

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
CENTRO DE ENERGIA NUCLEAR NA AGRICULTURA

VIVIAN SANTORO BRAGA

**Composto de lodo de esgoto na cultura da cana-de-açúcar:
nitrogênio, fósforo, fertilidade do solo e produtividade**

Piracicaba
2013

VIVIAN SANTORO BRAGA

**Composto de lodo de esgoto na cultura da cana-de-açúcar:
nitrogênio, fósforo, fertilidade do solo e produtividade
Versão revisada de acordo com Resolução CoPGr 6018 de 2011**

**Tese apresentada ao Centro de Energia Nuclear
na Agricultura, Universidade de São Paulo, para
obtenção do título de Doutor em Ciências**

**Área de Concentração: Química na Agricultura
e no Ambiente**

**Orientador: Prof. Dr. Cassio Hamilton Abreu
Junior**

Piracicaba

2013

AUTORIZO A DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Seção Técnica de Biblioteca - CENA/USP

Braga, Vivian Santoro

Composto de lodo de esgoto na cultura da cana-de-açúcar: nitrogênio, fósforo, fertilidade do solo e produtividade / Vivian Santoro Braga; orientador Cassio Hamilton Abreu Junior. - - versão revisada de acordo com Resolução CoPGr 6018 de 2011. - - Piracicaba, 2013.

98 f.: il.

Tese (Doutorado – Programa de Pós-Graduação em Ciências. Área de Concentração: Química na Agricultura e no Ambiente) – Centro de Energia Nuclear na Agricultura da Universidade de São Paulo.

1. Compostagem 2. Matéria orgânica do solo 3. Nutrientes minerais do solo
4. Plantas produtoras de açúcar 5. Reciclagem de resíduos urbanos I. Título

CDU 628.477.3 : 633.61

Aos meus pais Luiz e Selma, pelo amor, exemplo e dedicação irrestrita. Pela construção e consolidação de nossa família, por tudo o que fizeram e por tudo que sou

À minha irmã Graziela, pelo carinho, amizade, perseverança, por ter me mostrado o verdadeiro amor e por compartilharmos da mesma fé

Ao meu cunhado José Geraldo, por fazer parte de nossa família, pela amizade, pelos conselhos profissionais, pela ajuda não só nesse trabalho, mas em todos os momentos em que precisei

À minha querida sobrinha Maria Luíza, presente de Deus, a anjinha sempre sorridente que alegra nossas vidas todos os dias

OFEREÇO

À Deus

Pela dádiva da vida. Sem Ele nada é possível.

Dedico

AGRADECIMENTOS

Ao Centro de Energia Nuclear na Agricultura (CENA) da Universidade de São Paulo, pela estrutura oferecida para o desenvolvimento de meus trabalhos.

Ao Prof. Dr. Cassio Hamilton Abreu Junior, pela orientação, incentivo, apoio, compreensão nas dificuldades surgidas ao longo do doutorado e por toda a amizade durante esses anos.

À Coordenadoria do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela concessão da bolsa de doutorado e a Fundação de Amparo a Pesquisa no Estado de São Paulo (FAPESP) pelo auxílio financeiro à pesquisa.

Aos professores Dr. Takashi Muraoka e Dr. José Lavres Junior, pela amizade, pelos ensinamentos concedidos e por sempre estarem dispostos a ajudar.

Ao Supervisor de desenvolvimento agrônomo Antônio Palhares, da Usina Costa Pinto, Grupo RAÍZEN S/A, que foi quem nos ajudou na escolha da área experimental e prestou auxílio em todas as etapas do experimento.

À Usina Santa Helena, Grupo RAÍZEN S/A, por nos conceder a área para a realização do experimento e especialmente ao Sr. Doli, e a todos os funcionários de campo e do laboratório da Usina, que ajudaram em várias etapas do experimento.

À Empresa Biossolo, Agricultura e Ambiente, pelo fornecimento do composto de lodo de esgoto e ao Dr. Fernando Carvalho Oliveira, pelo auxílio e ensinamentos imprescindíveis para a execução desse trabalho.

Ao meu primo, Dr. Walter Casarin (IPNI), pelo apoio na aquisição dos fertilizantes.

Às Biólogas Cleusa Pereira Cabral e Henriqueta Maria Gimenes Fernandes, pelo apoio, pelos auxílios prestados durante as análises laboratoriais, e à Sra. Susi Manesco pela ajuda nas diferentes etapas do doutorado.

Aos estagiários do LNMP do CENA/USP: Amanda Pelligrinotti, André Luiz Borges Trombeta, Camila dos Santos Vieira, Felipe Teixeira de Freitas, Keyla Boralli, Luis Miguel de Melo e Saulo Augusto Quassi de Castro, por estarem sempre dispostos a ajudar e por toda a dedicação prestada. Vocês foram fundamentais na condução e finalização desse trabalho e dessa etapa da minha vida.

Ao pesquisador Felipe Alvarez Villanueva, pelo auxílio nas atividades laboratoriais, em especial nas análises com o ICP-MS.

A todos os colegas do Laboratório de Nutrição Mineral de Plantas (LNMP) do CENA/USP, pelo companheirismo, pela ajuda e troca de experiências profissionais.

À Seção de Apoio Acadêmico e PG-CENA/USP, por serem tão solícitos e pela atenção especial que despenderam a mim.

À Seção Técnica da Biblioteca do CENA/USP, especialmente à Marília Henyei, pela revisão das normas da tese.

Agradeço a todos os professores e funcionários do CENA/USP, sempre gentis e solícitos.

Ao meu namorado Daniel pelo amor, compreensão, apoio e carinho. À sua família, pela atenção e amizade, e ao Caio pela ajuda nas correções da tese.

Ao Prof. Dr. Mário Francisco Juruena da FMRP/USP pela atenção, incentivo e apoio irrestritos.

Ao Msc. Fernando H. Toledo pelo auxílio nas análises estatísticas deste trabalho.

Agradeço a todos que participaram direta ou indiretamente deste trabalho.

“Não sopram ventos favoráveis
para quem não sabe onde quer ir”

Sêneca

RESUMO

BRAGA, V. S. **Composto de lodo de esgoto na cultura da cana-de-açúcar: nitrogênio, fósforo, fertilidade do solo e produtividade.** 2013. 98 f. Tese (Doutorado) – Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2013.

O composto de lodo de esgoto, classificado como fertilizante orgânico Classe D (MAPA, 2009) é um material rico em nutrientes, especialmente nitrogênio (N) e fósforo (P), e possui elevado conteúdo de matéria orgânica. Contudo, ainda não há relatos na literatura brasileira sobre o uso do composto de lodo de esgoto na cultura da cana-de-açúcar. Assim como, faltam pesquisas para adequar as doses de adubos nitrogenado e fosfatado a serem aplicadas em área agrícola tratada com composto. O objetivo do presente trabalho foi avaliar os efeitos de aplicação e reaplicação de doses de composto de lodo de esgoto e de adubos minerais nitrogenado e fosfatado sobre as propriedades químicas do solo e a produtividade, características tecnológicas e os teores de N e P na folha, caldo e colmo da cana-soca de segundo e terceiro corte. Na aplicação do composto, segunda soca, foram aplicadas quatro doses de composto de lodo de esgoto (0; 27; 54 e 82 t ha⁻¹, base seca), quatro de N (0; 32,3; 64,7 e 98 kg ha⁻¹) e duas de P₂O₅ (0 e 30 kg ha⁻¹) e na reaplicação, terceira soca, foram aplicadas quatro doses decrescentes do composto (0; 7,8; 15,5 e 23,3 t ha⁻¹, base seca), quatro de N (0; 44,6; 89 e 135 kg ha⁻¹) e duas de P₂O₅, (0 e 54 kg ha⁻¹) em delineamento em blocos casualizados, em esquema fatorial, com três repetições. Na aplicação do composto, segunda soca, cujo requerimento de N foi considerado como 98 kg ha⁻¹, a produtividade de colmos (TCH) aumentou de 77 a 104 t ha⁻¹ em função das doses do composto. A aplicação do composto pelo critério do nitrogênio promoveu valores de TCH, produtividade de açúcar (TAH), açúcares redutores (AR), açúcar total recuperável (ATR) e açúcares redutores totais (ART) semelhantes aos do tratamento com adubo mineral convencional. Na reaplicação do composto, terceira soca, cujo requerimento de N foi considerado como 135 kg ha⁻¹, a TCH aumentou de 59 a 80 t ha⁻¹ em função das doses do composto. Porém, a maior dose do composto, cuja taxa de mineralização do N foi considerado de 30%, deve ser complementada com 89 kg ha⁻¹ de N mineral para produzir valores de TCH, TAH, AR e ATR semelhantes aos do tratamento com adubo mineral. As doses do composto de lodo de esgoto resultou em incrementos nos teores de N total, C-orgânico, P, pH, Ca, K, soma de bases e capacidade de troca catiônica do solo, em relação ao controle absoluto. Quanto aos teores de N e P nas soqueiras, de modo geral, não houve efeito dos tratamentos, exceto quanto ao teor de N na terceira soca que foi crescente em função das doses de N mineral. Conclui-se, com base no estudo de superfície de resposta, que: 1) a aplicação do composto de lodo de esgoto no cultivo da cana-soca, considerando taxa de mineralização do N de 10% e o requerimento agrônomo de N, pode substituir de forma adequada a aplicação dos adubos minerais nitrogenado e fosfatado, e 2) o uso de dose de composto inferior a da dose estabelecida pelo critério do N deve ser proporcionalmente complementada com nitrogênio mineral, seja em condições da primeira e, ou, da segunda aplicação sucessiva.

Palavras-chave: Compostagem. Resíduos sólidos urbanos. *Saccharum* spp. Superfície de resposta. Mineralização do N.

ABSTRACT

BRAGA, V. S. **Sewage sludge compost in sugarcane crop: nitrogen, phosphorus, soil fertility and yield.** 2013. 98 f. Tese (Doutorado) – Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2013.

The sewage sludge compost classified as an organic fertilizer Class D (MAPA, 2009) is a material rich in nutrients, especially nitrogen (N) and phosphorus (P), and have high content of organic matter. However, there is a lack of research in the Brazilian literature about the use of the sewage sludge compost on the sugar cane crop. There is also a lack of research to adequate the nitrogen and phosphate fertilizer doses to be applied in agricultural fields treated with compost. The objective of this study was to evaluated effect of levels of sewage sludge compost and mineral sources of nitrogen and phosphorus on the soil chemical proprieties, productivity and technological characteristics and the content of N and P on leaves, juice and stalks of the second and third ratoon cane. On the first application of compost, second ratoon cane, were applied four doses of sewage sludge compost (0; 27; 54 and 81.7 t ha⁻¹, dry base), four of N (0; 32.3; 64.7 and 98 kg ha⁻¹) and two of P₂O₅ (0 and 30 kg ha⁻¹) and in the reapplication of the compost, third ratoon, the compost was applied in decreased levels 0; 7,8; 15,5 e 23,3 t ha⁻¹, dry base, four of N (0; 44,6; 89 and 135 kg ha⁻¹) and four of P₂O₅, (0 and 54 kg ha⁻¹) in randomized block design, in factorial design, with three replications. In the first application, second ratoon, which N requirement was considered as 98 kg ha⁻¹, the stalk productivity (TSS) increased from 77 to 104 t ha⁻¹ in function of sewage sludge compost rate. The sewage sludge compost application rate established by nitrogen criteria promoted values of promoted values of stalk productivity (TSS), sugar productivity (TSH), reducing sugars (RS), total recoverable sugars (TRS) and total reducing sugars (TRS) similar to the treatment with mineral fertilizer. In reapplication of compost, whose N request was considered 135 kg ha⁻¹, the TSS increased from 59 to 80 t ha⁻¹ in function of compost application rate and the highest mineralization rate was 30%, should be complemented with 89 kg ha⁻¹ of mineral N to produce values of TSS, TSH, AR, Pol cane, Pol juice and similar to conventional mineral fertilizer. The sewage sludge compost application rate increased N total, organic carbon, P, pH, Ca, K, bases sum and cation exchange capacity soil contents in relation to the control treatment. As for the contents of N and P in the ratoon, in general, there was no effect on the treatments, except for the N content in the third ratoon that increased in function of N fertilizer. Concludes, based on the response surface study that: 1) the application of sewage sludge compost in cultivation of ratoon cane, whereas N mineralization rate of 10% and the agronomic application of N, can replace the adequately the application of nitrogen and phosphorus mineral fertilizer; 2) the use of lower dose of sewage sludge compost established by nitrogen criteria should be proportionally supplemented with mineral nitrogen, either in terms of first and second successive application.

Keywords: Composting. Municipal solid waste. *Saccharum* spp. Response surface. Nitrogen mineralization.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
2 REVISÃO DE LITERATURA.....	14
2.1 Composto de lodo de esgoto.....	14
2.1.2 Efeitos da aplicação de resíduos orgânicos nos solos	15
2.2 A cultura da cana-de-açúcar	16
2.3 Potencial do uso agrícola de resíduos compostados	17
2.4 Efeito de adubos minerais nitrogenado e fosfatado na cana-soca.....	18
3 COMPOSTO DE LODO DE ESGOTO COMO FONTE DE NITROGÊNIO E FÓSFORO NA CANA-SOCA	21
3.1 Introdução.....	23
3.2 Material e Métodos	25
3.3 Resultados e discussão	28
3.4 Conclusões.....	50
4 CANA-SOCA CULTIVADA COM COMPOSTO DE LODO, NITROGÊNIO E FÓSFORO: EFEITOS NA FERTILIDADE DO SOLO E NO ESTADO NUTRICIONAL ..	51
4.1 Introdução.....	53
4.2 Material e Métodos	54
4.3 Resultados e discussão	59
4.4 Conclusões.....	86
REFERÊNCIAS	87
APÊNDICES	96

1 INTRODUÇÃO

Com o objetivo de minimizar a contaminação do meio ambiente causada pela disposição dos esgotos sem tratamento adequado, são necessárias mais estações de tratamento de esgotos para tratar esse resíduo. Contudo, do tratamento dos esgotos nas estações de tratamento é gerado um novo resíduo, chamado de lodo de esgoto. Atualmente, o grande problema enfrentado pelas estações de tratamento de esgotos está relacionado ao descarte do lodo de esgoto gerado. As estações de tratamento geralmente descartam o lodo em aterros, porém os custos para dispor o lodo em aterros são elevados, podendo chegar a 50% do custo de tratamento das estações. O lodo de esgoto também pode ser destinado a outras finalidades. Outra opção menos impactante no ambiente é sua disposição em áreas agrícolas. O lodo de esgoto é composto principalmente por matéria orgânica e elementos que são essenciais para as plantas, como os macro e micronutrientes, e seu uso na agricultura pode trazer diversos benefícios: aumentando a fertilidade dos solos, a retenção de água em solos arenosos e a permeabilidade e a infiltração da água em solos argilosos.

Entretanto, a maior preocupação em relação à disposição do lodo deve ser do ponto de vista ambiental, pois sua disposição nos solos pode causar contaminação das águas subsuperficiais pelo excesso de nitrogênio, a introdução de organismos patogênicos e ainda contaminação por metais pesados. Para o lodo poder ser utilizado na agricultura ele deve atender alguns parâmetros previstos em lei, como baixa concentração de metais pesados e patógenos (CONAMA, 2006).

Devido ao elevado potencial poluidor do lodo seu uso tem sido restringido na agricultura, por conseguinte, a compostagem pode ser uma opção para as empresas gerenciadoras do lodo das estações de tratamento de esgotos, podendo dar continuidade à sua reciclagem agrícola. O processo de compostagem altera a mobilidade dos elementos potencialmente tóxicos, reduzindo a fitotoxicidade do lodo.

O processo de compostagem elimina os organismos patogênicos e os compostos orgânicos e inorgânicos indesejáveis presentes no lodo, resultando em um produto de uso seguro na agricultura, sendo classificado como fertilizantes orgânicos Classe “D”, conforme estabelecido pela Instrução Normativa da Secretaria de Defesa Agropecuária nº 25, do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (Mapa) (BRASIL, 2009). A Resolução

CONAMA n^o 375/06 (BRASIL, 2006) estabelece as culturas aptas a receberem lodo de esgoto ou produto derivado.

Dentre as culturas aptas a receberem o lodo ou o composto de lodo de esgoto, a cana-de-açúcar se destaca, face sua distribuição às cidades e sua grande extensão no Estado de São Paulo, onde figura como o mais importante agronegócio. Vale recordar que o Brasil é o país líder no mundo no desenvolvimento da cadeia produtiva do etanol à base de cana, um combustível limpo e renovável, e que contribui para a redução da emissão de CO₂.

O Brasil é o maior produtor e exportador de açúcar de cana no mundo. A cana-de-açúcar é uma das poucas culturas agrícolas auto-suficientes em energia no processo industrial e gera além dos produtos açúcar e etanol, a produção de energia, a partir das fibras da sua biomassa, de maneira sustentável. Para o Brasil se manter como maior produtor mundial de cana, exportador de açúcar, e ser competitivo em relação ao etanol produzido a partir de grãos, é necessário investir no aumento da produtividade dos canaviais, entre outros fatores. O grande problema que o Brasil vem enfrentando em relação aos produtos derivados da cana-de-açúcar é a perda de competitividade devido aos aumentos verificados nos últimos anos em seus custos de produção. Isso tem levado à redução da oferta de cana para moagem, em momento de forte aumento da demanda do produto no mercado interno brasileiro para o abastecimento da sua frota flexível de veículos leves. O Brasil não produz o etanol suficiente, com elevação dos seus custos de produção face ociosidade industrial e se tornando menos competitivo. O aumento dos custos na produção do açúcar e do etanol se depara com os preços mantidos superficialmente baixos da gasolina, seu concorrente direto. A baixa produtividade dos canaviais verificada nos últimos anos se deu por diferentes motivos, dentre eles podemos citar, a queda das taxas de reforma dos canaviais, com aumento gradual da idade média da planta e queda de produtividade, o menor uso de insumos modernos e alta densidade de pragas e doenças. Com a mecanização crescente das práticas agrícolas, do plantio à colheita, cabe aprimorar o pacote tecnológico contra os fatores de redução de produtividade. O melhor manejo da cultura implica na adubação diferenciada para corrigir a deficiência de nutrientes, até o controle das pragas, doenças e ervas daninhas. Também importante é a qualidade das mudas a escolha das variedades de cana, sua época de colheita durante toda a safra com o uso das canas mais ricas.

Hipótese

O uso do composto de lodo de esgoto para a cultura da cana-de-açúcar deverá substituir, pelo menos parcialmente, as quantidades de nitrogênio e fósforo aplicados como adubo mineral; pois a liberação lenta e gradual do nitrogênio e fósforo oriundos do composto de lodo de esgoto poderá resultar em melhor aproveitamento dos nutrientes pela cana-de-açúcar.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Composto de lodo de esgoto

Os prejuízos causados ao ambiente em virtude da alta poluição, consequência da falta de saneamento básico, tornam os recursos hídricos limitantes e comprometidos. Com isso há a necessidade de se tratarem os esgotos urbanos que hoje são os principais poluidores dos mananciais (BETTIOL; CAMARGO, 2006). Mesmo com a falta de saneamento básico na maioria das cidades brasileiras, o número de estações de tratamento de esgotos tende a aumentar devido às exigências das sociedades e das agências ambientais por melhores padrões de qualidade ambiental.

Do tratamento dos esgotos ou águas servidas é gerado um resíduo que é o lodo de esgoto. O lodo de esgoto é um resíduo semi-sólido e é composto predominantemente por material orgânico e varia de acordo com sua origem, do sistema de tratamento do esgoto e do próprio lodo dentro das estações (BERTON; NOGUEIRA, 2010).

A prática já usual de disposição do lodo de esgoto é em aterros, cujo custo tem sido a cada dia mais elevado, sendo, no início do milênio, estimado entre 20 a 40% do custo de operação de uma estação de tratamento de esgoto (TSUTIYA, 2002), atingindo 50 a 60%, (ABREU JUNIOR et al., 2008) atualmente.

Uma das alternativas para dispor o lodo de esgoto é utilizá-lo como fonte de nutrientes. A utilização do lodo na agricultura possui maior viabilidade técnico-econômica dentre as opções de disposição do resíduo, além de diminuir os custos com fertilizantes minerais (BERNAL et al., 1998; FARREL; JONES, 2009), e melhorar as propriedades físicas, químicas e biológicas do solo (BETTIOL; GHINI, 2011; PEDRA et al., 2007; SINGH; AGRAWAL, 2008).

O potencial do uso agrícola do lodo decorre da presença de matéria orgânica e de nutrientes para as plantas (BERNAL et al., 1998; OLIVEIRA, 2001; CHIBA; MATTIAZZO; OLIVEIRA, 2009; FRANCO A. et al., 2010a; BETTIOL; GHINI, 2011). As condições de clima tropical favorecem à maior degradação do conteúdo orgânico (OLIVEIRA et al., 2002), disponibilizando, principalmente o nitrogênio e fósforo, nutrientes em maiores quantidades nos lodos.

A aplicação do lodo de esgoto deve atender os critérios técnicos estabelecidos na Resolução CONAMA nº 375/06 (CONAMA, 2006). Este documento legisla sobre o uso agrícola de lodo de esgoto no Brasil, órgão responsável pela aprovação de projetos utilizando lodo de esgoto no Estado de São Paulo. O critério adotado para a definição da taxa de aplicação de lodo considera a quantidade de nitrogênio disponível no lodo e a dose de N requerida pela cultura que receberá o resíduo (CONAMA, 2006).

Devido à possível presença de patógenos e compostos orgânicos e inorgânicos potencialmente tóxicos nos lodos de esgoto, este potencial de contaminação do ambiente tem sido alvo constante de críticas e fator de restrição do seu uso agrícola. Agências de controle ambiental tem restringido o uso do lodo dificultando a aprovação de projetos para esse fim (ABREU JUNIOR et al., 2008; PARADELO; VILLADA; BARRAL, 2011).

Para evitar a contaminação dos solos agrícolas, a compostagem foi a saída encontrada pelas empresas que gerenciam o lodo de algumas ETES para a continuidade da reciclagem agrícola do lodo. O processo de compostagem altera a mobilidade dos metais pesados, limitando sua solubilidade e seu potencial biodisponível no solo, e, reduzindo a fitotoxicidade do lodo (HARGREAVES; ADL; WARMAN, 2008; HE; TIAN; LIANG, 2009; KHALIL et al., 2011).

Os fertilizantes orgânicos compostados produzidos a partir de lodo de esgoto, como matéria-prima, são passíveis de registro do produto, sendo classificados como fertilizantes orgânicos Classe “D”, de acordo com as Instruções Normativas da Secretaria de Defesa Agropecuária nº 25, do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (Mapa) (BRASIL, 2009).

2.1.2 Efeitos da aplicação de resíduos orgânicos nos solos

Os efeitos decorrentes da aplicação de resíduos orgânicos nos solos variam de acordo com o tipo de solo, características químicas e físicas dos solos, das condições climáticas, da cultura explorada e da frequência das aplicações (CASADO-VELA et al., 2006; BERTON; NOGUEIRA, 2010).

Com relação às propriedades físicas do solo, os resíduos orgânicos agem como condicionadores dos solos principalmente pela presença de matéria-orgânica, ocasionando melhorias no estado de agregação das partículas do solo e consequente diminuição da densidade e aumento na aeração e retenção de água (MELO; MARQUES, 2000).

A mineralização do carbono que ocorre com a aplicação do lodo no solo, comparado com a que ocorre com a compostagem, mostra que esta é a melhor maneira de se obter a máxima estabilização do carbono (RICCI, 2008).

Quanto aos aspectos químicos, a aplicação do composto ao solo tem propiciado elevação dos teores de fósforo, de carbono orgânico (SIMONETE et al., 2003), da fração húmica da matéria orgânica, do pH, da condutividade elétrica (ABREU JUNIOR et al., 2000) e da capacidade de troca de cátions (ABREU JUNIOR; MURAOKA; OLIVEIRA, 2001; NASCIMENTO et al., 2004). E redução da acidez potencial (BERTON et al., 1989; ABREU JUNIOR et al., 2000).

Em relação ao nitrogênio, os teores são menores nos lodos compostados. Por isso, é de extrema importância que se faça o acompanhamento do processo, para não ocorrer perdas de nitrogênio por volatilização da amônia (BERNAL et al., 1998). A mineralização do N orgânico do composto também é dependente de vários fatores, incluindo a relação C/N do material de origem, das condições de compostagem, maturidade do composto, tempo de aplicação, e qualidade do composto (HARGREAVES; ADL; WARMAN, 2008).

De modo geral, um terço do N dos compostos de lodo, que se encontra na forma orgânica, é potencialmente mineralizável durante o primeiro ano de aplicação (BOEIRA et al., 2002; BERTON; NOGUEIRA, 2010), tornando-se disponível à absorção pelas plantas ou à participação em outros processos dinâmicos no solo (BOEIRA; MAXIMILIANO, 2009). A liberação do N dos resíduos orgânico diminui para 10% no segundo ano de aplicação. No caso do fósforo, sua fitodisponibilidade varia de 16 a 64% do seu teor total no lodo no primeiro ano após a aplicação. No segundo ano, a quantidade aplicada remanescente pode substituir quase que totalmente as quantidades necessárias desse nutriente para a cultura (BERTON; NOGUEIRA, 2010).

2.2 A cultura da cana-de-açúcar

A cana-de-açúcar pertence à família *Poaceae* e ao gênero *Saccharum*, que abrange várias espécies, porém as canas comercialmente cultivadas são híbridas. É uma planta semi-perene e própria de climas tropicais e subtropicais (FIGUEIREDO, 2008).

O Brasil é o maior produtor mundial de cana-de-açúcar, sendo responsável por 34% do total produzido, e no agronegócio brasileiro a cana-de-açúcar é o produto agrícola com maior volume gerado no país, com cerca de 600 milhões de toneladas e ocupando uma área

plantada, no ano de 2012, de mais de oito milhões de hectares cultivados (CONAB, 2012). Além do interesse econômico no cultivo da cana-de-açúcar para produção de açúcar e etanol, biocombustível renovável, é fonte de biomassa, matéria-prima utilizada na geração de energia na agroindústria e o aumento das áreas cultivadas de cana prevê redução das emissões dos gases de efeito estufa associadas ao processo produtivo e ao consumo energético no setor de transporte.

A cana-de-açúcar é uma das culturas mais aptas a receber resíduos como o composto de lodo de esgoto, pelas seguintes vantagens: a) as áreas cultivadas estão próximas aos grandes centros urbanos; b) o cultivo da cana-de-açúcar apresenta alto índice de mecanização, o que minimiza o contato do operador com o resíduo; c) trata-se de um setor agrícola tecnologicamente diferenciado, onde as variáveis de fertilidade do solo e as envolvidas no desempenho da cultura são comumente monitoradas e corrigidas com o objetivo de se conseguir altas produtividades; e, d) trata-se de uma cultura não consumida *in natura*. Na produção de açúcar, o colmo da cana é submetido a um processo de industrialização, envolvendo tratamentos físico-químicos que podem eliminar a presença de parasitas humanos e minimizar a presença de elementos potencialmente tóxicos no produto final. Na produção de álcool os elementos potencialmente tóxicos também, em sua maioria, serão eliminados durante o processo de fabricação (MARQUES; MARQUES; TASSO JUNIOR, 2001).

Ainda não há relatos na literatura brasileira sobre a utilização de composto de lodo de esgoto em cana-de-açúcar. Entretanto, são encontrados vários trabalhos que relatam o uso do lodo de esgoto (BERTONCINI et al., 2004; MARQUES et al., 2007; NOGUEIRA et al., 2008; CHIBA et al., 2009; FRANCO et al., 2008, 2010a) e composto de lixo urbano (OLIVEIRA et al., 2002; ROSSETTO et al., 2002) na cultura da cana-de-açúcar.

2.3 Potencial do uso agrícola de resíduos orgânicos

Diversos estudos tem demonstrado efeitos positivos nas propriedades físicas, químicas e biológicas do solo após a aplicação de composto de lixo urbano. Como resultado foi observado que o desenvolvimento, o estado nutricional e a produtividade das plantas de interesse econômico foram semelhantes, ou mesmo superiores, ao manejo convencional (OLIVEIRA, 2000; SILVA et al., 2002; ROSSETTO et al., 2002; ABREU JUNIOR et al., 2001, 2002; CASADO-VELA et al., 2006).

Chiba, Mattiazzo e Oliveira (2008a), aplicando até 8,2 t ha⁻¹ de lodo, na base seca, em cana-planta, com e sem adubo fosfatado, e 16 t ha⁻¹ de lodo em cana-soca, em combinação com adubo nitrogenado, verificaram que o lodo pode substituir até 25 % do adubo fosfatado na cana-planta e 100 % do adubo nitrogenado na cana-soca.

Com o objetivo de fornecer nitrogênio para plantas de cana-de-açúcar, Franco; Marques e Melo (2008), aplicaram lodo de esgoto por dois anos consecutivos nas doses 5 e 10 t ha⁻¹, em cana-planta, e 7 e 14 t ha⁻¹, em cana-soca, em um Latossolo Vermelho distrófico argiloso, e verificaram que os teores de nitrogênio encontrados nos colmos, folhas e palmitos e a produtividade foram semelhantes àqueles encontrados no tratamento com adubação mineral convencional.

Franco et al. (2010a), aplicando quatro doses de lodo, quatro de N e quatro de P, avaliaram a capacidade de o lodo substituir os adubos minerais nitrogenado e fosfatado em cana-planta. Os autores concluíram que o lodo substitui 100% os adubos minerais nitrogenados e possibilita reduzir em 30% os fosfatados. Desta forma, propuseram elaborar tabela de recomendação de adubação objetivando a recomendação de lodo para a cultura da cana com base no N requerido pela cultura.

2.4 Efeito de adubos minerais nitrogenado e fosfatado na cana-soca

As respostas da cana-de-açúcar à adubação nitrogenada, em relação à produtividade, são variáveis para a cana-planta e relativamente homogêneas para a soqueira (CARNAÚBA, 1990). Segundo Zambelo Júnior e Orlando Filho (1981), as soqueiras de cana-de-açúcar apresentam maiores possibilidades de respostas positivas ao adubo nitrogenado que a cana-planta. De acordo com Morelli et al. (1997) a falta de resposta da cana-planta na produção de colmos em relação ao adubo nitrogenado ainda não é totalmente esclarecedora. O elevado erro experimental associado a estudos de adubação conduzidos em condições de campo tem feito que trabalhos com pequenas respostas em produção, em razão da adubação nitrogenada, não atinjam significância estatística (CANTARELLA; TRIVELIN; VITTI, 2007).

A cana-de-açúcar é eficiente em aproveitar o N do solo, devido ao longo ciclo e ao sistema radicular abundante, porém, sua eficiência ao utilizar o N aplicado como fertilizante é baixa e pode variar de 10 a 40%, sendo um pouco maior em cana-planta, variando de 34 a 63% (CANTARELLA; TRIVELIN; VITTI, 2007).

Em relação à adição do adubo mineral fosfatado às socas, tem-se verificado ausência de efeito na produtividade, ao contrário do que ocorre com o nitrogênio. Como o fósforo está diretamente ligado ao desenvolvimento radicular, intensidade de perfilhamento e crescimento do colmo é indispensável sua aplicação (ALEXANDER, 1973). Outro fator em relação à ausência de resposta da cana-soca ao fósforo está ligado ao fato de que a incorporação do fertilizante na soqueira é bem mais dificultada. O fósforo sendo um elemento pouco móvel permanece longe do alcance das raízes, e o sistema radicular nas socas é mais profundo, porém pouco volumoso (ROSSETTO et al., 2008).

O fósforo orgânico proveniente de resíduos orgânicos tem-se mostrado mais disponível que quando fornecido na forma mineral, isso se deve à decomposição do material orgânico, que resulta em ácidos orgânicos que são adsorvidos pelo solo, ocupando sítios de adsorção de fosfato e aumentando a disponibilidade do elemento (McDOWELL; SHARPLEY, 2001; ANDRADE et al., 2003). Porém este efeito pode ser transitório, devido a alguns ácidos orgânicos serem prontamente mineralizados (AFIF; BARRON; TORRENT, 1995). No caso de aplicação de lodo, o incremento do teor de fósforo disponível no solo, avaliado pelo método da resina, para a cultura da cana-de-açúcar já foi constatado por Silva et al. (2001) e Franco et al. (2010a).

A produtividade em massa vegetal e de açúcar é sensivelmente afetada quando há deficiência em fósforo. As características tecnológicas da cana e a presença de fósforo no caldo exercem influência no processo de clarificação do caldo para produção de açúcar (KORNDÖRFER, 2004), bem como nos processos de fermentação alcoólica.

O adubo nitrogenado, geralmente, não tem alterado as características agroindustriais da cana-de-açúcar, como Brix caldo, fibra, AR, Pol caldo, Pol cana; assim, os maiores rendimentos em açúcar por área são resultantes da maior produtividade de colmos (TRIVELIN, 2000; FRANCO et al., 2010b).

O cálculo de doses de aplicação a solos geralmente considera o fornecimento de N e P, por serem os elementos encontrados em maior quantidade no lodo e por serem poluentes potenciais de águas. A quantidade a ser aplicada baseada no teor de N é de difícil determinação, devido às diferentes formas de N no lodo e sua dinâmica no solo (BOEIRA; MAXIMILIANO, 2009).

O nitrogênio presente nos lodos e nos compostos de lodo, após mineralizado, pode ser convertido a nitrato e lixiviado, contaminando águas superficiais e subterrâneas. O consumo de águas com alto teor de nitrato pode ocasionar problemas de saúde em animais e em seres humanos, especialmente em crianças, pelo risco de causar metaemoglobinemia (LÆGREID;

BØCKMAN; KAARSTAD, 1999). A Organização Mundial de Saúde estabelece para água potável a concentração máxima aceitável de 10 mg L^{-1} de nitrogênio na forma de nitrato, padrão este também adotado no Brasil pelo Ministério da Saúde (BRASIL, 2004) e pela CETESB, para o Estado de São Paulo (CESTSB, 2005).

Anjos e Mattiazzo (2001) constataram risco de contaminação de águas subterrâneas em Latossolo Amarelo e Latossolo Vermelho, ambos distróficos, tratados com 388 t ha^{-1} de lodo. Porém, de acordo com Berton (2000), a dose agronomicamente recomendada de lodo de esgoto da ETE de Franca-SP na cultura da cana-de-açúcar é de $5,5 \text{ t ha}^{-1}$, na base seca, o que corresponderia aproximadamente a 120 kg ha^{-1} de nitrogênio inorgânico ou mineralizável nos três primeiros meses após a aplicação.

Durante o tratamento dos esgotos o lodo gerado é rico em fósforo (FROSSARD; SINAJ; DUFOUR, 1996), considerando a deficiência de fósforo nos solos brasileiros, é uma excelente alternativa para a manutenção do fósforo nos solos, principalmente em solos ácidos (LÆGREID; BØCKMAN; KAARSTAD, 1999).

Quantidades significativas de fósforo são adicionadas em solos ácidos pela aplicação do lodo de esgoto, podendo modificar alguns aspectos da dinâmica do nutriente e contribuir para a melhoria da disponibilidade de fósforo para as plantas (MUNHOZ, 2001). Portanto, deve-se considerar o risco de transporte do fósforo, contido no lodo ou adsorvido às partículas superficiais do solo, pela água de enxurrada, em direção aos reservatórios de águas superficiais, pois, há risco de causar eutrofização (MAGUIRRE; SIMS; COALE, 2000).

3 COMPOSTO DE LODO DE ESGOTO COMO FONTE DE NITROGÊNIO E FÓSFORO NA CANA-SOCA

RESUMO

O composto de lodo de esgoto é classificado como fertilizante orgânico Classe “D”, de acordo com a Instrução Normativa SDA nº 25 (Brasil, 2009), e pode ser utilizado na agricultura como fonte de nitrogênio e fósforo para as culturas. No entanto, faltam pesquisas para adequar as doses complementares de adubos nitrogenado e fosfatado a serem aplicadas em área agrícola tratada com composto. Objetivou-se avaliar os efeitos de doses de composto de lodo de esgoto e de adubos minerais nitrogenado e fosfatado sobre a produtividade e características tecnológicas da cana-soca (soqueiras de segundo e terceiro corte), em campo. Na cana-soca de segundo corte foram aplicadas quatro doses de composto de lodo de esgoto (0; 27; 54; 82 t ha⁻¹, base seca, quatro de N (0, 30, 60 e 98 kg ha⁻¹) e duas de P₂O₅ (0 e 30 kg ha⁻¹); na reaplicação, soqueira de terceiro corte, foram aplicadas quatro doses de composto de lodo de esgoto (0; 23,3; 15 e 7,8 t ha⁻¹, base seca), quatro de N (0; 44,6; 89 e 135 kg ha⁻¹) e duas de P₂O₅ (0 e 54 kg ha⁻¹), em delineamento em blocos casualizados, em esquema fatorial, com três repetições. Foram aplicados 77 e 108 kg ha⁻¹ de K₂O, na segunda e terceira soca, respectivamente, em todas as parcelas. A aplicação do composto de lodo de esgoto, combinado ou não com adubo nitrogenado e/ou fosfatado, aumentou a produtividade de colmos de 77 a 104 t ha⁻¹. O estudo de superfície de resposta para a produtividade de colmo, em solo de baixa fertilidade, permitiu estabelecer sugestão de recomendação de adubo mineral nitrogenado ou fosfatado em soqueira, em função da dose de composto de lodo de esgoto; e, concluir que a aplicação de 82 t ha⁻¹ de composto, ou seja, da dose estabelecida pelo critério do nitrogênio, conforme resolução Conama nº 375, pôde reduzir o uso de N mineral em 100% %, promoveu valores de produtividade de colmos (TCH), produtividade de açúcar (TAH), açúcares redutores (AR) e açúcar total recuperável (ATR) semelhantes aos do tratamento com adubo mineral convencional. Na reaplicação do composto, cujo requerimento de N foi considerado como 135 kg ha⁻¹, a TCH aumentou de 59 a 80 t ha⁻¹ em função das doses do composto e a maior taxa de mineralização do N foi 30%, o N disponibilizado pelo composto não foi suficiente, e deve ser complementada com 89 kg ha⁻¹ de N mineral para produzir valores de TCH, TAH, Pol caldo, Pol cana, AR, ATR e ART semelhantes aos do tratamento com adubo mineral.

Palavras-chave: Cana-de-açúcar. Produtividade. Resíduos urbanos. Superfície de resposta. Variáveis tecnológicas.

SEWAGE SLUDGE COMPOST AS NITROGEN AND PHOSPHORUS SOURCE TO SUGAR CANE

ABSTRACT

The sewage sludge compost classified as an organic fertilizer Class D (MAPA, 2009) is a material rich in nutrients, specially nitrogen (N) and phosphorus (P), and have high content of organic matter. However, there is a lack of research to adequate the nitrogen and phosphate fertilizer doses to be applied in agricultural fields treated with this compost. This study aimed to evaluate the effects of doses of sewage sludge compost, nitrogen and phosphate mineral fertilizer on the productivity and technological characteristics of the second and third sugarcane ratoon. In second cane ratoon were applied four doses of: sewage sludge compost (0, 27, 54, 82 t ha⁻¹, dry basis) and N (0, 30, 60 and 98 kg ha⁻¹) and two doses of P₂O₅ (0 and 30 kg ha⁻¹), the reapplication in the third cane ratoon were applied four doses of: sewage sludge compost (0, 23.3, 15 and 7.8 t ha⁻¹, dry basis) and N (0, 44.6, 89 and 135 kg ha⁻¹) and two doses of P₂O₅ (0 and 54 kg ha⁻¹), in a randomized block design in a factorial design with three replications. On all plots were applied 77 and 108 kg ha⁻¹ of K₂O in the second and third ratoon respectively. The sewage sludge compost application, combined or not with nitrogen and / or phosphate fertilizer, increased sugarcane yield from 77 to 104 t ha⁻¹. The study of surface response for the stalk yield of the second ratoon, to a low fertility soil, permitted to establish a draft of nitrogen with or without phosphate mineral fertilizer recommendation for cane ratoon crop in function of sewage sludge compost application rate. In order to conclude, according to the Conama n° 375 resolution, the application of 82 t ha⁻¹ of sewage sludge compost, established by nitrogen criteria, could reduce the use of mineral N fertilizer in 100%, promoted values of stalk productivity (TSS), sugar productivity (TSH), reducing sugars (RS), total recoverable sugars (TRS) and total reducing sugars (TRS) similar to conventional mineral fertilizer. In reapplication of compost, whose N request was considered 135 kg ha⁻¹, the TSS increased from 59 to 80 t ha⁻¹ in function of compost application rate and the highest mineralization rate was 30%, the available N by compost was not enough and should be complemented with 89 kg ha⁻¹ of mineral N to obtain values of TSS, TSH, RS, Pol cane, Pol juice, TRS and TRS similar to conventional mineral fertilizer.

Keywords: Sugarcane. Productivity. Urban waste. Surface response. Technological attributes.

3.1 Introdução

Com o aumento populacional nas cidades cresce a demanda por tratamento das águas servidas, o que gera um resíduo chamado de lodo de esgoto. Atualmente, a disposição dos resíduos gerados desse tratamento é um dos principais problemas ambientais enfrentados pelas cidades (KHALIL et al., 2011; ALLEONI; FERNANDES; CORREIA, 2012).

Uma das alternativas para dispor o lodo de esgoto é sua utilização na agricultura. Dentre as opções de disposição do resíduo é a que possui maior viabilidade técnico-econômica, além de diminuir os custos com fertilizantes minerais (BERNAL et al., 1998; FARREL; JONES, 2009), e melhorar as propriedades físicas, químicas e biológicas do solo (HARGREAVES; ADL; WARMAN, 2008). O potencial do uso agrícola do lodo decorre da presença de matéria orgânica e de nutrientes para as plantas (BERNAL et al., 1998; CHIBA; MATTIAZZO; OLIVEIRA, 2009; FRANCO et al., 2010a; BETTIOL; GHINI, 2011).

Devido à possível presença de patógenos e compostos orgânicos e inorgânicos potencialmente tóxicos nos lodos de esgoto, há um potencial de contaminação do ambiente, o que tem sido alvo constante de críticas e fator de restrição do uso agrícola do lodo. Agências de controle ambiental tem restringido o uso do lodo dificultando a aprovação de projetos para esse fim (ABREU JUNIOR et al., 2008; NOGUEIRA et al., 2013). Por conseguinte, a compostagem é uma opção para as empresas que gerenciam o lodo de algumas ETES para dar continuidade à reciclagem agrícola do lodo. O processo de compostagem altera a mobilidade dos elementos potencialmente tóxicos, reduzindo a fitototoxicidade do lodo (HARGREAVES; ADL; WARMAN, 2008; HE, TIAN, LIANG, 2009; KHALIL et al., 2011).

Os fertilizantes orgânicos compostados produzidos a partir de lodo de esgoto, como matéria-prima, são passíveis de registro do produto, sendo classificados como fertilizantes orgânicos Classe “D”, de acordo com as Instruções Normativas SDA nº 25, do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (Mapa) (BRASIL, 2009). O Mapa criou uma categoria de produto com critérios de qualidade físico-química e sanitárias bem mais restritivas do que o CONAMA, de uso seguro na agricultura.

Ainda não há relatos na literatura brasileira sobre a utilização de composto de lodo de esgoto na cultura da cana-de-açúcar. Entretanto, são encontrados vários trabalhos que relatam o uso de lodo de esgoto (BERTONCINI et al., 2004; MARQUES et al., 2007; NOGUEIRA et al., 2008; FRANCO et al., 2008, 2010a) e de compostos de lixo urbano (SILVA et al., 2002; OLIVEIRA et al., 2002; ROSSETTO et al., 2002) na cultura da cana.

O Brasil é o maior produtor e exportador de açúcar de cana no mundo, sendo responsável por 34% do total produzido, e é o produto agrícola com o maior volume gerado no país. Além do interesse econômico no cultivo cana-de-açúcar para produção de açúcar e etanol, biocombustível renovável, o aumento das áreas cultivadas de cana prevê redução das emissões dos gases de efeito estufa associadas ao consumo energético no setor de transporte (CONAB, 2013). A cana-de-açúcar é uma das culturas mais aptas a receber resíduos como o composto de lodo de esgoto, por algumas vantagens como: áreas cultivadas próximas aos grandes centros urbanos; o cultivo da cana-de-açúcar apresenta alto índice de mecanização, minimizando o contato do operador com o resíduo; trata-se de um setor agrícola tecnologicamente diferenciado, onde as variáveis de fertilidade do solo e as envolvidas no desempenho da cultura são comumente monitoradas e corrigidas com o objetivo de se conseguir altas produtividades; e, trata-se de uma cultura não consumida *in natura*. Na produção de açúcar, o colmo da cana é submetido a tratamentos físico-químicos que podem eliminar a presença de parasitas humanos e minimizar a presença de elementos potencialmente tóxicos no produto final. Na produção de álcool os elementos potencialmente tóxicos também, em sua maioria, serão eliminados durante o processo de fabricação (MARQUES; MARQUES; TASSO JUNIOR, 2001).

As respostas da cana-de-açúcar à adubação nitrogenada, em relação à produtividade, são variáveis para a cana-planta e relativamente homogêneas para a soqueira (CARNAÚBA, 1990). Segundo Zambelo Júnior e Orlando Filho (1981), as soqueiras de cana-de-açúcar apresentam maiores possibilidades de respostas positivas ao adubo nitrogenado que a cana-planta. De acordo com Morelli et al. (1997) a falta de resposta da cana-planta na produção de colmos em relação ao adubo nitrogenado ainda não é totalmente esclarecedora. O elevado erro experimental associado a estudos de adubação conduzidos em condições de campo tem feito que trabalhos com pequenas respostas em produção, em razão da adubação nitrogenada, não atinjam significância estatística (CANTARELLA; TRIVELIN; VITTI, 2007).

No solo, o comportamento do nitrogênio e do fósforo quando fornecidos por meio de fontes orgânicas é diferente daquele quando os nutrientes são fornecidos na forma mineral (BOARETTO, 1986; ANDRADE et al., 2003). O fósforo orgânico proveniente de lodos de esgoto tem-se mostrado mais disponível que quando fornecido na forma de adubo mineral. Devido à decomposição do material orgânico, que resulta em ácidos orgânicos sendo adsorvidos pelo solo, ocupando sítios de adsorção de fosfato e aumentando a disponibilidade do elemento (McDOWELL; SHARPLEY, 2001; ANDRADE et al., 2003).

Assim, o presente trabalho visou avaliar os efeitos de doses de composto de lodo de esgoto e de fontes minerais de nitrogênio e fósforo durante dois anos de aplicações sucessivas sobre a produtividade e as características tecnológicas da segunda e terceira cana-soca, por meio de modelos de superfície de respostas, com o intuito de nortear a elaboração de recomendação de adubação mineral para produção comercial de cana-de-açúcar, em área tratada com composto de lodo de esgoto.

3.2 Material e Métodos

O experimento foi realizado em área de produção comercial de cana-de-açúcar, no município de Rio das Pedras, Estado de São Paulo, Brasil. O clima no município de Rio das Pedras é do tipo Cwa (Classificação de Köppen), tropical úmido, com inverno seco e verão quente e úmido. A precipitação pluvial foi de 1.439 mm e de 1.679 mm nos períodos de novembro de 2009 a outubro de 2010 e de dezembro de 2010 a outubro de 2011 respectivamente, conforme registros da Usina Santa Helena, Grupo RAÍZEN S/A.

O solo onde foi instalado o experimento é classificado como Latossolo Vermelho-Amarelo (EMBRAPA, 2006). A amostragem do solo para fins de caracterização química foi feita previamente à instalação do experimento, em setembro de 2009 (Tabela 1), conforme os protocolos analíticos descritos em Rajj et al. (2001).

Tabela 1 – Caracterização química do solo da área experimental, para avaliação da fertilidade, antes da aplicação do composto de lodo de esgoto (setembro de 2009).

Profundidade m	pH CaCl ₂	P mg dm ⁻³	K -----	Ca	Mg mmol _c dm ⁻³	Al -----	H+Al	SB -----	T	V %
0-0,2	4,4	7	1	12	10	5	47	23	70	50
0,2-0,4	4,3	3	0,5	12	11	3	58	23	81	47

Foi utilizado um composto de lodo de esgoto produzido por meio da compostagem do lodo sanitário com bagaço de cana-de-açúcar, na proporção 1:1 (1 m³ de torta de lodo com 18% de sólidos com 1 m³ de bagaço de cana com 70% de sólidos). O lodo de esgoto utilizado na compostagem foi obtido da Estação de Tratamento de Esgoto de Jundiaí, operada sob regime de concessão pela Companhia Saneamento de Jundiaí, em Jundiaí, SP. Esse resíduo é

gerado em sistema biológico de lagoas aeradas, de mistura completa, seguidas de lagoas de sedimentação, resultando em um lodo com teor de matéria orgânica em sólidos secos menor que 70%. Na sequência, o lodo é condicionado com polímeros, centrifugado e seco ao ar por 120 dias, com revolvimento mecânico periódico das pilhas, para redução significativa de agentes patogênicos e obtenção de material com até 25% de sólidos.

O composto utilizado em outubro de 2009 foi aditivado com gesso agrícola. E o produto utilizado em outubro de 2010 recebeu calcário dolomítico. Em ambos os casos a quantidade adicionada foi cerca de 50 a 70 kg de gesso ou calcário para cada tonelada de fertilizante orgânico composto.

O composto de lodo de esgoto foi caracterizado conforme recomendado pela Resolução nº 375 (CONAMA, 2006). No primeiro ano experimental, iniciado em 17/10/2009, o composto de lodo de esgoto aplicado apresentou umidade de 57,7 % (m/m) e valor de pH, medido em água, de 5,0. Os teores totais (base seca) de C-org, N total, N amoniacal, N nitrato/nitrito, P, K, Ca, Mg, S, e de Na foram, em g kg^{-1} , de 248; 12; 0,5; 0,03; 4,0; 1,13; 55,1; 1,0; 21,9; 0,7, respectivamente. No segundo ano experimental, iniciado em 29/12/2010, o composto utilizado apresentou umidade de 46,2 % (m/m) e valor de pH, medido em água, de 7,4. Os teores totais (base seca) de C-org, N total, N amoniacal, N nitrato/nitrito, P, K, Ca, Mg, S, e de Na foram, em g kg^{-1} , de 175; 19,1; 1,8; 0,02; 7,9; 2,6; 14,1; 2,9; 15,6; 1,2, respectivamente.

O cultivar de cana-de-açúcar utilizado foi o RB85 5002, obtido a partir do cruzamento entre os cultivares NA56-79 e SP70-1143.

O experimento foi instalado em área de segunda soqueira (terceiro corte), em 17 de novembro de 2009. A colheita do ano anterior (primeira soca) foi realizada mecanicamente em 24 de outubro de 2009, e a produtividade média de colmos estimada, segundo dados da Usina Santa Helena, foi de 85 t ha^{-1} .

Cada parcela foi constituída por seis linhas de cana-de-açúcar, com 20 m de comprimento, espaçadas em 1,30 m, com área total de 156 m^2 . Como área útil foi considerada as quatro linhas centrais, descontando-se 2,0 m em cada extremidade das linhas. Devido à colheita mecanizada da soqueira no ano anterior, toda palhada permaneceu no local. Assim, a cada duas ruas, a palhada foi enleirada na terceira rua, ou seja, em cada parcela, havia um colchão de palha na rua central onde não foi possível aplicar o composto, contudo foram aplicados os adubos minerais. O espaçamento entre as linhas de cana era de 1,30 m, porém o recomendado e adotado para áreas onde a colheita é mecanizada é de 1,50 m.

Os tratamentos constituíram-se em quatro doses de composto de lodo de esgoto, quatro doses de nitrogênio e duas doses de fósforo, que foram aplicados em dezembro de 2009. O composto de lodo de esgoto, na base seca, foi aplicado em superfície nas doses de 0; 27; 54 e 82 t ha⁻¹, equivalentes a 0, 33, 66 e 100% do recomendado pelo critério de fornecimento do nitrogênio, foi considerada taxa de mineralização de 10%, conforme Resolução n° 375 (CONAMA, 2006), para lodos compostados. O N, na forma de ureia, foi aplicado nas doses de 0, 32,3; 65 e 98 kg ha⁻¹ de N, equivalentes a 0, 33, 66 e 100% do recomendado para a área experimental, e o fósforo (P), na forma de superfosfato triplo, nas doses de 0 e 30 kg ha⁻¹ de P₂O₅, equivalentes a 0 e 100% do recomendado. Foi aplicado potássio em todas as parcelas na dose de 77 kg ha⁻¹ de K₂O, na forma de cloreto de potássio.

Após a aplicação do composto do lodo de esgoto foi realizado cultivo na área na camada de 0-20 cm de profundidade. Nos dois anos do experimento o composto de lodo de esgoto foi aplicado por meio de máquina agrícola, a mesma utilizada na aplicação de torta de filtro, gesso e calcário em áreas de cultivo de cana-de-açúcar. Os adubos minerais foram aplicados manualmente em todas as linhas de cada parcela.

Em 29 de dezembro de 2010, o composto de lodo de esgoto foi reaplicado nas parcelas da área experimental. A literatura, de um modo geral, sugere que as aplicações sucessivas devem levar em consideração a taxa de mineralização do resíduo nos anos seguintes. Desta forma, na reaplicação, foram consideradas taxas de mineralização teóricas de 100, 50 e 30%, o que propiciou doses de 7,8; 15 e 20 t ha⁻¹ de composto e que foram aplicadas, respectivamente, nas parcelas que receberam 82, 54 e 27 t h⁻¹ no ano anterior quando iniciou-se o experimento.

As doses de nitrogênio aplicadas no segundo ano experimental, na forma de nitrato de amônio, foram: 0; 44,6; 89 e 135 kg ha⁻¹, e as doses de fósforo, na forma de super triplo foram: 0 e 54 kg ha⁻¹ de P₂O₅. Foi aplicado potássio em todas as parcelas na dose de 108 kg ha⁻¹ de K₂O, na forma de cloreto de potássio.

As doses recomendadas de N e K₂O foram estabelecidas com base na dose utilizada pela usina, responsável pelo plantio na área, de 350 kg ha⁻¹ da fórmula 28-00-22, para a segunda soqueira e de 300 kg ha⁻¹ da fórmula 00-18-36 e 135 kg N ha⁻¹ para a terceira soca.

A reaplicação do composto foi realizada 68 dias após a colheita da soca anterior, e a adubação das parcelas foi realizada em fevereiro de 2011. O atraso na adubação foi devido às intensas chuvas no período.

A colheita do primeiro experimento foi realizada mecanicamente em 11 de outubro de 2010, e a do segundo experimento em 03 de outubro de 2011. A produtividade da cana-de-

açúcar, em $t\ ha^{-1}$ (TCH), foi avaliada utilizando-se um caminhão de transbordo contendo célula de carga que pesava a cana colhida. Foram coletados dez colmos de cada parcela para as avaliações das características tecnológicas, que, consistiram na determinação do °Brix (CE), percentagem aparente de sacarose do caldo extraído (Pol % Caldo), Fibra na cana (%), açúcares redutores (AR % cana), percentagem de sacarose na cana (Pol % Cana), Pureza, açúcares redutores totais (ART % cana) e açúcar total recuperável (ATR), de acordo com a metodologia proposta pelo CONSECAN (2003). A produtividade de açúcar, em $t\ ha^{-1}$ (TAH), foi obtida pelo produto entre a TCH e o ATR de cada parcela, dividido por 1000.

Para permitir o estudo dos efeitos das doses de composto, de N e de P sobre as variáveis dependentes por meio de superfície de resposta, o delineamento experimental foi o de blocos ao acaso, em esquema fatorial, $4 \times 4 \times 2$ (4 doses de composto, 4 doses de N e 2 doses de P), com três repetições, totalizando 96 parcelas. Os dados foram submetidos à análise de variância pelo teste F para estudar os efeitos dos tratamentos doses de N (N), doses de P (P) e doses do composto (C). Os dados obtidos foram submetidos à análise de variância e ao estudo de modelagem de superfície de respostas, para obtenção das equações na ausência e na presença de fósforo, do tipo: $Y = a + bC + cN + dCN + eC^2 + fN^2 + G$, na qual C é a dose de composto ($t\ ha^{-1}$), N, a dose de nitrogênio ($kg\ ha^{-1}$), e G, é o fator que corresponde à dose de P_2O_5 ($kg\ ha^{-1}$). O fator G corresponde ao valor zero na condição de não aplicação de fósforo, ou quando não há efeito significativo do fator P.

Ao longo do texto, exceto quando explicitado, as doses de composto de lodo de esgoto em $t\ ha^{-1}$ referem-se à aplicação de material seco.

3.3 Resultados e discussão

Inicialmente são apresentados e discutidos os resultados obtidos após a aplicação do composto de lodo de esgoto na cana-soca (segunda soca), e posteriormente os resultados obtidos após a reaplicação do composto na área (terceira soca).

Efeito da aplicação do composto de lodo de esgoto em cana soca (segunda soca)

Toneladas de colmos por hectare

No primeiro ano de cultivo a produtividade média de colmo da cana-soca por hectare (TCH), em função das doses de composto de lodo de esgoto, de nitrogênio e de fósforo, variou de 77 a 104 t ha⁻¹, no primeiro ano de cultivo, segunda soca (Apêndice A). A produtividade do tratamento com adubo mineral foi de 89 t ha⁻¹. Segundo resultados de diversos experimentos do PMGCA/UFSCar (Programa de Melhoramento Genético da Cana-de-açúcar da UFSCar) com a variedade RB 85-5002, segunda soca, a média de produção de colmos obtida foi de 95 t ha⁻¹ (CHAPOLA, 2010; Informação pessoal)¹.

O estudo de modelagem de superfície de resposta demonstrou efeitos dos tratamentos sobre a TCH da cana-soca (segunda soca), sendo que os maiores incrementos foram causados pelas doses de composto, seguindo pelas doses de nitrogênio (Figura 1), na presença de P. Foram observados, efeitos lineares de composto e nitrogênio, conforme equação: TCH (t ha⁻¹) = 76,93 + 0,132 C + 0,08 N + 2,9; (R² = 0,38; p < 0,01), na condição de aplicação de 30 kg ha⁻¹ de P₂O₅. Para estimar a produtividade de colmos na ausência de fósforo fixa-se o valor de P igual à zero, portanto, a equação final é: TCH (t ha⁻¹) = 76,93 + 0,132 C + 0,08 N; (R² = 0,38; p < 0,01). Comparando-se as duas equações pode-se observar que com a aplicação do adubo mineral fosfatado há incremento de 2,9 t ha⁻¹ na produtividade de colmos.

A produtividade de colmos apresentou incrementos de 13,2 t ha⁻¹ para cada 10 t ha⁻¹ de composto, e de 8 t ha⁻¹ para cada 100 kg ha⁻¹ de N. Fato esperado, pois é frequente a resposta da cana-soca com adubação nitrogenada, requerendo doses maiores do que aquelas empregadas na adubação da cana-planta (SALCEDO; SAMPAIO, 1984; CARNAÚBA, 1990).

O uso de lodo de esgoto como fonte de N também tem mostrado efeitos positivos na cana-soca. Silva et al. (1998) avaliaram doses de lodo de esgoto (0, 15 e 30 kg ha⁻¹, peso do lodo úmido), complementadas ou não com doses de nitrogênio e fósforo (80 e 60 kg ha⁻¹ de N e P, respectivamente), no cultivo de cana-de-açúcar, cana-soca, em um Nitossolo Vermelho.

¹ CHAPOLA, R.G. Programa de Melhoramento Genético da Cana-de-açúcar da UFSCar Mensagem recebida por chapola@cca.ufscar.br em 06 abr. 2011.

Eles encontraram resultados semelhantes aos do presente estudo, assim como observaram efeito das doses de lodo na produtividade de colmos da cana-soca. Eles atribuíram esse aumento de produtividade ao aumento da fertilidade do solo provocada pelo lodo, e essas alterações no solo possibilitou melhor nutrição da cana-de-açúcar.

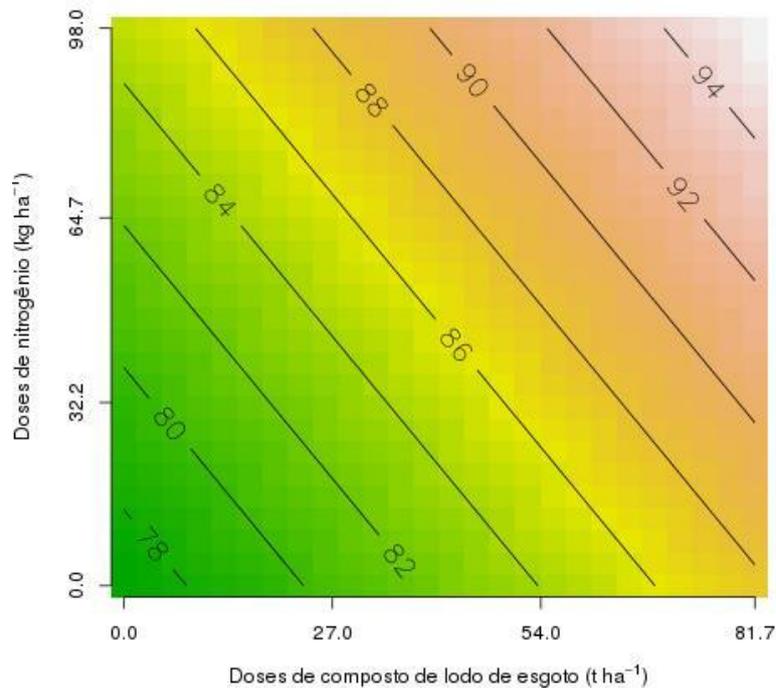


Figura 1 - Produtividade média de colmos (toneladas de colmos por hectare – TCH) da cana-soca, primeira aplicação, em função das doses de composto de lodo de esgoto e de nitrogênio mineral, na presença de fósforo mineral.

A produtividade máxima de colmos estimada pelo modelo estatístico foi de 96 t ha^{-1} , na condição da aplicação de 82 t ha^{-1} de composto, com a complementação de 98 kg ha^{-1} de N, via adubo mineral, sendo necessária a adição do adubo mineral fosfatado, na dose recomendada. Entretanto, foram observadas produtividades superiores, considerando-se a dose de 82 t ha^{-1} de composto, sem adição de N mineral, ter-se-á produtividade de 88 t ha^{-1} , com aplicação de 30 kg ha^{-1} de P_2O_5 , ou seja, a maior dose de composto proporcionou produtividade semelhante que o tratamento com aplicação de adubo mineral de modo convencional, com redução de 100% das doses recomendadas do adubo mineral nitrogenado.

De acordo com o modelo, a produtividade máxima estimada foi de 96 t ha^{-1} , porém, a produtividade máxima obtida no experimento foi de 104 t ha^{-1} referente ao tratamento com 54 t ha^{-1} de composto e $64,7 \text{ t ha}^{-1}$ de nitrogênio, com fósforo mineral (Apêndice A). O modelo estatístico proposto não conseguiu estimar todo o potencial produtivo do cultivar, haja vista o alto coeficiente de variação do experimento ($CV= 67\%$), consequência de alguns fatores não controlados experimentalmente, mas que provavelmente interferiram na produtividade final como espaçamento entre linhas e plantio irregulares, falhas nas linhas de cana devido à colheita mecanizada, compactação do solo e pisoteio da soca.

Rossetto et al. (2002) estudando a aplicação de composto de lixo na cana-de-açúcar, cana-planta, nas doses de 0, 10, 20 e 40 t ha^{-1} , base seca, em combinação com quatro doses de N-ureia (0, 25, 50 e 75 t ha^{-1}) e quatro doses de fósforo 0, 25, 50 e 75 t ha^{-1} , superfosfato triplo, verificaram aumento da produtividade de colmos em relação às doses de composto de lixo e de superfosfato, porém, não observaram efeito do N isoladamente na produtividade. Os resultados de produtividade, que foram ajustados para o modelo de superfície de resposta, demonstraram resposta linear e quadrática às doses de composto de lixo e de superfosfato, respectivamente. Pelo modelo estimou-se que a máxima produtividade econômica foi obtida com a aplicação de 35 t ha^{-1} do composto, com 140 kg ha^{-1} de P_2O_5 e 120 kg ha^{-1} de K_2O . Considerando que a resposta da cana ao composto de lixo foi linear, doses maiores que as utilizadas ainda dariam ganhos de produtividade, se apenas esse fator fosse levado em consideração.

Em relação à produtividade de colmos observada, pode-se dizer que foi baixa comparada à produtividade esperada para o cultivar utilizado. Embora, alguns tratamentos tenham atingido a produtividade média esperada, a maioria dos tratamentos apresentou produtividade abaixo de 90 t ha^{-1} (Apêndice A). Os problemas descritos anteriormente relacionados à área do experimento foram os que mais influenciaram na perda de produtividade. Contudo, a dose máxima de composto de lodo de esgoto foi suficiente para suprir a dose de N requerida pela cultura da cana-de-açúcar, sem a necessidade de complementação com o adubo mineral nitrogenado, obtendo a mesma produtividade do tratamento com adubo mineral convencional.

Em função dos resultados obtidos e do modelo de superfície de resposta para produtividade de colmos de cana-soca, é sugerida recomendação de adubação com composto de lodo de esgoto, para cana-soca cultivada por 12 meses, de modo a nortear os produtores de cana-de-açúcar interessados em fazer uso deste fertilizante em complementação à aplicação de adubo mineral convencional (Tabela 2). Os resultados são válidos para solos com teores

baixos de fósforo (7 a 15 mg dm⁻³) e de potássio (0,8 a 1,5 mmol_c dm⁻³) e produtividade relativa esperada de 100% equivalente a 89 t ha⁻¹, ou seja, a produtividade obtida no tratamento com adubo mineral NPK, aplicado de modo convencional. Verifica-se que à medida que se emprega dose maior de composto na implantação do canavial, até a dose permitida pela legislação, pelo critério do nitrogênio (CONAMA, 2006), diminui-se a necessidade de aplicação do fertilizante mineral nitrogenado em até 100%.

Tabela 2 - Sugestão para recomendação de adubação mineral nitrogenada em soqueira, em função de dose de composto de lodo de esgoto, primeira aplicação, considerando-se solo com teores baixos de fósforo (7 a 15 mg dm⁻³) e de potássio (0,8 a 1,5 mmol_c dm⁻³) e produtividade relativa esperada de 100% equivalente a 89 t ha⁻¹, ou seja, a produtividade obtida no tratamento com adubo mineral NPK, aplicado de modo convencional para cana-soca cultivada por 12 meses sob condições convencionais de manejo

⁽¹⁾ Composto de lodo de esgoto ----- % -----	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	Produtividade relativa estimada ----- % -----
	----- kg ha ⁻¹ -----			
0	98	30	77	100
33	65	30	77	99,5
66	32	30	77	101
100	0	0	77	98,6
100	0	30	77	101,8

⁽¹⁾ A dose de 100% de composto de lodo de esgoto equivale à taxa de aplicação com base no critério do nitrogênio, em t ha⁻¹, conforme recomendado pelo Conama (2006), que é definida pelo quociente entre a quantidade de nitrogênio requerida para a cultura, e teor de nitrogênio disponível do composto.

De acordo com os resultados estimados pode-se observar que com a aplicação da dose de 100 % de composto, sem N e sem P, a produtividade de colmos será de 98,6 % em relação àquela obtida no tratamento NPK. Considerando os resultados estimados com a aplicação da dose de 100 % de composto, sem N e com P, a produtividade de colmos será de 101,8 % em relação àquela obtida no tratamento NPK (Tabela 2). Embora a produtividade seja maior com a aplicação do fósforo mineral, é importante ressaltar se esse aumento no custo, com a aplicação do adubo fosfatado, compensa o ganho de produtividade obtido.

Toneladas de açúcar por hectare

Os dados médios de produtividade de açúcar da cana-soca (TAH), em função das doses de composto de lodo de esgoto, de nitrogênio e de fósforo, variaram de 13 a 17,1 t ha⁻¹ (Tabela 3). A produtividade de açúcar no tratamento convencional com adubação mineral foi de 14,6 t ha⁻¹. Houve efeito das doses de composto e nitrogênio sobre os teores da TAH (Figura 2). Também foi observado efeito do P inorgânico. Segundo o modelo de superfície de resposta foi obtida a seguinte equação: $TAH (t ha^{-1}) = 12,346 + 0,025 C + 0,013 N + 0,45$; ($R^2=0,42$; $p < 0,01$), na condição de aplicação de 30 kg ha⁻¹ de P₂O₅. Para estimar a produtividade de açúcar na ausência de P retira-se o fator P (0,45) da equação.

Os valores da TAH aumentaram linearmente com as doses de composto, 2,5 t ha⁻¹ para cada 100 t ha⁻¹ de composto, e de nitrogênio, 1,3 t ha⁻¹ para cada 100 kg ha⁻¹, variando em função do aumento da produtividade de colmos.

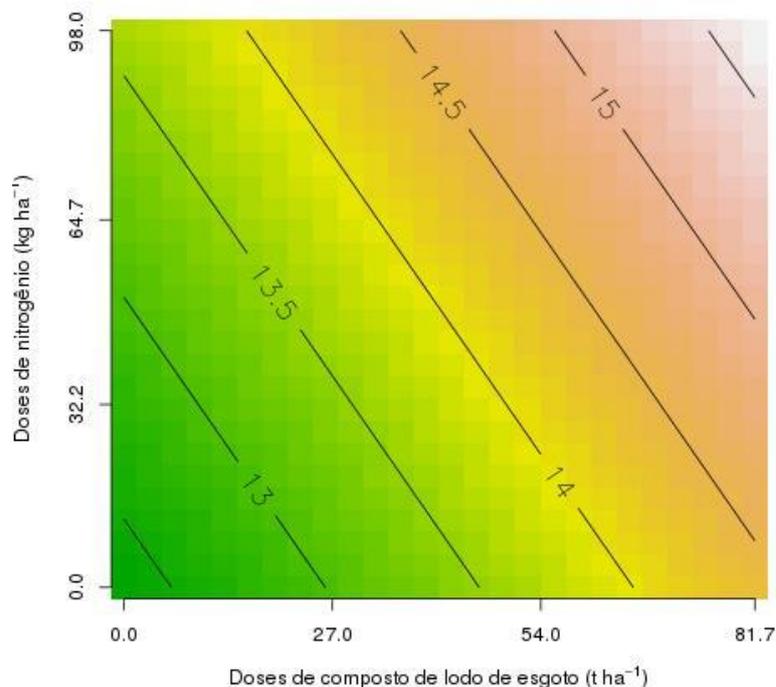


Figura 2 – Produtividade média de açúcar (toneladas de açúcar por hectare – TAH) da cana-soca, primeira aplicação, em função das doses de composto de lodo de esgoto e nitrogênio mineral, na presença de fósforo mineral.

Segundo a equação de superfície de resposta, a aplicação de 82 t ha^{-1} do composto possibilita obter a produtividade máxima de $15,6 \text{ t ha}^{-1}$ de açúcar, quando complementada com 98 kg ha^{-1} de N, via fertilizante nitrogenado e com adição do adubo fosfatado.

Substituindo na equação de superfície de resposta a dose máxima de composto utilizada, 82 t ha^{-1} , sem complementação com o adubo nitrogenado, a produtividade de açúcar seria de $14,4 \text{ t ha}^{-1}$, valor similar ao obtido pelo tratamento mineral convencional, que foi de $14,6 \text{ t ha}^{-1}$ de açúcar. Portanto, a dose máxima de composto utilizada proporcionou produtividade de açúcar semelhante à encontrada no tratamento mineral convencional.

Tabela 3 - Produtividade de açúcar (TAH) da cana-soca ($t\ ha^{-1}$), segunda soca, em função das doses de composto de lodo de esgoto, nitrogênio e fósforo.

Lodo de esgoto $t\ ha^{-1}$	Nitrogênio $kg\ ha^{-1}$	Fósforo, $kg\ ha^{-1}\ P_2O_5$	
		0	30
0	0	13,0	13,1
	32	13,0	14,1
	65	13,6	14,7
	98	13,7	14,4
27	0	13,7	13,9
	32	13,0	13,5
	65	14,7	16,0
	98	14,5	14,6
57	0	15,2	13,3
	32	14,7	15,6
	65	15,1	16,0
	98	15,1	15,9
82	0	14,0	16,0
	32	16,2	15,1
	65	15,3	17,1
	98	16,4	16,9

Açúcares redutores

De acordo com o estudo de modelagem de superfície de resposta, os teores de AR da cana-soca, após a primeira aplicação do composto de lodo de esgoto, foram influenciados pelas doses de composto e de nitrogênio (Figura 3). Os teores de AR variaram de 0,41 a 0,48%, e no tratamento com adubação mineral o teor encontrado foi de 0,43%. Os maiores

incrementos foram causados pelas doses de composto, seguindo pelas doses de nitrogênio. Os teores de AR nos tratamentos não foram influenciados pela adição do fósforo mineral. Foram observados efeitos quadráticos, conforme equação: $AR (\%) = 0,431 + 0,001 N - 0,00002 C^2 - 0,000005 N^2$; ($R^2 = 0,28$, $p < 0,001$).

O teor de AR na cana é um dos indicativos do seu estágio de maturação, teores elevados indicam menor acúmulo de sacarose. O aumento dos teores de AR em função das doses de composto e nitrogênio foi observado até a dose de 41 t ha^{-1} de composto e $37,3 \text{ t ha}^{-1}$ de N.

Esses resultados corroboram com os encontrados por Chiba et al. (2008a), que estudando a aplicação de lodo de esgoto nas doses de 14 e 16 t ha^{-1} (primeiro e segundo ano experimental, respectivamente), complementada ou não com N mineral, em soqueiras de cana-de-açúcar, constataram que, os teores de AR foram mais elevados nos tratamentos com as maiores doses de N mineral e no tratamento com lodo sem N. Entretanto, não foram observados efeitos deletérios na qualidade da cana.

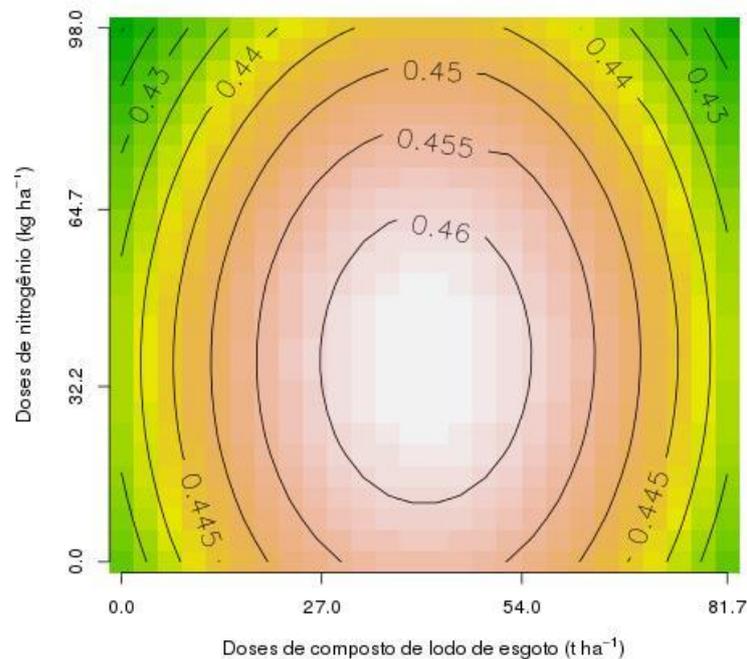


Figura 3- Teores de açúcares redutores (%) da cana-soca, primeira aplicação, em função das doses de composto de lodo de esgoto e nitrogênio mineral.

Açúcar total recuperável

Os valores de ATR foram alterados pelos tratamentos, variando de 155 a 167 kg t⁻¹, no tratamento fertilização mineral o valor obtido foi de 161 t ha⁻¹. Com o incremento das doses de composto e nitrogênio foi observado aumento nos teores de ATR (Figura 4). Não houve efeito do adubo fosfatado sobre os valores de ATR. Segundo o modelo de superfície de resposta houve efeito linear, segundo a equação: $ATR = 158,83 + 0,039 C + 0,021 N$; ($R^2=0,15$; $p < 0,01$).

O ATR, variável empregada no pagamento da cana-de-açúcar, pela indústria, ao fornecedor, é calculado baseado nos valores da Pol % Cana e AR % cana e representa todos os açúcares invertidos que são recuperados na indústria, baixos teores de ATR indicam baixo acúmulo de sacarose nos colmos. Embora, os teores de AR tenham aumentado em relação às doses de composto e nitrogênio não foram suficientes para causar efeitos deletérios no caldo e/ou prejuízos, pois, as doses de composto e as doses de N afetaram positivamente os valores de ATR.

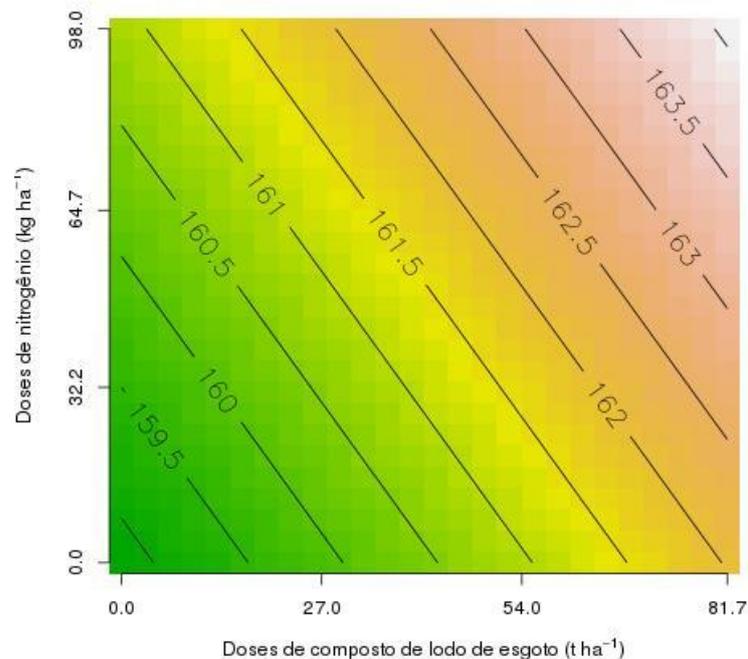


Figura 4 - Açúcar total recuperável (kg t⁻¹) da cana-soca, primeira aplicação, em função das doses de composto de lodo de esgoto e nitrogênio mineral.

Resultados demonstrando resposta da cultura da cana-de-açúcar, cana-planta, à aplicação de fertilizante nitrogenado, sobre a variável ATR, foi encontrada por Franco et al. (2010b), que verificaram que a maior produção de açúcar por área foi consequência direta da maior produtividade de colmos. Com objetivo de avaliar a produção de colmos, de açúcar e o efeito da fertilização nitrogenada sobre as variáveis tecnológicas da cana, os autores conduziram dois experimentos com cana-planta, em diferentes regiões do Estado de São Paulo. Os autores observaram que o aumento da produção de açúcar observado nos experimentos foi obtido de maneiras diferentes. Enquanto, em um dos experimentos o aumento foi obtido em consequência da maior produtividade de colmos, o outro foi em consequência do aumento da Pol da cana.

As demais variáveis tecnológicas ⁰Brix, Pol % caldo, Pol % cana, pureza, fibras e ART não foram alteradas pelos tratamentos. Outros estudos utilizando N mineral e/ou resíduos (como fonte de N) apresentaram resultados similares em relação à ausência de resposta da cana sobre as demais variáveis tecnológicas citadas (MARQUES et al., 2007; KORDÖRFER et al., 2002; CHIBA; MATTIAZZO; OLIVEIRA, 2009).

Açúcares redutores totais

Os valores de açúcares redutores totais (ART %) caldo foram afetados significativamente pelas doses de composto de lodo de esgoto (Figura 5), variando de 17,5 a 18,6 %. No tratamento fertilização mineral o valor encontrado foi de 17,8 %. Não foi observado efeito do adubo fosfatado, observou-se efeito linear, segundo a equação: ART caldo (%) = 17,53 + 0,004 C; ($R^2 = 0,12$; $p < 0,05$).

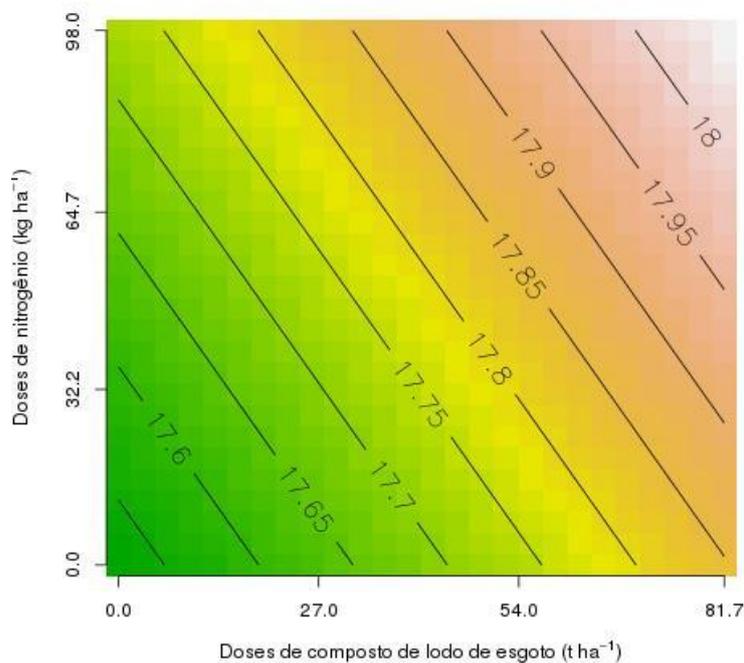


Figura 5 – Açúcares redutores totais (kg t^{-1}) da cana-soca, primeira aplicação, em função das doses de composto de lodo de esgoto e nitrogênio mineral.

Efeitos da reaplicação do composto de lodo de esgoto em cana-soca (terceira soca)

Toneladas de colmos por hectare

Na reaplicação do composto, terceira soca, a produtividade média de colmo da cana-soca por hectare (TCH), em função das doses de composto de lodo de esgoto e de nitrogênio, variou de 59 a 80 t ha^{-1} (Apêndice B). A produtividade do tratamento com adubo mineral convencional foi de 70 t ha^{-1} . A variedade RB 85-5002, na terceira soca, produz em média 73 t ha^{-1} de colmos, segundo resultados de experimentos do PMGCA/UFSCar (CHAPOLA, 2010; Informação pessoal)².

O estudo de modelagem de superfície de resposta demonstrou efeito da aplicação do composto e das doses de nitrogênio sobre a produtividade de colmos (Figura 6). Não foi observado efeito do adubo mineral fosfatado nos valores da TCH da terceira soca. Foram observados efeitos lineares e quadráticos, conforme equação: $\text{TCH} (\text{t ha}^{-1}) = 59,3 + 0,209 C + 0,17 N - 0,0008 CN - 0,0009 N^2$; ($R^2 = 0,40$; $p < 0,001$).

² CHAPOLA, R.G. Programa de Melhoramento Genético da Cana-de-açúcar da UFSCar. Mensagem recebida por em chapola@cca.ufscar.br em 06 abr. 2011.

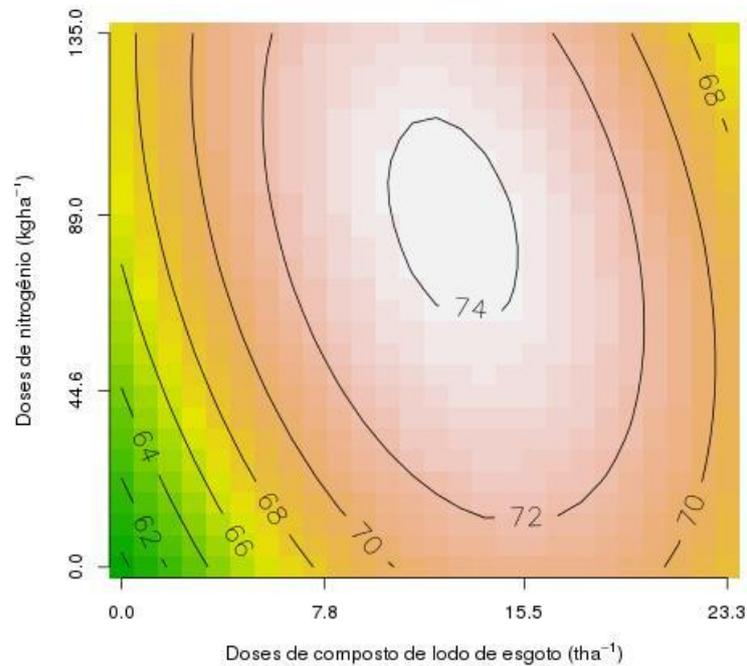


Figura 6 - Produtividade média de colmos (toneladas de colmos por hectare – TCH) da cana-soca, em área de reaplicação de composto de lodo de esgoto, em função das doses de composto de lodo de esgoto e de nitrogênio mineral.

A produtividade máxima de colmos estimada pelo modelo estatístico foi de 83 t ha^{-1} , na condição da aplicação de 105 t ha^{-1} de composto, com a complementação de 40 kg ha^{-1} de N, via adubo mineral, sem a necessidade da adição do fósforo mineral. De acordo com o modelo estatístico para obter a mesma produção de colmos do tratamento com aplicação de adubo mineral de modo convencional, a dose de composto de lodo de esgoto a ser aplicada seria de $51,2 \text{ t ha}^{-1}$, com redução de 100% do adubo mineral nitrogenado. Entretanto, aplicando a dose máxima de composto utilizada no experimento, na terceira soca, $23,3 \text{ t ha}^{-1}$, sem complementação com nitrogênio mineral, a produtividade seria de 64 t ha^{-1} , valor inferior ao obtido no tratamento NPK, que foi de 70 t ha^{-1} . Portanto, a dose máxima de composto aplicada na terceira soca não seria suficiente para fornecer 100 % do N recomendado para a cultura.

No primeiro ano do experimento, segunda cana-soca, a dose máxima de composto de lodo de esgoto foi suficiente para suprir a dose de N requerida pela cultura da cana-de-açúcar, sem a necessidade de complementação com o adubo mineral nitrogenado, obtendo a mesma produtividade do tratamento com adubo mineral convencional.

Entretanto, na reaplicação do composto, terceira soca, não foi constatado efeito semelhante. O composto de lodo de esgoto, mesmo quando aplicado na maior dose ($23,3 \text{ t ha}^{-1}$), não disponibilizou todo o N requerido pela cultura. O N disponibilizado pelo composto não foi suficiente para obter a mesma produtividade do tratamento NPK, sem a necessidade de complementação com o adubo mineral nitrogenado. O composto de lodo de esgoto se mostrou ineficiente quanto ao potencial de mineralização do N remanescente do composto aplicado no ano anterior.

Embora, o composto de lodo de esgoto seja mais seguro por ser mais higienizado e ter menor concentração de metais, além de ter maior teor de sólidos e ser mais facilmente aplicado, é agronomicamente menos eficiente que o lodo, pois, durante o processo de compostagem ocorre a diluição dos metais e também dos nutrientes (CORRÊA et al., 2005; KHALIL et al., 2011).

De acordo com Titarelli et al. (2000), para ajustar as doses de composto a serem aplicadas, baseando-se nos teores de N dos fertilizantes nitrogenados, deve-se considerar o N inorgânico e mineralizado que já estavam no solo devido às aplicações anteriores. Levando em consideração esses fatores, estima-se o N disponível do composto no primeiro ano de aplicação como 30-35 % do N total. Parte do N remanescente do composto pode ser mineralizado ficando disponível para às plantas nos dois anos seguintes, em taxas decrescentes.

Em experimentos realizados com resíduos urbanos compostados, os efeitos relatados em relação à disponibilização do N, não tem sido os mesmos em relação ao lodo, por exemplo. Enquanto, alguns estudos demonstram que compostos de resíduos urbanos aumentam o conteúdo do N do solo, outros, relatam que esses compostos tendem, geralmente, a ser menos efetivo no suprimento do N, no primeiro ano de aplicação, do que os fertilizantes minerais (HARGREAVES; ADL; WARMAN, 2008; CORRÊA et al., 2010).

Dois fatores que devem ser considerados em relação à aplicação do composto de lodo de esgoto é que, o composto tem menor teor de N do que o lodo, e o segundo é que o composto tem a menor taxa de mineralização do N total em relação ao lodo, por isso, o uso agrícola do composto com base no critério do N pode ser economicamente inviável. Também deve-se atentar para o fato de que a aplicação de doses muito elevadas de composto pode

levar à lixiviação do N no solo. Contudo, o composto pode ter mais teor (relativo) de P e K e outros macro e micronutrientes, cuja eficiência precisa ser mais bem estudada e avaliada.

Na reaplicação do composto, não foi constatado efeito do fósforo mineral na produtividade de colmos. A falta de resposta observada em relação ao adubo mineral fosfatado deve-se, principalmente, ao efeito residual do fósforo mineralizado do composto aplicado no ano anterior, segunda soca. Os teores de P no solo observados aos 30 dias após a aplicação do composto, segunda soca (Capítulo 4, Figura 4) aumentaram em relação aos teores iniciais. Após a colheita da segunda soca, os teores de P no solo permaneceram elevados (Capítulo 4, Figura 5), suprimindo a necessidade de P da soca subsequente.

Em função dos resultados obtidos e do modelo de superfície de reposta para produtividade de colmos de cana-soca foi elaborada tabela referente às diferentes taxas de mineralização de composto de lodo de esgoto para reaplicação em área de soqueira, com complementação ou não de adubação mineral nitrogenada (Tabela 4). A tabela é válida para cana-soca cultivada por 10 meses e áreas onde o composto de lodo de esgoto será reaplicado, levando em consideração que as doses utilizadas na primeira aplicação foram baseadas no critério do nitrogênio (CONAMA, 2006). E para solos com teores médios de fósforo (16 a 40 mg dm⁻³) e de potássio (0,8 a 1,5 mmol_c dm⁻³) e produtividade relativa esperada de 100% equivalente a 70 t ha⁻¹, ou seja, a produtividade obtida no tratamento com adubo mineral convencional. Verifica-se que à medida que se diminui a taxa de mineralização do composto, aumenta-se a necessidade de complementação do fertilizante mineral nitrogenado ou a dose de composto a ser aplicada.

Tabela 4. Modelagem com diferentes taxas de mineralização de composto de lodo de esgoto para reaplicação em área de soqueira, com complementação ou não de adubação mineral nitrogenada, considerando solo com teores médios de fósforo (16 a 40 mg dm^{-3}) e de potássio ($0,8$ a $1,5 \text{ mmolc dm}^{-3}$) e produtividade relativa esperada de 100% equivalente a 70 t ha^{-1} , ou seja, a produtividade obtida no tratamento com adubo mineral convencional NPK, aplicado de modo convencional., para cana-soca cultivada por 10 meses sob condições convencionais de manejo

⁽¹⁾ Composto de lodo de esgoto t ha^{-1}	N ----- kg ha^{-1}	P_2O_5 ----- kg ha^{-1}	K_2O ----- kg ha^{-1}	Produtividade relativa estimada ----- % -----
0	135	54	108	100
15	89	0	108	99
23,3	89	0	108	101
40	135	0	108	100
50	0	0	108	99,6
60	44,6	0	108	108
78	0	0	108	108

⁽¹⁾A dose de 100% de composto de lodo de esgoto equivale à taxa de aplicação do composto de lodo de esgoto, em t ha^{-1} , que é definida pelo quociente entre a quantidade de nitrogênio recomendada para a cultura, em kg ha^{-1} , conforme Boletim 100 (Spironello et al., 1996), e teor estimado de nitrogênio disponível, em g kg^{-1} , em base seca.

De acordo com o estudo de modelagem, as doses de composto de lodo de esgoto considerando taxas de mineralização do N superior a 15% , não são suficientes para suprir e substituir o N requerido pela cultura. No presente estudo foram consideradas taxas de mineralização teóricas do N de 30 , 50 e 100% , as quais foram estipuladas visando redução de custos com fertilizantes minerais, e, ou, diminuir a quantidade de composto a ser aplicada, levando em consideração o valor do frete para o transporte do composto da empresa gerenciadora para a área do experimento. Com esse objetivo taxas maiores de mineralização do N foram consideradas. Porém, na prática, o resultado obtido não foi o esperado e constatou-se que o composto de lodo de esgoto apresenta baixa taxa de mineralização do N e requer doses elevadas na reaplicação para substituir os adubos nitrogenados no cultivo da cana-soca. Portanto, o uso do composto em substituição ao adubo nitrogenado precisa ser mais bem estudado em relação às respectivas doses e custos de cada um.

Toneladas de açúcar por hectare

Os dados médios de produtividade de açúcar da cana-soca (TAH), em função das doses de composto de lodo de esgoto, de nitrogênio e de fósforo, variaram de 10,1 a 12,8 t ha⁻¹ (Tabela 5). No tratamento com adubação mineral a produtividade de açúcar foi de 11,8 t ha⁻¹.

Houve efeito das doses de composto de lodo de esgoto e nitrogênio sobre a produção de açúcar (Figura 7). Não foi observado efeito da adição do P mineral na TAH. Foram observados efeitos lineares e quadráticos, conforme a equação: $TAH = 9,98 + 0,25 C + 0,018 N - 0,0005 CN - 0,0084 C^2 - 0,00008 N^2$; ($R^2 = 0,33$; $p < 0,01$).

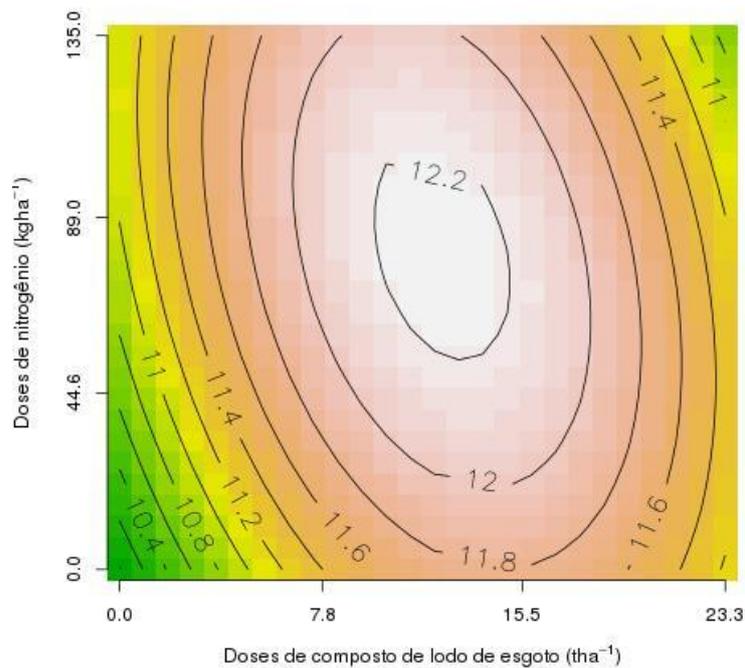


Figura 7 - Produtividade média de açúcar (toneladas de colmos por hectare – TAH) da cana-soca, em área de reaplicação de composto de lodo de esgoto, em função das doses de composto de lodo de esgoto e de nitrogênio mineral.

A produtividade máxima de açúcar estimada pelo modelo estatístico foi de 12,2 t ha⁻¹, na condição da aplicação de 12,9 t ha⁻¹ de composto, com a complementação de 63,2 kg ha⁻¹ de N, via adubo mineral, sem a necessidade da adição de fósforo.

Substituindo as doses máximas de composto, 23,3 t ha⁻¹, e nitrogênio, 135 kg ha⁻¹, na equação de superfície de resposta obteve-se a produtividade de 10,5 t ha⁻¹ de açúcar. Portanto, a dose máxima de composto aplicada não seria suficiente para fornecer a mesma produtividade de açúcar obtida no tratamento com adubo mineral convencional que foi de 11,8 t ha⁻¹.

Tabela 5. Produtividade de açúcar (TAH) da cana-soca (t ha⁻¹), terceira soca, em função das doses de composto de lodo de esgoto, nitrogênio e fósforo.

Lodo de esgoto	Nitrogênio	Fósforo, kg ha ⁻¹ P ₂ O ₅	
		0	54
t ha ⁻¹	kg ha ⁻¹	t ha ⁻¹	
0	0	13,0	13,1
	44,6	13,0	14,1
	89	13,6	14,7
	135	13,7	14,4
23	0	13,7	13,9
	44,6	12,7	13,5
	89	14,7	16,0
	135	14,5	14,6
15,5	0	15,2	13,3
	44,6	14,7	15,6
	89	15,1	16,0
	135	15,1	15,9
7,8	0	14,0	15,0
	44,6	15,2	15,1
	89	15,3	15,8
	135	16,1	15,9

Açúcares redutores

Os teores de AR encontrados no segundo ano de cultivo variaram de 0,55 a 0,67%. No tratamento fertilização mineral o valor encontrado foi de 0,62 %. Houve efeito das doses de N mineral sobre os teores de AR (Figura 8). Não foi observado efeito das doses de composto de lodo de esgoto, porém houve efeito do fósforo mineral nos teores de AR.

De acordo com o modelo de superfície de resposta houve efeito linear e quadrático, segundo a equação: $AR \% = 0,554 - 0,0008 N - 0,000004 N^2 + 0,014$; ($R^2 = 0,33$; $p < 0,001$), equação válida na presença de fósforo mineral.

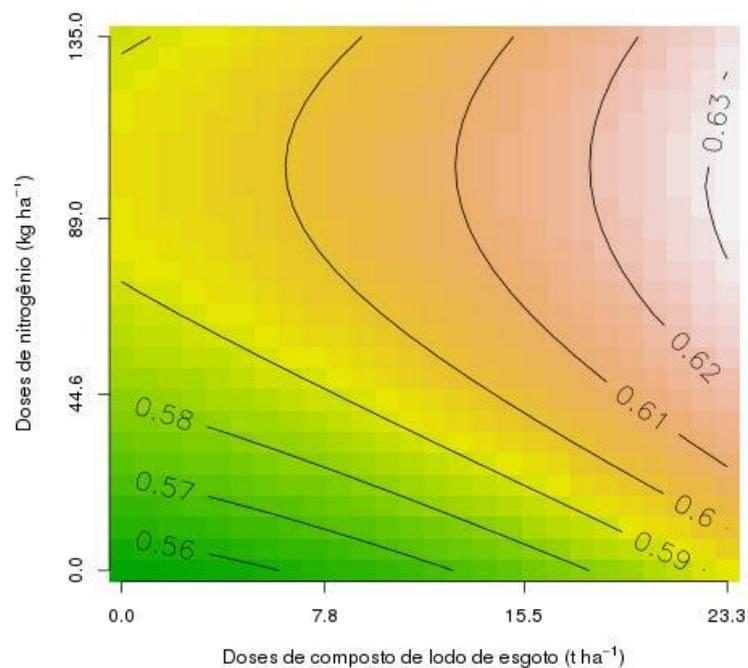


Figura 8 – Teores açúcares redutores (%) da cana-soca, em área de reaplicação de composto de lodo de esgoto, em função das doses de composto de lodo de esgoto e de nitrogênio mineral, na presença de fósforo mineral.

O conteúdo de AR na cana é uma das variáveis tecnológicas que é utilizado como indicativo de qualidade. Elevados teores de AR são encontrados na cana-de-açúcar quando esta ainda não se encontra madura, isto é, não apresenta os requisitos mínimos para ser colhida e processada. Segundo Marques et al. (2001), o valor de AR na cana no início de

safra, pode ser de até 1,5 %, porém, não deve ultrapassar 1% no transcorrer da safra. Portanto, os teores de AR apresentados estão dentro dos parâmetros de qualidade da cana.

Alguns autores tem reportado efeitos deletérios na qualidade da cana-de-açúcar quando foram aplicadas doses elevadas de fertilizantes nitrogenados (SILVEIRA; CROCOMO, 1981), causando atraso no processo de maturação e decréscimo no acúmulo de sacarose (SILVEIRA; CROCOMO, 1990; KORNDÖRFER et al., 2002).

Entretanto, há relatos em que a adição de fertilizantes nitrogenados no plantio da cana-planta melhorou a qualidade tecnológica do caldo. Os teores de todas as variáveis tecnológicas aumentaram em relação ao aumento das doses de N, exceto os teores de AR (FRANCO et al., 2010b).

Bertoncini, Mattiazzo e Rossetto (2004) aplicando lodo de esgoto (390 t ha^{-1}) em cana-de-açúcar cultivada em vasos com amostras de Latossolo Vermelho, obtiveram efeitos depreciativos na qualidade da cana-de-açúcar, com o aumento no teor de açúcares redutores e redução da quantidade de fibras. Nesse estudo as doses de lodo aplicadas foram bastante elevadas e a cana foi colhida precocemente aos 10 meses após o plantio, o que pode ter favorecido o baixo acúmulo de sacarose e elevado conteúdo de açúcares redutores.

Pol da cana

Quanto aos valores da Pol da cana em função das doses de composto, nitrogênio e fósforo variaram de 16,4 a 17,8 %. No tratamento fertilização mineral o valor encontrado foi de 17,3 %. Segundo dados do PMGCA/UFSCar (Programa de Melhoramento Genético da Cana-de-açúcar da UFSCar) o valor médio da Pol da cana obtido para a mesma variedade do presente estudo na terceira soca (quarto corte) é de 15,8 %. Os valores encontrados da Pol cana % estão acima do esperado para essa cultivar.

A aplicação do composto afetou significativamente os valores da Pol cana (Figura 9). Foi observado efeito linear das doses de composto sobre os teores da Pol cana, segundo a equação: $\text{Pol cana (\%)} = 21,21 - 0,25 C$; ($R^2 = 0,12$; $p < 0,05$). Os teores da Pol da cana variaram de 16,3 a 17,8 %, e no tratamento com adubo mineral convencional o teor foi de 17,3. Os tratamentos que receberam as maiores doses de composto obtiveram os menores valores de Pol cana.

A produtividade de açúcar está relacionada à Pol cana e à pureza do caldo. A qualidade tecnológica dos colmos pode ser influenciada pela aplicação do adubo nitrogenado,

pois, tanto o excesso quanto a deficiência pode alterar os parâmetros de qualidade (VITTI et al., 2008).

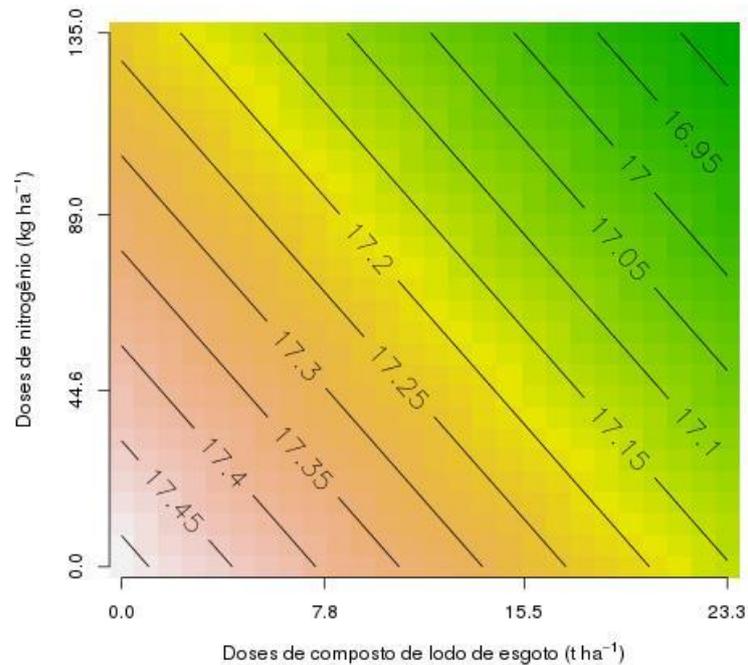


Figura 9 - Pol cana (%), da cana-soca, terceira soca, em área de reaplicação de composto de lodo de esgoto, em função das doses de composto de lodo de esgoto e de nitrogênio mineral.

Açúcares redutores totais

Os valores de açúcares redutores totais (ART %) caldo foram afetados significativamente pelas doses de composto de lodo de esgoto e de nitrogênio mineral (Figura 10), variando de 11,3 a 14,8 %. No tratamento fertilização mineral o valor encontrado foi de 13,4 %. Não foi observado efeito do adubo fosfatado nos teores de ART. Foi observado efeito linear, segundo a equação: $\text{ART caldo (\%)} = 12,41 + 0,03 \text{ C} + 0,005 \text{ N}$; ($R^2 = 0,10$; $p < 0,1$).

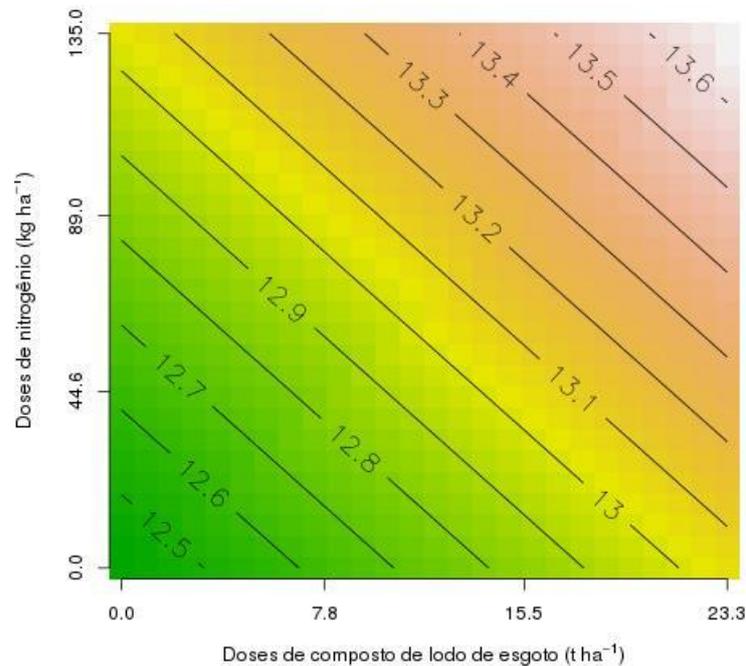


Figura 10 - ART (%) da cana-soca, em área de reaplicação de composto de lodo de esgoto, em função das doses de composto de lodo de esgoto e de nitrogênio mineral.

Considerando que o ART corresponde a todos os açúcares presentes na cana, os resultados de ART obtidos corroboram com os encontrados por Santos et al. (2011), que, avaliaram diferentes doses de adubo mineral fosfatado e torta de filtro na adubação da cana-de-açúcar e verificaram valores superiores nos teores de ART nos tratamentos com torta e P_2O_5 em comparação à testemunha.

Açúcar total recuperável

Os valores de ATR encontrados no segundo ano de cultivo variaram de 164,1 a 173,8 kg t⁻¹. No tratamento FM o valor obtido foi de 169,2 kg t⁻¹. As doses de N mineral afetaram significativamente os teores de ATR, enquanto nenhum efeito foi constatado pelas doses de composto e do adubo fosfatado. Houve efeito linear, segundo a equação: $ATR = 172,43 - 0,02 N$; ($R^2 = 0,14$; $p < 0,05$).

De acordo com a equação de superfície de resposta foi observado que os teores de ATR diminuíram em relação às doses de nitrogênio. Foi constatada ausência de resposta do composto. Pode-se deduzir que em concentrações maiores de matéria orgânica e nitrogênio

houve atraso no processo de maturação. Porém, a variação observada nos teores de ATR, nesse caso, foi pouco expressiva.

3.4 Conclusões

Para primeira aplicação de composto de lodo de esgoto em cana-soca, a taxa de aplicação do composto com base no critério do N, considerando a taxa de mineralização de 10 % do N total, é adequada para suprir o N requerido pela cultura da cana-de-açúcar, substituindo plenamente a necessidade do adubo mineral nitrogenado.

Para primeira aplicação de composto de lodo de esgoto em cana-soca, a taxa de aplicação do composto com base no critério do N, considerando a taxa de mineralização de 10 % do N total, é adequada para suprir parcialmente o P requerido pela cultura da cana-de-açúcar, substituindo parcialmente a necessidade do adubo mineral fosfatado.

Para reaplicações de composto de lodo de esgoto em área de cana-soca, já tratada com composto, utilizando taxas de mineralização superiores aquela do CONAMA, não são suficientes para substituir a necessidade do adubo mineral nitrogenado.

O composto de lodo de esgoto não altera as características tecnológicas da cana-soca.

4 CANA-SOCA CULTIVADA COM COMPOSTO DE LODO, NITROGÊNIO E FÓSFORO: EFEITOS NA FERTILIDADE DO SOLO E NO ESTADO NUTRICIONAL

RESUMO

O composto de lodo de esgoto, classificado como fertilizante orgânico Classe “D”, de acordo com a Instrução Normativa SDA nº 25 (Brasil, 2009), possui elevado teor de nitrogênio e fósforo e é fonte matéria orgânica. O presente trabalho avaliou os efeitos da aplicação e reaplicação de composto de lodo de esgoto e de fontes minerais de nitrogênio e fósforo sobre as propriedades químicas do solo e os teores de N e P da cana-soca. Na cana-soca de segundo corte foram aplicadas quatro doses de composto de lodo de esgoto (0; 27; 54; 82 t ha⁻¹, base seca, quatro de N (0, 30, 60 e 98 kg ha⁻¹) e duas de P₂O₅ (0 e 30 kg ha⁻¹); na soqueira de terceiro corte foram aplicadas quatro doses de composto de lodo de esgoto (0; 23,3; 15 e 7,8 t ha⁻¹, base seca), quatro de N (0; 44,6; 89 e 135 kg ha⁻¹) e duas de P₂O₅ (0 e 54 kg ha⁻¹), em delineamento em blocos casualizados, em esquema fatorial, com três repetições. Foram aplicados 77 e 108 kg ha⁻¹ de K₂O, segunda e terceira soca, respectivamente, em todas as parcelas. As doses do composto de lodo de esgoto resultou em incrementos nos teores de N total, C-orgânico, P, pH, Ca, K, soma de bases e capacidade de troca catiônica do solo, em relação ao controle absoluto. Quanto aos teores de N e P nas soqueiras, de modo geral, não houve efeito dos tratamentos, exceto quanto ao teor de N na terceira soca que foi crescente em função das doses de N mineral.

Palavras-chaves: Compostagem de resíduos urbanos. Disponibilidade de nutrientes. Lodo de esgoto. *Saccharum* spp.

ABSTRACT

The sewage sludge compost classified as organic fertilizer "D" Class, according to the SDA Normative n^o 25 (Brazil, 2009), have a high level of nitrogen and phosphorus and is an organic matter source. This study evaluated the effects of application and reapplication of sewage sludge compost and mineral sources of nitrogen and phosphorus on soil chemical properties and the N and P levels of ratoon cane. In second cane ratoon were applied four doses of: sewage sludge compost (0, 27, 54, 82 t ha⁻¹, dry basis) and N (0, 30, 60 and 98 kg ha⁻¹) and two doses of P₂O₅ (0 and 30 kg ha⁻¹), the reapplication in the third cane ratoon were applied four doses of: sewage sludge compost (0, 23.3, 15 and 7.8 t ha⁻¹, dry basis) and N (0, 44.6, 89 and 135 kg ha⁻¹) and two doses of P₂O₅ (0 and 54 kg ha⁻¹), in a randomized block design in a factorial design with three replications. On all plots were applied 77 and 108 kg ha⁻¹ of K₂O in the second and third ratoon respectively. The sewage sludge compost application rate increased N total, organic carbon, P, pH, Ca, K, bases sum and cation exchange capacity soil contents in relation to the control treatment. The N and P ratoon content, altogether, there wasn't effect on the treatments, except for the N content in the third ratoon that increased in function of N fertilizer.

Keywords: Urban waste composting. Nutrients availability. Sewage sludge. *Saccharum* spp.

4.1 Introdução

A utilização de compostos orgânicos na agricultura tem sido uma alternativa eficaz na reciclagem dos nutrientes, contribuindo com o aumento da fertilidade dos solos devido ao seu elevado teor de matéria orgânica e nutrientes. As condições de clima tropical favorecem a degradação do conteúdo orgânico (OLIVEIRA et al., 2002), disponibilizando nutrientes, principalmente o nitrogênio, constituinte de maior valor agrícola dos resíduos orgânicos, em geral (CORRÊA et al., 2010).

Os fertilizantes orgânicos compostados produzidos a partir de lodo de esgoto, como matéria-prima, são passíveis de registro do produto, sendo classificados como fertilizantes orgânicos Classe “D”, de acordo com as Instruções Normativas da Secretaria de Defesa Agropecuária nº 25, do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (Mapa) (BRASIL, 2009).

Uma das culturas mais aptas a receber o composto de lodo de esgoto é a cana-de-açúcar, pois, além de ser uma cultura de grande interesse econômico para o Brasil, não é consumida “in natura” e é cultivada muito próxima aos centros urbanos. As respostas da cana-de-açúcar à adubação nitrogenada, em relação à produtividade, são variáveis para a cana-planta e relativamente homogêneas para a soqueira (CARNAÚBA, 1990). Segundo Zambelo Júnior e Orlando Filho (1981), as soqueiras de cana-de-açúcar apresentam maiores possibilidades de respostas positivas ao adubo nitrogenado que a cana-planta.

Em relação à adição do adubo mineral fosfatado às socas, tem-se verificado ausência de efeito na produtividade, ao contrário do que ocorre com o nitrogênio (ALEXANDER, 1973). A ausência de resposta da cana-soca ao fósforo está ligada ao fato de que a incorporação do fertilizante na soqueira é bem mais dificultada. O fósforo sendo um elemento pouco móvel permanece longe do alcance das raízes, e o sistema radicular nas socas é mais profundo, porém pouco volumoso (ROSSETTO et al., 2008). O fósforo orgânico proveniente de resíduos orgânicos tem-se mostrado mais disponível que quando fornecido na forma mineral, isso se deve à decomposição do material orgânico, que resulta em ácidos orgânicos que são adsorvidos pelo solo, ocupando sítios de adsorção de fosfato e aumentando a disponibilidade do elemento (McDOWELL; SHARPLEY, 2001; ANDRADE et al., 2003).

A aplicação de composto de lixo aumenta os teores de carbono orgânico do solo, melhorando suas propriedades químicas, físicas e biológicas (OLIVEIRA et al., 2002; PEDRA et al., 2007). Abreu Junior, Muraoka e Oliveira (2002) observaram incrementos nos

teores de carbono orgânico, em 21 solos ácidos, que variaram de 4 a 35% e de 8,6 e 34% em cinco solos alcalinos, após a aplicação de 60 t ha⁻¹ de composto de lixo. Os autores observaram que existe uma variação no potencial de cada solo para promover a degradação da carga orgânica do resíduo. Caso não haja uma frequência adequada de aplicações, em alguns tipos de solos tropicais, os efeitos da aplicação do composto de lixo sobre os teores de carbono orgânico do solo podem ser de curta duração.

Segundo Abreu Junior, Muraoka e Oliveira (2002), a aplicação do composto de lixo em solos ácidos promoveu aumentos nos teores de K, Ca, Mg e Na, em média de 195 %, 200 %, 86 % e 1200 %, respectivamente, em relação ao controle, com ou sem adubo NPK.

A aplicação de composto de resíduo sólido urbano parece ser um dos principais responsáveis pelo aumento do pH em solos ácidos (ABREU JUNIOR et al., 2000; OLIVEIRA et al., 2002). O incremento do valor de pH é diretamente proporcional à capacidade de consumo de prótons, à soma de cátions trocáveis (WONG et al., 1998), e à quantidade e qualidade da matéria orgânica adicionada aos solos pelo material orgânico (ESCUADERO et al., 2012).

Os compostos de lodo de esgoto para serem utilizados de maneira segura em solos agrícolas a matéria orgânica base deve ser transformada e estabilizada (BARREIRA et al., 2009), deve-se atentar para relação C:N final dos compostos, o composto maduro apresenta elevado conteúdo de nitrato em relação ao amônio. O nitrogênio nos compostos maduros está presente em formas mais estáveis e associado à matéria orgânica estabilizada, diminuindo sua liberação e os riscos de lixiviação do nitrato no perfil do solo (BARREIRA et al., 2009; ESCUDERO et al., 2012).

O presente trabalho visou avaliar os efeitos da aplicação de composto de lodo e de fontes minerais de nitrogênio e fósforo sobre as propriedades químicas do solo e o estado nutricional da segunda e terceira cana-soca, com reaplicação do composto e adubos minerais.

4.2 Material e Métodos

O experimento foi realizado em área de produção comercial de cana-de-açúcar, no município de Rio das Pedras, Estado de São Paulo, Brasil. O clima no município de Rio das Pedras é do tipo Cwa (Classificação de Köppen), tropical úmido, com inverno seco e verão quente e úmido. A precipitação pluvial foi de 1.439 mm e de 1.679 mm nos períodos de

novembro de 2009 a outubro de 2010 e de dezembro de 2010 a outubro de 2011 respectivamente, conforme registros da Usina Santa Helena, Grupo RAÍZEN S/A.

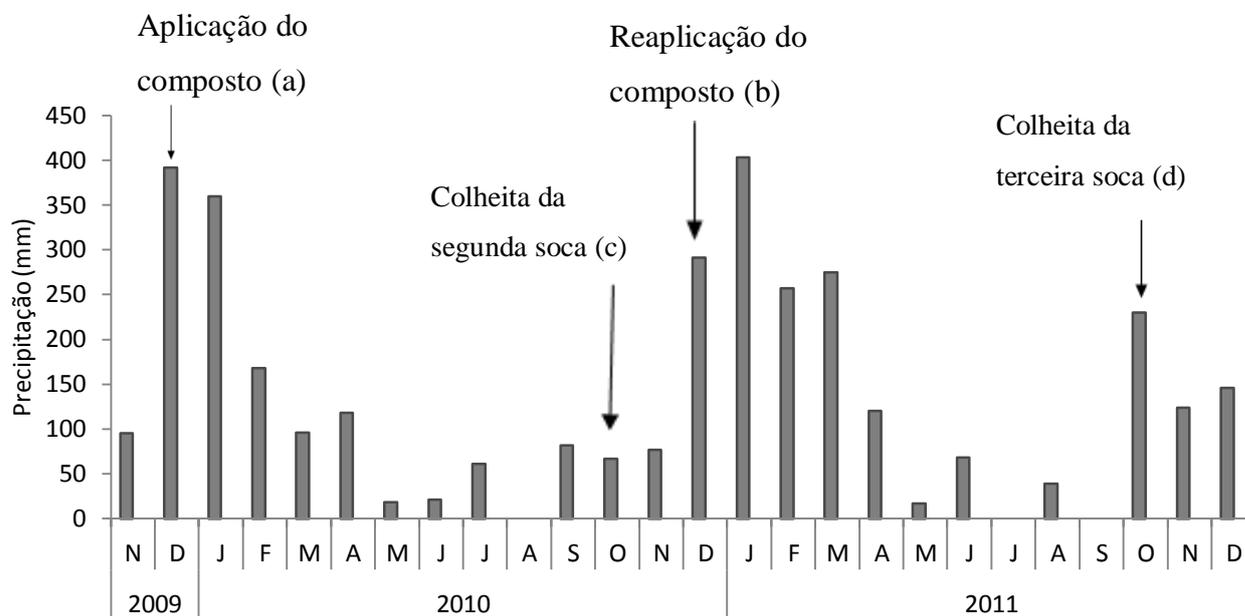


Figura 1 - Valores mensais de precipitação pluviométrica (P) acumulada, ao longo do experimento com aplicação (a) e reaplicação (b) de composto de lodo de esgoto em cana-soca, segunda soca (c) e terceira soca (d).

O solo onde foi instalado o experimento é classificado como Latossolo Vermelho-Amarelo (EMBRAPA, 2006). A amostragem do solo para fins de caracterização química foi feita previamente à instalação do experimento, em setembro de 2009 (Tabela 1), conforme os protocolos analíticos descritos em Raij et al. (2001).

Tabela 1 – Caracterização química do solo da área experimental, para avaliação da fertilidade, antes da aplicação do composto de lodo de esgoto (setembro de 2009).

Profundidade m	pH CaCl ₂	P mg dm ⁻³	K	Ca	Mg	Al	H+Al	SB	T	V
			----- mmol _c dm ⁻³ -----							%
0-0,2	4,4	7	1	12	10	5	47	23	70	50
0,2-0,4	4,3	3	0,5	12	11	3	58	23	81	47

Foi utilizado um composto de lodo de esgoto produzido por meio da compostagem do lodo sanitário com bagaço de cana-de-açúcar, na proporção 1:1 (1 m³ de torta de lodo com 18% de sólidos com 1 m³ de bagaço de cana com 70% de sólidos). O lodo de esgoto utilizado na compostagem foi obtido da Estação de Tratamento de Esgoto de Jundiaí, operada sob regime de concessão pela Companhia Saneamento de Jundiaí, em Jundiaí, SP. Esse resíduo é gerado em sistema biológico de lagoas aeradas, de mistura completa, seguidas de lagoas de sedimentação, resultando em um lodo com teor de matéria orgânica em sólidos secos menor que 70%. Na sequência, o lodo é condicionado com polímeros, centrifugado e seco ao ar por 120 dias, com revolvimento mecânico periódico das pilhas, para redução significativa de agentes patogênicos e obtenção de material com até 25% de sólidos.

O composto utilizado em outubro de 2009 foi aditivado com gesso agrícola. E o produto utilizado em outubro de 2010 recebeu calcário dolomítico. Em ambos os casos a quantidade adicionada foi cerca de 50 a 70 kg de gesso ou calcário para cada tonelada de fertilizante orgânico composto.

O composto de lodo de esgoto foi caracterizado conforme recomendado pela Resolução nº 375 (CONAMA, 2006). No primeiro ano experimental, iniciado em 17/10/2009, o composto de lodo de esgoto aplicado apresentou umidade de 57,7 % (m/m) e valor de pH, medido em água, de 5,0. Os teores totais (base seca) de C-org, N total, N amoniacal, N nitrato/nitrito, P, K, Ca, Mg, S, e de Na foram, em g kg⁻¹, de 248; 12; 0,5; 0,03; 4,0; 1,13; 55,1; 1,0; 21,9; 0,7, respectivamente. No segundo ano experimental, iniciado em 29/12/2010, o composto utilizado apresentou umidade de 46,2 % (m/m) e valor de pH, medido em água, de 7,4. Os teores totais (base seca) de C-org, N total, N amoniacal, N nitrato/nitrito, P, K, Ca, Mg, S, e de Na foram, em g kg⁻¹, de 175; 19,1; 1,8; 0,02; 7,9; 2,6; 14,1; 2,9; 15,6; 1,2, respectivamente.

O cultivar de cana-de-açúcar utilizado foi o RB85 5002, obtido a partir do cruzamento entre os cultivares NA56-79 e SP70-1143.

O experimento foi instalado em área de segunda soqueira (terceiro corte), em 17 de novembro de 2009. A colheita do ano anterior (primeira soca) foi realizada mecanicamente em 24 de outubro de 2009, e a produtividade média de colmos estimada, segundo dados da Usina Santa Helena, foi de 85 t ha⁻¹.

Cada parcela foi constituída por seis linhas de cana-de-açúcar, com 20 m de comprimento, espaçadas em 1,30 m, com área total de 156 m². Como área útil foi considerada as quatro linhas centrais, descontando-se 2,0 m em cada extremidade das linhas. Devido à colheita mecanizada da soqueira no ano anterior, toda palhada permaneceu no local. Assim, a

cada duas ruas, a palhada foi enleirada na terceira rua, ou seja, em cada parcela, havia um colchão de palha na rua central onde não foi possível aplicar o composto, contudo foram aplicados os adubos minerais. O espaçamento entre as linhas de cana era de 1,30 m, porém o recomendado e adotado para áreas onde a colheita é mecanizada é de 1,50 m.

Os tratamentos constituíram-se em quatro doses de composto de lodo de esgoto, quatro doses de nitrogênio e duas doses de fósforo, que foram aplicados em dezembro de 2009. O composto de lodo de esgoto, na base seca, foi aplicado em superfície nas doses de 0; 27; 54 e 82 t ha⁻¹, equivalentes a 0, 33, 66 e 100% do recomendado pelo critério de fornecimento do nitrogênio, foi considerada taxa de mineralização de 10%, conforme Resolução n° 375 (CONAMA, 2006), para lodos compostados. O N, na forma de ureia, foi aplicado nas doses de 0, 32,3; 65 e 98 kg ha⁻¹ de N, equivalentes a 0, 33, 66 e 100% do recomendado para a área experimental, e o fósforo (P), na forma de superfosfato triplo, nas doses de 0 e 30 kg ha⁻¹ de P₂O₅, equivalentes a 0 e 100% do recomendado. Foi aplicado potássio em todas as parcelas na dose de 77 kg ha⁻¹ de K₂O, na forma de cloreto de potássio.

Após a aplicação do composto do lodo de esgoto foi realizado cultivo na área na camada de 0-20 cm de profundidade. Nos dois anos do experimento o composto de lodo de esgoto foi aplicado por meio de máquina agrícola, a mesma utilizada na aplicação de torta de filtro, gesso, calcário em áreas de cultivo de cana-de-açúcar. Os adubos minerais foram aplicados manualmente em todas as linhas de cada parcela.

Em 29 de dezembro de 2010, o composto de lodo de esgoto foi reaplicado nas parcelas da área experimental. A literatura, de um modo geral, sugere que as aplicações sucessivas devem levar em consideração a taxa de mineralização do resíduo nos anos seguintes. Desta forma, na reaplicação, foram consideradas taxas de mineralização teóricas de 100, 50 e 30%, o que propiciou doses de 7,8; 15 e 20 t ha⁻¹ de composto e que foram aplicadas, respectivamente, nas parcelas que receberam 82, 54 e 27 t ha⁻¹ no ano anterior quando iniciou-se o experimento.

As doses de nitrogênio aplicadas no segundo ano experimental, na forma de nitrato de amônio, foram: 0; 44,6; 89 e 135 kg ha⁻¹, e as doses de fósforo, na forma de super triplo foram: 0 e 54 kg ha⁻¹ de P₂O₅. Foi aplicado potássio em todas as parcelas na dose de 108 kg ha⁻¹ de K₂O, na forma de cloreto de potássio.

As doses recomendadas de N e K₂O foram estabelecidas com base na dose utilizada pela usina, responsável pelo plantio na área, de 350 kg ha⁻¹ da fórmula 28-00-22, para a segunda soqueira e de 300 kg ha⁻¹ da fórmula 00-18-36 e 135 kg N ha⁻¹ para a terceira soca.

A reaplicação do composto foi realizada 68 dias após a colheita da soca anterior, e a adubação das parcelas foi realizada em fevereiro de 2011. O atraso na adubação foi devido às intensas chuvas no período.

A colheita do primeiro experimento foi realizada mecanicamente em 11 de outubro de 2010, e a do segundo experimento em 03 de outubro de 2011. A produtividade da cana-de-açúcar, em $t\ ha^{-1}$, foi avaliada utilizando-se um caminhão de transbordo contendo célula de carga que pesava a cana colhida.

Para avaliação da fertilidade do solo as amostras de solo foram coletadas na camada de 0-0,1; 0,1-0,2; 0,2-0,4 e 0,4-0,6 m de profundidade, aos 30 e 330 dias após a aplicação do composto de lodo de esgoto, durante o período de cultivo da segunda soca. Cada amostra, uma por parcela, foi composta de oito subamostras coletadas entre 5 a 10 cm ao lado da linha de plantio e nas entrelinhas. As amostras foram secas ao ar, peneiradas (1 mm de abertura de malha), homogeneizadas e caracterizadas. Foram determinados os teores de P-total (resina), N-total, C, K, Ca e Mg (RAIJ et al., 2001), e calculados valor de SB e T.

Para análise do estado nutricional das plantas as amostragens de folhas foram realizadas em abril de 2010 (período de cultivo da segunda soca) e em maio de 2011 (período de cultivo da terceira soca), coletando-se 15 folhas na segunda e na quinta linha central de cada parcela, separando-se os 0,2 m centrais da folha +1 (folha mais alta com colarinho visível – TVD), excluindo-se a nervura central. As amostras de folhas foram lavadas, secas em estufa a 40 °C e moídas (40 mesh).

A colheita do experimento, segunda soca, foi realizada mecanicamente em 11 de outubro de 2010, e a da terceira soca em 03 de outubro de 2011. Antes da colheita foram retirados dez colmos de cada parcela. Os colmos foram desintegrados e retirou-se duas subamostras, uma para análises químicas e outra, de 500 g, para as análises tecnológicas. As amostras de colmo foram secas em estufa 40 °C e moídas (40 mesh), e as amostras de caldo ficaram congeladas até o início das análises.

Foram determinados os teores de N e P nas amostras de folhas, colmo e caldo. O teor de nitrogênio nas amostras de folhas, colmo e caldo foi determinado pelo método de Kjeldahl, por titulação, após digestão com ácido sulfúrico (RAIJ et al., 2001).

O teor de P na folha foi determinado por colorimetria (MALAVOLTA; VITTI; OLIVEIRA, 1997) As amostras de colmo e caldo foram digeridas em sistema fechado de microondas, seguindo adaptações do método 3051 de solo da USEPA (USEPA, 2006) e de Wu, Feng e Wittmeier (1997) e Araújo et al. (2002), para determinação dos teores de P, por espectrometria de massa com plasma acoplado indutivamente com sistema octopolo de reação

(ICP-MS). Foram utilizados para as análises o caldo e o colmo obtidos após a prensagem do colmo desfibrado.

Para permitir o estudo dos efeitos das doses de composto, de N e de P sobre as variáveis dependentes por meio de superfície de resposta, o delineamento experimental foi o de blocos ao acaso, em esquema fatorial, 4x4 (4 doses de composto, 4 doses de N), com e sem P, com três repetições, totalizando 96 parcelas. Os dados foram submetidos à análise de variância pelo teste F para estudar os efeitos dos tratamentos doses de N (N), doses de P (P) e doses do composto (C). Os dados obtidos foram submetidos à análise de variância, modelo de regressão múltipla e ao estudo de modelagem de superfície de respostas, para obtenção das equações na ausência e na presença de fósforo, do tipo: $Y = a + bC + cN + dCN + eC^2 + fN^2 + G$, na qual C é a dose de composto ($t\ ha^{-1}$), N, a dose de nitrogênio ($kg\ ha^{-1}$), e G, é o fator que corresponde à dose de P_2O_5 ($kg\ ha^{-1}$). O fator G corresponde ao valor zero na condição de não aplicação de fósforo, ou quando não há efeito significativo do fator P.

Ao longo do texto, exceto quando explicitado, as doses de composto de lodo de esgoto em $t\ ha^{-1}$ referem-se à aplicação de material seco.

4.3 Resultados e discussão

Nitrogênio

Foi observado efeito significativo das doses de composto de lodo de esgoto sobre os teores de nitrogênio do solo, nas duas épocas de amostragens, aos 30 dias após a aplicação do composto e após a colheita da segunda soca.

Nas amostras de solos coletadas 30 dias após a aplicação do composto de lodo de esgoto, os maiores teores de N total do solo foram encontrados até a camada de 0,2 m. Na camada de 0,1-0,2 m os teores de N aumentaram em função das doses de composto de lodo de esgoto (Figura 2). Não foi observada influência do adubo mineral fosfatado sobre os teores de N total do solo. Foi encontrado ajuste ao modelo estatístico proposto, segundo a equação: $N\ (g\ kg^{-1}) = 1,024 + 0,0035\ N + 0,00003\ CN$; ($R^2 = 0,62$; $p < 0,01$). Nos tratamentos onde a maior dose de composto foi aplicada, $82\ t\ ha^{-1}$, o teor de N total aumentou 17 % em relação ao tratamento com adubo mineral convencional, os teores N do solo variaram de 0,99 a $1,54\ g\ kg^{-1}$.

Na camada de 0,2-0,4 m os teores de N total do solo variaram de 0,50 a 1,1 g kg⁻¹, e no tratamento com adubo mineral convencional o teor encontrado foi de 1,01. No tratamento que recebeu a dose de 82 t ha⁻¹ de composto o teor de N total (1,01 g kg⁻¹) foi semelhante àquele encontrado no tratamento NPK.

Na camada de 0,4-0,6 m os teores de N total variaram de 0,61 a 0,77 g kg⁻¹, no tratamento com adubo mineral convencional o teor encontrado foi de 0,72 g kg⁻¹.

A ausência de efeito do fósforo mineral nos teores de N total do solo demonstra que tanto na presença quanto na ausência de P os teores de N no solo não variam.

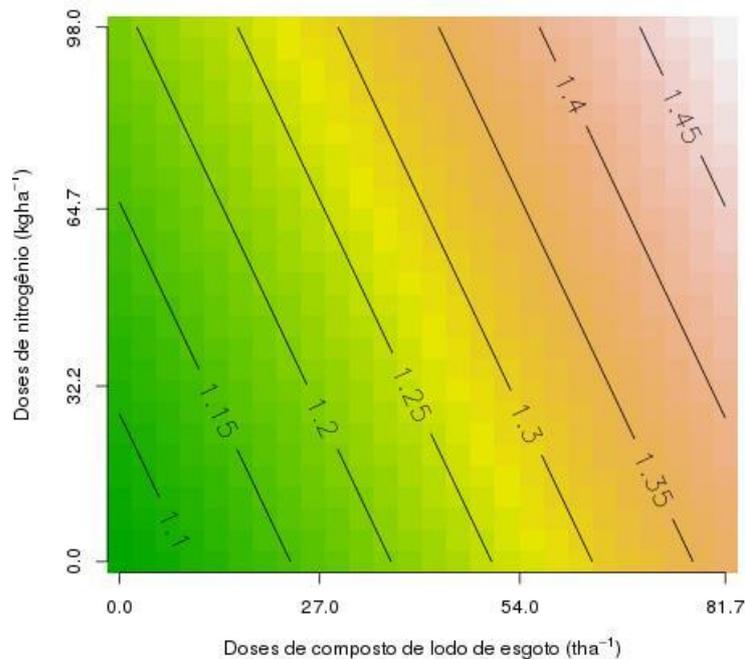


Figura 2 - Teores de N (g kg⁻¹) no solo cultivado com cana-soca, da camada de 01-0,2 m, segunda soca, aos 30 dias após a aplicação do composto de lodo de esgoto, em função de doses de composto de lodo de esgoto e de nitrogênio mineral.

Após a colheita da segunda soca os teores de N total do solo variaram em função das doses de composto de lodo de esgoto. Os maiores teores de N total foram encontrados na camada de 0-0,1 m e foi crescente em relação às doses de composto (Figura 3). Os teores de N do solo, na camada de 0-0,1 m, variaram de 1,0 a 1,5 g kg⁻¹ e no tratamento NPK o teor de N encontrado foi de 1,1 g kg⁻¹.

Foi observado efeito das doses de composto de lodo de esgoto sobre os teores de N do solo, e, interação entre as doses de composto e N mineral. Foi observado efeito linear, segundo a equação: $N \text{ solo} = 1,02 + 0,0026 C + 0,00001 CN$; ($R^2 = 0,70$; $p < 0,001$). Houve aumento de 36 % dos teores de N total no tratamento que recebeu a maior dose de composto (82 t ha^{-1}) em relação ao tratamento NPK. Após a colheita da segunda soca os teores de N total do solo diminuíram em relação aos teores observados aos 30 dias após a aplicação do composto.

Não foi observado efeito significativo dos tratamentos na camada de 0,1-0,2 m. Os teores de N variaram de 1,1 a $1,2 \text{ g kg}^{-1}$ e no tratamento NPK o teor de N encontrado foi de $1,1 \text{ g kg}^{-1}$.

Nas camadas de 0,2-0,4 m não foi observado efeito significativo entre os teores de N total do solo. Os teores de N total variaram de 0,74 a $1,05 \text{ g kg}^{-1}$. Na camada de 0,4-0,6 m os teores de N total não foram significativos em relação às doses de composto de lodo de esgoto, e variaram de 0,49 a $0,7 \text{ g kg}^{-1}$.

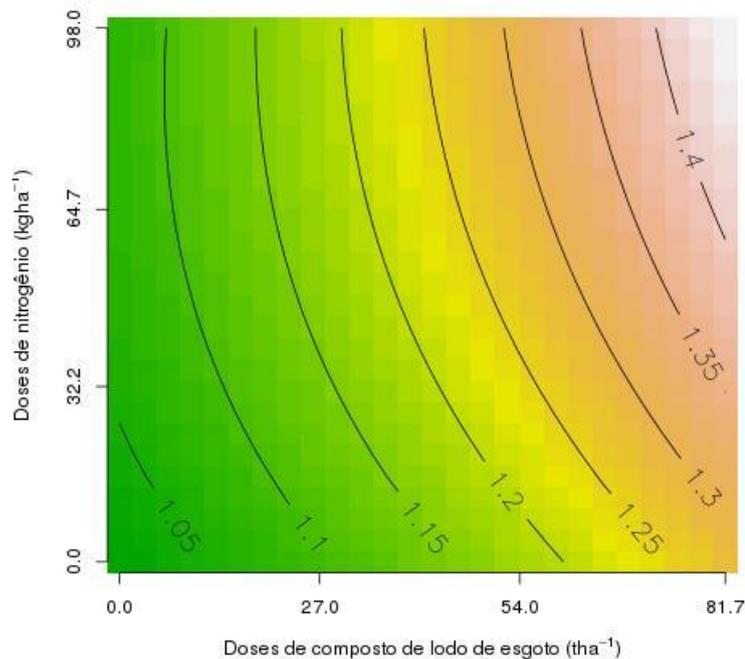


Figura 3 - Teores de N (g kg^{-1}) no solo cultivado com cana-soca, da camada de 0-0,1 m, segunda soca, aos 330 dias após a aplicação do composto de lodo de esgoto, em função de doses de composto de lodo de esgoto e de nitrogênio mineral.

O aumento nos teores de N total do solo observado aos 30 dias após a aplicação do composto foi resultado da mineralização da matéria orgânica do composto. O composto atua como fonte de matéria orgânica, proporcionando condições favoráveis para o desenvolvimento e aumento dos microrganismos decompositores no solo, os quais utilizam o carbono orgânico como fonte de energia e pelo processo de mineralização transforma o N orgânico em N mineral. O aumento nos teores de N total do solo não foi apenas produto da mineralização do N orgânico do composto, mas também do N nativo do solo e também do N mineral residual do composto aplicado anteriormente (DIACONO; MONTEMURRO, 2010). A decomposição gradativa de resíduos orgânicos aumenta a possibilidade de aproveitamento pelas plantas do N mineralizado, comparado ao adubo mineral prontamente solúvel (MARQUES et al., 1996).

Fósforo

Nas amostras de solos coletadas 30 dias após a aplicação do composto de lodo de esgoto, os maiores teores de P disponíveis, obtido pelo método da resina (RAIJ et al., 1987) do solo foram encontrados até a camada de 0-0,2 m, contudo, apenas na camada de 0,0-0,1 m houve diferença significativa entre os teores de P. Na camada de 0,0-0,1 m os teores de P aumentaram em função das doses de composto de lodo de esgoto (Figura 4). Houve influência do adubo mineral fosfatado sobre os teores de P do solo, os maiores teores foram encontrados nos tratamentos que receberam o composto de lodo de esgoto e o P mineral. Foi encontrado ajuste ao modelo estatístico proposto, segundo a equação: $P_{\text{resina}} (\text{mg dm}^{-3}) = 1,19 + 0,16 C + 0,027 N + 4,6$; ($R^2 = 0,54$; $p < 0,01$), equação válida na presença de fósforo mineral. Foi observado aumento de mais de 300 % do teor de P disponível nos tratamentos que receberam a maior dose de composto em relação ao tratamento controle, variando de 9 a 30 mg dm^{-3} , no tratamento NPK convencional o teor encontrado foi de 9 mg dm^{-3} .

Aumentos dos teores de P disponíveis em solos tratados com resíduos orgânicos (compostos de lixo, compostos de lodo de esgoto, lodos de esgoto, etc.) têm sido relatados por diversos autores (ABREU JUNIOR et al., 2002; MARQUES et al., 2007; CORRÊA et al., 2010; BUENO et al., 2011). O aumento da disponibilidade de fósforo, pela aplicação do composto, pode ser atribuído ao aumento da quantidade de material orgânico adicionado ao solo, disponibilizando mais fósforo pela liberação do P orgânico devido ao processo de mineralização da matéria orgânica e pela formação de fosfatos orgânicos mais fracamente retidos no solo (MELLO, 1980). Outro fator responsável pelo aumento do P disponível é a

liberação de ácidos orgânicos da decomposição e posterior reação com o P na solução do solo, resultando em moléculas complexas de fósforo orgânico. Essa reação preveniria a precipitação do fósforo solúvel, bloquearia os sítios de adsorção do P na fase sólida, diminuindo a capacidade do solo em adsorver P (BUENO et al., 2011).

O manejo realizado na área também foi um dos responsáveis pelo aumento no processo de mineralização da matéria orgânica do solo e liberação do fósforo. O uso de cultivador mecânico, após a aplicação do composto, promoveu o revolvimento do solo na camada de 0-0,2 m, aumentando a aeração, a atividade microbológica no solo e a mineralização da matéria orgânica, disponibilizando mais P.

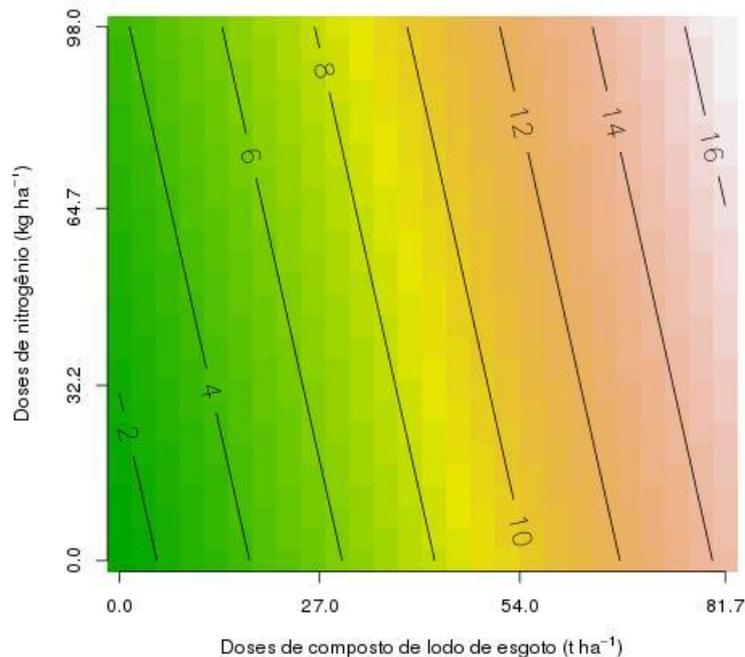


Figura 4 - Teores de P (mg dm^{-3}) no solo cultivado com cana-soca, da camada de 0,0-0,1 m, segunda soca, aos 30 dias após a aplicação do composto de lodo de esgoto, em função de doses de composto de lodo de esgoto e de nitrogênio mineral, na presença de fósforo mineral.

Ricci, Padovani e Paula Júnior (2010) verificaram aumento nos teores de P do solo na camada de 0-0,20 m com aplicação de 80 t ha^{-1} de composto de lodo de esgoto, aumentando em quase oito vezes o teor de P em relação ao valor observado na ausência da aplicação do composto, alterando a classificação de “muito baixo” para “alto”, segundo Raij et al. (1986).

Na segunda amostragem de solos, realizada após a colheita da cana-soca, segundo corte, foram observados teores disponíveis de P do solo superiores em relação à primeira amostragem. Os teores de P disponíveis do solo aumentaram em função das doses de composto de lodo de esgoto (Figura 5) na camada de 0-0,1 m. Nos tratamentos que receberam o adubo fosfatado foram os que apresentaram os maiores teores de P disponíveis do solo. Na camada de 0,1-0,2 m observou-se elevados teores de P, porém, bem menores que na camada de 0-0,1 m. Foi observado efeito quadrático do composto de lodo de esgoto, segundo a equação: $P \text{ resina (mg dm}^{-3}\text{)} = 11,2 + 3,11 C - 0,126 C^2 + 4,25$; ($R^2 = 0,67$; $p < 0,01$), equação válida na presença de fósforo mineral.

Os teores de P disponível nos tratamentos com a maior dose de composto (82 t ha^{-1}) aumentaram em quase sete vezes em relação aos teores de P na testemunha, variando de 8 a 55 mg dm^{-3} , no tratamento com adubo mineral convencional o valor encontrado foi de 5 mg dm^{-3} .

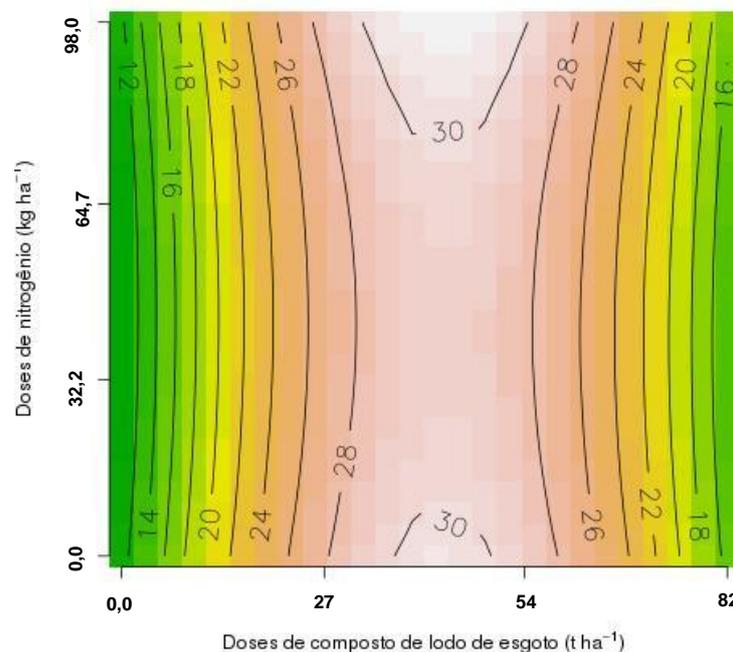


Figura 5 - Teores de P (mg dm^{-3}) no solo cultivado com cana-soca, da camada de 0,1-0,2 m, segunda soca, aos 330 dias após a aplicação do composto de lodo de esgoto, em função de doses de composto de lodo de esgoto e de nitrogênio mineral, na presença de fósforo mineral.

pH

Foi observado efeito dos tratamentos sobre os valores de pH do solo após a aplicação do composto de lodo de esgoto, segunda soca. Analisando-se os valores de pH foi constatada diferenças entre os tratamentos que receberam ou não a adição do adubo mineral fosfatado. Os valores de pH também foram alterados em relação às camadas de solo analisadas. Em relação aos tratamentos aplicados, os valores foram afetados significativamente pelas doses de composto, também houve interação entre as doses de composto e nitrogênio (Figura 6). Foi encontrado ajuste ao modelo estatístico proposto. Foi observado efeito quadrático, segundo a equação: $\text{pH} = 4,86 + 0,006C + 0,00005 \text{CN} - 0,00009 C^2$ ($R^2 = 0,38$; $p < 0,01$).

Os valores de pH aumentaram com o incremento das doses de composto de lodo de esgoto, até a dose de $35,6 \text{ t ha}^{-1}$ de composto; porém, diminuíram em relação às camadas de solo analisadas e foram negativamente afetados pelo fósforo mineral, e não houve interação entre os dois últimos fatores. Os valores de pH variaram de 4,4 a 5,8. As alterações nos valores de pH foram verificadas nas camadas superficiais do solo, até a camada de 0,2 m.

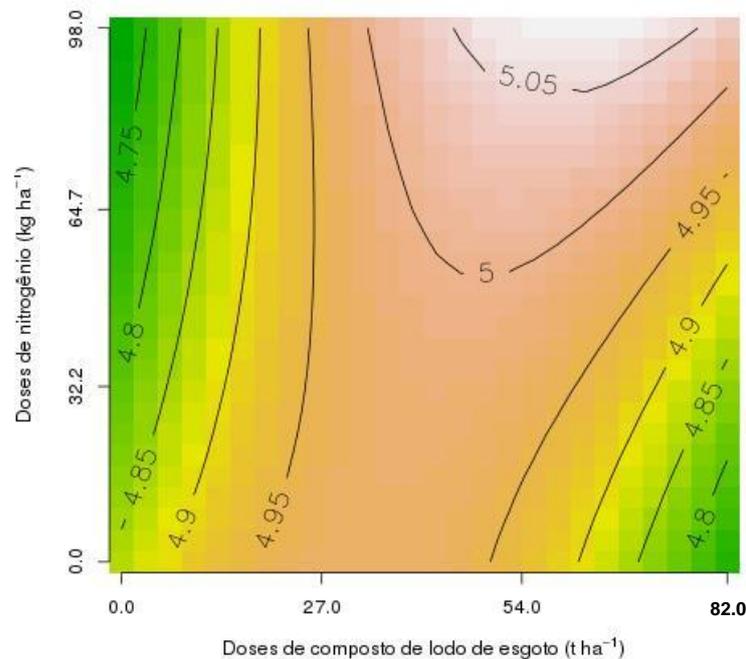


Figura 6 - Valores de pH no solo cultivado com cana-soca, da camada de 0-0,2 m, segunda soca, aos 30 dias após a aplicação do composto de lodo de esgoto em função de doses de composto de lodo de esgoto e de nitrogênio mineral.

Tem sido relatados efeitos semelhantes em relação à aplicação de compostos de lixo sobre o pH do solo (OLIVEIRA et al., 2002; ABREU JUNIOR et al., 2000, 2009). O aumento do pH em solos ácidos pela aplicação de composto de lixo, pode ser atribuído à presença de humatos alcalinos (KIEHL, 1985), capacidade de consumo de prótons (WONG et al., 1998) e a complexação do $H^+ + Al^{3+}$ pela carga orgânica do composto (OLIVEIRA, 2000), ou, ainda, pelo aumento nos teores de cátions trocáveis do solo Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+ (MAZUR et al., 1983). Abreu Junior et al. (2000) avaliando os efeitos da aplicação de composto de lixo em 21 solos ácidos brasileiros constataram que o principal mecanismo para o aumento do pH foi a troca de H^+ entre o sistema tampão do solo e da matéria orgânica do composto. Outro fator a ser considerado, é que, a soma de bases do composto reflete o conteúdo de grupos funcionais de ácidos orgânicos fracos, que reteriam H^+ e Al^{3+} no solo. Eles concluíram que, a aplicação do composto de lixo ($60 t ha^{-1}$) promoveu um efeito sobre o pH dos solos ácidos, igual ao da aplicação de $2 t ha^{-1}$ de calcário, ou mais.

Na segunda amostragem de solos, realizada após a colheita da segunda soqueira, não foram encontradas diferenças entre os valores de pH do solo. Os efeitos dos tratamentos e do composto de lodo de esgoto verificados logo após a aplicação do composto não permaneceram até o final da segunda cana-soca. Esse efeito está relacionado provavelmente à degradação do conteúdo orgânico inicial, e, portanto, diminuição na mineralização do carbono e na produção dos íons OH^- , pela troca de ligantes e a introdução das bases catiônicas, K^+ , Ca^{2+} e Mg^{2+} (HARGREAVES; ADL; WARMAN, 2008).

Ricci, Padovani e Paula Júnior (2010) utilizaram um composto orgânico, obtido a partir da compostagem de lodo de esgoto ativado e resíduos de roçagens de gramíneas (*Brachiaria* spp.), na recuperação de um Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico decapitado, nas doses de 0, 20, 40 e $80 t ha^{-1}$, durante dois anos. Os autores descreveram que em razão das diferentes quantidades de composto de lodo de esgoto aplicadas, o pH do solo mostrou diferenças significativas. Os maiores valores de pH foram obtidos logo após a aplicação, independente das dosagens de composto, entretanto, após um ano, esses valores decaíram significativamente, aumentando no segundo ano, porém menos que no primeiro. Os autores atribuíram à adição do composto o aumento no pH, devido às reações alcalinas no N, tendendo a diminuir ao longo do tempo, devido à acidificação natural do solo estudado.

Cálcio

Na primeira amostragem de solo, 30 dias após a aplicação do composto, os teores de Ca do solo variaram em função das doses de composto de lodo de esgoto (Figura 7), variando de $18 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$ (nos tratamentos sem aplicação do composto e do fósforo mineral) a $55 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$ (nos tratamentos que receberam a maior dose de composto e com fósforo mineral). No tratamento fertilização mineral convencional o teor de Ca encontrado foi de $21 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$. Os maiores teores de Ca foram observados na camada de 0,1-0,2 m, nas camadas de 0,2-0,4 e 0,4-0,6 m não foram observadas diferenças significativas para os teores de Ca, indicando baixa lixiviação desse elemento para as camadas mais profundas. Houve efeito linear das doses de composto sobre os teores de cálcio, segundo a equação: $\text{Ca} (\text{mmol}_c \text{ dm}^{-3}) = 13,55 + 0,28 C$; ($R^2 = 0,48$; $p < 0,01$).

Após a aplicação do composto constatou-se que na dose de 82 t ha^{-1} de composto com fósforo mineral, o teor de Ca aumentou três vezes em relação aos valores observados nos tratamentos sem aplicação do composto.

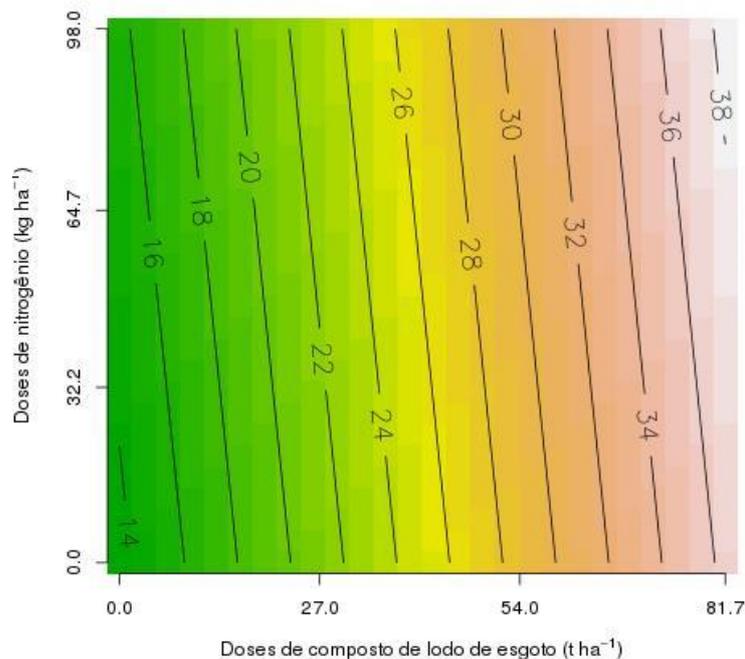


Figura 7 - Teores de Ca ($\text{mmol}_c \text{ dm}^{-3}$) no solo cultivado com cana-soca, da camada de 0,1-0,2 m, segunda soca, aos 30 dias após a aplicação do composto de lodo de esgoto em função de doses de composto de lodo de esgoto e de nitrogênio mineral.

Na segunda amostragem de solo, realizada após a colheita da segunda cana-soca, foi observado que os teores de cálcio do solo na camada de 0-0,1 e 0,1-0,2 m aumentaram em relação às doses de composto de lodo de esgoto aplicadas (Figura 8). Não foi verificado efeito significativo das doses de composto de lodo de esgoto sobre os teores de Ca nas camadas de 0,2-0,4 e 0,4-0,6 m. Na camada de 0,1-0,2 m foi observado efeito quadrático, segundo a equação: $\text{Ca (mmol}_c \text{ dm}^{-3}) = 26,42 + 3,216 C - 0,132 C^2; + 3,21; (R^2 = 0,72; p < 0,01)$, equação válida na presença de fósforo mineral.

O material utilizado no primeiro ano do experimento, segunda cana-soca, recebeu 50 a 70 kg de gesso agrícola para cada tonelada de fertilizante orgânico composto. O aumento nos teores de cálcio deve-se provavelmente à adição, embora em pequena quantidade, do gesso agrícola no produto compostado.

De acordo com a superfície de resposta pôde-se observar que com o incremento das doses de composto e nitrogênio até as doses de 12,4 t ha⁻¹ e 51,7 kg ha⁻¹, de composto e nitrogênio respectivamente, houve aumento nos teores de cálcio no solo, porém, a partir dessas doses os teores de cálcio diminuíram (Figura 8). A explicação para esse fato está relacionada ao fornecimento de nitrogênio para a planta, que, com o aumento do N pelas doses de composto e nitrogênio mineral houve maior crescimento da planta e maior foi a absorção de cálcio pelas raízes.

A extração de cálcio pela cana-de-açúcar não é muito elevada, contudo, ele participa da parede celular, sendo importante no funcionamento das membranas intercelulares, é um componente estrutural em ligações intermoleculares (QUAGGIO; VAN RAIJ, 2008).

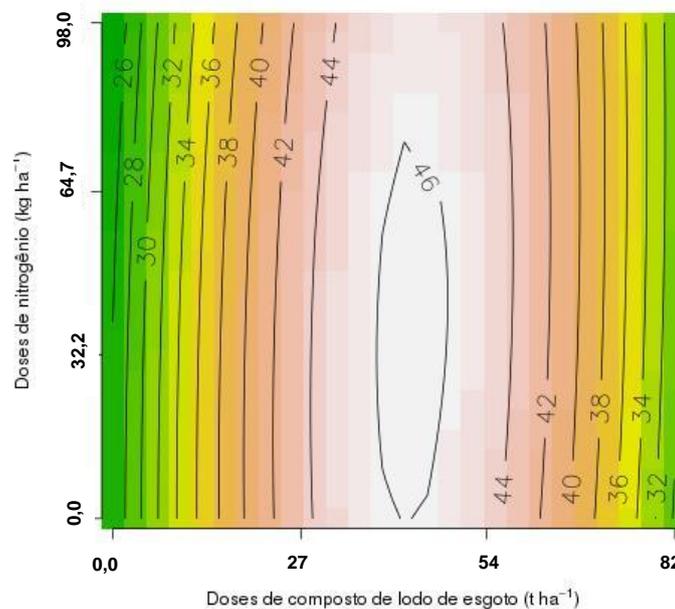


Figura 8 - Teores de Ca ($\text{mmol}_c \text{dm}^{-3}$) no solo cultivado com cana-soca, da camada de 0,1-0,2 m, segunda soca, aos 330 dias após a aplicação do composto de lodo de esgoto em função de doses de composto de lodo de esgoto e de nitrogênio mineral, na presença de fósforo mineral.

Aumentos nos teores de K, Ca e Mg no solo devido à aplicação de composto de lixo foram observados por Cravo et al. (1995) e Abreu Junior et al. (2001) e de composto de lodo de esgoto por Ricci, Padovani e Paula Júnior (2010). Segundo Cravo et al. (1995), o efeito do composto de lixo urbano sobre os teores de K, Ca e Mg do solo pode variar em função da procedência, do modo de produção deste material e do número de cultivos.

Potássio

Após a aplicação do composto de lodo de esgoto foi observado decréscimo nos teores de potássio do solo em relação aos teores iniciais. A redução dos teores de potássio do solo ocorreu em função das doses de nitrogênio (Figura 9). Foi observado efeito do adubo fosfatado sobre os teores de K do solo. Os efeitos dos tratamentos foram verificados até a profundidade de 0,2 m. Foi encontrado ajuste ao modelo estatístico proposto, segundo a equação: $\text{K} (\text{mg kg}^{-1}) = 0,714 - 0,001 \text{N} + 0,07$; ($R^2 = 0,17$; $p < 0,01$), equação válida na presença de fósforo mineral. Os teores de K do solo na camada de 0-0,2 m variaram de 0,4 a $1,0 \text{mmol}_c \text{dm}^{-3}$. No tratamento com adubo mineral o teor de K encontrado foi de $0,7 \text{mmol}_c \text{dm}^{-3}$.

Na segunda amostragem de solo, aos 330 dias após aplicação do composto, não foi observado efeito significativo dos tratamentos sobre os teores de K do solo. Os teores de K encontrados na camada de 0-0,1 m variaram de 0,7 a 1,0 $\text{mmol}_c \text{dm}^{-3}$ e na camada de 0,1-0,2 m, de 0,4 a 0,9 $\text{mmol}_c \text{dm}^{-3}$. No tratamento com adubo mineral o teor de K foi de 0,7 $\text{mmol}_c \text{dm}^{-3}$, em ambas as camadas.

Os teores de K observados na camada de 0,1-0,2 m na segunda coleta foram menores em relação aos teores encontrados aos 30 dias após a aplicação do composto. O mesmo efeito pôde ser constatado nas camadas mais profundas, de 0,2-0,4 e de 0,4-0,6 m. De acordo com a literatura, geralmente os maiores teores de potássio se encontram nos primeiros 20 cm (BEBÉ, 2009), corroborando com os resultados encontrados no presente estudo.

O potássio é o elemento mais extraído pela cana-de-açúcar que o acumula em grande quantidade, inclusive excessivamente, com “consumo de luxo” (ROSSETTO et al., 2008). A queda nos teores desse elemento no solo após a colheita da segunda soca está relacionada ao fato da alta demanda da cultura por esse elemento. A elevada taxa de extração do potássio pela cana resultou na diminuição dos teores de potássio no solo.

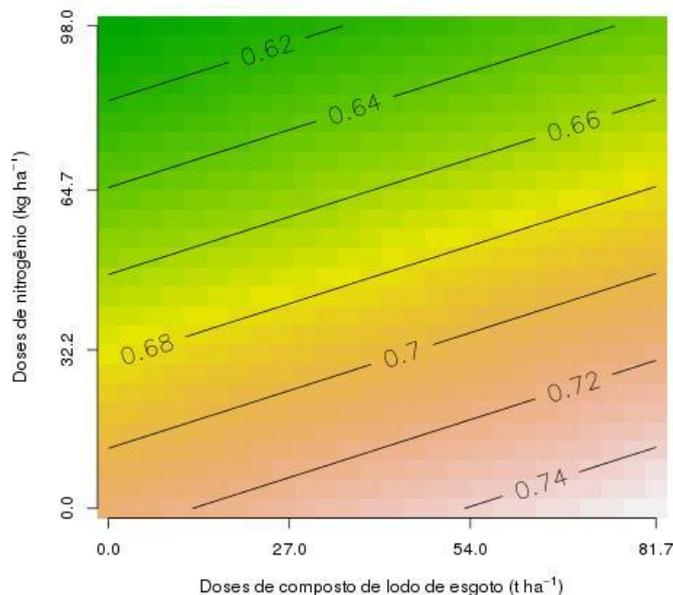


Figura 9 - Teores de K ($\text{mmol}_c \text{dm}^{-3}$) do solo cultivado com cana-soca, da camada de 0,0-0,2 m, segunda soca, aos 30 dias após a aplicação do composto de lodo de esgoto em função de doses de composto de lodo de esgoto e de nitrogênio mineral, na presença de fósforo mineral.

Trabalhos sobre o uso de compostos de lixo tem reportado efeitos positivos sobre o aumento dos teores de K^+ nos solos, tal fato pode ser atribuído à disponibilidade desse elemento no lixo domiciliar (ABREU JUNIOR et al., 2001; OLIVEIRA et al., 2002; CORRÊA et al., 2010).

Embora as doses de composto de lodo de esgoto tenham proporcionado aumento significativo nos teores de K do solo, logo após a aplicação do composto, os teores de K não foram suficientes para mudar a classe de disponibilidade, permanecendo classificado como muito baixo (RAIJ et al., 1996). O K sendo muito solúvel se encontra na forma iônica nas águas residuárias e durante o tratamento nas estações de tratamento de esgoto tende a ficar em solução (SIMONETE et al., 2003), conseqüentemente, pouco desse elemento fica retido no lodo (FERNANDES et al., 1993; MARQUES et al., 2007), explicando sua baixa concentração nos compostos de lodo de esgoto.

Magnésio

Quanto aos teores de magnésio do solo não apresentaram variações significativas em relação às doses de composto de lodo de esgoto e nitrogênio, com ou sem adição do adubo mineral fosfatado. Também não foram observadas diferenças dos teores de Mg entre as camadas de solo analisadas. No primeiro ano do experimento os teores de Mg do solo variaram de 4 a 14 $\text{mmol}_c \text{dm}^{-3}$, na camada de 0-0,2 m, e no tratamento com adubo mineral o teor foi de 10 $\text{mmol}_c \text{dm}^{-3}$. Na segunda amostragem de solo, também não foi observado efeito dos tratamentos nos teores de Mg do solo.

Corrêa et al. (2010) avaliaram a fertilidade química de um substrato, horizonte C de um Latossolo Vermelho, que recebeu doses de lodo de esgoto e de composto de resíduos domésticos. Nesse trabalho, os autores observaram que o composto de resíduos domésticos e o lodo de esgoto duplicaram a concentração de Ca^{+2} no substrato, na dose mais alta (76 t ha^{-1}), porém, não provocaram incrementos significativos de Mg^+ , portanto, os dois resíduos não podem ser considerados fonte desse elemento.

Acidez potencial

Foi constatada variação da acidez potencial do solo em função das doses de nitrogênio aos 30 dias após a aplicação do composto. Não foi observado efeito das doses de composto de lodo de esgoto sobre a acidez potencial, mas houve interação entre as doses de composto e

nitrogênio (Figura 10) na camada de 0,1-0,2 m. Foi observado efeito quadrático, segundo a equação: $H + Al \text{ (mmol}_c \text{ dm}^{-3}) = 41,405 - 0,004 C N + 0,003 N^2$; ($R^2 = 0,43$; $p < 0,01$).

Os teores médios da acidez potencial na camada de 0,1-0,2 m variaram de 50 a 101,2 $\text{mmol}_c \text{ dm}^{-3}$, e no tratamento com adubo mineral convencional o teor encontrado foi de 100,3 $\text{mmol}_c \text{ dm}^{-3}$.

O aumento da acidez potencial do solo em função das doses de nitrogênio foi causada pela adubação nitrogenada com ureia, que apresenta forte efeito acidificante residual (RAIJ, 1991), decorrente das reações de nitrificação subsequente à hidrólise da uréia (ABREU JUNIOR et al., 2000).

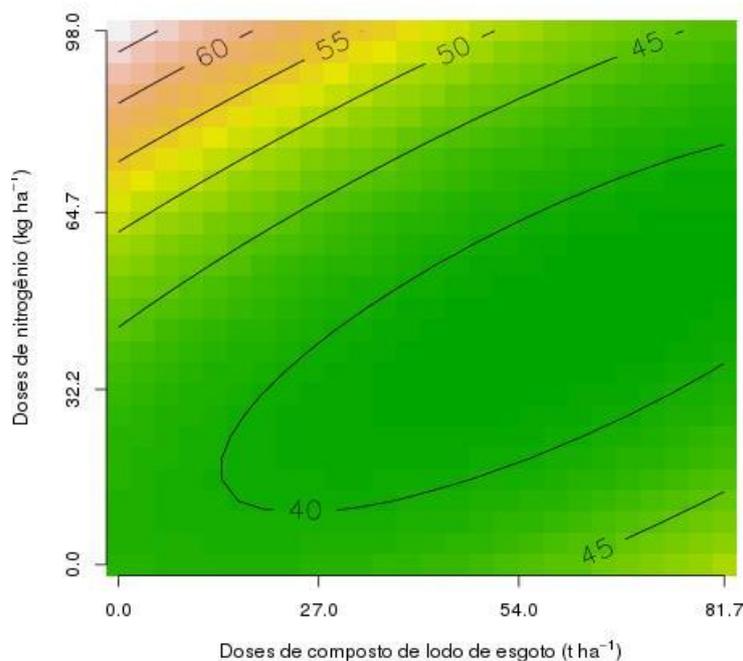


Figura 10 - Valores da acidez potencial ($\text{mmol}_c \text{ dm}^{-3}$) do solo, da camada de 0,1-0,2 m, cultivado com cana-soca, segunda soca, aos 30 dias após a aplicação do composto de lodo de esgoto em função de doses de composto de lodo de esgoto e de nitrogênio mineral

Carbono orgânico

Os teores de carbono orgânico do solo observados após a aplicação do composto de lodo de esgoto variaram em função das doses de composto e de nitrogênio (Figura 11), houve influência do fósforo mineral nos teores de carbono orgânico do solo. As diferenças entre os teores de carbono orgânico foram observadas até a camada de 0-0,2 m, os teores médios

encontrados variaram de 8,7 a 16,4 g dm⁻³, e no tratamento com adubo mineral convencional o teor encontrado foi de 14,1 g dm⁻³. Nas camadas mais profundas, 0,2-0,4 e 0,4-0,6 m, não foram observadas alterações no teor de carbono orgânico em função dos tratamentos. Houve efeito significativo dos tratamentos na camada de 0,0-0,1 m, foi observado efeito linear, segundo a equação: Carbono orgânico (g dm⁻³) = 11,37 + 0,015 C + 0,014 N + 1,9; (R²= 0,25; p < 0,01), equação válida na presença de fósforo mineral.

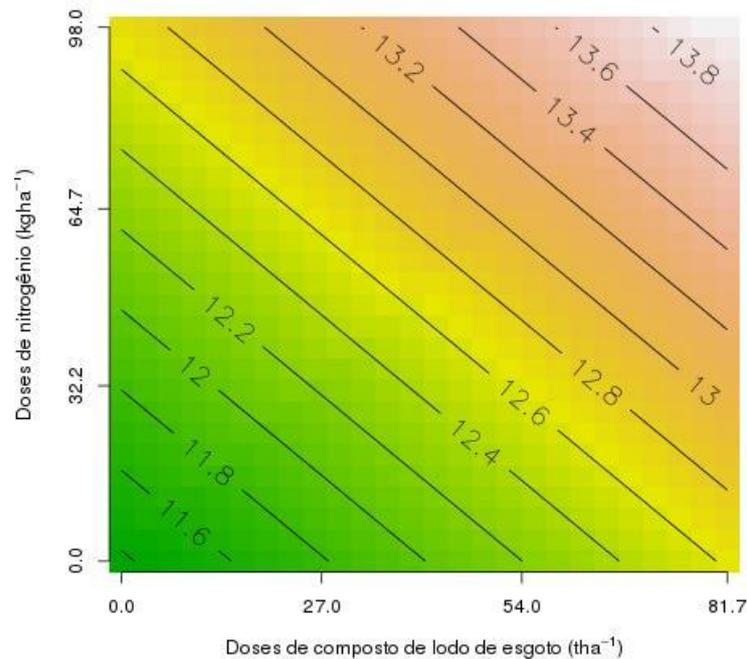


Figura 11 - Teores de carbono orgânico (g dm⁻³) no solo cultivado com cana-soca, da camada de 0-0,1 m, segunda soca, aos 30 dias após a aplicação do composto de lodo de esgoto em função de doses de composto de lodo de esgoto e de nitrogênio mineral, na presença de fósforo mineral.

Os teores de carbono orgânico encontrados no solo após a colheita da segunda soca variaram de 13,8 a 21,9 g dm⁻³, e no tratamento NPK convencional o valor foi de 15,1 g dm⁻³, na camada de 0-0,1cm. Os teores de carbono orgânico variaram em função das doses de composto de lodo de esgoto (Figura 12), foi observado efeito quadrático do composto de lodo de esgoto sobre os teores de carbono orgânico do solo, conforme a equação: Carbono orgânico = 15,64 + 0,48 C - 0,02C²; (R²= 0,48; p < 0,01).

A análise conjunta dos dados demonstra que o composto de lodo de esgoto proporcionou aumentos significativos nos teores de carbono do solo, verificados principalmente após o primeiro ano de aplicação do composto. Esse fato sugere a possibilidade de incrementos crescentes em função de aplicações sucessivas do resíduo (OLIVEIRA, 2000).

O aumento nos teores de carbono orgânico do solo, um ano após a primeira aplicação, pode ser explicada pela degradação do composto de lodo de esgoto, que é reduzida drasticamente à medida que aumenta seu grau de maturação (BERNAL et al., 1998; OLIVEIRA, 2000; ABREU JUNIOR et al.; 2009). Levando em consideração a relação C/N do composto utilizado, que era de 20, pode-se considerá-lo como um composto maduro, com fração humificada estável, pouco susceptível à rápida degradação em curto período (OLIVEIRA, 2000; ABREU JUNIOR et al.; 2009).

Resultados semelhantes aos obtidos no presente estudo foram encontrados por Oliveira (2000) e Abreu Junior, Muraoka e Oliveira (2002). Segundo os autores, o aumento no teor de matéria orgânica tem sido proporcional à dose do composto aplicada, com efeito cumulativo em aplicações sucessivas.

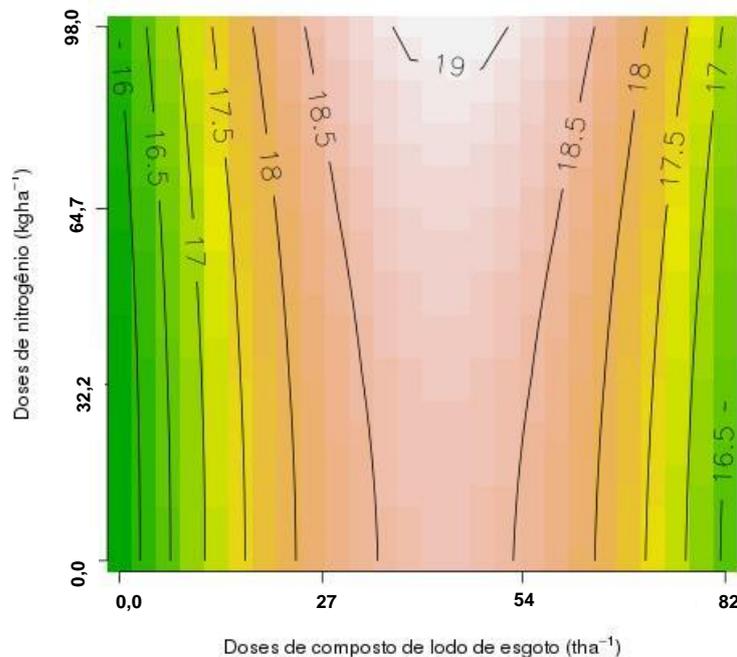


Figura 12 - Teores de carbono orgânico (g dm^{-3}) no solo cultivado com cana-soca, da camada de 0,0-0,2 m, segunda soca, aos 330 dias após a aplicação do composto de lodo de esgoto em função de doses de composto de lodo de esgoto e de nitrogênio mineral.

Soma das bases cálcio, potássio e magnésio

Foi observada influência das doses de composto de lodo de esgoto sobre a soma das bases (SB) do solo aos 30 dias após a aplicação do composto de lodo de esgoto (Figura 13). Não foi constatado efeito das doses de nitrogênio mineral e do adubo fosfatado nos teores da soma de bases do solo. Na camada de 0-0,1 m houve aumento nos teores da soma de bases em relação às doses de composto variando de 12 a 71,7 $\text{mmol}_c \text{dm}^{-3}$, e no tratamento com adubo mineral convencional o valor encontrado foi de 12 $\text{mmol}_c \text{dm}^{-3}$.

Na camada de 0,1-0,2 m, os valores da SB do solo variaram de 48,5 a 100,9 $\text{mmol}_c \text{dm}^{-3}$, e no e no tratamento com adubo mineral convencional o valor encontrado foi de 56,4 $\text{mmol}_c \text{dm}^{-3}$. Foi observado efeito quadrático do composto, na camada de 0,1-0,2 m, segundo a equação: $SB = 39,89 + 0,62 C - 0,0043 C^2$; ($R^2 = 0,51$; $p < 0,01$).

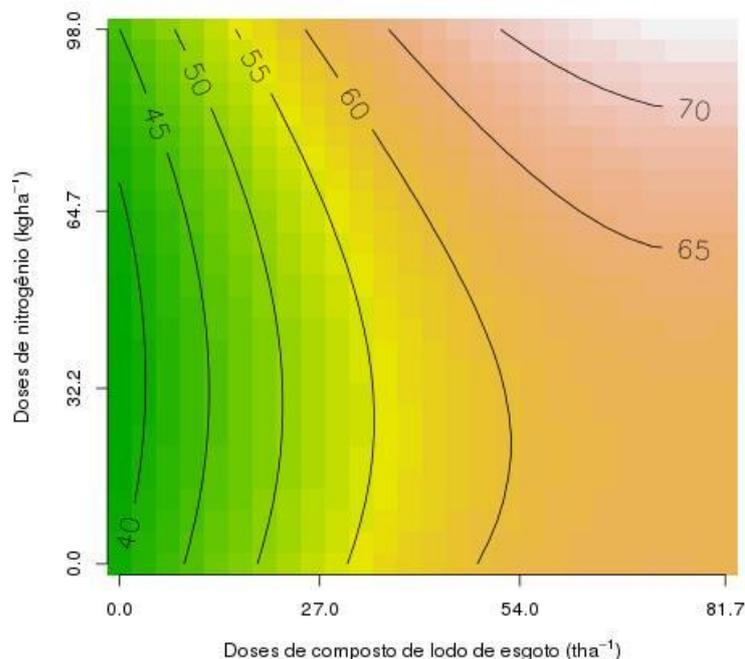


Figura 13 - Teores de soma de bases ($\text{mmol}_c \text{dm}^{-3}$) no solo cultivado com cana-soca, da camada de 0,1-0,2 m, segunda soca, aos 30 dias após a aplicação do composto de lodo de esgoto em função de doses de composto de lodo de esgoto e de nitrogênio mineral.

Os teores da soma de bases observados após a colheita da segunda soca, na camada de 0,1-0,2 m, variaram de 37,4 a 46,4 $\text{mmol}_c \text{ dm}^{-3}$, e no tratamento com adubo mineral convencional o valor encontrado foi de 20,7 $\text{mmol}_c \text{ dm}^{-3}$. Foi observado efeito quadrático do composto sobre os teores da SB no solo, na presença do fósforo mineral. Segundo o modelo de superfície de resposta foi obtida a seguinte equação: $\text{SB} = 28,3 + 0,304 C - 0,0018 C^2 + 2,47$; ($R^2 = 0,33$; $p < 0,15$), equação válida na presença de fósforo mineral.

Após a colheita da segunda soca, na camada de 0,0-0,1 m, verificou-se aumento nos teores da SB do solo em relação às doses de composto de lodo de esgoto aplicadas (Figura 14) e em relação aos teores encontrados aos 30 dias após a aplicação do composto. Na camada de 0,1-0,2 m, comparando-se os teores das SB encontrados 30 dias após a aplicação do composto e os teores encontrados após a colheita da segunda soca, houve redução de aproximadamente 50% nos teores das SB do solo em todos os tratamentos, porém, foram crescentes em relação às doses de composto nos dois períodos avaliados. Na camada de 0,0-0,1 m os teores de SB aumentaram entre a primeira e a segunda coleta, o mesmo não foi observado em relação à camada de 0,1-0,2 m, pois, as raízes da cana-de-açúcar exploram um maior volume de solo em busca de nutrientes, incluindo o nitrogênio, quando não estão próximos à zona de absorção radicular, favorecendo seu crescimento para as camadas mais profundas, diminuindo a concentração dos nutrientes na região próximas às raízes.

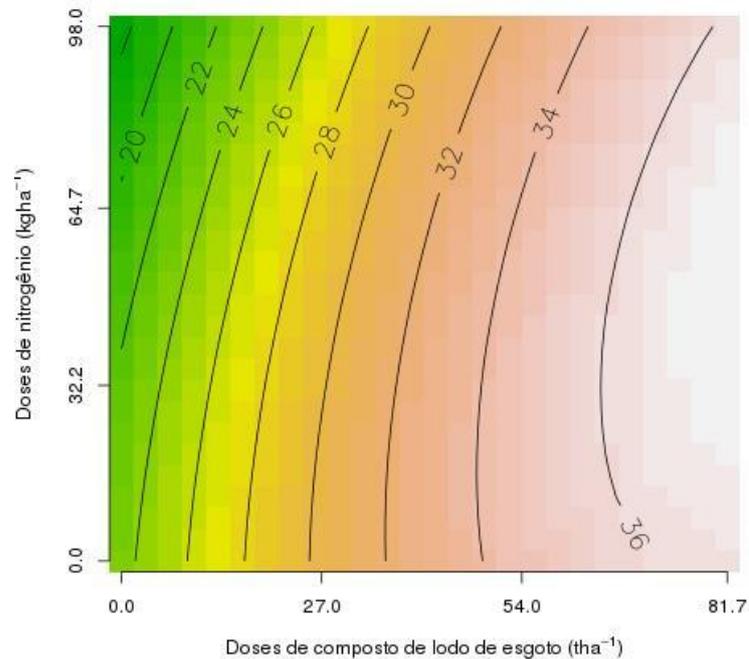


Figura 14 - Teores de soma de bases ($\text{mmol}_c \text{ dm}^{-3}$) no solo cultivado com cana-soca, da camada de 0,1-0,2 m, segunda soca, aos 330 dias após a aplicação do composto de lodo de esgoto, em função de doses de composto de lodo de esgoto e de nitrogênio mineral, na presença de fósforo mineral.

O aumento na soma de bases do solo é proporcional ao aumento dos teores trocáveis de Ca, Mg e K, devido à aplicação do composto de lodo de esgoto. A adição do composto no solo eleva a CTC (capacidade de troca de cátions) do solo, refletindo no aumento dos teores de Ca, Mg, K, H+Al utilizados no cálculo.

Os resultados encontrados corroboram com os encontrados por Ricci et al. (2010), que observaram aumento da soma de bases no solo (Latosolo Vermelho-Amarelo distrófico) das parcelas que receberam doses composto de lodo de esgoto, camada de 0-0,2 m. Os autores atribuem o aumento nos valores das somas de bases nos solos das parcelas principalmente aos teores de Ca e Mg, que aumentaram proporcionalmente com as dosagens do composto de lodo de esgoto.

Capacidade de troca catiônica

A aplicação do composto de lodo de esgoto e do nitrogênio mineral promoveu elevação da CTC do solo (Figura15). Foi observado aumento da CTC do solo nos tratamentos que receberam composto em relação à ao tratamento controle, aos 30 dias após a aplicação do composto. Os maiores valores da CTC foram encontrados na camada de 0,1-0,2 m, variando de 73,5 a 158,1 $\text{mmol}_c \text{dm}^{-3}$, e no tratamento NPK convencional o valor foi de 153,1 $\text{mmol}_c \text{dm}^{-3}$. A CTC do solo variou em função do composto de lodo de esgoto e do nitrogênio mineral. Foi encontrado ajuste ao modelo estatístico, segundo a equação $\text{CTC} = 110,3 + 0,5 C - 0,47 N + 0,007 N^2$; ($R^2 = 0,27$; $p < 0,001$).

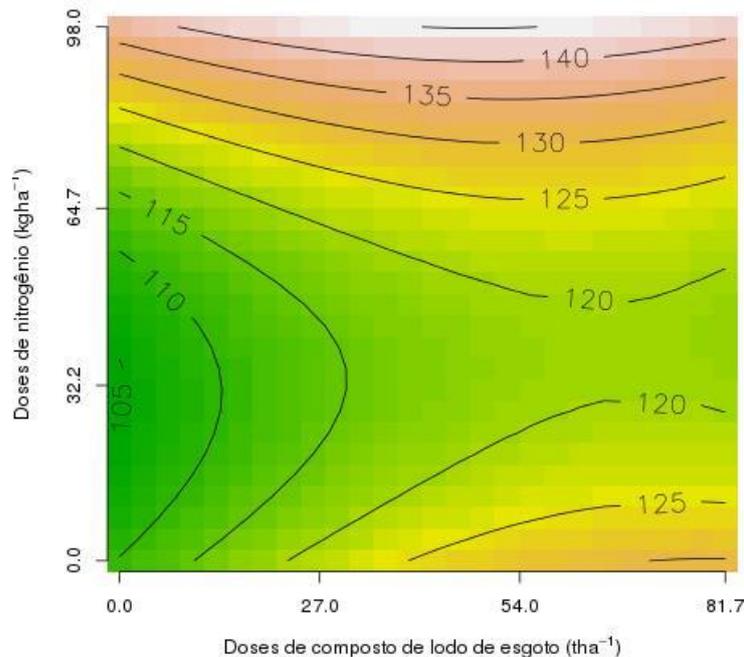


Figura 15 – Valores da capacidade de troca de cátions ($\text{mmol}_c \text{dm}^{-3}$) no solo cultivado com cana-soca, da camada de 0-0,2 m, aos 30 dias após aplicação do composto de lodo de esgoto, em função de doses de composto de lodo de esgoto e de nitrogênio mineral.

Após a colheita da segunda soca, a CTC do solo foi reduzida em relação à CTC observada aos 30 dias após a aplicação do composto, na camada de 0,1-0,2 m. A CTC do solo na camada de 0,1-0,2 m variou de 81 a 93 $\text{mmol}_c \text{dm}^{-3}$, e no tratamento com adubo mineral convencional a CTC foi de 91,1 $\text{mmol}_c \text{dm}^{-3}$. A CTC variou em função das doses de composto (Figura 16). Foi observado efeito linear segundo a equação: $\text{CTC} (\text{mmol}_c \text{dm}^{-3}) = 79,26 + 0,33 C$; ($R^2 = 0,36$; $p < 0,001$).

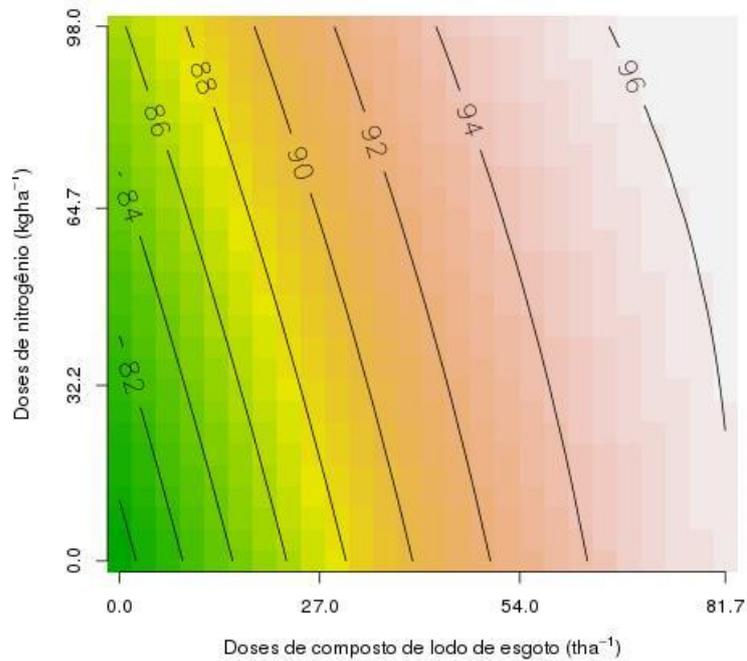


Figura 16 – Valores da capacidade de troca de cátions ($\text{mmol}_c \text{dm}^{-3}$) no solo cultivado com cana-soca, da camada de 0-0,2 m, 330 dias após aplicação do composto de lodo de esgoto em função de doses de composto de lodo de esgoto e de nitrogênio mineral.

Corrêa et al. (2010), avaliando doses de lodo de esgoto e de resíduos domésticos compostados observou que o lodo de esgoto aumentou linearmente a CTC de um substrato exposto à superfície, enquanto o resíduo doméstico compostado não alterou significativamente a CTC.

Teores elevados de matéria orgânica em compostos não significa boa qualidade agronômica do produto ou capacidade de alterar a fertilidade de solos. Composição e estabilidade da matéria orgânica e concentração de nutrientes na matéria seca determinam a capacidade de produtos orgânicos alterarem a fertilidade dos solos ao serem incorporados a eles (CORRÊA et al., 2006). A matéria orgânica geralmente é responsável pelas alterações do complexo coloidal do solo, e criar cargas superficiais e, conseqüentemente, aumentar a CTC do solo (BEZERRA et al., 2006), mas esse efeito varia de acordo com a fonte de matéria orgânica (CORRÊA et al., 2010).

Folha, Caldo e Colmo

O efeito do composto do lodo de esgoto, na nutrição da cana-de-açúcar, pode ser verificado observando os teores dos nutrientes nas folhas e no caldo.

Folha

Nitrogênio

Com relação ao estado nutricional da cana-de-açúcar, não foi observado efeito significativo das doses de composto de lodo de esgoto e de nitrogênio nos teores de N foliar nas amostras coletadas durante o cultivo da segunda cana-soca. Porém, foram observadas diferenças significativas nos teores de N foliar entre os tratamentos que receberam e os que não receberam o adubo mineral fosfatado. Os teores médios de N foliar em função dos tratamentos variaram de 12,1 a 19 g kg⁻¹. No tratamento com adubação mineral convencional o teor médio de N foi de 14,7 g kg⁻¹.

Nas amostras de folhas coletadas durante o período de cultivo da terceira cana-soca, foi observado efeito das doses de nitrogênio nos teores de N foliar (Figura 17). Os teores de N na folha variaram de 13,2 a 19,3 g kg⁻¹. No tratamento com adubação mineral convencional o teor médio de N foi de 15,3 g kg⁻¹. Foi observado efeito quadrático, segundo a equação: N folha (g kg⁻¹) = 16,67 - 0,039 N + 0,023 N²; (R² = 0,15; p < 0,05).

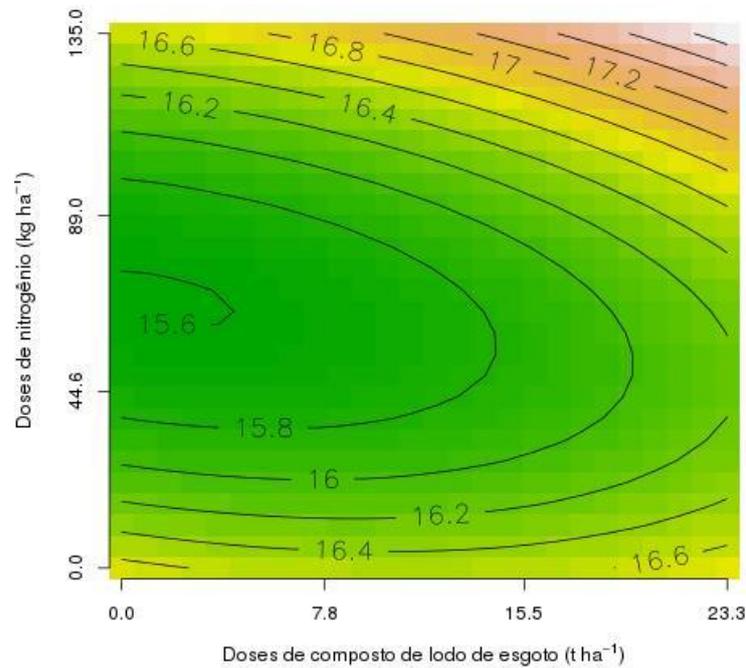


Figura 17 - Teores de nitrogênio (g kg^{-1}) nas folhas de cana-de-açúcar, coletadas durante o cultivo da terceira soca, em função de doses de composto de lodo de esgoto e de nitrogênio mineral

Os teores de N nas amostras de folhas da segunda e terceira cana-soca estiveram abaixo da faixa de suficiência preconizada por Raij et al. (1997), que é de 18-25 g kg^{-1} . Entretanto, não foram verificados sintomas de deficiência de N nos dois anos de cultivo das soqueiras.

Chiba, Mattiazzo e Oliveira (2008a) observaram efeito significativo da aplicação de lodo de esgoto no teor de N foliar da cana-de-açúcar. Os tratamentos que receberam lodo de esgoto apresentaram teores médios de N foliar igual a 17,29 e 17,52 g kg^{-1} , primeiro e segundo ano de cultivo, respectivamente. No tratamento com adubo mineral os teores de N observados foram 17,35 e 19,21, primeiro e segundo ano de cultivo, respectivamente. Os autores concluíram que o lodo de esgoto apresentou-se como fonte adequada do nutriente.

Marques et al. (2007) avaliaram o efeito da aplicação de quatro doses de lodo de esgoto (0, 40, 80 e 160 t ha^{-1} , base úmida) e duas doses de nitrogênio (50 e 100% da dose recomendada) em um Argissolo Vermelho no cultivo de cana-de-açúcar, cana-planta. No final do experimento os autores não observaram qualquer influência das doses de lodo de esgoto e da adubação mineral nos teores de N foliar.

Fósforo

Quanto aos teores de fósforo nas amostras de folhas coletadas durante o período de cultivo da segunda soca, foi observado efeito das doses de composto nos teores de P foliar (Figura 18). Não foram observadas diferenças nos teores de P foliar entre os tratamentos que receberam ou não o P mineral. Os teores de P na folha variaram de 1,9 a 2,5 g kg⁻¹. No tratamento com adubo mineral convencional o teor de P encontrado foi de 2,2 g kg⁻¹. Segundo o modelo de superfície de resposta foram observados efeitos lineares e quadráticos, segundo a equação: $P \text{ folha (g kg}^{-1}\text{)} = 2,17 + 0,007 C - 0,00009 C^2$; ($R^2 = 0,24$; $p < 0,01$).

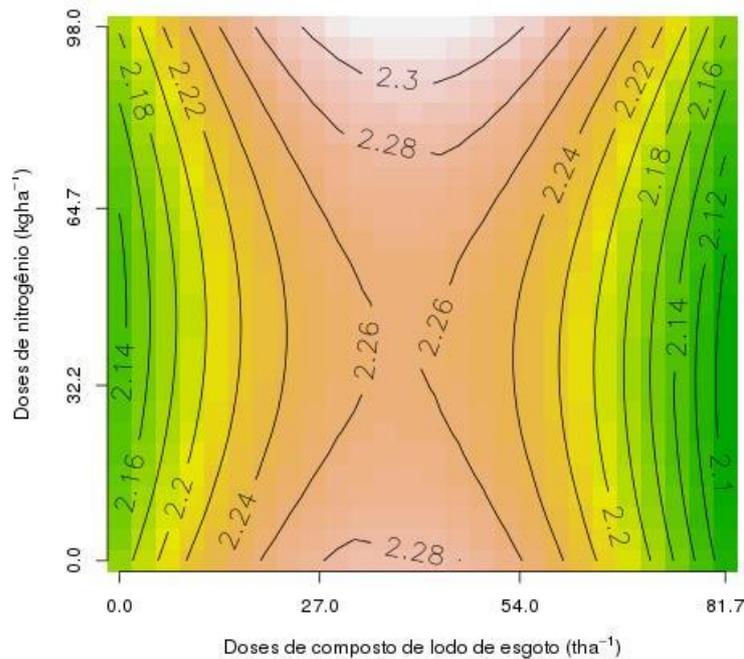


Figura 18 - Teores de fósforo (g kg⁻¹) nas folhas de cana-de-açúcar, coletadas durante o cultivo da segunda soca, em função de doses de composto de lodo de esgoto e de nitrogênio mineral.

Nas amostras de folha coletadas durante o período de cultivo da terceira soca, foi observado efeito das doses de composto de lodo de esgoto e de nitrogênio nos teores de P foliar (Figura 19). Os teores de P variaram de 1,9 a 2,6 g kg⁻¹, no tratamento NPK convencional o teor encontrado foi de 2,3 g kg⁻¹. Segundo o modelo de superfície de resposta foi observado efeito quadrático, segundo a equação: $P \text{ folha (g kg}^{-1}\text{)} = 2,35 + 0,02 C + 0,004 N - 0,0009 C^2 - 0,00005 N^2$; ($R^2 = 0,12$; $p < 0,01$).

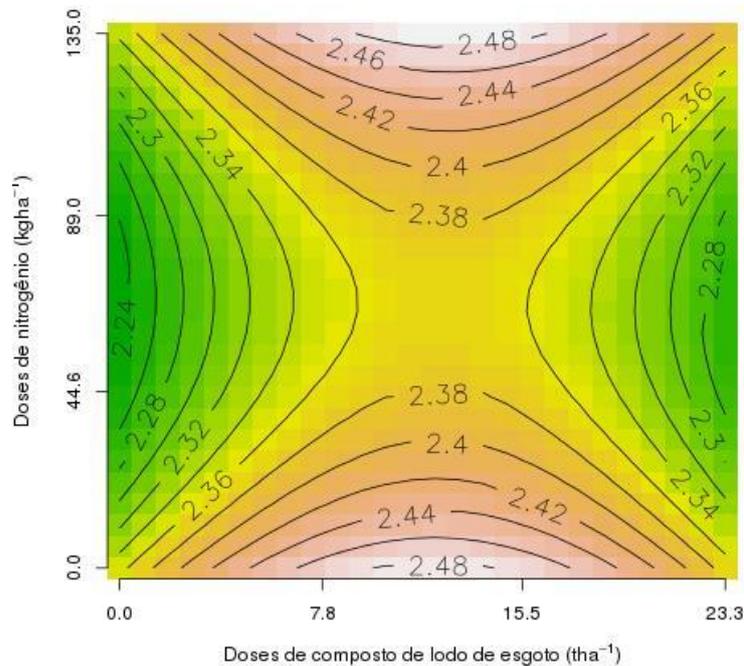


Figura 19 - Teores de fósforo (g kg^{-1}) nas folhas de cana-de-açúcar, coletadas durante o cultivo da terceira soca, em função de doses de composto de lodo de esgoto e de nitrogênio mineral.

Os teores de P encontrados nas folhas da cana-soca, de segundo e de terceiro corte, estão dentro da faixa preconizada por Raij et al. (1997) como adequada para a cultura da cana-de-açúcar que corresponde a $1,5\text{-}3,0 \text{ g kg}^{-1}$.

De acordo com os teores de P foliares observados nos dois anos de cultivo da cana-soca, pode-se presumir que o composto de lodo de esgoto disponibilizou o nutriente para a cana, pois nos tratamentos que não receberam o adubo mineral fosfatado os teores médios de P encontrados variaram de 2,1 a 2,4 e 2,1 a 2,5, segunda e terceira soca, respectivamente. Chiba, Mattiazzi e Oliveira (2008b) também relataram aumento na absorção de P pela cana-de-açúcar com aplicação de lodo de esgoto sem adição de P mineral.

Caldo

Nitrogênio

Os teores de nitrogênio no caldo da cana-de-açúcar após a primeira aplicação do composto, segunda soca, não apresentaram diferenças significativas entre as doses de

composto de lodo de esgoto e nitrogênio mineral, com ou sem fósforo. Os teores de N no caldo variaram entre de 1,8 a 4,7 g kg⁻¹.

Na replicação do composto, terceira soca, os teores de N no caldo variaram entre 3,1 a 5,8 g kg⁻¹. No tratamento com adubo mineral convencional o teor encontrado foi de 4,2 g kg⁻¹. Foi observado efeito das doses de composto de lodo de esgoto sobre os teores de N no caldo. Houve efeito quadrático do composto sobre os teores de N, segundo a equação:

$$N_{\text{caldo}} (\text{g kg}^{-1}) = 3,40 + 0,13 C - 0,0003 CN - 0,004 C^2 \quad (R^2 = 0,43; p \leq 0,01).$$

De acordo com a superfície de resposta foi observado aumento nos teores de N no caldo até a dose de 15 t ha⁻¹ de composto e 0,6 kg ha⁻¹ de N, o que corresponde a 68,1 kg ha⁻¹ de N. Entretanto, com o aumento das doses de composto a partir das doses de 15 t ha⁻¹ de composto e 0,6 kg ha⁻¹ de nitrogênio, os teores de nitrogênio no caldo diminuíram (Figura 20). Franco et al. (2010b) cita alguns estudos onde foi observado efeitos deletérios da fertilização nitrogenada com doses superiores a 120 kg ha⁻¹ de N no acúmulo de sacarose pela cana. Silveira e Crocomo (1981) apud Franco et al. (2010b) observaram decréscimo no conteúdo de sacarose nas plantas de cana-de-açúcar cultivadas na presença de elevado conteúdo de N.

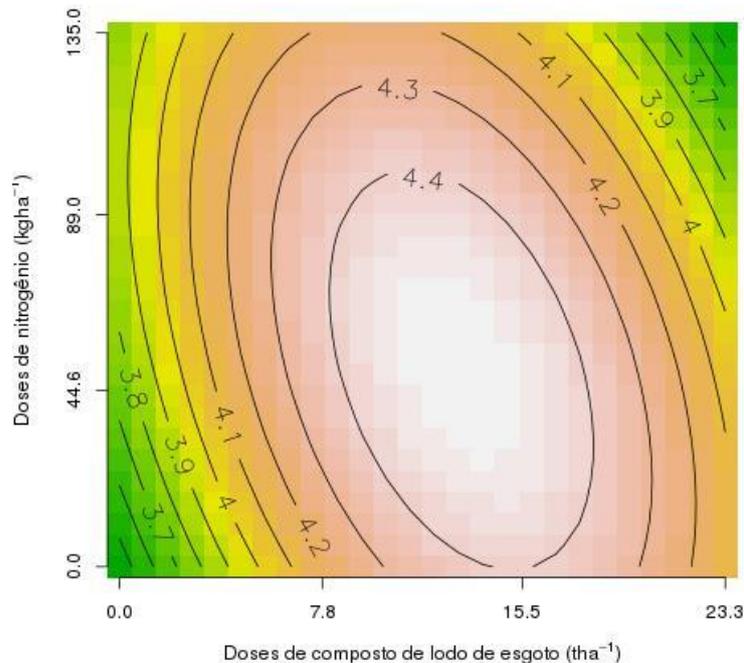


Figura 20 - Teores de nitrogênio (g kg⁻¹) no caldo de cana-de-açúcar, coletado após a colheita da terceira soca, em função de doses de composto de lodo de esgoto e de nitrogênio mineral.

Fósforo

Em relação aos teores de P no caldo não foram observados efeitos das doses de composto de lodo de esgoto e de nitrogênio nos teores de P do caldo da segunda e da terceira soca. Os teores de P na segunda soca variaram de 660,1 a 961,7 mg L⁻¹, e no tratamento NPK convencional o teor encontrado foi de 784,7 mg L⁻¹. Na terceira soca os teores de P encontrados variaram entre 676,1 a 883,7 mg L⁻¹, e no tratamento com adubo mineral convencional o teor encontrado foi de 883,7 mg L⁻¹.

Os teores de P encontrados são adequados para o processamento da fermentação alcoólica, que ocorre com teores entre 115 a 230 mg L⁻¹ de P. O processo de clarificação também é favorecido por teores de P no caldo entre 120 a 260 mg L⁻¹ (CHIBA, MATTIAZZO, OLIVEIRA, 2009).

O fósforo no caldo é fundamental no processo de clarificação. Caldos com baixos teores de P₂O₅ são de difícil floculação, dificultando a decantação de impurezas (bacilho, argila, clorofila, etc.) é ruim. O caldo turvo e de coloração intensa implica na produção de açúcar de pior qualidade e, conseqüentemente, de menor valor comercial. No caldo de cana é importante que contenha um teor mínimo de P₂O₅ para que ocorra uma boa floculação, quando esses teores foram inferiores deve-se fazer a complementação através da adição de um fosfato solúvel ao caldo. A adubação fosfatada contribui para elevar os teores de P₂O₅ do caldo, melhorando o processo de clarificação (KORNDÖRFER; MARTINS, 1992)

Os teores de P no caldo são considerados elevados, em todos os tratamentos, quando comparados com os encontrados na literatura. Chiba, Mattiazzo e Oliveira analisaram os teores de P no caldo de cana-de-açúcar tratada com lodo de esgoto e P mineral e obtiveram valores entre 145 e 269 mg L⁻¹, e no tratamento com adubo mineral NPK o valor encontrado foi de 145 mg L⁻¹. A determinação do caldo foi realizada pelo método de colorimetria, o qual determina os teores de P solúveis no caldo de cana.

No presente estudo as amostras de caldo foram digeridas em sistema fechado em forno de microondas para posterior leitura em ICP-MS. Devido ao tipo de análise adotada foram determinados os teores solúveis e insolúveis de P, superestimando esses valores. Portanto, os teores de P no caldo se referem ao P solúvel mais o P insolúvel contidos nas amostras de caldo de cana-de-açúcar.

Colmo

Nitrogênio e fósforo

Não foram encontradas diferenças entre os teores de nitrogênio e fósforo nas amostras de colmo da cana-de-açúcar nos dois períodos de cultivo avaliados, segunda e terceira soca.

Os teores de N do colmo, na segunda soca, variaram de 2,4 a 3,3 g kg⁻¹, e no tratamento NPK o valor encontrado foi de 2,7 g kg⁻¹. Na terceira soca os teores variaram de 2,6 a 3,8 g kg⁻¹, e no tratamento NPK o valor encontrado foi de 3,1 g kg⁻¹.

Os teores de fósforo das amostras de colmo da segunda soca variaram de 0,24 a 0,37 g kg⁻¹, e na terceira soca os teores variaram de 0,26 a 0,4 g kg⁻¹, no tratamento NPK o teor encontrado foi de 0,33 g kg⁻¹.

Os teores de N e P encontrados em relação às doses de composto foram iguais ou maiores àqueles encontrados no tratamento com adubo mineral, indicando que o composto disponibilizou N e P para a planta.

Marques et al. (2007) não encontraram diferenças significativas nos teores de N e P em amostras de colmos provenientes de canas tratadas com lodo de esgoto. Segundo os autores, de maneira geral, os teores de N em todas as partes das plantas analisadas não apresentaram variações significativas, em relação aos tratamentos, mesmo quando comparados com o tratamento controle.

4.4 Conclusões

O composto de lodo de esgoto contribui para a melhoria da fertilidade do solo, com aumento no teor de C-orgânico, P, pH, Ca, K, soma dos cátions (Ca, Mg e K) e CTC do solo.

A aplicação de composto de lodo de esgoto na dose estabelecida pelo critério do N, CONAMA (2006), supri as necessidades nutricionais da cultura da cana-de-açúcar.

REFERÊNCIAS

- ABREU JUNIOR, C. H.; MURAOKA, T.; LAVORANTE, A. F.; ALVAREZ, V. F. C. Condutividade elétrica, reação do solo e acidez potencial em solos adubados com composto lixo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 24, n. 3, p. 645-657, 2000.
- ABREU JUNIOR, C. H.; MURAOKA, T.; OLIVEIRA, F. C. Carbono, nitrogênio, fósforo e enxofre em solos tratados com composto de lixo urbano. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 26, p. 769-780, 2002.
- ABREU JUNIOR, C. H.; MURAOKA, T.; OLIVEIRA, F. C. Cátions trocáveis, capacidade de troca de cátions e saturação por bases em solos brasileiros adubados com composto de lixo urbano. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 58, p. 813-824, 2001.
- ABREU JUNIOR, C. H.; NOGUEIRA, T. A. R.; OLIVEIRA, F. C.; PIRES, A. M. M.; FRANCO, A. Aproveitamento agrícola de resíduos no canavial. In: MARQUES, M. O.; MUTTON, M. A.; NOGUEIRA, T. A. R.; TASSO JÚNIOR, L. C.; NOGUEIRA, G. A.; BERNARDI, J. H. (Org.). **Tecnologias na agroindústria canavieira**. Jaboticabal: Funep, 2008, p. 183-210.
- ABREU JUNIOR, C.H.; PIRES, A.M.M.; COSCIONE, A.R.. **Utilização agrícola de composto de lixo**. In: SILVA, F.C.; SERGIO, M.; BARREIRA, L.P.; Pires, A.M.. (Org.). *Gestão Pública de Resíduo Sólido Urbano: Compostagem e Interface Agrícola*. Botucatu: FEPAF - Fundação de Estudos e Pesquisas Agrícolas e Florestais, cap. 7, 2009, 123-140 p.
- ABREU JUNIOR, C. H.; NOGUEIRA, T. A. R. Determinação de elementos potencialmente tóxicos por espectrometria de massas com plasma (ICP-MS): solução ou problema? In: COSCIONE, A. R.; NOGUEIRA, T. A. R.; PIRES, A. M. M. (Org.). **Uso agrícola de lodo de esgoto** - Avaliação após a resolução nº 375 do CONAMA. 1. ed. Botucatu: FEPAF – Fundação de Estudos e Pesquisas Agrícolas e Florestais, 2010. p. 225-263.
- AFIF, E.; BARRON, V.; TORRENT, J. Organic matter delays but does not prevent phosphate sorption by cerrado soils from Brazil. **Soil Science**, New Brunswick, v. 195, p. 207-211, 1995.
- ALEXANDER, A. G. **Sugarcane physiology**. Amsterdam: Elsevier, 1973. 752 p.
- ALLEONI, L. R. F.; FERNANDES, A. R.; CORREIA, B.L. Sequential extraction of phosphorus in a long term field experiment in Brazil. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 161, 145-151, 2012.
- ALLEONI, L. R. F.; FERNANDES, A. R.; JORDÃO, C. B. Phosphorus availability in an oxisol amended with biosolids in a long-term field experiment. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 76, p. 1678-1684, 2012.
- ANDRADE, F.V.; MENDONÇA, E. S.; ALVAREZ, V. H.; NOVAIS, R. F. Adição de ácidos orgânicos e húmicos em Latossolos e adsorção de fosfato. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 27, p. 1003-1011, 2003.

ANJOS, A. R. M.; MATTIAZZO, M. E. Metais pesados em plantas de milho cultivadas em Latossolos repetidamente tratados com biossólido. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 57, p. 1-16, 2000.

BACCHI, O. O. S. Botânica da cana-de-açúcar. In: ORLANDO FILHO, J. (Coord.). **Nutrição e adubação da cana-de-açúcar**. Piracicaba: IAA/Planalsucar, 1983. p. 25-37.

BEBÉ, F.V.; BARROS, M.F.C.; FREIRE, M.B.G.S.; BELTRAME, L.T.C.; NUNES, R.S.; SOUZA, A.M.O.; CARVALHO, R.E.R.; SANTOS, M.A.; SILVA, T.D.M. Dinâmica do potássio em cana-de-açúcar fertirrigada com vinhaça. IX Jornada de Ensino, Pesquisa e Extensão – JEPEX. UFRPE, 2009.

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

BERNAL, M. P.; NAVARRO, A. F.; SÁNCHEZ-MENEDERO, M. A.; ROIG, A.; CEGARRA, J. Influence of sewage sludge compost stability and maturity on carbon and nitrogen mineralization in soil. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v. 30, p. 305-313, 1998.

BERTON, R. S. Recomendações do uso de lodo de esgotos para algumas culturas. In: SABESP. **Curso - Uso agrícola de lodo de esgoto**. São Paulo: SABESP, 2000. 158 p.

BERTON, S. R.; NOGUEIRA, T. A. R. Uso de Lodo de esgoto na agricultura (Sewage sludge usage in agriculture). In: COSCIONE, A. R.; NOGUEIRA, T. A. R.; PIRES, A. M. (Org.). **Uso agrícola de lodo de esgoto - Avaliação após a resolução nº 375 do CONAMA**. 1. ed. Botucatu: FEPAF – Fundação de Estudos e Pesquisas Agrícolas e Florestais, 2010. p. 31-50.

BERTON, R. S.; CAMARGO, O. A.; VALADARES, J. M. A. S. Absorção de nutrientes pelo milho em resposta à adição de lodo de esgoto a cinco solos paulistas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 13, p. 187-192, 1989.

BERTON, R.S.; VALADARES, J.M.A.S. Potencial agrícola do composto de lixo urbano do Estado de São Paulo. **O Agrônomo**, v.43, p.87-93, 1991.

BERTONCINI, E. I.; MATTIAZZO, M. E.; ROSSETTO, R. Sugarcane yield and heavy metal availability in two biosolid-amended Oxisols. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v. 27, p. 1243-1260, 2004.

BETTIOL, W.; CAMARGO, O. A. **Impactos ambientais na agricultura**. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 349 p. 2006.

BETTIOL, W.; GHINI, R. Impacts of sewage sludge in tropical soil: a case study in Brazil. **Applied and Environmental Soil Science**, New York, v. 2011, n. 1, p. 1-11, 2011.

BOARETTO, A. E. (Coord.). **Uso do lodo de esgoto como fertilizante**. Botucatu: FINEP, 1986. 185 p.

BOEIRA, R. C.; LIGO, M. A. V.; DYNIA, J. F. Mineralização de nitrogênio em solo tropical tratado com lodo de esgoto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 37, p. 1639-1647, 2002.

BOEIRA, R. C.; MAXIMILIANO, V. C. B. Mineralização de compostos nitrogenados após aplicações de lodos de esgoto em quatro cultivos de milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 33, p. 207-218, 2009.

BRASIL. Ministério da Saúde. Portaria nº. 518, de 25 de março de 2004. Estabelece os procedimentos e responsabilidades relativos ao controle e vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade, e dá outras providências. **Diário Oficial**, Brasília, 26 de março de 2006. Seção 1, 266p.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Instrução Normativa nº 25**. <http://sistemasweb.agricultura.gov.br/sislegis/action/detalhaAto.do?method=consultarLegislacaoFederal>. 2009.

BUENO, J.R.P.; BERTON, R.S.; SILVEIRA, A.P.D.; CHIBA, M.K.; ANDRADE, C.A.; DE MARIA, I.C. Chemical and microbiological attributes of an oxisol treated with successive applications of sewage sludge, **Revista Brasileira de Ciência do solo**, Viçosa, v. 35; p. 1461-1470, 2011.

CANTARELLA, H.; TRIVELIN, P.C.O.; VITTI, A.C. Nitrogênio e enxofre na cultura da cana-de-açúcar. In: SIMPÓSIO SOBRE NITROGÊNIO E ENXOFRE NA AGRICULTURA BRASILEIRA, 2007, Piracicaba. **Anais ...** Piracicaba: IPNI, 2007. P 355-392.

CARNAÚBA, B. A. A. **Eficiência de utilização e efeito residual de uréia – 15N em cana-de-açúcar (*Saccharum spp*), em condições de campo**. 1989. 193 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1989.

CASADO-VELA, J.; SELLÉS, S.; NAVARRO, J.; BUSTAMANTE, M. A.; MATAJAX, J.; GUERRIERO, C.; GOMEZ, I. Evaluation of composted sewage sludge as nutritional source for horticultural soils. **Waste Management**, Amsterdam, v. 26, p. 946–952, 2006.

COMPANHIA DE TECNOLOGIA E SANEAMENTO AMBIENTAL - CETESB. **Decisão de Diretoria nº 195-2005-E**, de 23 de novembro de 2005. Dispõe sobre a aprovação dos Valores Orientadores para Solos e Águas Subterrâneas no Estado de São Paulo – 2005, em substituição aos Valores Orientadores de 2001, e dá outras providências. São Paulo, 2005.

CHANG, A.C.; GRANATO, T.C.; PAGE, A.L. A methodology for establishing prytotoxicity criteria for Cr, Cu, Ni, and Zn in agricultural land application of municipal sewage sludges, **Journal of Environmental Quality**, Madison, v.21, p.521-536, 1992.

CHIBA, M. K.; MATTIAZZO, M. E.; OLIVEIRA, F. C. Rendimento de cana-de-açúcar cultivada em Argissolo, utilizando lodo de esgoto como fonte de fósforo. **Acta Scientiarum Agronomy**, 31:495-501, 2009.

CHIBA, M. K.; MATTIAZZO, M. E.; OLIVEIRA, F. C. a. Cultivo de cana-de-açúcar em argissolo tratado com lodo de esgoto. I – Disponibilidade de nitrogênio no solo e componentes de produção. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, n. 2, p. 643-652, 2008.

CHIBA, M. K.; MATTIAZZO, M. E.; OLIVEIRA, F. C. b. Cultivo de cana-de-açúcar em argissolo tratado com lodo de esgoto. II - Fertilidade do solo e nutrição da planta. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, n. 2, p. 653-662, 2008.

COMPANHIA NACIONAL DE ABSTECIMENTO - CONAB. Produtos e serviços safras. http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/12_12_12_10_34_43_boletim_cana_p_ortugues_12_2012.pdf. 2013.

CONSECANA. **Manual de instruções**. Piracicaba, Opinião, 2003, 4 ed. 116p.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE - CONAMA. **Resolução nº 375**, de 29 de agosto de 2006. Define critérios e procedimentos, para o uso agrícola de lodos de esgoto gerados em estações de tratamento de esgoto sanitário e seus produtos derivados, e dá outras providências. Brasília, 2006. 32p.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE - CONAMA. **Resolução nº 375**, de 29 de agosto de 2006. Define critérios e procedimentos, para o uso agrícola de lodos de esgoto gerados em estações de tratamento de esgoto sanitário e seus produtos derivados, e dá outras providências. Brasília, 2006. 32p.

CORRÊA, R.S. Efficiency of five biosolids to supply nitrogen and phosphorus to ryegrass. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 39, p.1133-1139, 2004.

CORRÊA, R.S.; WHITE, R.E.; WEATHERLEY, A.J. Biossolids effectiveness to yield ryegrass based on their nitrogen content. **Scientia Agricola**, v.62, n.3, p.274-280, 2005.

CORRÊA, R.S.; WHITE, R.E.; WEATHERLEY, A.J. Effect of compost treatment of sewage sludge on nitrogen behavior in two soils. **Waste Management**, v.26, n.6, p.614-619, 2006.

CORRÊA, R.S.; SILVA, L.C.R.; BAPTISTA, G.M.M. & SANTOS, P.F. Fertilidade química de um substrato tratado com lodo de esgoto e composto de resíduos domésticos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola Ambiental**, 14:538-544, 2010.

CRAVO, M.S. **Composto de lixo urbano como fonte de nutrientes e metais pesados para alfafa**. Piracicaba, 1995. 148 p. Tese (Doutorado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo.

DIACONO, M.; MONTEMURRO; F. Long-term effects of organic amendments on soil fertility. A review. **Agronomy for Sustainable Development**. 30:401-422, 2010.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGRPECUÁRIA. **Manual de métodos de análise de solo**. 2 ed. Rio de Janeiro: Embrapa, Centro Nacional de Pesquisa de Solos, 1997. 212p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGRPECUÁRIA. **Sistema Brasileiro de Classificação de solos**. 2 ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2006. 306p.

ESCUADERO, A., GONZÁLEZ-ARIAS, A., DEL HIERRO, O., PINTO, M., GARTZIA-BENGOETXEA, N. Nitrogen dynamics in soil amended with manures composted in dynamic and static systems. *J. Environ. Manage.* 108, 66e72, 2012.

FARRELL, M.; JONES, D.L. Heavy metal contamination of a mixed waste compost: metal speciation and fate, **Bioresource Technology**. n.100, p.4423–4432, 2009.

FIGUEIREDO, P. Breve história da cana-de-açúcar e do papel do instituto agrônomo no seu estabelecimento no Brasil. In: DINARDO-MIRANDA, L.L.; VASCONCELOS, A.C.M.; LANDELL, M.G.A. Cana de açúcar. 1 ed. Campinas, Instituto Agrônomo, 2008. 882p.

FRANCO, A. **Uso agrícola de lodo de esgoto na cultura da cana-de-açúcar como fonte de nitrogênio e fósforo e seu impacto ambiental**. 2010. 101f. Tese (Doutorado em Energia Nuclear na agricultura). - Centro de Energia Nuclear na Agricultura/Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2009.

FRANCO, A.; ABREU JUNIOR, C. H.; PERECIN, D.; OLIVEIRA, F. C.; GRANJA, A. C. R.; BRAGA, V. S. Lodo de esgoto como fonte de nitrogênio e fósforo no cultivo de cana-planta e de primeira cana-soca. **Revista Brasileira Ciência do Solo**. Viçosa, v. 34, p.553-561, 2010a.

FRANCO, A.; MARQUES, M.O.; MELO, W.J. Sugarcane grown in an Oxisol amended with sewage and vinasse: nitrogen contents in soil and plant. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v.65, p.408-414, 2008.

FRANCO, H.C.J.; TRIVELIN, P.C.O.; FARONI, C.E.; VITTI, A.C.; OTTO, R. Stalk yield and technological attributes of planted cane as related to nitrogen fertilization. **Scientia Agricola**, v.67, n.5, p.579-590, sep/oct. 2010b.

FROSSARD, E.; SINAJ, S.; DUFOUR, P. Phosphorus in urban sewage sludges as assessed by isotopic exchange. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.60, p.179-182, 1996.

GOMES, J.F.F. **Produção de colmos e exportação de macronutrientes primários por cultivares de cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*)**. Piracicaba, Universidade de São Paulo, 2003. 65p. (Tese de Mestrado).

GRIGATTI, M.; CAVANI, L. ECIAVATTA, C. The evaluation of stability during the composting of different starting materials: Comparison of chemical and biological parameters. **Chemosphere**, n.83, p.41–48, 2011

HARGREAVES, J. C., ADL, M.S., WARMAN, P.R. A review of the use of composted municipal solid waste in agriculture. **Agriculture Ecosystem Environment**, n. 123, p.1–14, 2008.

HE, M. M. TIAN, G. M. LIANG, X. Q. Phytotoxicity and speciation of copper, zinc and lead during the aerobic composting of sewage sludge, **Journal of Hazardous Materials**, n.163, p.671–677, 2009.

KHALIL, A. I.; HASSOUNA, M. S.; EL-ASHQAR, H. M. A.; FAWZI, M. Changes in physical, chemical and microbial parameters during the composting of municipal sewage sludge. **World Journal of Microbiology & Biotechnology**, v.27, p.2359-2369, 2011.

KIEHL, E.J. **Fertilizantes orgânicos**. São Paulo: Ceres, 1985, 492 p.

KORNDORFER, G. H.; COLOMBO, C. A.; CHIMELLO, M. A.; LEONE, P. L. C. Desempenho de variedades de cana-de-açúcar cultivadas com e sem nitrogênio. **STAB**. Sociedade dos Técnicos Açucareiros e Alcooleiros do Brasil, Piracicaba/SP, v. 20, n.3, p. 28-31, 2002.

LÆGREID, M.; BØCKMAN, O.C.; KAARSTAD, O. **Agriculture, fertilizers and the environment**. Wallingford: CABI, 1999. 294p.

MAGUIRRE, R.O.; SIMS, J.T.; COALE, F.J. Phosphorus solubility in biosolids – amended farm soils in the Mid – Atlantic Region of the USA. **Journal of Environmental Quality**, Madison, v.29, n.4, p.1225-1233, 2000.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G.C.; OLIVEIRA, S.B. OLIVEIRA. **Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações**. Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato, p.319. 1997

MARQUES, M.O. BELLINGIERRI, P.A.; MARQUES, T.A.; NOGUEIRA, T.A.R. Qualidade e produtividade de cana-de-açúcar cultivada em solo com doses crescentes de lodo de esgoto. **Bioscience Journal**, v.23, p.111-122, 2007.

MARQUES, M.O.; MARQUES, T.A.; TASSO JUNIOR, L.C. **Tecnologia do açúcar**. Produção e industrialização da cana-de-açúcar. Jaboticabal: FUNEP, 2001. 170p.

McDOWELL, R.W.; SHARPLEY, A.N. Phosphorus losses in subsurface flow before and after manure application to intensively farmed land. **Science of the Total Environment**, Amsterdam, v.278, p.113-125, 2001.

MELO, W.J.; MARQUES, M.O. Potencial **do lodo de esgoto como fonte de nutrientes para as plantas**. In: BETTIOL, W.; CAMARGO, O.A. Impacto ambiental do uso agrícola do lodo de esgoto. Jaguariúna: Embrapa Meio ambiente, 2000. p.109-141.

MORELLI, J.; DEMATTÊ, J.L.I.; DALBEN, A.E.; NELLI, E. Parcelamento da adubação nitrogenada em cana-planta: aplicação no solo. **STAB. Açúcar, Álcool e Subprodutos**, Piracicaba, v. 15, n. 6, p. 26-30, 1997.

MUNHOZ, R.O. **Disponibilidade de fósforo para o milho em solo que recebeu lodo de esgoto**. 2001. 74p. Dissertação (Mestrado) – Instituto Agronômico de Campinas, Campinas, 2001.

NASCIMENTO, C.W.A. et al. 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, p.385-392, 2004.

NOGUEIRA, T. A. R.; OLIVEIRA, L. R.; MELO, W. J.; FONSECA, I. M.; MELO, G. M. P.; MELO, V. P.; MARQUES, M. O. Cádmio, cromo, chumbo e zinco em plantas de milho e em Latossolo após nove aplicações anuais de lodo de esgoto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, p. 2195-2207, 2008.

NOGUEIRA, T. A. R.; FRANCO, A.; HE, ZL; BRAGA, V.S.; FIRME, L.P.; ABREU JUNIOR, C.H. Short-term usage of sewage sludge as organic fertilizer to sugarcane in a tropical soil bears little threat of heavy metal contamination. **Journal of Environmental Management**, v. 114, p. 168-177, 2013.

OLIVEIRA, F.C. **Disposição de lodo de esgoto e composto de lixo urbano num Latossolo Vermelho-Amarelo cultivado com cana-de-açúcar**. 2000. 247f. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2000.

OLIVEIRA, F.C. et al. Efeitos de aplicações sucessivas de lodo de esgoto em um Latossolo Amarelo distrófico cultivado com cana-de-açúcar: carbono orgânico, condutividade elétrica, pH e CTC. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.26, p.505-519, 2002.

OLIVEIRA, F.C. et al. Lixiviação de nitrato em um Latossolo Amarelo distrófico tratado com lodo de esgoto e cultivado com cana-de-açúcar. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v.58, n.1, p.171-180, 2001.

PARADELO, R.; VILLADA, A.; BARRAL, M. T. Reduction of the short-term availability of copper, lead and zinc in a contaminated soil amended with MSW compost. **Journal of Hazardous Materials**, 188, p.96–104, 2011.

PEDRA, F.; POLO, A.; RIBEIRO, A.; DOMINGUES, H. Effects of municipal solid waste compost and sewage sludge on mineralization of soil organic matter. **Soil Biology & Biochemistry**, n.39, p. 1375–1382, 2007.

QUAGGIO, J.A.; VAN RAIJ, B.; Cálcio, Magnésio e correção da acidez do solo. In: DINARDO-MIRANDA, L.L.; VASCONCELOS, A.C.M.; LANDELL, M.G.A. **Cana-de-açúcar**. Campinas: Fundação IAC, 2008. p. 313-321

RAIJ, B. Van; ANDRADE, J.C.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A. **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Campinas: Instituto Agrônomo, 2001. 285p.

RAIJ, B. Van. et al. Interpretação de resultados de análise do solo. In: RAIJ, B. van et al. (Ed.). **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. 2. ed. Campinas: Fundação IAC, 1996. p.237-239. (Boletim, 100).

RICCI, A. B. **Uso de lodo de esgoto estabilizado na revegetação de um solo decapitado**. 2008. 111p. (Tese de Doutorado). Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2008.

RICCI, A. B.; PADOVANI, V. C. R.; PAULA JÚNIOR, D. R.; Use of stabilized sewage sludge on a humusless soil: II-chemical properties and revegetation. *Revista Brasileira Ciência do Solo*, 34, 543, 2010.

ROSSETTO, R.; DIAS, F.L.; VITTI, A.C.; TAVARES, S. Potássio. In: DINARDO-MIRANDA, L.L.; VASCONCELOS, A.C.M.; LANDELL, M.G.A. **Cana-de-açúcar**. Campinas: Fundação IAC, 2008. p. 289-312.

ROSSETTO, R.; BERTON, R. S.; MATTIAZO, M. E. ; LANDELL, M. G. A. Produtividade e nutrientes na cana-de-açúcar em solo tratado com composto de lixo urbano. **STAB**. Sociedade dos Técnicos Açucareiros e Alcooleiros do Brasil, Piracicaba, v. 20, n.04, p. 28-31, 2002.

SAMPAIO, E.V.S.B.; SALCEDO, I.J.; BETTAMY, J. Dinâmica de nutrientes em cana-de-açúcar. I. Eficiência de utilização de uréia – ¹⁵N em aplicação única ou parcelada. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.19, n.8, p.943-949, 1984.

SILVA, F.C. et al. 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; da CALDEIRA, C.M.V.; GOMES, P.C.; BERGAMASCO, A.F. **Uso agrícola de composto de lixo**: estudo da transferência de metal pesado no sistema solo-cana-de-açúcar. Campinas: Embrapa Informática Agropecuária, 5p. 2000.

SILVEIRA, J. A. G.; CROCOMO, O. J. Assimilação de Nitrogênio em cana-de-açúcar cultivada em presença de elevado nível de N e de vinhaça no solo. **Revista Brasileira de Fisiologia Vegetal**, n.2, v.2, 7-15p, 1990.

SILVEIRA, J. A. G.; CROCOMO, O. J. Biochemical and physiological aspects of sugarcane (*Saccharum* spp;) I. Effect of NO₃ nitrogen concentration on the metabolism of sugars and nitrogen. *Energia Nuclear na Agricultura*, Piracicaba, 3:19-33, 1981.

SIMONETE, M.A. et al. Efeito do lodo de esgoto em um Argissolo e no crescimento e nutrição de milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.38, p.1187-1195, 2003.

SINGH R.P; AGRAWAL M. Potential benefits and risks of land application of sewage sludge. *Waste Manage* 28:347–358, 2008.

SPIRONELLO, A.; RAIJ, B.van; PENATTI, C.P.; CANTARELLA, H.; MORELLI, J.L.; ORLANDO FILHO, J.; LANDELL, M.G.A. & ROSSETTO, R. Cana-de-açúcar. 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*. Campinas: Fundação IAC, 1996. p.237-239. (Boletim, 100).

TITTARELLI, F., PETRUZZELLI, G., PEZZAROSSA, B., CIVILINI, M., BENEDETTI, A. Quality and agronomic use of compost, in: Diaz L.F., de Bertoldi M., Bidlingmaier W., Stentiford E. (Eds.), *Compost science and technology*, Waste management series 8, Elsevier Ltd., pp. 119–145, ISBN-13: 978-0-08-043960-0, 2007.

TRIVELIN, P.C.O. **Utilização do nitrogênio pela cana-de-açúcar**: três casos estudados com uso do traçador ^{15}N . 2000. 138f. Dissertação (Livre-Docência). Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2000.

TSUTIYA, M.T. Alternativas de disposição final de lodo de esgotos. In: TSUTIYA, M.T. et al. Lodo de esgotos na agricultura. 2. ed. São Paulo: ABES/SP, 2002. p.133-180.]

VITTI, A.C.; TRIVELIN, P.C.O.; CANTARELLA, H.; FRANCO, H.C.J.; FARONI, C.E.; OTTO, R.; TRIVELIN, M.O.; TOVAJAR, J.G. Mineralização da palhada e crescimento de raízes de cana-de-açúcar relacionados com a adubação nitrogenada de plantio. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 32, p.2757-2762, 2008.

ZAMBELLO JUNIOR, E.; ORLANDO FILHO, J. A adubação da cana-de-açúcar na região centro-sul do Brasil. Boletim Técnico Planalsucar, Piracicaba, v.3, n.3, p.5-26, 1981.

APÊNDICES

Apêndice A - Produtividade média (TCH) da cana-soca ($t\ ha^{-1}$), segunda soca, em função das doses de composto de lodo de esgoto, nitrogênio e fósforo.

Lodo de esgoto $t\ ha^{-1}$	Nitrogênio $kg\ ha^{-1}$	Fósforo, $kg\ ha^{-1}\ P_2O_5$	
		0	30
		t ha^{-1}	
0	0	78	77
	32	78	88
	65	85	88
	98	77	89
27	0	87	85
	32	87	82
	65	92	96
	98	90	90
57	0	96	83
	32	86	97
	65	96	104
	98	90	98
82	0	79	92
	32	96	85
	65	91	103
	98	98	95

Apêndice B - Produtividade média (TCH) da cana-soca ($t\ ha^{-1}$), terceira soca, em função das doses de composto de lodo de esgoto, nitrogênio e fósforo.

Lodo de esgoto $t\ ha^{-1}$	Nitrogênio $kg\ ha^{-1}$	Fósforo, $kg\ ha^{-1}\ P_2O_5$	
		0	54
0	0	59	55
	44,6	64	66
	89	68	67
	135	61	70
23,3	0	73	71
	44,6	69	65
	89	71	65
	135	69	69
15,5	0	68	68
	44,6	69	75
	89	74	71
	135	72	68
7,8	0	70	72
	44,6	78	70
	89	69	80
	135	75	75