tabelas 6 a 9). CASAGRANDE et al. (1999) também não encontraram alterações nestes atributos pela aplicação de vinhaça em Latossolo cultivado com cana-de-açúcar. Nem mesmo a aplicação conjunta de lodo de esgoto e vinhaça causou qualquer alteração nesses três atributos do solo (Tabelas 6 a 9).

TABELA 8. Valores médios de matéria orgânica (MO), porosidade total (Pt), macroporosidade (Macro), microporosidade (Micro), densidade do solo (Ds), densidade de partícula (Dp), resistência do solo à penetração (Rp), umidade gravimétrica (Ug) e grau de floculação (Gf) para diferentes profundidades, na avaliação após a colheita do 3º corte de cana-de-açúcar e sem cultivo de soqueira.

Tratamento	Pt	Macro	Micro	Ds	Dp	Rp	Ug	Gf
	cm ³	100 cm ⁻³		g cm ⁻³		MPa	g 100 g ⁻¹	kg kg ⁻¹
				0-10 cm				
Le 1 ⁽¹⁾	53,97	8,14	45,83	1,31	2,86	0,96	18,08	44,37
Le 2 ⁽²⁾	56,99	13,53	43,47	1,20	2,86	0,91	18,08	46,68
V 1 ⁽³⁾	54,34	10,04	44,29	1,27	2,84	0,92	18,54	45,87
V 2 ⁽⁴⁾	55,38	12,33	43,05	1,24	2,82	1,22	17,84	50,00
Le 1 ⁽¹⁾ + V 1 ⁽³⁾	53,26	10,44	42,83	1,29	2,86	0,95	19,14	42,75
Le 2 ⁽²⁾ + V 2 ⁽⁴⁾	44,91	14,00	30,91	1,25	2,86	0,89	18,95	49,03
Adubação Mineral ⁽⁵⁾	55,19	11,73	43,46	1,24	2,82	1,03	17,73	40,88
				10-20 cm				
Le 1 ⁽¹⁾	45,67	7,39	38,28	1,35	2,81	2,15	19,78	35,00
Le 2 ⁽²⁾	47,79	12,53	36,25	1,22	2,85	2,23	19,66	32,17
V 1 ⁽³⁾	47,00	9,31	37,69	1,28	2,90	2,03	20,04	38,00
V 2 ⁽⁴⁾	47,13	10,31	36,82	1,31	2,87	2,44	19,47	36,82
Le 1 ⁽¹⁾ + V 1 ⁽³⁾	46,22	7,40	38,82	1,37	2,85	2,41	20,31	36,57
Le 2 ⁽²⁾ + V 2 ⁽⁴⁾	48,20	11,50	36,71	1,26	2,84	2,41	20,01	35,35
Adubação Mineral ⁽⁵⁾	47,16	8,08	39,08	1,30	2,84	2,24	19,94	36,62
				20-30 cm				
Le 1 ⁽¹⁾	46,08	5,50	40,58	1,35	2,87	2,16	20,02	33,69
Le 2 ⁽²⁾	46,73	7,55	39,18	1,27	2,88	2,24	20,28	32,46
V 1 ⁽³⁾	49,26	9,74	39,51	1,29	2,83	1,95	20,06	32,85
V 2 ⁽⁴⁾	49,40	9,10	40,30	1,31	2,85	2,40	19,84	34,18
Le 1 ⁽¹⁾ + V 1 ⁽³⁾	47,88	7,66	39,51	1,35	2,86	2,23	20,43	29,79
Le 2 ⁽²⁾ + V 2 ⁽⁴⁾	48,23	9,25	38,98	1,31	2,84	2,24	20,40	30,51
Adubação Mineral ⁽⁵⁾	48,06	6,48	41,59	1,32	2,88	2,41	20,25	31,78
				30-40 cm				
Le 1 ⁽¹⁾	48,82	7,01	40,13	1,35	2,85	2,01	20,37	28,36
Le 2 ⁽²⁾	49,80	9,89	39,90	1,27	2,88	2,04	20,65	30,37
V 1 ⁽³⁾	48,67	7,79	40,88	1,38	2,87	1,78	20,38	31,37
V 2 ⁽⁴⁾	47,50	8,81	38,69	1,38	2,88	2,08	20,61	30,74
Le 1 ⁽¹⁾ + V 1 ⁽³⁾	48,49	12,97	35,52	1,31	2,86	2,03	20,85	27,51
Le 2 ⁽²⁾ + V 2 ⁽⁴⁾	50,18	12,31	37,88	1,28	2,82	2,22	20,63	29,65
Adubação Mineral ⁽⁵⁾	45,34	4,91	40,44	1,32	2,86	1,88	20,61	30,35
				40-50 cm				
Le 1 ⁽¹⁾	49,16	6,90	40,57	1,33	2,84	2,04	20,61	28,60
Le 2 ⁽²⁾	49,83	9,60	40,20	1,27	2,89	1,88	20,70	30,19
V 1 ⁽³⁾	48,15	7,91	40,23	1,38	2,86	1,86	19,90	30,78
V 2 ⁽⁴⁾	48,15	9,26	38,88	1,38	2,87	2,01	21,38	29,94
Le 1 ⁽¹⁾ + V 1 ⁽³⁾	48,82	12,30	36,52	1,30	2,84	1,82	21,78	27,80
Le 2 ⁽²⁾ + V 2 ⁽⁴⁾	50,51	12,64	37,87	1,28	2,84	2,17	21,61	29,73
Adubação Mineral ⁽⁵⁾	45,78	5,21	40,57	1,47	2,87	1,80	21,11	29,95

⁽¹⁾ Le: lodo de esgoto (19,5 t ha⁻¹). ⁽²⁾ Le: lodo de esgoto (39 t ha⁻¹). ⁽³⁾ V: vinhaça (379 m³ ha⁻¹).
⁽⁴⁾ V: vinhaça (758 m³ ha⁻¹). ⁽⁵⁾ Sem aplicação de lodo de esgoto e vinhaça.

TABELA 9. Valores médios de porosidade total (Pt), macroporosidade (Macro), microporosidade (Micro), densidade do solo (Ds), densidade de partícula (Dp), resistência do solo à penetração (Rp), umidade gravimétrica (Ug) e grau de floculação (Gf) em diferentes profundidades, na avaliação após a colheita do 4^o corte de cana-de-açúcar e com cultivo de soqueira.

Tratamento	Pt cm ³	Macro 100 cm ⁻³	Micro	Ds g cm ⁻³	Dp g cm ⁻³	Rp MPa	Ug g 100 g ⁻¹	Gf kg kg ⁻¹
0-10 cm								
Le 1 ⁽¹⁾	55,14	22,57	32,58	1,14	2,88	0,39	17,75	44,37
Le 2 ⁽²⁾	52,55	18,84	33,72	1,28	2,87	0,41	17,38	46,68
V 1 ⁽³⁾	54,23	21,84	32,37	1,22	2,88	0,52	17,37	45,87
V 2 ⁽⁴⁾	51,76	16,61	35,15	1,23	2,89	0,39	18,64	50,00
Le 1 ⁽¹⁾ + V 1 ⁽³⁾	54,30	23,23	31,07	1,17	2,88	0,32	16,75	42,75
Le 2 ⁽²⁾ + V 2 ⁽⁴⁾	53,84	19,67	34,17	1,15	2,88	0,36	18,29	49,03
Adubação Mineral ⁽⁵⁾	51,41	17,14	34,27	1,21	2,88	0,43	17,28	40,88
10-20 cm								
Le 1 ⁽¹⁾	47,66	13,27	34,39	1,39	2,89	0,92	19,17	35,00
Le 2 ⁽²⁾	47,86	9,96	37,90	1,41	2,88	0,98	20,68	32,17
V 1 ⁽³⁾	46,52	9,08	37,45	1,43	2,90	1,22	19,58	38,00
V 2 ⁽⁴⁾	52,38	16,46	35,92	1,27	2,90	0,95	19,11	36,82
Le 1 ⁽¹⁾ + V 1 ⁽³⁾	48,50	12,66	35,84	1,35	2,89	0,72	19,04	36,57
Le 2 ⁽²⁾ + V 2 ⁽⁴⁾	47,70	11,84	35,87	1,38	2,88	0,78	20,28	35,35
Adubação Mineral ⁽⁵⁾	47,61	10,56	37,05	1,37	2,90	1,08	20,03	36,62
20-30 cm								
Le 1 ⁽¹⁾	45,70	10,65	35,06	1,40	2,89	1,80	19,97	33,69
Le 2 ⁽²⁾	46,98	12,12	34,86	1,41	2,90	1,69	20,25	32,46
V 1 ⁽³⁾	44,45	8,35	36,10	1,47	2,92	1,73	20,17	32,84
V 2 ⁽⁴⁾	48,03	12,41	35,62	1,35	2,90	1,80	20,46	34,18
Le 1 ⁽¹⁾ + V 1 ⁽³⁾	47,52	11,19	36,34	1,37	2,92	1,56	19,86	29,79
Le 2 ⁽²⁾ + V 2 ⁽⁴⁾	46,68	8,75	36,93	1,40	2,90	1,57	20,33	30,51
Adubação Mineral ⁽⁵⁾	45,42	9,10	36,32	1,42	2,92	1,81	20,59	31,78
30-40 cm								
Le 1 ⁽¹⁾	46,63	11,86	34,77	1,40	2,94	2,25	20,56	28,36
Le 2 ⁽²⁾	48,06	14,43	33,63	1,34	2,91	1,98	21,12	30,37
V 1 ⁽³⁾	46,56	12,91	33,64	1,36	2,92	1,91	20,58	31,37
V 2 ⁽⁴⁾	45,79	9,23	36,55	1,43	2,96	2,43	20,72	30,74
Le 1 ⁽¹⁾ + V 1 ⁽³⁾	46,18	10,99	35,18	1,40	2,94	1,96	20,60	27,03
Le 2 ⁽²⁾ + V 2 ⁽⁴⁾	44,86	9,66	35,19	1,43	2,92	2,52	20,47	30,13
Adubação Mineral ⁽⁵⁾	45,94	10,99	34,95	1,44	2,94	2,11	20,85	30,35
40-50 cm								
Le 1 ⁽¹⁾	48,61	15,17	33,44	1,34	2,95	1,99	21,31	28,60
Le 2 ⁽²⁾	46,51	12,70	33,80	1,37	2,96	1,86	21,13	30,19
V 1 ⁽³⁾	47,33	13,68	33,65	1,35	2,93	1,73	20,77	30,78
V 2 ⁽⁴⁾	47,55	13,02	34,53	1,38	2,97	2,44	21,65	29,94
Le 1 ⁽¹⁾ + V 1 ⁽³⁾	48,01	14,84	33,17	1,34	2,95	1,66	21,43	27,80
Le 2 ⁽²⁾ + V 2 ⁽⁴⁾	43,82	8,72	35,10	1,43	2,97	2,33	21,18	29,73
Adubação Mineral ⁽⁵⁾	45,97	10,65	35,32	1,36	2,95	2,04	21,00	29,95

⁽¹⁾ Le: lodo de esgoto (25,5 t ha⁻¹). ⁽²⁾ Le: lodo de esgoto (51 t ha⁻¹). ⁽³⁾ V: vinhaça (532 m³ ha⁻¹).

⁽⁴⁾ V: vinhaça (1064 m³ ha⁻¹). ⁽⁵⁾ Sem aplicação de lodo de esgoto e vinhaça.

Alguns valores de macroporosidade principalmente em relação ao 3º corte (Tabelas 8 e 9) estão abaixo do limite crítico ($10 \text{ cm}^3 \text{ } 100 \text{ cm}^{-3}$) em que ainda é possível o desenvolvimento normal do sistema radicular da cana-de-açúcar (VOMOCIL & FLOCKER, 1961) e da maioria das culturas (ARGENTON et al., 2005). Abaixo desse valor, a aeração do solo pode ser reduzida de maneira drástica (XU et al., 1992), a ponto de prejudicar a respiração de raízes e, portanto, o crescimento radicular. Desta forma estes valores podem contribuir para uma baixa produtividade da cultura.

A densidade do solo e a densidade de partícula não foram influenciadas pelas adições de lodo de esgoto e/ou vinhaça (Tabelas 6 a 9). JORGE et al. (1991) verificaram que aplicações de até 80 t ha^{-1} de lodo de esgoto também não alteraram tais atributos de um Latossolo Vermelho argiloso. Em relação à vinhaça, CAMARGO et al. (1983) e CASAGRANDE et al. (1999) constataram que o emprego do resíduo não aumentou nem diminuiu a densidade do solo.

A resistência do solo à penetração e o teor de água gravimétrico do solo também não foram alterados com aplicações de lodo de esgoto e/ou vinhaça (Tabelas 6 a 9), evidenciando que tais resíduos não atenuam nem agravam o problema da compactação do solo. SOUZA et al. (2005) constataram que adição de 50 t ha^{-1} de lodo de esgoto em Latossolos (textura média e argiloso) não modificou a resistência do solo à penetração e a umidade do solo. No entanto, menor resistência à penetração na camada superficial de um Latossolo argiloso que recebeu 24 t ha^{-1} desse resíduo foi verificada por BARBOSA et al. (2002).

Os resultados de resistência do solo à penetração são confiáveis porque o teor de água do solo não variou entre tratamentos. STOLF et al. (1983) advertem que o valor de resistência é variável com a umidade.

Observa-se no 4º corte (Tabela 9) que houve um aumento da macroporosidade com redução da microporosidade, da densidade do solo e da resistência do solo à penetração quando comparado com os mesmos dados do 3º corte (Tabela 8). Estes resultados podem ser explicados pela realização do cultivo de soqueira realizada após a colheita do 4º corte e antes das retiradas das amostras para avaliações dos atributos estudados. Esses mesmos resultados, pelo uso do cultivador de soqueira, também

foram observados por CASAGRANDE (1973), CERQUEIRA LUZ (1989), CAMILOTTI (2003) e CAMILOTTI et al. (2005).

O grau de floculação não foi influenciado pelas adições de lodo de esgoto e/ou vinhaça (Tabelas 6 a 9). PRADO & CENTURION (2001) em um Latossolo Vermelho Escuro textura média cultivado com cana-de-açúcar encontraram valores 39,95, 33,44 e 31,49 % de grau de floculação nas camadas 0-10, 10-20 e 20-30 cm, respectivamente.

Nas Figuras 1 e 2 e nas figuras 3 e 4 estão apresentados os valores médios do diâmetro médio ponderado (DMP) e diâmetro médio geométrico (DMG) respectivamente para o 3º e 4º cortes da cultura. O DMP (Figuras 1 e 2) variou entre 2,18 e 3,61 mm no 3º corte e entre 3,60 e 4,29 mm no 4º corte. Em relação ao DMG (Figuras 3 e 4) houve variação entre 3,37 e 4,16 mm (3º corte) e entre 2,46 e 3,51 mm (4º corte). O DMP e DMG não foram influenciados pelos tratamentos utilizados (Figuras 1 a 4). BARBOSA et al. (2002) não encontraram alteração do DMP e DMG quando utilizaram até 36 t ha⁻¹ de lodo de esgoto. De outra forma SOUZA et al. (2005) encontraram aumento do DMG em dois diferentes solos de textura média e argilosa quando utilizaram doses acumuladas de 50 t ha⁻¹ de lodo de esgoto.

CAMARGO et al. (1983) não encontraram diferenças no diâmetro aritmético médio de um Latossolo Vermelho (28% de argila) quando aplicou cumulativamente 28000 m³ ha⁻¹ de vinhaça comparada com a testemunha.

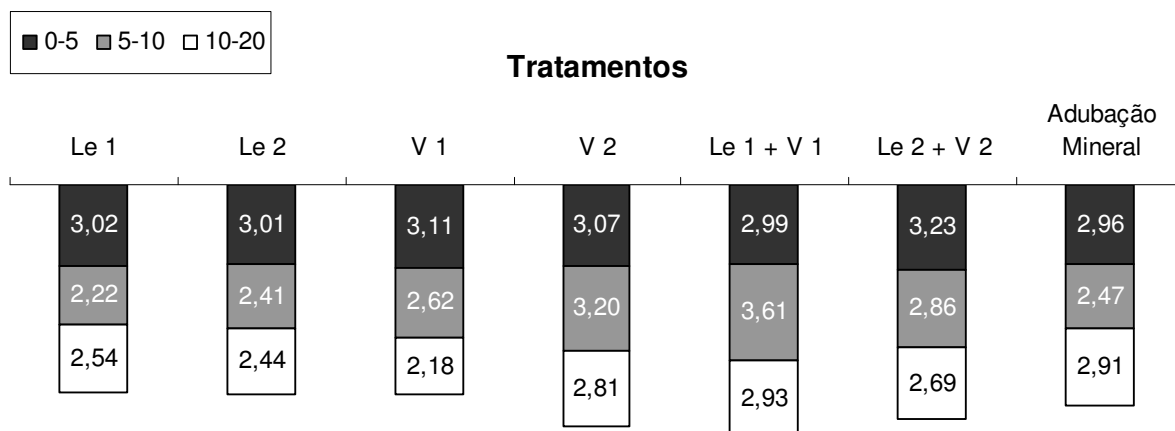


Figura 1: Valores médios de diâmetro médio ponderado em diferentes camadas na avaliação após a colheita de 3º corte de cana-de-açúcar. [$P > 0,05$ (CV = 11,55, 17,47 e 23,86 para as camadas 0-5, 5-10 e 10-20 cm, respectivamente)].

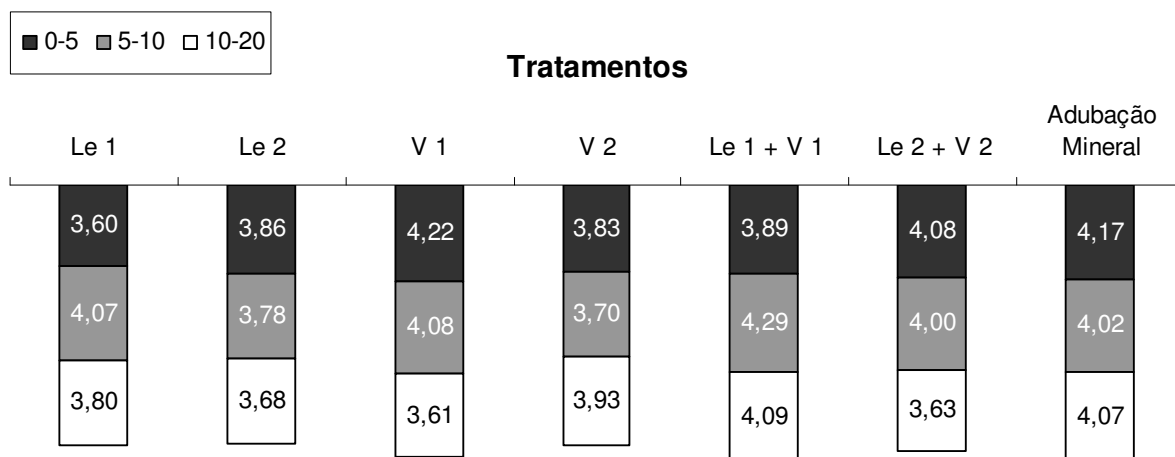


Figura 2: Valores médios de diâmetro médio ponderado em diferentes camadas na avaliação após a colheita de 4º corte de cana-de-açúcar. [$P > 0,05$ (CV = 11,51, 9,45 e 16,12 para as camadas 0-5, 5-10 e 10-20 cm, respectivamente)].

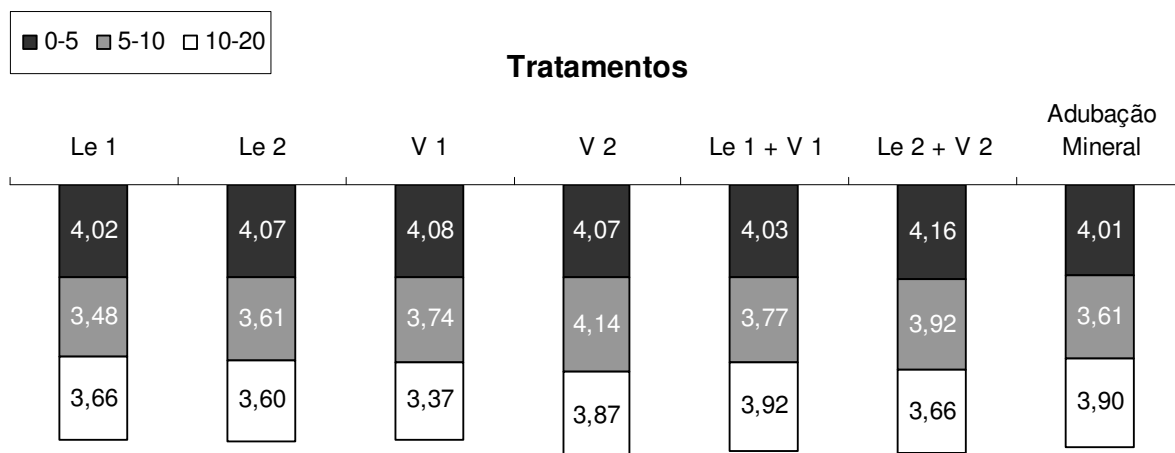


Figura 3: Valores médios de diâmetro médio geométrico em diferentes camadas na avaliação após a colheita de 3º corte de cana-de-açúcar. [$P > 0,05$ (CV = 5,37, 8,69 e 11,97 para as camadas 0-5, 5-10 e 10-20 cm, respectivamente)].

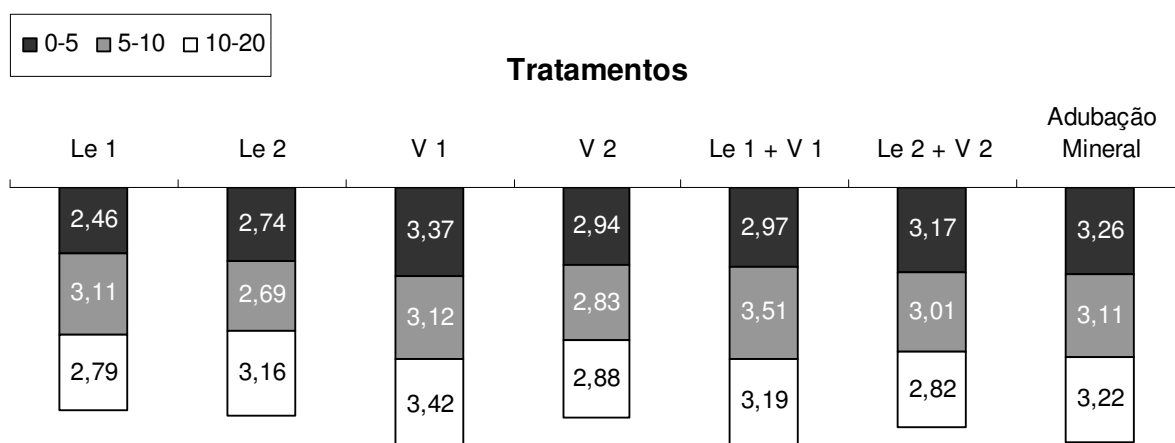


Figura 4: Valores médios de diâmetro médio geométrico em diferentes camadas na avaliação após a colheita de 4º corte de cana-de-açúcar. [$P > 0,05$ (CV = 22,19, 19,33 e 16,92 para as camadas 0-5, 5-10 e 10-20 cm, respectivamente)].

Nas Tabelas 12 e 13 estão apresentados respectivamente, os valores médios da distribuição da classe agregados para o 3º e 4º cortes da cultura. Os agregados nas diferentes classes de tamanho não foram influenciados pelos tratamentos utilizados (Tabelas 10 e 11). JORGE et al. (1991) encontraram maior retenção de agregados nas classes de 4, 2 e 1 mm quando aplicaram cumulativamente 40 e 80 t ha⁻¹ de lodo de esgoto em um Latossolo Vermelho argiloso. O aumento de agregados > 2 mm foi observado por SOUZA et al. (2005) utilizando doses cumulativas de 50 t ha⁻¹ de lodo de esgoto em dois diferentes solos de textura média e argilosa.

Em relação à aplicação de vinhaça FREIRE & AGUIAR (1993) encontraram aumento nos valores de agregados na classe de 0,25 mm em um solo argiloso-siltoso cultivado com cana-de-açúcar em relação ao tratamento testemunha.

Tabela 10. Resumo da análise de variância (ANOVA) para as classes de agregados nas diferentes profundidades, na avaliação após a colheita do 3º corte de cana-de-açúcar.

ANOVA	7,93-4,00	4,00-2	2-1	1-0,5	0,5-0,25	0,25-0,125	<0,125
				0-5 cm			
Teste F	0,19 ^{NS(1)}	0,44 ^{NS}	0,25 ^{NS}	0,12 ^{NS}	0,44 ^{NS}	0,67 ^{NS}	1,32 ^{NS}
CV (%) ⁽²⁾	7,56	26,61	25,12	26,04	26,33	24,31	13,95
				5-10 cm			
Teste F	1,40 ^{NS}	1,47 ^{NS}	1,60 ^{NS}	1,11 ^{NS}	0,90 ^{NS}	0,84 ^{NS}	0,36 ^{NS}
CV (%)	11,43	26,29	22,00	30,89	33,93	40,31	17,97
				10-20 cm			
Teste F	0,54 ^{NS}	0,36 ^{NS}	0,68 ^{NS}	0,76 ^{NS}	0,61 ^{NS}	0,92 ^{NS}	1,45 ^{NS}
CV (%)	15,63	29,47	34,24	40,07	43,25	51,10	11,29

⁽¹⁾ NS: não-significativo ($P > 0,05$). ⁽²⁾ CV: coeficiente de variação.

Tabela 11. Resumo da análise de variância (ANOVA) para as classes de agregados nas diferentes profundidades, na avaliação após a colheita do 4º corte de cana-de-açúcar.

ANOVA	7,93-4,00	4,00-2	2-1	1-0,5	0,5-0,25	0,25-0,125	<0,125
0-5 cm							
Teste F	0,74 ^{NS(1)}	1,16 ^{NS}	0,53 ^{NS}	0,96 ^{NS}	0,74 ^{NS}	0,68 ^{NS}	1,38 ^{NS}
CV (%) ⁽²⁾	15,30	50,32	45,85	47,34	43,73	43,46	22,09
5-10 cm							
Teste F	0,77 ^{NS}	2,74 ^{NS}	0,48 ^{NS}	0,78 ^{NS}	0,55 ^{NS}	0,74 ^{NS}	0,97 ^{NS}
CV (%)	12,18	26,86	43,29	55,88	50,34	46,24	25,31
10-20 cm							
Teste F	0,26 ^{NS}	0,38 ^{NS}	0,39 ^{NS}	0,54 ^{NS}	0,54 ^{NS}	0,67 ^{NS}	1,11 ^{NS}
CV (%)	23,98	52,63	52,99	61,42	69,20	69,20	27,48

(1) ^{NS}: não-significativo ($P > 0,05$). (2) CV: coeficiente de variação.

Tabela 12. Valores médios da distribuição de agregados em classes de tamanho em diferentes profundidades, na avaliação após a colheita do 3º corte de cana-de-açúcar.

Tratamento	7,93-4,00	4,00-2	2-1	1-0,5	0,5-0,25	0,25-0,125	<0,125
% 0-5 cm							
Le 1 ⁽¹⁾	70,49	8,65	3,71	3,56	2,90	2,20	8,51
Le 2 ⁽²⁾	70,67	6,36	3,04	3,65	3,36	2,52	10,41
V 1 ⁽³⁾	71,09	7,60	3,46	3,38	2,89	1,95	9,66
V 2 ⁽⁴⁾	70,87	7,98	3,31	3,30	2,82	2,23	9,51
Le 1 ⁽¹⁾ + V 1 ⁽³⁾	69,62	7,34	3,36	3,60	3,25	2,47	10,38
Le 2 ⁽²⁾ + V 2 ⁽⁴⁾	72,98	6,78	2,99	3,16	2,60	1,98	9,52
Testemunha ⁽⁵⁾	68,59	7,23	3,32	3,52	3,34	2,61	11,41
% 5-10 cm							
Le 1 ⁽¹⁾	57,53	10,39	5,84	6,14	5,02	3,70	11,34
Le 2 ⁽²⁾	60,49	6,64	5,63	5,68	4,13	3,09	10,60
V 1 ⁽³⁾	63,86	6,17	4,96	4,85	4,01	3,03	9,66
V 2 ⁽⁴⁾	72,62	8,69	3,66	3,48	2,68	1,81	9,61
Le 1 ⁽¹⁾ + V 1 ⁽³⁾	64,22	8,09	5,11	4,94	4,02	2,84	10,22
Le 2 ⁽²⁾ + V 2 ⁽⁴⁾	66,85	10,85	4,24	4,03	3,46	2,33	11,01
Testemunha ⁽⁵⁾	60,51	10,71	5,62	5,38	4,40	2,84	10,41
% 10-20 cm							
Le 1 ⁽¹⁾	61,73	10,71	6,55	5,49	3,43	2,28	9,83
Le 2 ⁽²⁾	59,25	10,53	6,07	5,80	3,88	2,70	11,78
V 1 ⁽³⁾	55,12	11,49	7,01	7,10	4,83	3,22	11,25
V 2 ⁽⁴⁾	66,27	8,73	4,90	4,64	3,30	2,27	9,92
Le 1 ⁽¹⁾ + V 1 ⁽³⁾	66,31	9,27	4,61	3,93	2,88	3,99	11,04
Le 2 ⁽²⁾ + V 2 ⁽⁴⁾	61,85	10,15	6,14	4,57	3,70	2,30	10,42
Testemunha ⁽⁵⁾	65,30	8,95	4,88	4,38	2,80	1,73	11,96

(1) Le: lodo de esgoto (19,5 t ha⁻¹). (2) Le: lodo de esgoto (39 t ha⁻¹). (3) V: vinhaça (379 m³ ha⁻¹). (4) V: vinhaça (758 m³ ha⁻¹). (5) Sem aplicação de lodo de esgoto e vinhaça.

Tabela 13. Valores médios da distribuição de agregados em classes de tamanho em diferentes profundidades, na avaliação após a colheita do 4º corte de cana-de-açúcar.

Tratamento	7,93-4,00	4,00-2	2-1	1-0,5	0,5-0,25	0,25-0,125	<0,125
%							
0-5 cm							
Le 1 ⁽¹⁾	63,06	12,12	5,99	5,97	4,16	2,79	5,92
Le 2 ⁽²⁾	69,56	7,43	4,99	5,38	4,10	2,55	6,00
V 1 ⁽³⁾	78,45	6,25	3,24	3,10	2,70	1,79	4,47
V 2 ⁽⁴⁾	68,87	8,02	4,97	5,33	4,32	2,59	5,90
Le 1 ⁽¹⁾ + V 1 ⁽³⁾	69,95	12,42	4,63	3,77	2,67	1,96	4,56
Le 2 ⁽²⁾ + V 2 ⁽⁴⁾	75,38	8,39	3,98	3,25	3,03	1,78	4,19
Testemunha ⁽⁵⁾	77,01	5,57	4,14	3,68	2,91	1,78	5,08
5-10 cm							
Le 1 ⁽¹⁾	73,06	7,50	4,64	3,88	2,57	1,65	6,70
Le 2 ⁽²⁾	67,43	9,34	5,50	5,40	4,06	2,32	5,95
V 1 ⁽³⁾	74,28	7,01	4,55	3,85	3,02	1,63	5,65
V 2 ⁽⁴⁾	65,56	11,34	4,97	6,47	3,72	2,61	5,33
Le 1 ⁽¹⁾ + V 1 ⁽³⁾	78,87	5,09	3,52	2,93	2,24	1,31	6,04
Le 2 ⁽²⁾ + V 2 ⁽⁴⁾	71,71	7,23	4,23	4,27	3,48	2,04	7,03
Testemunha ⁽⁵⁾	70,79	9,91	3,37	3,37	2,63	1,93	8,00
10-20 cm							
Le 1 ⁽¹⁾	64,68	12,19	5,13	4,38	2,73	1,79	9,10
Le 2 ⁽²⁾	65,06	9,49	6,68	5,87	3,93	2,38	6,59
V 1 ⁽³⁾	63,00	8,92	5,42	6,70	5,01	3,20	7,75
V 2 ⁽⁴⁾	70,35	7,87	4,97	5,04	3,43	1,85	6,49
Le 1 ⁽¹⁾ + V 1 ⁽³⁾	72,51	8,88	3,62	3,38	2,39	1,65	7,57
Le 2 ⁽²⁾ + V 2 ⁽⁴⁾	62,31	11,68	6,38	5,45	3,69	2,25	8,24
Testemunha ⁽⁵⁾	59,24	7,56	4,98	3,27	2,22	1,17	5,46

⁽¹⁾ Le: lodo de esgoto (25,5 t ha⁻¹). ⁽²⁾ Le: lodo de esgoto (51 t ha⁻¹). ⁽³⁾ V: vinhaça (532 m³ ha⁻¹).

⁽⁴⁾ V: vinhaça (1064 m³ ha⁻¹). ⁽⁵⁾ Sem aplicação de lodo de esgoto e vinhaça.

Finalmente a permeabilidade do solo não foi alterada pela aplicação de lodo de esgoto e/ou vinhaça com a finalidade de fornecer todo o N e K para a cultura da cana-de-açúcar, o que pode ser explicado pela não variação da macroporosidade do solo (Tabelas 6 e 7). A permeabilidade do solo variou entre 13,6 a 22,0 mm h⁻¹ e 10,8 a 22,2 mm h⁻¹, respectivamente no 3º e 4º cortes da cultura da cana-de-açúcar (Figura 5). BARBOSA et al. (2002) encontraram aumento na permeabilidade quando se aplicou 36 t ha⁻¹ de lodo de esgoto em dois anos consecutivos. MARCIANO et al. (2001) encontraram aumento linear da permeabilidade após duas aplicações de doses crescentes de lodo de esgoto cultivado com cana-de-açúcar. Em relação à vinhaça, LOBATO et al. (1998) verificaram diminuição da permeabilidade com aplicações a partir

de 800 m³ ha⁻¹ utilizando amostras de um Latossolo Roxo. O valor de 17,4 mm h⁻¹ foi obtido por LOPES et al. (2003) em um Latossolo Vermelho textura argilosa, cultivado com cana-de-açúcar, sem aplicações de resíduos.

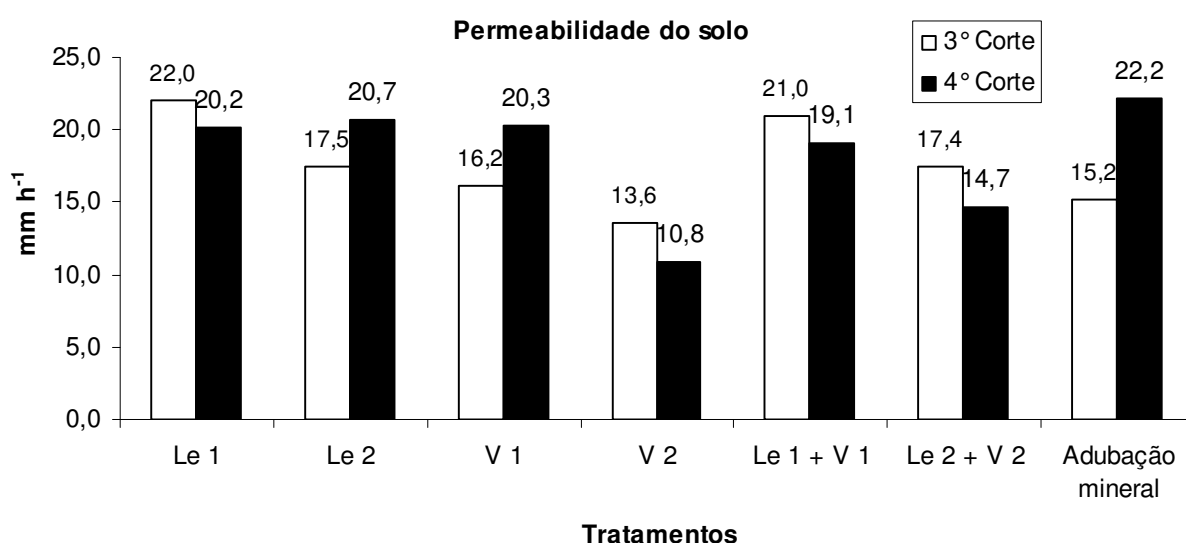


Figura 5: Permeabilidade do solo para os tratamentos testados [$P > 0,05$ (CV = 53,00 e 64,06 para o 3° e 4° corte, respectivamente)].

Como consideração final, é preciso ter em conta que os atributos físicos não foram alterados em função da adição de lodo de esgoto e vinhaça provavelmente porque não houve incremento de matéria orgânica do solo. Solos cultivados com cana-de-açúcar sofrem pressões elevadas de máquinas e implementos (VASCONCELOS, 2002) e são revolvidos por cultivos de soqueira (CASAGRANDE, 1973 e CAMILOTTI et al. (2005), eventos que certamente alteram mais consistentemente a condição física do solo do que a matéria orgânica. Neste estudo, é possível que o manejo do solo tenha minimizado o efeito dos tratamentos.

Conclusão

Os atributos físicos do solo não foram alterados pela aplicação de lodo de esgoto e/ou vinhaça mesmo após a realização de quatro aplicações anuais sucessivas e a conclusão de quatro ciclos da cultura.

Referências

ABRAHÃO, E. C. **Efeito de doses de biossólido sobre a fertilidade, atividade de amilase e celulase de um Latossolo Vermelho Escuro textura média**. 1992. 110 f. Monografia (Trabalho de Graduação em Agronomia) – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 1992.

AMARAL, A. S.; ANGHINONI, I.; DESCHAMPS, F. C. Resíduos de plantas de cobertura e mobilidade dos produtos da dissolução do calcário aplicado na superfície do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, n. 1, p. 115-123, 2004.

ANDRIOLI, I. **Efeitos da vinhaça em algumas propriedades químicas e físicas de um latossolo vermelho escuro textura média**. 85 f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1986.

ARGENTON, J.; ALBUQUERQUE, J. A.; BAYER, C.; WILDNER, L. P. Comportamento de atributos relacionados com a forma de estrutura de um Latossolo Vermelho sob sistemas de preparo e plantas de cobertura. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.29, n.3, 425-435, 2005.

BARBOSA, G. M. C.; TAVARES FILHO, J.; FONSECA, I. C. B. Avaliações de propriedades físicas de um latossolo vermelho eutroférico tratado com lodo de esgoto por dois anos consecutivos. **Sanare**, Curitiba, v. 17, n. 17, p. 94-101, 2002.

BAYER, C.; MIELNICZUK, J. Dinâmica e função da matéria orgânica. In: SANTOS, G.A.; CAMARGO, F.A.O. (Ed.) **Fundamentos da matéria orgânica do solo**. Porto Alegre: Genesis, 1999. p. 9-26.

BLAKE, G. R.; HARTGE, K. H. Particle density. In: KLUTE, A. (Ed.). **Methods of soil analysis – Part 1**. 2. ed. Madison: ASA/SSSA, 1986. p. 377-382.

CAMARGO, O. A.; VALADARES, J. M. A. S.; GERALDI, R. N. **Características químicas e físicas de solo que recebeu vinhaça por longo tempo**. Campinas: Instituto Agrônomo, 1983. 30p. (Boletim Técnico, 76).

CAMILOTTI, F. **Efeito residual de sistemas de preparo do solo com e sem cultivo das soqueiras de cana crua nas propriedades físicas do solo**. 2003. 62 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2003.

CAMILOTTI, F.; ANDRIOLI, I.; DIAS, F. L. F.; CASAGRANDE, A. A.; SILVA, A. R.; MUTTON, M.; CENTURION, J. F. Efeito prolongado de sistemas de preparo do solo com e sem cultivo de soqueira de cana crua em algumas propriedades físicas do solo. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 25, n. 1, p. 189-198, 2005.

CANELLAS, L. P., VELLOSO, A. C. X., MARCIANO, C. R.; RAMALHO, J. F. G. P.; RUMJANEK, V. M.; REZENDE, C. E.; SANTOS, G. A. Propriedades químicas de um Cambissolo cultivado com cana-de-açúcar, com preservação do palhiço e adição de vinhaça por longo tempo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 27, n. 5, p. 935-944, 2003.

CASAGRANDE, A. A. **Cultivo mecânico e adubação na soqueira da cana-de-açúcar – efeitos na planta e no solo**. 1973. 99 f. Tese (Doutorado em Ciências) – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 1973.

CASAGRANDE, J. C.; DIAS, N. M. P. Atributos químicos de um solo com mata natural e cultivado com cana-de-açúcar. **STAB: Açúcar, Álcool e Subprodutos**, Piracicaba, v. 17, n. 5, p.35-37, 1999.

CASAGRANDE, A. A.; ANDRIOLI, I.; BUZOLIN, P. R. S.; MUTTON, M. A.; CAMPOS, M. S. BARBOSA, J. C. Atributos físicos de um solo manejado no sistema mecanizado de cana crua e cana queimada. In: CONGRESSO NACIONAL DA SOCIEDADE DOS TÉCNICOS AÇUCAREIROS E ALCOOLEIROS DO BRASIL, 7., 1999, Londrina. **Anais**. Piracicaba: STAB, 1999.

CERQUEIRA LUZ, P. H. **Efeitos de sistemas de colheita e formas de cultivo de soqueira sobre a produção e qualidade tecnológica da cana-de-açúcar (*Saccharum spp*)**. 1989. 135 f. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1989.

CORRÊA, M. C. M.; CONSOLINI, F.; CENTURION, J. F. Propriedades químicas de um Latossolo Vermelho Escuro Distrófico sob cultivo contínuo de cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*). **Acta Scientiarum**, v. 23, n. 5, p. 1159-1163, 2001.

DOMINY, C. S.; HAYNES, R. J.; ANTWERPEN, R. van. Loss of soil organic matter and related soil properties under long-term sugarcane production on two contrasting soils. **Biology and Fertility of Soils**, Berlin, v. 36, n. 5, p. 350-356, 2002.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Manual de métodos de análise de solos**. 2.ed. Rio de Janeiro: Embrapa Produção de Informação, 1997. 212p.

FRANCO, A. **Cana-de-açúcar cultivada em solo adubado com lodo de esgoto e vinhaça: nitrogênio no sistema solo-planta, produtividade e características tecnológicas**. 2003. 90 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2003.

FRANKLIN, R. **Land application of sewage sludge**. Clemson: Faculty of Soils and Land Resources. 2004. 16p.

FREIRE, W. J.; AGUIAR, M. A. Incorporação da vinhaça concentrada em dois solos distintos: Características químicas, físicas e mecânicas da mistura obtida. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 13, p. 85-96, 1993.

JORGE, J. A.; CAMARGO, O. A.; VALADARES, J. M. A. S. Condições físicas de um Latossolo Vermelho-Escuro quatro anos após aplicação de lodo de esgoto e calcário. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 15, n. 3, p. 237-240, 1991.

KIEHL, E. J. **Manual de edafologia**. São Paulo: Editora Agronômica Ceres, 1979. 264p.

LOBATO, E. J. V.; LIBARDI, P. L.; CAMARGO, O. A. Condutividade hidráulica de amostras remoldadas de um latossolo roxo distrófico tratado com água/vinhaça. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 22, n. 2, p. 181-188, 1998.

LOPES, A. S.; VALPASSOS, M. A. R.; CENTURION, J. F., ANDRIOLI, I. Permeabilidade e agregação de um latossolo vermelho sob três sistemas de manejo no município de Jaboticabal-SP. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 23, n. 3, p. 504-510, 2003.

MARCIANO, C. R.; MORAES, S. O.; OLIVEIRA, F. C. MATIAZZO, M. E. Efeito do lodo de esgoto e do composto de lixo urbano sobre a condutividade hidráulica de um latossolo amarelo saturado e não saturado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 25, n. 1, p. 1-9, 2001.

MARQUES, M. O. **Incorporação de bio sólido em solo cultivado com cana-de-açúcar**. 1996. 111 f. Tese (Livre-docência) - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 1996.

MELO, W. J.; MARQUES, M. O.; MELO, V. P. O uso agrícola do bio sólido e as propriedades do solo. In. TSUTIYA, M. T.; COMPARINI, J. B.; SOBRINHO, P. A.; HESPANOL, I.; CARVALHO, P. C. T.; MELFI, A. J.; MELO, W. J.; MARQUES, M. O. **Bio sólidos na agricultura**. São Paulo: SABESP, 2001. p.289-363.

MELO, V. P.; BEUTLER, A. N.; SOUZA, Z. M.; CENTURION, J. F.; MELO, W. J. Atributos físicos de Latossolos adubados durante cinco anos com bio sólido. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 39, n. 1, p. 67-72, 2004.

NAVAS, A.; BERMÚDEZ, F.; MACHÍN, J. Influence of sewage sludge application on physical and chemical properties of Gypsisols. **Geoderma**, Amsterdam v. 87, n. 1-2, p. 123-135, 1998.

ORLANDO FILHO, J.; SILVA, G. M. A.; LEME, E. J. A. Utilização agrícola dos resíduos da agroindústria canavieira. In: ORLANDO FILHO, J. (Coord.). **Nutrição e adubação da cana-de-açúcar no Brasil**. Piracicaba: IAA/Planalsucar, 1983. p. 227-264.

PRADO, R. M.; CENTURION, J. F. Alterações na cor e no grau de floculação de um Latossolo Vermelho-Escuro sob cultivo contínuo de cana-de-açúcar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 36, n. 1, p. 197-203, 2001.

RAIJ, B. van; ANDRADE, J. C.; CANTARELA, H.; QUAGGIO, J. A. **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Campinas: Instituto Agrônomo, 2001. 284p.

REYNOLDS, W. D.; VIEIRA, S. R.; TOPP, G. C. An assessment of the single-head analysis for the constant head well permeameter. **Canadian Journal of Soil Science**, Ottawa, v. 72, n. 4, p. 489-501, 1992.

SOUZA, Z. M.; BEUTLER, A. N.; MELO, V. P.; MELO, W. J. Estabilidade de agregados e resistência à penetração em Latossolos adubados por cinco anos com biossólido. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 29, n. 1, p. 117-123, 2005.

SPIRONELLO, A.; RAIJ, B. van; PENATTI, C. P.; CANTARELLA, H.; MORELLI, J. L.; ORLANDO FILHO, J.; LANDELL, M. G. A.; ROSSETO, R. In: RAIJ, B. van; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A.; FURLANI, A. M. C. (Ed.). **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. 2. ed. Campinas: Instituto Agrônomo/Fundação IAC, 1997. p. 237-239. (Boletim Técnico, 100).

STOLF, R. Teoria e teste experimental de fórmulas de transformação dos dados de penetrômetro de impacto em resistência do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 15, n. 3, p. 229-235, 1991.

STOLF, R.; FERNANDES, J. FURLANI NETO, V. L. Penetrômetro de impacto IAA/Planalsucar-STOLF (Recomendações para seu uso). **STAB: Açúcar, Álcool e Subprodutos**, Piracicaba, v. 3, p. 18-23, 1983.

TISDALL, J. M.; OADES, J. M. Organic matter and water stable aggregates in soils. **Journal of Soil Science**, Oxford, v. 33, p. 141-163, 1982.

VASCONCELOS, A. C. M. **Desenvolvimento do sistema radicular e da parte aérea de socas de cana-de-açúcar sob dois sistemas de colheita: crua mecanizada e queimada manual.** 2002. 140 f. Tese (Doutorado em Produção Vegetal) – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2002.

VOMOCIL, J. A.; FLOCKER, W. J. Effect of soil compaction on storage and movement of soil air and water. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v. 4, n. 2, p. 242-246, 1961.

XU, X.; NIEBER, J. L.; GUPTA, S. C. Compaction effect on the gas diffusion coefficient in soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 56, n. 6, p. 1743-1750, 1992.

CAPÍTULO 3 – PRODUTIVIDADE E QUALIDADE AGROINDUSTRIAL DA CANA-DE-AÇÚCAR CULTIVADA COM LODO DE ESGOTO, VINHAÇA E ADUBOS MINERAIS

RESUMO - O objetivo deste trabalho foi comparar o efeito do lodo de esgoto e uréia como fontes de N e vinhaça e KCl como fontes de K na produtividade e nas características tecnológicas de cana-soca de 3^o e 4^o cortes. O solo da área experimental foi classificado como Latossolo Vermelho distroférico que já estava sendo cultivado com cana-de-açúcar (variedade SP81-3250). O experimento constou de fatorial $3 \times 2 + 1$ [três tipos de resíduos (lodo de esgoto, vinhaça e lodo de esgoto + vinhaça); duas doses de resíduo, de modo a completar 100 e 200% das doses de N e K recomendadas (lodo de esgoto e vinhaça com fontes de N e K, respectivamente); e um tratamento adicional (adubação mineral)]. Os tratamentos foram distribuídos na área em delineamento em blocos ao acaso com 3 repetições, tendo sido aplicados a cada ciclo da cana-de-açúcar desde o plantio. Foram avaliadas a produtividade e características tecnológicas (brix, pol % caldo, fibra, pureza, pol % cana, AR e ATR). Os resultados indicam que o lodo de esgoto como fonte de N e vinhaça como fonte de K foram similares às fontes minerais de cada um desses nutrientes em termos de produtividade e características tecnológicas de cana-soca.

Palavras-Chave: adubação nitrogenada, adubação potássica, resíduos orgânicos, *Saccharum*.

Introdução

O lodo de esgoto é um resíduo proveniente do tratamento de esgotos urbanos e a vinhaça é um resíduo obtido da fabricação de álcool na agroindústria canavieira. Segundo MELO et al. (2001), o lodo de esgoto empregado na agricultura promove melhoria das propriedades físicas, químicas e biológicas do solo, podendo ser considerado uma adequada fonte de N para as culturas. Por apresentar predomínio de K em sua composição (ORLANDO FILHO et al., 1983), a vinhaça é comumente utilizada como fonte desse nutriente em áreas canavieiras.

Pesquisas vêm demonstrando que a aplicação de lodo de esgoto em solos tropicais beneficia a produtividade e o rendimento em sacarose da cultura da cana-de-açúcar (SILVA et al., 1998).

É interessante estudar se a adubação com tais resíduos pode ser comparável à adubação mineral em termos de produtividade e qualidade dessa cultura. FRANCO (2003) constatou que o lodo de esgoto como fonte de N e vinhaça como fonte de K foram tão eficientes quanto as fontes minerais desses dois nutrientes (uréia e KCl) na produtividade e qualidade industrial de cana-planta e cana-soca.

O objetivo deste trabalho foi comparar o efeito do lodo de esgoto e uréia como fontes de N e vinhaça e KCl como fontes de K na produtividade agrícola e nas características tecnológicas de cana-soca de 3^o e 4^o cortes.

Material e Métodos

A cana-de-açúcar, variedade SP81-3250 (Figura 1), estava sendo cultivada em Latossolo Vermelho distroférico, município de Pontal, SP. O clima da região é do tipo Cwa pela classificação de Köppen.

O experimento constou de fatorial $3 \times 2 + 1$ [três tipos de resíduos (lodo de esgoto, vinhaça e lodo de esgoto + vinhaça); duas doses de resíduo, de modo a completar 100 e 200% das doses de N e K recomendadas (lodo de esgoto e vinhaça

com fontes de N e K, respectivamente); e um tratamento adicional (adubação mineral)]. Os tratamentos foram distribuídos na área em delineamento em blocos ao acaso com 3 repetições, tendo sido aplicados, uma vez ao ano, desde o plantio da cana-de-açúcar. A área total de cada unidade experimental (parcela) foi de 75 m² (5 linhas de cana-de-açúcar, cada uma com comprimento de 10 m, e espaçamento entrelinhas de 1,5 m).



Figura 1: Variedade SP81-3250.

O lodo de esgoto (Figura 2) foi proveniente da estação de tratamento de esgoto da Sabesp de Franca, SP, e a vinhaça obtida junto à Destilaria Santa Inês, Pontal, SP.

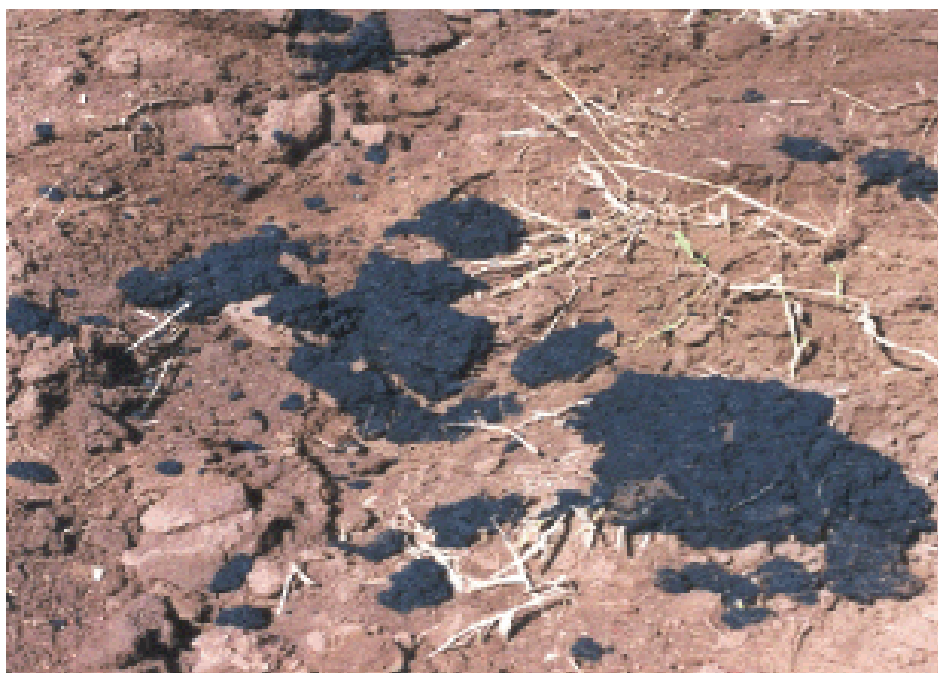


Figura 2: Lodo de esgoto utilizado no experimento.

As doses de N e K empregadas neste experimento foram baseadas na recomendação de SPIRONELLO et al. (1997), constando de 100 kg ha^{-1} de N e 130 kg ha^{-1} de K_2O para cada um dos dois anos de cultivo. As concentrações de N no lodo de esgoto e de K na vinhaça (Tabela 1) serviram de base para o cálculo da quantidade do resíduo a ser aplicada para fornecer 100 e 200% da dose recomendada de cada um desses nutrientes para cana-soca. Vários são os fatores que interferem na porcentagem de N disponível para as plantas presente no lodo de esgoto: sistema de tratamento a que foi submetido o esgoto, sistema de estabilização do lodo gerado, porcentagem de N-NO_3^- e N-NH_4^+ e método de aplicação no solo (FRANKLIN, 2004). Na maior parte dos casos, esse valor oscila entre 30 e 35%, mas pode chegar até 50% em casos isolados. Neste trabalho, considerou-se de 33% a porcentagem de N

disponível às plantas presentes no lodo empregado. Nos tratamentos em que foi aplicado lodo de esgoto como único resíduo foi feita suplementação potássica com KCl. Nos tratamentos em que foi aplicada vinhaça como único resíduo foi feita suplementação nitrogenada com uréia. Os resíduos e os adubos minerais foram aplicados a lanço e em área total no início do ciclo da cana-soca de 3^o e 4^o cortes. Logo após a adubação, as soqueiras foram cultivadas com cultivador de uma haste com ponteiros aletados. A cultura foi mantida no limpo por meio de aplicações de herbicida (hexazinona + diuron).

Tabela 1. Concentrações de N total e K₂O nos resíduos.

Resíduos	N		K ₂ O	
	g kg ⁻¹	kg m ⁻³	g kg ⁻¹	kg m ⁻³
			3 ^o corte	
Lodo de esgoto	39,80		0,50	
Vinhaça		0,36		1,05
			4 ^o corte	
Lodo de esgoto	52,00		0,60	
Vinhaça		0,40		0,85

Amostras de cana (10 colmos retirados aleatoriamente em cada parcela), coletadas uma semana antes da colheita, foram utilizadas para avaliação das características tecnológicas (brix, pol % caldo, pol % cana, pureza, fibra, AR e ATR) e determinação das concentrações de N e K segundo metodologia de BATAGLIA et al. (1983).

A produtividade de cana queimada foi estimada pela pesagem dos colmos coletados nas três linhas centrais de cada parcela, eliminando 1 m de suas extremidades. Os resultados foram expressos em TCH.

Os resultados foram submetidos à análise de variância, e as médias foram comparadas pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Resultados e Discussão

A produtividade e as características tecnológicas da cana-de-açúcar no 3º corte não sofreram alteração em decorrência dos fatores testados, havendo apenas variação nos valores de brix devido à significância da interação R × D (Tabela 2). Verifica-se na Tabela 3 que a dose de 200% de K aplicado como vinhaça proporcionou valor mais elevado de brix do que a dose recomendada do nutriente (100%). Esse resultado decorre do maior fornecimento de K, embora não exagerado, suprimindo as necessidades das plantas, podendo favorecer maior intensidade de síntese e acúmulo de sacarose (MALAVOLTA et al., 1989). Por outro lado, a combinação lodo de esgoto + vinhaça em quantidade suficiente para fornecer 200% das doses de N e K recomendadas causaram redução nessa variável (Tabela 3). Contudo, não houve qualquer alteração nas concentrações de N e K na cana (Tabela 4).

Tabela 2. Produtividade e características tecnológicas de cana-de-açúcar no 3º corte em função de tipos e doses de resíduos e adubação mineral (testemunha).

Resíduo	TCH	Brix	Pol Caldo	Fibra	Pureza	AR	Pol cana	ATR
	%						kg t ⁻¹	
Le ⁽¹⁾	65,58	23,5	21,45	10,76	91,48	0,30	185,58	174,51
V ⁽²⁾	67,36	23,4	21,50	10,25	91,80	0,28	187,62	176,19
Le + V ⁽³⁾	68,40	23,4	21,36	13,25	91,42	0,29	174,78	164,44
Dose (N ou K)								
100 %	63,66	23,4	21,47	10,75	91,64	0,28	185,74	174,53
200 %	70,57	23,2	21,41	12,08	91,49	0,29	179,58	168,89
Testemunha ⁽⁴⁾	68,89	23,4	21,33	11,40	91,55	0,32	182,66	171,79
Fatorial	67,12	23,3	21,44	11,42	91,56	0,29	182,57	171,72
	Teste F ⁽⁵⁾							
Resíduo (R)	0,12 ^{NS}	2,49 ^{NS}	0,13 ^{NS}	1,75 ^{NS}	0,38 ^{NS}	0,20 ^{NS}	2,66 ^{NS}	2,69 ^{NS}
Dose (D)	2,12 ^{NS}	2,22 ^{NS}	0,06 ^{NS}	0,91 ^{NS}	0,16 ^{NS}	0,08 ^{NS}	1,59 ^{NS}	1,59 ^{NS}
Test. × Fatorial	0,08 ^{NS}	0,09 ^{NS}	0,11 ^{NS}	0,00 ^{NS}	0,18 ^{NS}	0,46 ^{NS}	0,00 ^{NS}	0,00 ^{NS}
R × D	2,98 ^{NS}	10,98**	2,79 ^{NS}	0,20 ^{NS}	1,02 ^{NS}	1,23 ^{NS}	1,67 ^{NS}	1,74 ^{NS}
CV ⁽⁶⁾ (%)	14,95	1,70	2,38	25,98	0,88	23,37	5,67	5,52

⁽¹⁾ Le: lodo de esgoto, mais suplementação de K via KCl. ⁽²⁾ V: vinhaça, mais suplementação de N via uréia. ⁽³⁾ Le + V: aplicação exclusiva de lodo de esgoto como fonte de N e vinhaça com fonte de K. ⁽⁴⁾ Testemunha corresponde à adubação mineral com N (uréia) e K (KCl). ⁽⁵⁾ ** Significativo a 1% de probabilidade. ^{NS} não-significativo. ⁽⁶⁾ CV: coeficiente de variação.

Tabela 3. Valores de brix (%) de cana de açúcar no 3º corte em função de cada tipo e dose do resíduo.

Resíduo	Dose	
	100 %	200 %
Le ⁽¹⁾	23,5Aa ⁽⁴⁾	23,4Aa
V ⁽²⁾	23,1Ab	23,8Aa
Le + V ⁽³⁾	23,7Aa	22,3Bb

⁽¹⁾ Le: lodo de esgoto, mais suplementação de K via KCl. ⁽²⁾ V: vinhaça, mais suplementação de N via uréia. ⁽³⁾ Le + V: aplicação exclusiva de lodo de esgoto como fonte de N e vinhaça com fonte de K. ⁽⁴⁾ Médias seguidas por letras distintas, maiúscula na coluna e minúscula na linha, diferem pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Tabela 4. Concentrações de N e K em cana (colmo) em função de tipos e doses de resíduos e adubação mineral (testemunha).

	3º corte		4º corte	
	N	K	N	K
Resíduo	g kg ⁻¹			
Le ⁽¹⁾	4,46	1,34	2,60	1,33
V ⁽²⁾	4,21	1,19	2,55	1,22
Le + V ⁽³⁾	3,80	1,20	2,65	1,17
Dose (N ou K)				
100 %	4,29	1,14	2,52	1,32
200 %	4,02	1,35	2,68	1,56
Testemunha ⁽⁴⁾	3,88	1,43	2,50	1,33
Fatorial	4,15	1,24	2,60	1,24
Teste F ⁽⁵⁾				
Resíduo (R)	1,52 ^{NS}	0,50 ^{NS}	0,42 ^{NS}	0,82 ^{NS}
Dose (D)	0,76 ^{NS}	2,46 ^{NS}	3,06 ^{NS}	2,32 ^{NS}
Test. × Fatorial	0,43 ^{NS}	1,20 ^{NS}	0,72 ^{NS}	0,43 ^{NS}
R × D	0,00 ^{NS}	0,61 ^{NS}	3,48 ^{NS}	0,65 ^{NS}
CV ⁽⁶⁾ (%)	16,14	22,02	7,30	18,52

⁽¹⁾ Le: lodo de esgoto, mais suplementação de K via KCl. ⁽²⁾ V: vinhaça, mais suplementação de N via uréia. ⁽³⁾ Le + V: aplicação exclusiva de lodo de esgoto como fonte de N e vinhaça com fonte de K. ⁽⁴⁾ Testemunha corresponde à adubação mineral com N (uréia) e K (KCl). ⁽⁵⁾ NS Não-significativo. ⁽⁶⁾ CV: coeficiente de variação.

Os resultados obtidos na avaliação do 4º corte mostram que o dobro das doses de N e K aplicados como resíduos promoveram redução dos valores de brix, pol % caldo e

pol % cana (Tabela 5). Os outros fatores não influenciaram essas e as outras variáveis tecnológicas, bem como a produtividade.

Tabela 5. Produtividade e características tecnológicas de cana-de-açúcar no 4º corte em função de tipos e doses de resíduos e adubação mineral (testemunha).

	TCH	Brix	Pol no caldo	Fibra	Pureza	AR	Pol na cana	ATR
Resíduo	%						kg t ⁻¹	
Le ⁽¹⁾	39,92	21,82	20,13	12,59	92,25	0,23	168,75	158,16
V ⁽²⁾	45,70	21,70	20,05	12,39	92,49	0,33	168,65	159,28
Le + V ⁽³⁾	48,47	21,79	20,27	12,19	93,09	0,18	171,17	159,98
Dose (N ou K)								
100 %	44,39	22,15a ⁽⁴⁾	20,45a	12,40	92,35	0,21	171,98a	161,16
200 %	45,00	21,39b	19,85b	12,37	92,87	0,28	167,07b	157,12
Testemunha ⁽⁵⁾	45,28	21,47	20,32	12,05	94,67	0,25	172,00	161,24
Fatorial	44,70	21,77	20,15	12,39	92,61	0,25	169,52	159,14
Teste F ⁽⁶⁾								
Resíduo (R)	1,27 ^{NS}	0,20 ^{NS}	0,36 ^{NS}	0,20 ^{NS}	0,18 ^{NS}	3,59 ^{NS}	0,55 ^{NS}	0,27 ^{NS}
Dose (D)	0,02 ^{NS}	23,72**	7,24*	0,00 ^{NS}	0,20 ^{NS}	1,70 ^{NS}	4,93*	3,97 ^{NS}
Test. × Fatorial	0,01 ^{NS}	2,14 ^{NS}	0,34 ^{NS}	0,25 ^{NS}	1,78 ^{NS}	0,02 ^{NS}	0,72 ^{NS}	0,61 ^{NS}
R × D	1,59 ^{NS}	0,60 ^{NS}	1,64 ^{NS}	0,57 ^{NS}	2,19 ^{NS}	2,09 ^{NS}	2,09 ^{NS}	1,50 ^{NS}
CV ⁽⁷⁾ (%)	21,17	1,52	2,31	8,85	2,67	41,82	2,76	2,70

⁽¹⁾ Le: lodo de esgoto, mais suplementação de K via KCl. ⁽²⁾ V: vinhaça, mais suplementação de N via uréia. ⁽³⁾ Le + V: aplicação exclusiva de lodo de esgoto como fonte de N e vinhaça com fonte de K. ⁽⁴⁾ Médias seguidas por letras distintas na coluna diferem pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. ⁽⁵⁾ Testemunha corresponde à adubação mineral com N (uréia) e K (KCl). ⁽⁶⁾ *, ** Significativo a 5% e 1% de probabilidade, respectivamente. ^{NS} Não-significativo. ⁽⁷⁾ CV: coeficiente de variação.

As reduções dos valores de brix, nas avaliações do 3º e 4º cortes, e de pol % caldo e pol % cana, apenas no 4º corte, podem ter sido ocasionadas pelo atraso na maturação devido ao prolongamento do desenvolvimento vegetativo da planta, obtido pela elevada disponibilidade de N e K (dobro da dose recomendada de cada nutriente para a cultura). SILVEIRA & CROCOMO (1981) verificaram que o aumento excessivo da disponibilidade de N no meio de crescimento provocou decréscimo da concentração de sacarose e de açúcares redutores ao mesmo tempo em que aumentou a atividade da redutase do nitrato e a concentração de N (forma amídica) no colmo de cana. Tais resultados permitem a inferência de que mais compostos orgânicos nitrogenados foram produzidos às expensas de açúcares solúveis, dinâmica típica do estímulo ao

desenvolvimento vegetativo. Altas doses de K veiculadas com vinhaça também podem estimular o crescimento da planta e aumentar paralelamente o consumo de açúcares, resultando no atraso da maturação (KORNDÖRFER, 1994).

Os resultados obtidos nesses dois anos de experimento apontam que a produtividade e as características tecnológicas da cana-de-açúcar não diferiram entre adubação mineral e adubação com lodo de esgoto e vinhaça (Tabelas 2 e 5), resíduos orgânicos adotados como fonte de N e de K, respectivamente. FRANCO (2003) constatou que lodo de esgoto como fonte de N e vinhaça como fonte de K foram tão eficientes quanto à adubação mineral em termos de produtividade e características tecnológicas de cana-planta e cana-soca. Deve-se frisar que desde a instalação do experimento os resíduos orgânicos foram aplicados repetidamente, a cada novo ciclo da cultura, a exemplo do que é feito com os adubos minerais.

Na Tabela 6 estão apresentadas as variações médias das características tecnológicas da cana-de-açúcar avaliadas neste experimento, bem como os valores considerados adequados. Valores de brix, fibra, pureza e pol % cana estão adequados quando o objetivo é o fornecimento de matéria-prima para agroindústria canavieira, independentemente dos tratamentos empregados. Isso reforça ainda mais o fato de que o lodo de esgoto como fonte de N e vinhaça como fonte de K são comparáveis às fontes minerais de cada um desses nutrientes.

Tabela 6. Variação dos valores médios das características tecnológicas de cana-de-açúcar no presente trabalho e comparação com valores adequados.

	3 ^o corte	4 ^o corte	Adequado ⁽¹⁾
Brix (%)	23,2-23,3	21,4-22,2	≥ 18
Pol caldo (%)	21,33-21,50	19,85-20,45	—
Fibra (%)	10,25-13,25	12,05-12,59	10-11
Pureza (%)	91,42-91,80	92,25-94,67	≥ 80
Pol cana (%)	17,48-18,76	16,71-17,20	≥ 14,4
AR (%)	0,28-0,30	0,18-0,33	< 1,00
ATR (kg t ⁻¹)	164,44-176,79	157,12-161,24	—

⁽¹⁾Segundo Fernandes (2000).

Conclusão

A substituição da uréia por lodo de esgoto e de KCl por vinhaça, na cana-soca de 3º e 4º cortes não interfere na produtividade agrícola da cultura e na qualidade e valorização da matéria-prima para a agroindústria.

Referências

BATAGLIA, O. C.; FURLANI, A. M. C.; TEIXEIRA, J. P. F.; FURLANI, P. R.; GALLO, J. R. **Métodos de análise química de plantas**. Campinas, Instituto Agrônomo, 1983. 48p. (Boletim Técnico, 78).

FERNANDES, A. C. **Cálculos na agroindústria da cana-de-açúcar**. Piracicaba, STAB-Açúcar, Álcool e Subprodutos, 2000. 193p.

FRANCO, A. **Cana-de-açúcar cultivada em solo adubado com lodo de esgoto e vinhaça: nitrogênio no sistema solo-planta, produtividade e características tecnológicas**. 2003. 90 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2003.

FRANKLIN, R. **Land application of sewage sludge**. Clemson: Faculty of Soils and Land Resources. 2004. 16p.

KORNDÖRFER, G. H. Importância da adubação na qualidade da cana-de-açúcar. In: SÁ, M. E.; BUZZETI, S. **Importância da adubação na qualidade dos produtos agrícolas**. São Paulo: Ícone, 1994. p. 133-142.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S. A. **Avaliação do estado nutricional das plantas**. Princípio e aplicações. Piracicaba, Associação Brasileira para a Pesquisa da Potassa e do Fosfato. 1989. 201p.

MELO, W. J.; MARQUES, M. O.; MELO, V. P. O uso agrícola do biossólido e as propriedades do solo. In .TSUTIYA, M. T.; COMPARINI, J. B.; SOBRINHO, P. A.; HESPANOL, I.; CARVALHO, P. C. T.; MELFI, A. J.; MELO, W. J.; MARQUES, M. O. **Biossólidos na agricultura**. São Paulo: SABESP, 2001. p. 289-363.

ORLANDO FILHO, J.; ZAMBELLO JR, E.; AGUJARO, R.; ROSSETO, A. L. J. Efeitos da aplicação prolongada de vinhaça nas propriedades químicas dos solos com cana-de-açúcar. Estudo exploratório. **STAB: Açúcar, Álcool e Subprodutos**, Piracicaba, v. 1, n. 6, p. 28-33, 1983.

SILVA, F. C.; BOARETTO, A. E.; BERTON, R. S.; ZOTELLI, H. B.; PEXE, C. A.; MENDONÇA, E. Cana-de-açúcar cultivada em solo adubado com lodo de esgoto: nutrientes, metais pesados e produtividade. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 33, n. 1, p. 1-8, 1998.

SILVEIRA, J.A.G.; CROCOMO, O. J. Biochemical and physiological aspects of sugarcane (*Saccharum* spp.). I. Effects of NO_3^- -nitrogen concentration on the metabolism of sugars and nitrogen. **Energia Nuclear na Agricultura**, Piracicaba v. 3, n. 1, p. 19-33, 1981.

SPIRONELLO, A.; RAIJ, B. van; PENATTI, C. P.; CANTARELLA, H.; MORELLI, J. L.; ORLANDO FILHO, J.; LANDELL, M. G. A.; ROSSETO, R. Cana-de-açúcar. In .; RAIJ, B. van; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A.; FURLANI, A. M. C. 2 ed. **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. Campinas, Instituto Agrônomo/Fundação IAC, 1997. p.237-239. (Boletim Técnico, 100).

CAPÍTULO 4 – EFEITO DA ADUBAÇÃO COM LODO DE ESGOTO E VINHAÇA PARA CANA-DE-AÇÚCAR NOS TEORES DE METAIS PESADOS NO SOLO E NA PLANTA

RESUMO - O uso adequado de resíduos orgânicos que contêm metais pesados pode evitar a poluição do solo. O objetivo deste trabalho foi avaliar os teores totais de Cd, Cr, Ni e Pb no solo e na planta da cana-de-açúcar após quatro aplicações anuais de lodo de esgoto e vinhaça em doses suficientes para fornecer todo N e todo K exigidos pela cultura. O experimento foi conduzido em Latossolo Vermelho distroférico argiloso. O delineamento experimental foi em blocos casualizados com sete tratamentos e três repetições. Os tratamentos consistiram em: (i) dose de lodo de esgoto para suprir 100% do N exigido pela cultura; (ii) dose de lodo de esgoto para suprir 200% do N exigido; (iii) dose de vinhaça para suprir 100% do K exigido; (iv) dose de vinhaça para suprir 200% do K exigido; (v) combinação dos tratamentos (i) e (iii); (vi) combinação dos tratamentos (ii) e (iv); (vii) adubação mineral recomendada. Os teores de Cd, Cr, Ni e Pb no lodo de esgoto atingiram valores máximos de 2,27, 45,62, 35,17 e 45,25 mg kg⁻¹, respectivamente. Esses metais não foram detectados na vinhaça. Os resíduos foram aplicados anualmente por quatro anos. Ao final desse período, as doses acumuladas de lodo de esgoto e de vinhaça, que chegaram até 51 t ha⁻¹ e 1064 m³ ha⁻¹, respectivamente, não provocaram alteração nos teores totais de Cd, Cr, Ni e Pb no solo, até 50 cm de profundidade, e na planta (colmo, palmito e folhas). A aplicação de lodo de esgoto e vinhaça para fornecer N e K para a cana-de-açúcar não ofereceu risco de poluição do solo por metais pesados.

Palavras-Chave: Cd, Cr, Ni, Pb, poluição do solo, resíduos orgânicos, *Saccharum*.

Introdução

O lodo de esgoto e a vinhaça são resíduos orgânicos gerados em larga escala. Só para se ter uma idéia, a região metropolitana de São Paulo, com uma população equivalente a 6.500.000 pessoas, produz 229 t de lodo de esgoto por dia (SABESP, 2006). No caso da vinhaça, calculou-se a quantidade produzida em todo Brasil na safra 2005/06, que foi de 221 milhões de m³, considerando que a produção de álcool no período foi de 17 bilhões de litros (ANUÁRIO BRASILEIRO DA CANA-DE-AÇÚCAR, 2005) e que cada litro de álcool destilado gera, em média, 13 L de vinhaça (FREIRE & CORTEZ, 2000).

O lodo de esgoto e a vinhaça podem ser usados para fornecer, respectivamente, todo nitrogênio e todo potássio à cana-de-açúcar, sem prejuízo à produtividade agrícola da cultura e à qualidade da matéria-prima para a agroindústria canavieira (FRANCO, 2003). Esse é um dos meios de destinar as grandes quantidades produzidas desses resíduos. No entanto, a destinação de resíduos no solo deve ser realizada de tal forma a não poluí-lo, principalmente por metais pesados, uma vez que esses elementos podem entrar em teores elevados na cadeia alimentar e atingir o homem, causando-lhe toxicidade (McLAUGHLIN et al., 1998).

O lodo de esgoto apresenta em sua composição metais pesados como cádmio (Cd), cromo (Cr), níquel (Ni), chumbo (Pb), entre outros elementos, cujos teores variam principalmente em função da procedência do resíduo (MARQUES et al., 2002). Assim, se aplicado ao solo, o resíduo pode provocar aumento dos teores desses metais no solo. OLIVEIRA & MATIAZZO (2001) verificaram que o teor total de Cr na camada de 0–20 cm de um Latossolo Amarelo aumentou de 16,57 para 27,19 mg kg⁻¹ [extrator água-régia (HCl + HNO₃)] pela aplicação cumulativa de 209 t ha⁻¹ de lodo de esgoto com 385,5 mg kg⁻¹ do elemento. Cd e Pb não foram detectados e o Ni foi detectado no solo que recebeu cumulativamente 140 ou 209 t ha⁻¹ do resíduo. OLIVEIRA et al. (2005b) constataram aumentos significativos nos teores totais de Ni e Pb (extraídos por HNO₃ + H₂O₂ + HCl) na camada de 0–20 cm de dois Latossolos após cinco anos de aplicações anuais de lodo de esgoto cuja dose máxima acumulada foi de 50 t ha⁻¹.

A vinhaça é um resíduo que reconhecidamente não contém metais pesados. Porém, GATTO (2003) encontrou em uma amostra desse resíduo 0,06 mg kg⁻¹ de Cd, 0,05 mg kg⁻¹ de Cr, 0,20 mg kg⁻¹ de Ni e 0,03 mg kg⁻¹ de Pb (base seca). Embora sejam teores baixos, aplicações de elevadas doses de vinhaça por um longo período poderiam aumentar os teores de metais pesados no solo.

A determinação do teor total é uma forma mais prudente de avaliação da poluição do solo por metais pesados. No entanto, o teor total não dá informação precisa sobre a disponibilidade desses elementos para as plantas. Pesquisas mostram que ainda não há um só extrator capaz de avaliar eficientemente o teor disponível de todos os metais pesados de interesse em solos brasileiros (ANJOS & MATIAZZO, 2001; BORGES & COUTINHO, 2004; MANTOVANI et al., 2004). Assim, torna-se necessária a determinação dos teores desses elementos na planta.

Os teores totais são tomados apenas como indicativo de poluição do solo por metais pesados. Eles não representam necessariamente o potencial de absorção desses elementos pelas plantas.

O objetivo deste trabalho foi avaliar os teores totais de Cd, Cr, Ni e Pb no solo e planta da cana-de-açúcar após quatro aplicações anuais de lodo de esgoto e vinhaça em doses suficientes para fornecer todo N e todo K exigidos pela cultura.

Material e Métodos

O experimento foi conduzido em área da Destilaria Santa Inês Ltda, município de Pontal, SP. O solo foi classificado como Latossolo Vermelho distroférrico argiloso, apresentando na camada de 0–20 cm as seguintes características: pH (CaCl₂) 5,0; MO = 25 g dm⁻³; P (resina) = 20 g dm⁻³; bases trocáveis, em mmol_c dm⁻³, K = 1,2, Ca = 20 e Mg = 6; H+Al = 28 mmol_c dm⁻³; SB = 27,2 mmol_c dm⁻³; CTC = 55,2 mmol_c dm⁻³; V = 49%; areia = 380 g kg⁻¹, silte = 110 g kg⁻¹ e argila = 510 g kg⁻¹. O clima da região é do tipo Cwa pela classificação de Köppen.

O plantio da cana-de-açúcar (variedade SP 81-3250) ocorreu em abril de 2000. A área estava sendo cultivada com cana-de-açúcar e milho para silagem na reforma do canavial.

O experimento constou de sete tratamentos com três repetições distribuídas em delineamento em blocos ao acaso. A área total de cada unidade experimental (parcela) foi de 75 m² (5 linhas de cana-de-açúcar, cada uma com 10 m de comprimento, e espaçamento de 1,5 m).

Os tratamentos apresentados na Tabela 1 consistiram de duas doses lodo de esgoto e de duas doses de vinhaça, sendo os resíduos aplicados separadamente ou em conjunto. O lodo de esgoto foi aplicado anualmente para fornecer 100 ou 200% de todo N requerido pela cana-de-açúcar, conforme recomendação de SPIRONELLO et al. (1997). Da mesma forma, a vinhaça foi aplicada anualmente para fornecer 100 ou 200% de todo K requerido pela cana-de-açúcar, conforme recomendação de SPIRONELLO et al. (1997). Nos tratamentos com um só tipo de resíduo orgânico, quando se usou lodo de esgoto como fonte de N, o K era suplementado com KCl, enquanto que, quando se usou vinhaça como fonte de K, o N era suplementado com uréia. Nos tratamentos com os dois resíduos, uréia e KCl não foram empregados. Na testemunha, todo N e K requeridos pela cana-de-açúcar foram fornecidos com uréia e KCl, respectivamente. Os resíduos orgânicos foram aplicados em área total no plantio e após cada colheita da cultura. O lodo de esgoto, obtido na Estação de Tratamento de Esgoto da Sabesp de Franca, SP, apresentou em sua composição metais pesados cujos teores estão apresentados na Tabela 2 (USEPA, 1986). A vinhaça, obtida na Destilaria Santa Inês, não apresentou metais pesados ou pelo menos ficaram abaixo do limite de determinação do método analítico (nitro-perclórica).

A cultura foi mantida no limpo por meio de aplicações de herbicida (hexazinona + diuron).

Tabela 1. Doses aplicadas de lodo de esgoto e vinhaça a cada ciclo da cana-de-açúcar em função dos tratamentos.

Tratamento	Ciclo da cana-de-açúcar				Total
	1º corte	2º corte	3º corte	4º corte	
Le 1 ⁽¹⁾ , t ha ⁻¹	5	7	7,5	6	25,5
Le 2 ⁽²⁾ , t ha ⁻¹	10	14	15	12	51
V 1 ⁽³⁾ , m ³ ha ⁻¹	125	130	124	153	532
V 2 ⁽⁴⁾ , m ³ ha ⁻¹	250	260	248	306	1064
Le 1 ⁽¹⁾ + V 1 ⁽³⁾	5 + 125	7 + 130	7,5 + 190	6 + 153	25,5 + 532
Le 2 ⁽²⁾ + V 2 ⁽⁴⁾	10 + 250	14 + 260	15 + 248	12 + 306	51 + 1064
Adubação mineral ⁽⁵⁾	-	-	-	-	-

⁽¹⁾ Le 1: dose de lodo de esgoto aplicado para fornecer 100% do N requerido pela cultura. ⁽²⁾ Le 2: dose de lodo de esgoto aplicado para fornecer 200% do N requerido pela cultura. ⁽³⁾ V 1: dose de vinhaça aplicada para fornecer 100% do K requerido pela cultura. ⁽⁴⁾ V 2: dose de vinhaça aplicada para fornecer 200% do K requerido pela cultura. ⁽⁵⁾ Sem aplicação de lodo de esgoto e vinhaça.

Tabela 2. Teores de metais pesados nos lodos de esgoto usados em cada ciclo da cana-de-açúcar.

Ciclo da cultura	Cd	Cr	Ni	Pb
	mg kg ⁻¹			
1º corte ⁽¹⁾	1,89	43,31	34,75	43,84
2º corte ⁽¹⁾	1,89	43,31	34,75	43,84
3º corte	1,50	41,00	34,33	42,42
4º corte	2,27	45,62	35,17	45,25

⁽¹⁾ O teor de cada metal pesado corresponde à média dos teores obtidos no 3º e no 4º corte.

As plantas do 4º corte da cana-de-açúcar foram separadas em colmo, folha e palmito. Essas frações foram lavadas, secas e submetidas à digestão nítrico-perclórica conforme BATAGLIA et al. (1983). Nos extratos foram determinados Cd, Cr, Ni e Pb por espectrofotometria de absorção atômica.

Logo após essa colheita foram retiradas amostras de solo no meio da entrelinha da cultura, nas camadas de 0–10, 10–20, 20–30, 30–40 e 40–50 cm de profundidade. Essas amostras foram secas ao ar, passadas por peneira de 2 mm de abertura de malha e submetidas à digestão com HNO₃ + H₂O₂ + HCl (USEPA, 1986). Nos extratos foram determinados Cd, Cr, Ni e Pb por espectrofotometria de absorção atômica.

Os resultados referentes a cada camada do solo e a cada parte da planta foram submetidos à análise de variância pelo teste F.

Resultados e Discussão

Os teores totais de Cd, Cr, Ni e Pb nas diferentes camadas do solo não foram alterados após quatro aplicações anuais de lodo de esgoto ou vinhaça ou ambos os resíduos (Tabela 3).

Tabela 3. Resumo da análise de variância (ANOVA) dos teores totais de Cd, Cr, Ni e Pb em diferentes camadas do solo.

ANOVA	Cd	Cr	Ni	Pb
			0–10 cm	
Teste F	1,13 ^{NS(1)}	1,16 ^{NS}	1,18 ^{NS}	0,89 ^{NS}
CV (%) ⁽²⁾	8,23	22,47	7,68	9,42
			10–20 cm	
Teste F	0,89 ^{NS}	1,20 ^{NS}	0,61 ^{NS}	0,59 ^{NS}
CV (%)	9,09	16,18	7,06	9,83
			20–30 cm	
Teste F	1,43 ^{NS}	1,92 ^{NS}	0,90 ^{NS}	2,21 ^{NS}
CV (%)	6,31	16,73	7,89	6,69
			30–40 cm	
Teste F	0,30 ^{NS}	1,59 ^{NS}	0,45 ^{NS}	1,42 ^{NS}
CV (%)	11,45	16,33	7,83	6,56
			40–50 cm	
Teste F	0,37 ^{NS}	1,44 ^{NS}	1,42 ^{NS}	1,57 ^{NS}
CV (%)	10,98	20,34	6,70	5,28

⁽¹⁾ NS: não-significativo ($P > 0,05$). ⁽²⁾ CV: coeficiente de variação.

Os teores médios de Cd estão apresentados na Tabela 4. Considerando todos os tratamentos e todas as camadas do solo, os valores variaram de 1,17 a 1,42 mg kg⁻¹. LAKE (1987) cita faixa menor para solos agrícolas, 0,01–0,7 mg kg⁻¹. No Brasil, JULIATTI et al. (2002) constataram em diferentes camadas de um Latossolo Vermelho textura média teores entre 1,07 e 1,26 mg kg⁻¹ (extração nítrico-perclórica), que variaram em função da profundidade (até 60 cm). OLIVEIRA et al. (2005a) verificaram na camada de 0–20 cm de um Latossolo Vermelho-Amarelo textura média teor de 0,7 mg kg⁻¹. Essas diferenças podem estar relacionadas principalmente com os materiais de origem dos solos, que, em princípio, apresentam teores variáveis de

metais pesados, e com os extratores químicos, que removem, em função da sua composição, quantidades diferenciadas de Cd (MATTIAZZO et al., 2001).

Os teores de Cr oscilaram de 26,08 a 39,75 mg kg⁻¹ (Tabela 4), valores que estão dentro da faixa apresentada por LAKE (1987), 5–1000 mg kg⁻¹. BARCELÓ & POSCHENRIEDER (1992) mencionam teor normal de 50 mg kg⁻¹. No Estado de São Paulo, OLIVEIRA & MATTIAZZO (2001) constataram na camada de 0–20 cm de um Latossolo Amarelo textura média sem aplicação de lodo de esgoto teores de 15,55 a 16,57 mg kg⁻¹, inferiores ao do presente estudo. Esses autores usaram água-régia (HCl + HNO₃) como extrator de Cr, o que supostamente é a principal causa da diferença.

Quanto ao Ni, seus teores ficaram entre 13,29 e 15,75 mg kg⁻¹ (Tabela 4), enquadrando-se na faixa de LAKE (1987), 5–500 mg kg⁻¹. Em estudo que envolveu solos do Estado de São Paulo, ROVERS et al. (1983) observaram variação de < 10 a 85 mg kg⁻¹ em Latossolos com diferenças marcantes nos teores de argila (110–590 g kg⁻¹). OLIVEIRA et al. (2005b) constataram em Latossolo argiloso teores de 12,44 a 13,34 mg kg⁻¹, semelhantes ao do presente trabalho. Ressalta-se que esses autores usaram o mesmo método de extração empregado no atual estudo.

Na Tabela 4 verifica-se que os teores de Pb variaram de 21,17 a 24,75 mg kg⁻¹, valores que estão dentro da faixa de 2 a 200 mg kg⁻¹ mostrada por LAKE (1987). O teor normal, segundo BARCELÓ & POSCHENRIEDER (1992), é de 14 mg kg⁻¹. No Estado de São Paulo, OLIVEIRA et al. (2005b) verificaram em Latossolo argiloso teores abaixo aos do presente trabalho (15,80 a 16,96 mg kg⁻¹), usando o mesmo método de extração.

Tabela 4. Teores totais de Cd, Cr, Ni e Pb em diferentes camadas do solo após quatro aplicações anuais de lodo de esgoto ou vinhaça ou ambos os resíduos.

Tratamento	Cd	Cr	Ni	Pb
mg kg ⁻¹				
0–10 cm				
Le 1 ⁽¹⁾	1,17	38,58	13,29	21,33
Le 2 ⁽²⁾	1,33	38,75	15,17	24,33
V 1 ⁽³⁾	1,33	30,25	14,88	21,33
V 2 ⁽⁴⁾	1,25	33,58	15,25	23,83
Le 1 ⁽¹⁾ + V 1 ⁽³⁾	1,33	28,75	14,83	22,50
Le 2 ⁽²⁾ + V 2 ⁽⁴⁾	1,33	27,75	14,58	22,58
Adubação mineral ⁽⁵⁾	1,33	30,17	15,42	23,32
10–20 cm				
Le 1 ⁽¹⁾	1,33	31,42	14,63	22,25
Le 2 ⁽²⁾	1,33	39,33	15,50	24,75
V 1 ⁽³⁾	1,17	31,67	14,30	21,88
V 2 ⁽⁴⁾	1,25	36,92	15,58	22,83
Le 1 ⁽¹⁾ + V 1 ⁽³⁾	1,25	32,17	15,21	23,50
Le 2 ⁽²⁾ + V 2 ⁽⁴⁾	1,33	29,67	15,25	24,08
Adubação mineral ⁽⁵⁾	1,25	34,83	14,75	22,92
20–30 cm				
Le 1 ⁽¹⁾	1,33	39,75	15,54	22,58
Le 2 ⁽²⁾	1,33	39,42	15,75	24,58
V 1 ⁽³⁾	1,25	30,50	14,04	25,13
V 2 ⁽⁴⁾	1,25	33,17	15,75	23,33
Le 1 ⁽¹⁾ + V 1 ⁽³⁾	1,33	27,66	14,54	21,17
Le 2 ⁽²⁾ + V 2 ⁽⁴⁾	1,33	34,25	15,42	24,33
Adubação mineral ⁽⁵⁾	1,42	31,33	15,00	24,00
30–40 cm				
Le 1 ⁽¹⁾	1,33	31,50	14,04	22,83
Le 2 ⁽²⁾	1,33	39,08	15,17	24,75
V 1 ⁽³⁾	1,33	38,67	14,38	24,50
V 2 ⁽⁴⁾	1,25	31,42	15,08	22,33
Le 1 ⁽¹⁾ + V 1 ⁽³⁾	1,33	30,17	15,08	22,17
Le 2 ⁽²⁾ + V 2 ⁽⁴⁾	1,33	38,33	14,67	24,17
Adubação mineral ⁽⁵⁾	1,42	31,33	14,33	23,08
40–50 cm				
Le 1 ⁽¹⁾	1,25	33,58	15,38	23,58
Le 2 ⁽²⁾	1,25	38,42	15,50	24,33
V 1 ⁽³⁾	1,17	29,08	14,00	22,58
V 2 ⁽⁴⁾	1,25	29,00	15,00	21,83
Le 1 ⁽¹⁾ + V 1 ⁽³⁾	1,33	30,00	15,00	23,08
Le 2 ⁽²⁾ + V 2 ⁽⁴⁾	1,25	36,50	15,42	23,67
Adubação mineral ⁽⁵⁾	1,25	26,08	13,83	22,25

⁽¹⁾ Le: lodo de esgoto (dose total de 25,5 t ha⁻¹). ⁽²⁾ Le: lodo de esgoto (dose total de 51 t ha⁻¹). ⁽³⁾ V: vinhaça (dose total de 532 m³ ha⁻¹). ⁽⁴⁾ V: vinhaça (dose total de 1064 m³ ha⁻¹). ⁽⁵⁾ Sem aplicação de lodo de esgoto e vinhaça.

O lodo de esgoto não provocou acréscimos nos teores de Cd, Cr, Ni e Pb no solo provavelmente pelo fato de apresentar baixos teores desses metais em sua composição (Tabela 2). A vinhaça não conteve esses elementos. Incrementos nos teores de metais pesados no solo têm sido verificados quando são aplicadas doses elevadas de lodo de esgoto com altos teores de metais. OLIVEIRA & MATTIAZZO (2001) verificaram aumento linear nos teores de Cr e Ni no solo pela aplicação cumulativa de até 209 t ha⁻¹ de lodo de esgoto com teores de Cr e Ni que variaram, respectivamente, de 385 a 386 e de 239 a 286 mg kg⁻¹. Ao aplicar cumulativamente até 50 t ha⁻¹ de lodo de esgoto com teor de Ni e Pb entre 268 a 595 e 152 a 371 mg kg⁻¹, OLIVEIRA et al. (2005b) observaram incremento significativo nos teores desses metais no solo.

Reforçando o argumento de que os baixos teores de metais pesados no lodo de esgoto evitaram o aumento significativo desses elementos no solo, observa-se na Tabela 5 que as quantidades aplicadas de Cd, Cr, Ni e Pb na área foram baixas em comparação ao máximo permitido. Com base na Tabela 5, para serem atingidos aproximadamente os valores acumulados máximos de Cd, Cr, Ni e Pb seriam necessários respectivamente, mais 3120, 10810, 1887 e 1071 aplicações anuais de lodo de esgoto, de mesma composição química, em dose suficiente para fornecer todo o N exigido pela cana-de-açúcar.

Tabela 5. Metais pesados adicionados ao solo até o 4º corte da cana-de-açúcar pela aplicação cumulativa de 25,5 e 51 t ha⁻¹ de lodo de esgoto (Le) e quantidade acumulada máxima permitida desses elementos em solos agrícolas devido à adição do resíduo.

Metal pesado	Quantidade aplicada do metal com:		Quantidade acumulada máxima permitida
	25,5 t ha ⁻¹ de Le ⁽¹⁾	51 t ha ⁻¹ de Le ⁽²⁾	
	kg ha ⁻¹		kg ha ⁻¹
Cd	0,05	0,10	39 ⁽³⁾
Cr	1,11	2,21	3000 ⁽⁴⁾
Ni	0,89	1,78	420 ⁽³⁾
Pb	1,12	2,24	300 ⁽³⁾

⁽¹⁾ Dose cumulativa de aplicações anuais de lodo de esgoto para fornecer 100% do N requerido pela cultura. ⁽²⁾ Dose cumulativa de aplicações anuais de lodo de esgoto para fornecer 200% do N requerido pela cultura. ⁽³⁾ CETESB (1999). ⁽⁴⁾ CFR (1993).

Os teores totais de Cd, Cr, Ni e Pb nas diferentes camadas do solo (Tabela 4) estão abaixo dos limites críticos apresentados por KABATA-PENDIAS & PENDIAS (1984). De acordo com os autores, o limite crítico de cada metal no solo corresponde à faixa de teor acima da qual pode ocorrer a fitotoxicidade do elemento.

Os teores de Cd, Cr, Ni e Pb nas diferentes partes da cana-de-açúcar estiveram abaixo do limite de determinação do método analítico, com exceção dos teores de Pb no palmito e na folha (Tabela 6). Por isso, a análise estatística foi conduzida apenas com o Pb nessas partes. Verifica-se na Tabela 6 que a aplicação de lodo de esgoto ou vinhaça ou ambos os resíduos não alterou os teores de Pb no palmito e na folha.

Tabela 6. Resumo da análise de variância (ANOVA) dos teores totais de Cd, Cr, Ni e Pb em diferentes partes da cana-de-açúcar no 4º corte.

ANOVA	Cd	Cr	Ni	Pb
			Colmo	
Teste F	-(¹)	-	-	-
CV (%) ⁽²⁾	-	-	-	-
			Palmito	
Teste F	-	-	-	1,36 ^{NS(3)}
CV (%)	-	-	-	34,64
			Folha	
Teste F	-	-	-	0,67 ^{NS}
CV (%)	-	-	-	33,07

⁽¹⁾ Não foi realizada ANOVA em razão do teor do metal estar abaixo do limite de determinação do método analítico. ⁽²⁾ CV: coeficiente de variação. ⁽³⁾ NS: não-significativo ($P > 0,05$).

OLIVEIRA & MATTIAZZO (2001) relataram resultados semelhantes ao deste trabalho, ao não detectar Cd, Cr, Ni e Pb no colmo e na folha+1 de cana-de-açúcar cultivada em solo tratado com lodo de esgoto. MARQUES (1996) também não conseguiu detectar Cd, Cr e Pb em colmo e folha da cultura estabelecida em solo que recebeu o resíduo.

Os teores de Pb no palmito e na folha (Tabela 7) ficaram abaixo dos limites gerais de toxicidade para plantas. LAKE (1987) cita 35 mg kg⁻¹ como teor fitotóxico em

tecido vegetal. Para BARCELÓ & POSCHENRIEDER (1992), esse teor na parte aérea de plantas pode variar de 30 a 300 mg kg⁻¹. MARQUES et al. (2001) consideram que os teores de 100 a 400 mg kg⁻¹ como fitotóxicos.

Tabela 7. Teores totais de Cd, Cr, Ni e Pb em diferentes partes da cana-de-açúcar no 4º corte em função dos tratamentos.

Tratamento	Cd	Cr	Ni	Pb
	mg kg ⁻¹			
	Colmo			
Le 1 ⁽¹⁾	-(6)	-	-	-
Le 2 ⁽²⁾	-	-	-	-
V 1 ⁽³⁾	-	-	-	-
V 2 ⁽⁴⁾	-	-	-	-
Le 1 ⁽¹⁾ + V 1 ⁽³⁾	-	-	-	-
Le 2 ⁽²⁾ + V 2 ⁽⁴⁾	-	-	-	-
Adubação mineral ⁽⁵⁾	-	-	-	-
	Palmito			
Le 1 ⁽¹⁾	-	-	-	1,00
Le 2 ⁽²⁾	-	-	-	1,00
V 1 ⁽³⁾	-	-	-	1,67
V 2 ⁽⁴⁾	-	-	-	1,33
Le 1 ⁽¹⁾ + V 1 ⁽³⁾	-	-	-	1,00
Le 2 ⁽²⁾ + V 2 ⁽⁴⁾	-	-	-	1,67
Adubação mineral ⁽⁵⁾	-	-	-	1,33
	Folha			
Le 1 ⁽¹⁾	-	-	-	1,00
Le 2 ⁽²⁾	-	-	-	1,00
V 1 ⁽³⁾	-	-	-	1,33
V 2 ⁽⁴⁾	-	-	-	1,33
Le 1 ⁽¹⁾ + V 1 ⁽³⁾	-	-	-	1,33
Le 2 ⁽²⁾ + V 2 ⁽⁴⁾	-	-	-	1,00
Adubação mineral ⁽⁵⁾	-	-	-	1,00

⁽¹⁾ Le: lodo de esgoto (dose total de 25,5 t ha⁻¹). ⁽²⁾ Le: lodo de esgoto (dose total de 51 t ha⁻¹). ⁽³⁾ V: vinhaça (dose total de 532 m³ ha⁻¹). ⁽⁴⁾ V: vinhaça (dose total de 1064 m³ ha⁻¹). ⁽⁵⁾ Sem aplicação de lodo de esgoto e vinhaça. ⁽⁶⁾ Teor do metal abaixo do limite de determinação do método analítico.

Conclusões

Aplicação de lodo de esgoto não aumentou os teores totais de Cd, Cr, Ni e Pb no solo e na planta.

A aplicação de vinhaça não oferece risco de contaminação do solo por esses metais pesados.

Referências

ANJOS, A. R. M.; MATTIAZZO, M. E. Extratores para Cd, Cu, Cr, Mn, Ni, Pb e Zn em Latossolos tratados com biossólido e cultivados com milho. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 58, n. 2. p. 337-344, 2001.

ANUÁRIO BRASILEIRO DA CANA-DE-AÇÚCAR 2005. Santa Cruz do Sul: Gazeta Santa Cruz, 2005. 136p.

BARCELÓ, J.; POSCHENRIEDER, CH. Respuestas de las plantas a la contaminación por metales pesados. **Suelo Planta**, Madrid, v. 2, n. 2, p. 345–361, 1992.

BATAGLIA, O. C. FURLANI, A. M. C.; TEIXEIRA, J. P. F.; FURLANI, P. R.; GALLO, J. R. **Métodos de análise química de plantas**. Campinas: Instituto Agronômico, 1983. 48p. (Boletim Técnico, 78)

BORGES, M. R.; COUTINHO, E. L. M. Metais pesados do solo após aplicação de biossólido: II – Disponibilidade. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, n. 3, p. 557–568, 2004.

CETESB. **Aplicação de lodos de sistemas de tratamento biológico em áreas agrícolas – critérios para projeto e operação**. São Paulo: Cetesb, 1999. 32p. (Manual Técnico da Norma P4230).

CFR - CODE OF FEDERAL REGULATIONS. Title 40 chapter I Subchapter O – **Sewage Sludge**. Part 503. Standards for the use or disposal of sewage sludge. Federal Register, 48: 9387-9415, 1993.

FRANCO, A. **Cana-de-açúcar cultivada em solo adubado com lodo de esgoto e vinhaça: nitrogênio no sistema solo-planta, produtividade e características tecnológicas**. 2003. 90 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2003.

FREIRE, W. J.; CORTEZ, L. A. B. **Vinhaça de cana-de-açúcar**. Guaíba: Agropecuária, 2000. 203p.

GATTO, R. H. **Lodo de esgoto e vinhaça como fonte de cálcio, magnésio e potássio para a cultura da cana-de-açúcar**. 2003. 107 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2003.

JULIATTI, M. A.; PRADO, R. M.; BARRIQUELO, M. F.; LENZI, E. Cádmiu em Latossolo Vermelho cultivado com milho em colunas: mobilidade e biodisponibilidade. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 26, n. 4, p. 1075–1081, 2002.

KABATA-PENDIAS, A.; PENDIAS, H. **Trace elements in soils and plants**. Boca Raton: CRC Press, 1984. 315p.

LAKE, D. L. Sludge disposal to land. In: LESTER, J.N. (Ed.). **Heavy metals in wastewater and sludge treatment process**. Boca Raton: CRC Press, 1987. v. 2, p. 91–130.

MANTOVANI, J. R.; CRUZ, M. C. P.; FERREIRA, M. E.; ALVES, W. L. Extratores para avaliação da disponibilidade de metais pesados em solos adubados com vermicomposto de lixo urbano. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 39, n. 4, p. 371–378, 2004.

MARQUES, M. O. **Incorporação de biossólido em solo cultivado com cana-de-açúcar**. 1996. 111 f. Tese (Livre-docência) - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 1996.

MARQUES, M. O.; MELO, W. J.; MARQUES, T. A. Metais pesados e o uso de biossólido na agricultura. In: TSUTIYA, M. T.; COMPARINI, J. B.; ALÉM SOBRINHO, P.; HESPANHOL, I.; CARVALHO, P. C. T.; MELFI, A. J.; MELO, W. J.; MARQUES, M. O. **Biossólidos na agricultura**. 2 ed. São Paulo: ABES/SP, 2002. p. 365-403.

MATTIAZZO, M. E.; BERTON, R. S.; CRUZ, M. C. P. **Disponibilidade e avaliação de metais pesados potencialmente tóxicos**. In: FERREIRA, M. E.; CRUZ, M. C. P.; RAIJ, B. van; ABREU, C. A. (Ed.). Micronutrientes e elementos tóxicos na agricultura. Jaboticabal: CNPq/Fapesp/Potafos, 2001. p. 213–234.

McLAUGHLIN, M. J.; PARKER, D. R.; CLARKE, J. M. Metals and micronutrients – food safety issues. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 60, n. 1-2, p. 143–163, 1999.

OLIVEIRA, C.; AMARAL SOBRINHO, N. M. B.; MARQUES, V. S.; MAZUR, N. Efeitos da aplicação do lodo de esgoto enriquecido com cádmio e zinco na cultura do arroz. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 29, n. 1, p. 109–116, 2005a.

OLIVEIRA, F. C.; MATTIAZZO, M. E. Metais pesados em Latossolo tratado com lodo de esgoto e em plantas de cana-de-açúcar. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 51, n. 3, p. 581–593, 2001.

OLIVEIRA, W. K.; MELO, W. J.; PEREIRA, G. T.; MELO, V. P. & MELO, G. M. P. Heavy metals in Oxisols amended with biosolids and cropped with maize in a long-term experiment. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 62, n. 4, p. 381–388, 2005b.

ROVERS, H.; CAMARGO, O. A. & VALADARES, J. M. A. S. Níquel total e solúvel em DTPA em solos do Estado de São Paulo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 7, n. 3, p. 217–220, 1983.

SABESP. **Sabesfértil** Disponível em:
http://www.sabesp.com.br/o_que_fazemos/coleta_e_tratamento/tratamento_metropolitano_numerossistemaprincipal.htm. Acesso: 1 maio 2006.

SPIRONELLO, A.; RAIJ, B. van; PENATTI, C. P.; CANTARELLA, H.; MORELLI, J. L.; ORLANDO FILHO, J.; LANDELL, M. G. A. & ROSSETO, R. In: RAIJ, B. van; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A.; FURLANI, A. M. C. (Ed.). **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. 2. ed. Campinas: Instituto Agrônomo/Fundação IAC, 1997. p.237–239. (Boletim Técnico, 100)

USEPA – United States Environmental Agency. **Standards for the use and disposal of sewage sludge**. Washington: USEPA, 1986. (Code of Federal Regulations 40 CRF Part 503).