

CAIO VILELA CRUZ

**PRODUÇÃO E EFICIÊNCIA AGRONÔMICA DE COMPOSTO ORGÂNICO
BIOESTABILIZADO ENRIQUECIDO COM FÓSFORO A PARTIR DE LODO DE
ESGOTO**

Botucatu

2019

CAIO VILELA CRUZ

**PRODUÇÃO E EFICIÊNCIA AGRONÔMICA DE COMPOSTO ORGÂNICO
BIOESTABILIZADO ENRIQUECIDO COM FÓSFORO A PARTIR DE LODO DE
ESGOTO**

Tese apresentada à Faculdade de Ciências Agronômicas da Unesp Câmpus de Botucatu, para obtenção do título de Doutor em Agronomia (Agricultura).

Orientador: Dr. Dirceu Maximino Fernandes

Coorientador: Dr. Roberto Lyra Villas Boas

Botucatu

2019

C957p Cruz, Caio Vilela
Produção e eficiência agronômica de composto orgânico bioestabilizado enriquecido com fósforo a partir de lodo de esgoto / Caio Vilela Cruz. -- , 2019
109 p.

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de Ciências Farmacêuticas, Araraquara,
Orientador: Dirceu Maximino Fernandes
Coorientador: Roberto Lyra Villas Boas

1. Compostagem. 2. Disponibilidade de fósforo. 3. Produção.
I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca da Faculdade de Ciências Farmacêuticas, Araraquara. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

Título: "PRODUÇÃO E EFICIÊNCIA AGRONÔMICA DE COMPOSTO ORGÂNICO BIOESTABILIZADO ENRIQUECIDO COM FÓSFORO A PARTIR DE LODO DE ESGOTO"

AUTOR: CAIO VILELA CRUZ
ORIENTADOR: DIRCEU MAXIMINO FERNANDES
COORIENTADOR: ROBERTO LYRA VILLAS BÔAS

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Doutor em AGRONOMIA (AGRICULTURA), pela Comissão Examinadora:

Dirceu Maximino Fernandes
Prof. Dr. DIRCEU MAXIMINO FERNANDES
Solos e Recursos Ambientais / Faculdade de Ciências Agrônomicas de Botucatu

Iraé Amaral Guerrini
Prof. Dr. IRAÉ AMARAL GUERRINI
Solos e Recursos Ambientais / Faculdade de Ciências Agrônomicas de Botucatu

Fernando Carvalho Oliveira
Dr. FERNANDO CARVALHO OLIVEIRA
/ Biossolo Agricultura & Ambiente Ltda

Caroline de Moura d'Andréa Mateus
Pós-Doutoranda CAROLINE DE MOURA D'ANDRÉA MATEUS
Solos e Recursos Ambientais / Faculdade de Ciências Agrônomicas de Botucatu

LUIZ VITOR CREPALDI SANCHES
Prof. Dr. LUIZ VITOR CREPALDI SANCHES
Agronomia, Floricultura e Paisagismo / FIB - Faculdades Integradas de Bauru

Botucatu, 31 de maio de 2019.

A meus pais Paulo e Lilia, aos meus irmãos Igor e Paulo, minha tia Sônia e minha avó Fina, por sempre me ajudarem, apoiar e incentivar todas as minhas realizações.

A minha esposa Fernanda pelo companheirismo, compreensão, amor e incentivo nesta caminhada.

DEDICO

AGRADECIMENTOS

A Deus pela oportunidade da vida, pela família maravilhosa e por me guiar pelos caminhos certos.

A meus pais, Paulo e Lilia pelo apoio e amor incondicional. Por não medirem esforços para me ajudar, por estarem presentes em todas as minhas caminhadas. Sem o apoio de vocês eu não teria começado esta caminhada e nem conseguiria seguir com meus objetivos de vida.

A minha tia Sônia e minha vó Josefina pelo amor, carinho e apoio.

A minha esposa Fernanda, por estar ao meu lado em todo os momentos, amor, carinho, paciência.

A meus irmãos Igor e Paulo pelo apoio e incentivo.

A Juslei Figueiredo pelos bons momentos compartilhados.

A UNESP- FCA – Campus de Botucatu. É de grande orgulho ter estudo nesta instituição.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, pela concessão da bolsa de estudos.

A Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pelo financiamento desse trabalho (Processo 2013/50413-0).

A todos os docentes da PG-Agricultura pelos valiosos ensinamentos e por momentos prazerosos de aprendizado.

Aos funcionários do departamento de Solos e Recursos Naturais, por todo o auxílio e pela amizade.

Aos funcionários da FEPE – Fazendas de Ensino Pesquisa e Extensão.

Ao Professor Dr. Dirceu Maximino Fernandes, por ter me dado a oportunidade de realização do Doutorado, pelos valiosos ensinamentos, pelos conselhos, pela amizade e por não medir esforços para me ajudar em momentos difíceis. Sou eternamente grato!

Ao Professor Dr. Roberto Lyra Villas Boas que me proporcionou inúmeras oportunidades de aprendizado e crescimento profissional, pelo incentivo constante, pela enorme paciência, pela confiança depositada em mim.

A Dra. Caroline de Moura D'Andréa Mateus pela amizade, pelos bons conselho, apoio, dedicação, enorme paciência e principalmente pelo incentivo.

A pesquisadora Dra. Rosemary Marques de Almeida Bertani, pela ajuda e ensinamentos.

A Raquel Crisma pelo apoio e dedicação realização deste trabalho e pela amizade.

A Daniela Pires pelo apoio na realização deste trabalho.

Aos meus amigos Hugo, Lydia, Douglas, Marco, Livia, Roseli, Raquel, Caio Nascimento, Caroline. Por todos os excelentes momentos vividos ao lado de vocês.

RESUMO

No estado de São Paulo o lodo de esgoto é destinado para aterros sanitários, perdendo-se assim um resíduo orgânico de grande potencial fertilizante. O objetivo deste trabalho foi avaliar o efeito do enriquecimento desse resíduo com fontes de fósforo (P) no processo de compostagem e a eficiência agronômica dos fertilizantes produzidos. Dois experimentos foram realizados, o primeiro (Experimento I) consiste no enriquecimento de P no início do processo de compostagem do lodo de esgoto com bagaço de cana, foi conduzido em delineamento inteiramente casualizado com um esquema fatorial 2x4, o primeiro fator consiste em fontes inorgânicas de P: superfosfato triplo (ST) e um fosfato natural reativo (FR), em interação com quatro doses de P (0%, 1,5%, 3,0% e 4,5%) sendo essas doses calculadas em relação a massa seca do composto, com duração de 60 dias e foram coletadas amostras a cada 15 dias para análise química e para avaliação do pH, umidade, P Total, P solúvel em água, P em citrato neutro de amônio (CNA) e P em ácido cítrico (AC), nitrogênio total, carbono orgânico total e relação C/N e os teores de macro e micro nutrientes; também foi monitorado a temperatura (T) das leiras. O segundo experimento (Experimento II), foi realizado em condições de estufa em delineamento inteiramente casualizado no esquema fatorial 10x5, onde o primeiro fator consiste nas fontes de P produzidas no experimento I e fontes inorgânicas de P, sendo: ST, FR, lodo compostado (LC)+FR a 0%, 1,5%, 3,0% e 4,5% (LC0%FR; LC1,5%FR; LC3,0% FR e LC4,5%) e LC+ST a 0%, 1,5%, 3,0% e 4,5% (LC0%ST; LC1,5%ST; LC3,0% ST e LC4,5%ST), o segundo fator em doses (0, 25, 50, 75 e 100 mg de P dm⁻³), foi realizado dois cultivos sequenciais de milho com 40 dias de crescimento cada; Na planta foi avaliado a produção de biomassa seca (MS), acúmulo de P (AC), Índice de Eficiência Agronômica (IEA), no solo foi avaliado o P-resina. O uso da fonte superfosfato triplo na dose de 1,5% de P no enriquecimento em base seca e a fonte fosfato reativo no enriquecimento para as doses de 1,5%, 3,0% e 4,5% em base seca, não interferem no processo de compostagem e possibilitam que ocorra de forma eficiente, podendo ser utilizadas para o enriquecimento. O processo de compostagem por si só, não é eficiente em solubilizar e disponibilizar em quantidades satisfatórias o P contido no fosfato reativo. As fontes LC 0% ST, LC 1,5% ST, LC 3,0% ST, LC 4,5% ST, LC 0% FR, LC 1,5% FR, LC 3,0% FR incrementam e elevam o teor de P no solo com o aumento das doses. O enriquecimento do composto com o superfosfato triplo, presente nos tratamentos LC

1,5% ST, LC 3,0% ST, LC 4,5% ST, proporcionou os maiores valores de massa seca, acúmulo de P e IEA, demonstrando que essas fontes são mais adequadas para o suprimento de P para culturas de ciclo curto, porém o uso de fonte solúvel com o lodo de esgoto no processo de compostagem diminuiu a eficiência agronômica da fonte solúvel, onde surge a hipótese que em função do pH e da concentração de Fe e Al no composto, pode formar compostos pouco solúveis e inibem a disponibilidade de P fornecido via ST.

Palavras Chave: Compostagem. Disponibilidade de fósforo. Produção.

ABSTRACT

In the state of São Paulo, sewage sludge is destined for landfills, thus losing an organic residue with great fertilizing potential. The objective of this work was to evaluate the effect of enrichment from phosphorus residues on the composting process and the agronomic efficiency of the fertilizers produced. Two experiments were carried out, the first (Experiment I) consists of P enrichment at the beginning of the sugarcane bagasse sewage sludge composting process, was conducted in a completely randomized design with a 2x4 factorial scheme, the first factor consists of inorganic sources. P: triple superphosphate (ST) and a reactive natural phosphate (RF), in interaction with four P doses (0%, 1.5%, 3.0% and 4.5%). 60 days dry weight of the compost and samples were taken every 15 days for chemical analysis and for pH, moisture, Total P, water soluble P, neutral ammonium citrate (CNA) and P acid citric acid (AC), total nitrogen, total organic carbon and C / N ratio and the macro and micro nutrient contents; The temperature (T) of the swaths was also monitored. The second experiment (Experiment II) was conducted under greenhouse conditions in a completely randomized design in a 10x5 factorial scheme, where the first factor consists of P sources produced in experiment I and inorganic P sources, being: ST, FR, composted sludge. (LC) + 0% FR, 1.5%, 3.0% and 4.5% (LC0% FR; LC1.5% FR; LC3.0% FR and LC4.5%) and LC + ST a 0%, 1.5%, 3.0% and 4.5% (LC0% ST; LC1.5% ST; LC3.0% ST and LC4.5% ST), the second factor in doses (0.25 , 50, 75 and 100 mg of P dm⁻³), two sequential maize crops were grown with 40 days of growth each; In the plant was evaluated the production of dry biomass (DM), accumulation of P (AC), Agronomic Efficiency Index (IEA), in the soil was evaluated the P-resin. The use of the triple superphosphate source at 1.5% P for dry basis enrichment and the reactive phosphate source for enrichment at 1.5%, 3.0% and 4.5% dry basis did not interfere in the composting process and enable it to occur efficiently and can be used for enrichment. The composting process alone is not efficient in solubilizing and making available in satisfactory quantities the P contained in the reactive phosphate. LC 0% ST, LC 1.5% ST, LC 3.0% ST, LC 4.5% ST, LC 0% FR, LC 1.5% FR, LC 3.0% FR sources increase and increase the soil P content with increasing doses. The enrichment of the compound with triple superphosphate, present in the treatments LC 1.5% ST, LC 3.0% ST, LC 4.5% ST, provided the highest values of dry mass, accumulation of P and IEA, demonstrating that these The sources are better suited to

P supply for short cycle crops, but the use of soluble source decreased the agronomic efficiency of the soluble source, ie, using a soluble source in biostabilized sewage sludge reduces the IEA of the soluble mineral source.

Keywords: Composting. Availability of phosphorus. Production

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
2	REVISÃO DE LITERATURA.....	17
2.1	Disponibilidade de fósforo nos solos tropicais.....	17
2.2	Fontes minerais de Fósforo.....	19
2.3	Uso de Lodos de esgoto na agricultura.....	20
2.4	Compostagem.....	22
3	MATERIAL E MÉTODOS.....	24
3.1	Experimento I – Produção de fertilizantes orgânicos compostados a partir do lodo de esgoto e bagaço de cana, e enriquecimento com fosfatos	24
3.1.1	Localização e caracterização da área experimental	24
3.1.2	Delineamento experimental e tratamentos	25
3.1.3	Montagem das leiras, aplicação dos tratamentos e revolvimentos.....	25
3.1.4	Origem e características dos materiais utilizados na compostagem.....	30
3.1.5	Cálculo da MS do composto e da qualidade de fertilizante mineral adicionado.....	31
3.1.6	Avaliações no composto.....	33
3.1.6.1	pH.....	33
3.1.6.2	Temperatura.....	33
3.1.6.3	Umidade.....	33
3.1.6.4	Fósforo.....	33
3.1.6.5	Caracterização química.....	34
3.1.6.6	Metais pesados.....	34
3.1.7	Análise estatística.....	34
3.2	Experimento II – Fertilidade do solo e eficiência agrônômica de fertilizantes orgânicos a base de lodo de esgoto e enriquecidos com fosfatos	34
3.2.1	Localização e caracterização da área experimental.....	34
3.2.2	Características do solo utilizado no experimento.....	34
3.2.3	Caracterização do Experimento.....	36
3.2.4	Fertilizantes minerais e produção dos fertilizantes enriquecidos com fosfatos.....	37
3.2.5	Primeiro cultivo.....	39
3.2.6	Segundo cultivo.....	40
3.2.7	Coleta de solo.....	40
3.2.8	Avaliações de solo.....	40
3.2.9	Avaliações na planta.....	41
3.2.9.1	Matéria seca da parte aérea.....	41
3.2.9.2	Acúmulo de fósforo.....	41
3.2.9.3	Altura e diâmetro.....	41
3.2.9.4	Índice de eficiência agrônômica (IEA).....	41
3.2.10	Análise estatística.....	41
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	43
4.1	Experimento I – Produção de fertilizantes orgânicos compostados a partir do lodo de esgoto e bagaço de cana, e enriquecimento com fosfatos.....	43

4.1.1	Temperatura.....	45
4.1.2	Umidade.....	47
4.1.3	pH.....	50
4.1.4	Nitrogênio.....	50
4.1.5	Fósforo.....	52
4.1.6	Teor de Cálcio.....	54
4.1.7	Carbono Orgânico total.....	61
4.1.8	Relação C:N.....	63
4.1.9	Concentração de potássio (K ₂ O), magnésio (Mg), enxofre (S) e micronutrientes nos compostos produzidos.....	64
4.1.10	Metais pesados.....	66
4.1.11	Considerações finais.....	68
4.2	Experimento II – Fertilidade do solo e eficiência agronômica de fertilizantes orgânicos a base de lodo de esgoto e enriquecimento com fosfatos.....	69
4.2.1	Produção de massa seca nas plantas de milho.....	69
4.2.2	Acúmulo de P na parte aérea das plantas de milho.....	73
4.2.3	Altura de plantas.....	75
4.2.4	Diâmetro do colmo.....	77
4.2.5	Índice de Eficiência Agronômica – IEA.....	79
4.2.6	Avaliações no Solo.....	85
4.2.6.1	Materia Orgânica do Solo (MOS).....	85
4.2.6.2	Fósforo disponível.....	87
4.2.6.3	pH, Al,H+Al,K,Ca,Mg,SB,CTC,V% e Boro(B).....	90
4.2.6.4	Cu, Fe,Mn e Zn.....	91
4.2.7	Considerações Finais.....	95
5	CONCLUSÕES.....	97
	REFERÊNCIAS.....	99
	APÊNDICE A.....	109

1 INTRODUÇÃO

A compostagem é um processo onde a decomposição microbiana de uma massa heterogênea de matéria orgânica no estado sólido transforma um resíduo orgânico em um fertilizante. Na sua fase final tem-se a mineralização de determinados componentes da matéria orgânica, com produção de calor, sendo necessária água para que o processo funcione.

Essa técnica é uma alternativa bastante eficiente para dar um destino diferente e sustentável para resíduos orgânicos, e viabiliza o uso do lodo de esgoto, que é produzido na estação de tratamento da Sabesp localizada no município de Botucatu, transformando um resíduo orgânico em fertilizante.

O lodo de esgoto é um resíduo de maior volume gerado durante os processos de tratamento de efluentes domésticos. A problemática que envolve o lodo é sua disposição final, em que geralmente o destino é um aterro sanitário, gerando impacto ambiental o que compromete, em parte, os efeitos benéficos da coleta e tratamento.

É um material rico em nutrientes o que viabiliza o seu uso, reaproveitando os nutrientes podendo até substituir adubações minerais em plantas cultivadas. Com o processo da compostagem o teor P no lodo torna-se reduzido, sendo assim necessárias grandes quantidades de lodo empregadas para suprir a necessidade das plantas, tornando o seu uso inviável ou até prejudicial devido as grandes quantidades empregadas.

O fósforo é um nutriente de grande importância em regiões tropicais, pois os solos tropicais apresentam deficiência de P e grande adsorção deste nutriente quando adicionado via fertilizantes, sendo imprescindível o uso de fertilizantes fosfatados para uma produção satisfatória. Essa característica tem uma relação direta com a produtividade das culturas afetando nos custos de produção e retorno econômico, e ainda é uma fonte onde as jazidas de rocha fosfatada para a produção de fertilizantes são finitas, e com a expansão e aumento da área de plantio e da produtividade, o uso e manejo mais eficiente dos fertilizantes fosfatados vêm sendo uma busca constante pela pesquisa.

Neste contexto a adição de fontes solúveis e com uma baixa solubilidade de fósforo é uma alternativa para aumentar o teor de fósforo disponível no lodo compostado e o próprio processo de compostagem pode ajudar na solubilização de fertilizante menos solúveis, aumentando assim a eficiência no uso destes fertilizantes

na agricultura e viabilizando uma fonte renovável de P que é o lodo de esgoto, produzindo assim um fertilizante fosfatado organomineral, adicionando ao solo uma fonte renovável de P e podendo aumentar a eficiência da fonte mineral e adicionar matéria orgânica no solo.

A crescente preocupação em ter um destino viável e sustentável para os lodos produzidos nas estações de tratamento da Sabesp e a busca de alternativas para o aumento da eficiência no manejo de nutrientes na agricultura, torna a produção de fertilizante organominerais, que atendam às necessidades das culturas e ao mesmo tempo dê um destino sustentável e viável para esse resíduo, uma alternativa viável e mostra-se de grande importância social e ambiental.

Portanto, objetiva-se com esse trabalho: avaliar o efeito da adição de fertilizantes fosfatados no processo de compostagem do lodo de esgoto (ETE) da SABESP de Botucatu, avaliando assim qual das fontes minerais e em qual dose possibilite que o processo de compostagem seja eficiente; avaliar o efeito da compostagem na solubilização do fósforo (P) de fosfatos naturais reativos; avaliar o efeito que os fertilizantes organominerais exercem no solo, no fornecimento de P para plantas de milho e a sua eficiência agrônômica.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Disponibilidade de fósforo nos solos tropicais

Para que a planta seja nutrida de forma que alcance seu máximo potencial produtivo, o solo tem que fornecer o nutriente em solução atendendo a demanda da planta (SOUSA et al., 2010).

O fósforo em solos de regiões tropicais ocupa um lugar de destaque, pois é o nutriente que se encontra, de forma geral, com uma baixa concentração e quando adicionado via fertilizante sofre reações as quais diminuem a eficiência no uso deste pela planta (HINSINGER, 2001; NOVAIS & SMYTH, 1999).

É um elemento que tem grande afinidade com o cálcio (Ca), ferro (Fe) e alumínio (Al) os quais estão presentes na maioria dos solos brasileiro em grandes quantidades principalmente nas formas de óxidos hidratados de ferro, alumínio e caulinita compondo a maior parte da fração mineralógica da argila formando compostos de baixa solubilidade (RAIJ, 2004; ROLIM NETO et al.,2004; VALLADARES et al.,2003).

A adsorção de P adicionado ao solo, ocorre pela precipitação do P em solução como formas iônicas de Fe, Al e Ca. O P inicialmente adsorvido a superfície dos colóides e difunde-se, com o tempo, para seu interior. É um processo lento, que pode levar anos para atingir o equilíbrio, devendo ser, também, responsável pela diminuição da disponibilidade de P de um solo recém fertilizado (ALCARDE et al., 1991; AQUINO, 2004), em solos com baixa ou nenhuma adição de fertilizantes fosfatados, as formas orgânicas de P são as principais responsáveis pelo fornecimento deste nutriente às plantas, pois as formas inorgânicas encontram-se indisponíveis tanto por ter teores baixos como adsorvido ou precipitado (GATIBONE et al.,2007).

A adsorção por oxidróxidos ocorre por meio de troca de ligantes onde OH^- e o OH_2^+ , da superfície dos óxidos é trocado por fosfato da solução. Nesse tipo de ligação o núcleo central que é o receptor de elétrons (no caso dos nossos solos são o Fe, Al e Mn) que se encontram e fazem parte da estrutura e estão localizados na superfície dos óxidos, hidróxidos e minerais de argila (1:1), se liga a um ligante (doadores de elétrons no caso os fosfatos). É uma ligação ou adsorção específica e não depende do tipo de carga elétrica dos constituintes sólidos devido ao caráter covalente da ligação, com formação de compostos pouco solúveis ou insolúveis fixando o P ao entrarem em contato com a fase sólida do solo, não o disponibilizando às plantas o

que justifica a baixa concentração de fosfatos (H_2PO_4^- e HPO_4^{2-}) na solução do solo (ERNANI, 2008).

O fósforo que fica retido no solo e não retorna em formas que as plantas possam absorver é conhecido como fósforo não-lábil, cerca de 75% de adsorção é completada em um tempo de equilíbrio inferior a meia hora em solos que tem grande capacidade de adsorção de fósforo (GONÇALVES et al., 1985).

Essa adsorção de fosfato também está relacionada com a textura, formação geológica e área superficial dos óxidos de Fe e Al, respectivamente, goethita e gibbsita (Rolim Neto et al., 2004; CORRÊA, 2011). Bahia Filho et al. (1983) estudando o fenômeno de adsorção em componentes da fração argila observara que em solos de textura e mineralogia variáveis, que a goethita foi o principal componente dessa fração responsável pelas variações observadas na capacidade tampão máxima e na adsorção máxima de fósforo. Portanto o processo de fixação de P tem grande relevância no manejo da fertilidade do solo, visando maior eficiência de uso de fertilizantes fosfatados.

Segundo HINSINGER (2001), de forma geral, a disponibilidade de P é maior em solos com pH na faixa de 5,5 a 7,0, pois o pH do solo controla a disponibilidade para as plantas das formas iônicas do fosfato principalmente a forma H_2PO_4^- .

Por essa razão é que a recomendação de corretivos visa elevar o pH do solo entre 5,5 a 7, além de proporcionar aumento do pH, da saturação por bases, a precipitação e a neutralização do alumínio, do ferro e do manganês, aumentando e a eficiência dos fertilizantes, resultando ainda em diminuição na capacidade de fixação do P, favorecendo o crescimento e desenvolvimento vegetal em solos ácidos (FAGERIA, 2001; CIOTTA et al., 2004;).

Esses fatores influenciam na disponibilidade do fósforo para as plantas, estando diretamente ligados aos fatores intensidade (I), quantidade (Q) e capacidade (C), que um solo tem em fornecer e armazenar fósforo, onde I corresponde ao P em solução, Q ao P-lábil e C a capacidade tampão de P (NOVAIS; SMYTH, 1999), ou seja, a disponibilidade do fósforo para as plantas depende do teor de fósforo na solução do solo, e essa depende diretamente da capacidade que o solo tem em manter teores adequados para suprir as necessidades da planta ao longo de todo o ciclo. Esses fatores são afetados de forma significativa no solo com a forma de aplicação e a fonte de fósforo utilizada para adubação fosfatada.

2.2 Fontes minerais de Fósforo

A produção de fertilizantes fosfatados minerais é feita a partir de rochas fosfatadas, que são um recurso natural finito e impossível de ser substituído, assim é de grande importância manejar os fertilizantes fosfatados para obter máxima eficiência no uso deste nutriente (NOVAIS; SMYTH,1999).

A produção de fertilizantes fosfatados se concentra com o uso de rochas de origem vulcânicas sendo as apatitas e de origem sedimentar sendo as fosforitas (MALAVOLTA,1981).

Na agricultura brasileira, predomina o uso de fontes industrializadas solúveis em água, estes fertilizantes apresentam elevada solubilidade no solo e correspondem a 95% do fósforo utilizado no país, possuindo elevada eficiência em qualquer condição de solo e cultura (SOUSA et al.,2010)

Os fosfatados totalmente acidulados, obtidos a partir do tratamento ácido de rochas fosfáticas (apatitas) com ácido sulfúrico (H_2SO_4) formando o Superfosfato Simples com 18% de P_2O_5 solúvel em citrato neutro de amônio + água e o Superfosfato Triplo formado a partir do tratamento ácido de rochas fosfáticas (apatitas) com ácido fosfórico (H_3PO_4) contendo 43% de P_2O_5 solúvel em CNA + água e 13% de Ca^{2+} , os fosfatos obtidos a partir da amoniação de ácido fosfórico sendo o MAP (Fosfato Monoamônico) e o DAP (Fosfato Diamônico) contendo 48% de P_2O_5 solúvel em CNA+água e 9 % de N e 45% de P_2O_5 e 16% de N e por fim os termofosfatos obtidos a partir da fusão (1450°C) de fosfato natural (apatita ou fosforita) com uma rocha magnésiana (serpentina) e resfriamento rápido contendo 18% de P_2O_5 total, 16,5% de P_2O_5 solúvel em ácido cítrico a 2% e cerca de 20% de Ca e 9% Mg (NOVAIS et al., 2007;ALCADE, 1998; CHIEN, 2011; MALAVOLTA, 1981;SOUSA et al., 2010).

Os fosfatos reativos são uma alternativa para adubação de fósforo nos solos. A escolha dessas fontes geralmente baseia-se na melhor relação custo benefício da adubação, onde os fosfatos reativos apresentam custos reduzidos e vem sendo amplamente estudados (FREIRE *et al.*, 2005). Para o uso comercial de fertilizantes fosfatados, são oferecidos no mercado fosfatos naturais reativos que permitem sua utilização diretamente na agricultura, como os fosfatos naturais da Carolina do Norte-EUA, de Gafsa- Tunísia, de Sechura- Peru e de Arad- Israel (HAMMOND, 1977), esses fosfatos são de origem sedimentar, possuem menor cristalização e maior

reação no solo sendo assim denominados fosfatos naturais reativos (KAMINSKI & PERUZZO, 1997).

A maior reatividade e a menor cristalização dos fosfatos de origem sedimentar é dada pelo grau de substituições isomórficas de PO_4^{2-} por CO_3^{2-} -F, de Ca^{+2} por Mg^{+2} e Na^{-1} dando maior reatividade e ocorrendo incompatibilidade entre dois ânions na rede cristalina impedindo seu crescimento (HOROWITZ e MEURER,2004). Outro fator que é considerado para uma boa reatividade é o tamanho das partículas, onde fosfatos naturais com partículas menores apresentaram demonstraram um maior acúmulo de P na parte aérea das plantas (HOROWITZ e MEURER,2003). Segundo TISDALE et al (1993) para classificar um fosfato natural como reativo, a amostra moída deve apresentar uma solubilidade em ácido fórmico a 2% e ácido cítrico a 2% maior que 65% e 40% respectivamente.

Resende et al. (2006) estudando o efeito residual de fonte de P, observaram que fontes solúveis favoreceram a exportação de P pelas plantas de milho, porém os fosfatos reativos apresentaram valores muito próximos aos valores das fontes mais solúveis e obtém efeito residual de maior eficiência relativa em 3 anos de cultivos e associado a boa produção de grãos quando aplicado de forma parcelada. Em solo com alta capacidade de fixação pode ser mais conveniente o uso de fontes menos solúveis desde que a menor solubilidade não implique em restrição no processo de difusão ao qual garante o suprimento de P para a planta (NOVAIS & SMYTH, 1999). Também necessitam apresentar preço que compense a aplicação dessas fontes com menor reatividade em comparação a fontes solúveis em água.

Em longo prazo, em solos com adição de fertilizantes fosfatados em quantidades suficientes para o crescimento e desenvolvimento das plantas, as formas inorgânicas e orgânicas de P têm capacidade semelhante de fornecer P para as plantas (GATIBONE et al.,2007)

2.3 Uso de Lodos de Esgoto na Agricultura

O processo de tratamento do esgoto doméstico ou industrial, gera um resíduo que é denominado lodo do esgoto, esse resíduo apresenta diferentes concentrações de nutrientes das plantas, metais pesados, matéria orgânica, parasitas intestinais humanos, vírus e coliformes (BERTON & NOGUEIRA, 2010).

Os constituintes do esgoto é que determinaram a concentração do componentes do lodo, assim a composição lodo de esgoto é variável de acordo com o processo utilizado na estação de tratamento de esgoto, origem e época do ano (ANDREOLI et al., 2014)

O lodo de esgoto, resíduo de maior volume gerado durante os processos de tratamento de efluentes domésticos, apresenta disposição final problemática, o que compromete, em parte, os efeitos benéficos da coleta e tratamento (BRADY e WEIL, 2012).

Uma alternativa apontada e já utilizada em algumas ETEs da SABESP foi o emprego do lodo como fertilizante orgânico e condicionador de solo em áreas agrícolas e florestais (BETTIOL e CAMARGO, 2000), porém como o lodo de esgoto puro tem à presença de organismos patogênicos e sua aplicação no campo pode gerar a atratividade de vetores, é necessário que se faça o tratamento do lodo antes da sua aplicação no campo (ANDREOLI, 2014). As culturas em que o uso do lodo tratado é recomendado são o milho, a cana-de-açúcar, espécies frutíferas, reflorestamentos e recuperação de área degradadas, sendo proibido o uso em cultivos hortícolas (SANEPAR, 1997).

A parte sólida que é a que dá origem ao lodo é constituída de 70% de substâncias orgânicas e os 30% restantes constituídos de tipos diversos de areia e sais (BERTON et al, 2010). O lodo é um material rico em matéria orgânica e elementos essenciais as plantas, e quando empregado de forma correta pode substituir de forma parcial os fertilizante minerais, demonstrando capacidade de manutenção da fertilidade do solo (NOGUEIRA et al., 2008; MATTENBERGER et al., 2008).

A utilização do lodo de esgoto representa o reaproveitamento integral de seus nutrientes e a substituição total ou parcial da adubação mineral (ALAMINO, 2010; MELO et al. 2019). Vários pesquisadores desenvolveram estudos sobre uso do lodo de esgoto em culturas agrícolas e no plantio de árvores demonstrando o aumento da produtividade. O uso do lodo na recuperação de áreas degradadas (SAMPAIO, 2010; GUERRINI et al., 2010), como componente de substrato para a produção de mudas de eucalipto (TRIGUEIRO e GUERRINI, 2003), e como fertilizante em diversas culturas tais como: grama produzida em tapetes (BACKES et al., 2009; BACKES et al. 2010), soja e aveia (CORREA et al., 2008; FREITAG, 2008; MIGGIOLARO, 2009; LOBO, et al. 2012), girassol (LOBO e GRASSI FILHO, 2007), feijão (LOBO et al. 2012), mamona (SOUTO, 2007), milho (MELO et al. 2019).

A principal vantagem do uso de lodo de esgoto em solos utilizados para agricultura é a incorporação de nitrogênio, fósforo, matéria orgânica e micronutrientes (BETIOL & CAMARGO, 2007), sendo uma boa fonte de nutrientes para as culturas.

A utilização agrícola é o destino de maior vantagem e interesse para o lodo (LOBO 2010; CONTIN et al., 2012; LEITE 2015), porém para sua utilização é preciso atender as exigências impostas pela legislação que regulamenta o uso deste resíduo quanto a concentração de metais pesados, patógenos nocivos à saúde humana (ALVARENGA et al. 2015).

2.4 Compostagem

A compostagem é um processo onde ocorre a bioxidação aeróbia microbiana, de um material orgânico úmido e transformando assim esse material em um composto orgânico estabilizado (ANDREOLI et al., 2014; KIEHL, 2004; BUDZIAK et al., 2004), ou seja, é o processo de transformação de um material orgânico ou resíduo orgânico em um composto orgânico, através da atividade microbiana, podendo assim ser utilizado na agricultura.

Esse processo é caracterizado pela liberação de CO₂, NH₃, água, energia na forma de calor e estabilização do material orgânico (FERNANDES & SILVA, 2000).

Os fatores que afetam a atividade dos microorganismos, que realizam o processo de compostagem, são: aeração, temperatura, teor de umidade, teor de nutrientes e relação C/N e pH (NOGUEIRA et al., 2007; ANDREOLI et al., 2014; KIEHL, 2004).

Para a compostagem do lodo de esgoto, a temperatura tem papel fundamental, pois a higienização de patógenos está diretamente relacionada com esta variável (FARIA, 2018).

O processo de compostagem é caracterizado por três fases distintas. A primeira fase ou fase inicial é a mais rápida onde os microorganismos mesófilos se desenvolvem e iniciam a elevação da temperatura, essa fase apresenta fitotoxicidade e pode ocorrer uma queda no pH do material, pois uma ampla variedade de ácidos orgânicos é liberados pelos microorganismos em função da metabolização dos compostos ricos em carbono. Nesta primeira fase o composto ainda não está pronto para utilização. A segunda fase é caracterizada pela intensa degradação da matéria orgânica e consumo de oxigênio onde ocorre a atividade dos microorganismos termofílicos, pois ocorre a redução dos microorganismos mesofílicos em função da temperatura ter

ultrapassado 45 °C, nesta fase é comum a temperatura ultrapassar 70°C. A terceira fase é caracterizada pela temperatura atingir valores próximos aos do ambiente, e nesta fase ocorre a maturação do composto, ocorrendo a humificação do material, redução microorganismos patogênicos que restaram. A compostagem é dada por completo quando o material apresenta cor escura, nenhum odor indesejável (ANDREOLI et al., 2014; KIEHL, 2004; LEITE 2015; FATUNLA et al., 2017; ZANG et al., 2018; LUO ET AL., 2001).

Uma ampla variedade de ácidos orgânicos é liberados pelos microrganismos e proporcionam interações que podem resultar na solubilização do fósforo oriundo da rocha fosfatada, melhorando a eficiência no aproveitamento das plantas. Há relatos de que a disponibilidade de P é aumentada através da liberação de ácidos orgânicos provenientes de processos biológicos da decomposição da matéria orgânica, os quais quelatam o Fe e Al, liberando assim o P (LUO et al., 2001).

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Experimento I - Produção de fertilizantes orgânicos compostados a partir do lodo de esgoto e bagaço de cana, e enriquecimento com fosfatos.

3.1.1 Localização e caracterização da área experimental

O experimento foi realizado dentro da Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) pertencente a Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo (Sabesp) da cidade de Botucatu-SP, a ETE está localizada dentro da fazenda Lageado que pertence a Faculdade de Ciências Agrônômicas (FCA) da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” – UNESP - campus de Botucatu (Figura 01).

Figura 1 - Vista aérea da Estação de Tratamento de Esgoto da Sabesp, localizada dentro da Fazenda Lageado pertencente a FCA/Unesp-Botucatu.



O estudo foi conduzido em estufa agrícola de 12,8 metros de largura, 80 metros de comprimento com 6,5 metros de altura. Essa estufa é coberta por filme polietileno transparente com espessura de 150 micras com tratamento contra raios ultravioleta, as laterais tem fechamento fixo, sendo uma com tela branca de malha 30% e com tratamento contra raios ultravioleta, a outra lateral é do mesmo material da cobertura (Figura 02).

3.1.2 Delineamento experimental e tratamentos

O experimento foi conduzido em delineamento inteiramente casualizado em esquema fatorial 2x4 com três repetições, onde o primeiro fator consiste nas fontes minerais de fósforo (P) adicionadas no início do processo de compostagem, sendo o superfosfato triplo (SFT) e fosfato reativo (FR), o segundo fator consiste nas doses destas fontes: 0%, 1,5%, 3,0% e 4,5% equivalentes em P da fonte mineral adicionado em relação ao peso seco da mistura dos materiais orgânicos, totalizando assim oito tratamentos. O cálculo foi feito transformando o teor de P_2O_5 de cada fonte mineral para P.

Os tratamentos são descritos como:

- T1: Material Orgânico (lodo de esgoto + bagaço de cana);
- T2: Material Orgânico (lodo de esgoto + bagaço de cana) + 1,5% de P mineral via superfosfato triplo;
- T3: Material Orgânico (lodo de esgoto + bagaço de cana) + 3,0 % de P mineral via superfosfato triplo;
- T4: Material Orgânico (lodo de esgoto + bagaço de cana) + 4,5 % de P mineral via superfosfato triplo;
- T5: Material Orgânico (lodo de esgoto + bagaço de cana);
- T6: Material Orgânico (lodo de esgoto + bagaço de cana) + 1,5 % de P mineral via fosfato reativo;
- T7: Material Orgânico (lodo de esgoto + bagaço de cana) + 3,0 % de P mineral via fosfato reativo;
- T8: Material Orgânico (lodo de esgoto + bagaço de cana) + 4,5 % de P mineral via fosfato reativo;

3.1.3 Montagem das leiras, aplicação dos tratamentos e revolvimentos.

As leiras foram montadas com ajuda de um caminhão basculante com capacidade de 5 metros cúbicos (m^3) e uma retro escavadeira que tem capacidade de carregar um volume de 1 m^3 (Figura 02).

A proporção de material utilizado foi de 1:1, ou seja, uma parte de lodo para uma parte de bagaço de cana. A opção de escolher essa proporção, foi pela mesma apresentar algumas vantagens em relação as compostagem feitas seguindo a relação C/N de 30:1, essas vantagens são: não necessitar de adição de água após algumas semanas de compostagem, reduz o gasto/custo com material estruturante (fonte de carbono), não apresenta problema quanto ao aquecimento das pilhas, com poucos revolvimentos já se consegue uma boa homogeneização dos matérias a serem compostados, reduz o tempo de permanência da leira no pátio e a estabilização do material pode ser feita em pilhas fora do pátio de compostagem.

O acondicionamento do material orgânico na caçamba do caminhão basculante era feito sempre colocando o bagaço primeiro e depois o lodo, isso facilita o descarregamento na hora de formar a leira, diminuindo o tempo de montagem das leiras. No caminhão era colocado por viagem duas conchas de bagaço para duas de lodo, no momento de colocar esse material na leira parte de material caia fora do espaço delimitado para o experimento, esse material que ficava fora da leira era recolhido e colocado no topo da pilha, dando assim a altura desejada para as leiras e possibilitou atingir a largura estipulada.

Figura 2 - A: Local de armazenagem do lodo, B:carregamento do caminhão basculante, C: Montagem das leiras, D: Vista da estufa e das leiras.



Devido a problemas na centrifuga da ETE de Botucatu e a falta de comunicação do problema, só foi armazenado a quantidade suficiente de lodo para montagem de uma das leiras no dia que estava previsto a montagem das duas leiras, assim só foi possível montar a segunda leira 13 dias após a montagem da primeira leira. O problema só foi percebido no momento da implantação do experimento, pois o material (lodo de esgoto) acabou no momento do início da montagem da segunda leira.

A primeira leira foi montada dia 04/05/2017 sendo aplicados os tratamentos relacionados ao fosfato reativo no dia 05/05/2017. A segunda leira foi montada dia 18/05/2017 sendo adicionados os tratamentos relacionados ao superfosfato triplo no dia 19/05/2017. As duas leiras foram conduzidas por 60 dias.

Cada leira ficou com 28 metros lineares para cada fonte mineral utilizada (superfosfato triplo e fosfato reativo). Cada tratamento, dentro da sua respectiva leira, teve inicialmente 7 metros de comprimento, 3 metros de largura e 1,30 metros de

altura, assim cada tratamento obteve um volume inicial de 15,8 metros cúbicos. Foi considerado como área útil dos tratamentos os 3 metros centrais e esses 3 metros foram divididos de forma igual formando assim 3 repetições (Figura 3), com o revolvimento ocorre um arraste de material de 1 metro para o lado contrário que a compostadora está passando, assim o descarte de 2 metros para cada leira garantiu-se que não fosse ocorrer contaminação entre tratamentos.

O volume final variou conforme os tratamentos e é apresentado na Tabela 01.

Figura 3 – Croqui da disposição das leiras e dos tratamentos dentro da estufa para compostagem.

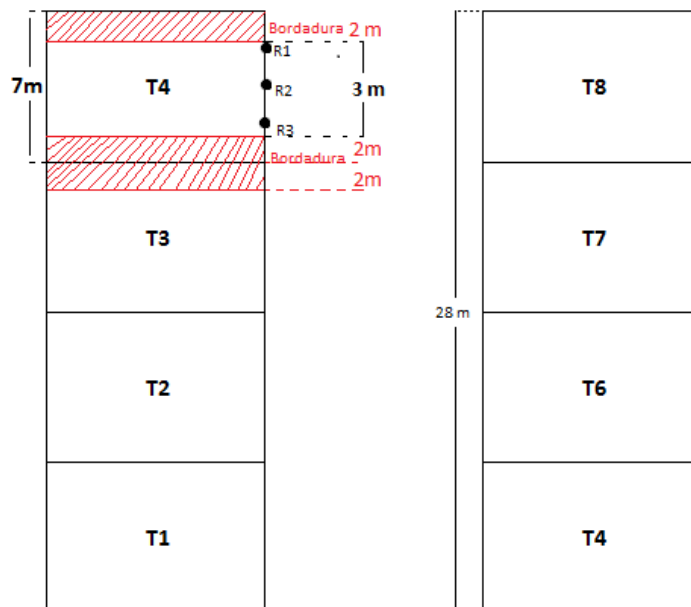


Tabela 1- Volume inicial e final dos tratamentos na compostagem.

Tratamento	Volume inicial (m ³)	Volume final (m ³)
T1	15,8	6
T2	15,8	6,9
T3	15,8	7,8
T4	15,8	8,5
T5	15,8	5,9
T6	15,8	5,6
T7	15,8	7,4
T8	15,8	5,6

A aplicação dos tratamentos foi realizada manualmente com ajuda de uma pá, primeiro foi aplicado metade da dose calculada para cada tratamento e logo em seguida foi realizado o revolvimento das leiras (Figura 04), a outra metade das doses foi aplicada logo após procedimento, efetuando em seguida o segundo revolvimento. Buscou-se assim a melhor opção para deixar os tratamentos devidamente homogêneos.

Figura 4 - A: Aplicação da metade de cada tratamento; B: vista da leira e do fertilizante mineral aplicado na superfície; C: primeira incorporação; D: aplicação da outra metade do fertilizante mineral e a segunda incorporação.



Foi utilizado para os revolvimentos a compostadora da marca Astral modelo AST – 1800 Plus acoplada a um trator Massey Ferguson modelo 4299 de 130 cavalos de potência no motor. No período da compostagem foi feitos quatorze revolvimentos, que estão demonstrados na tabela 02. Os revolvimentos tem por objetivo efetuar trocas gasosas nas leiras favorecendo a entrada de oxigênio e saída de CO₂, melhorar a perda de umidade do composto e homogeneizar os materiais a serem compostados.

Tabela 2 - Esquema de revolvimento das leiras no período de condução do experimento.

Semana	Revolvimentos
1	3
2	3
3	2
4	2
5	1
6	1
7	1
8	1
Total	14

3.1.4 Origem e características dos materiais utilizados na compostagem

O superfosfato triplo e o fosfato reativo utilizados neste experimento foram caracterizados conforme a porcentagem de fósforo total (T), fósforo solúvel em ácido cítrico (AC), fósforo solúvel em citrato neutro de amônio (CNA) e fósforo solúvel em água (H₂O). Os resultados estão demonstrados na tabela 03 e por suas características físicas que constam na tabela 04.

Tabela 3 - Teores de P₂O₅ total, solúvel em ácido cítrico a 2%, solúvel em CNA e solúvel em H₂O das fontes de fósforo mineral usadas no experimento.

Fertilizantes	P ₂ O ₅ - Total	P ₂ O ₅ - AC	P ₂ O ₅ - CNA	P ₂ O ₅ - H ₂ O
	----- % -----			
Fosfato reativo	29	10	5	ND
Superfosfato triplo	48	44	46	40

Tabela 4 - Composição granulométrica das fontes de fósforo utilizadas, em % passante na peneira.

Fosfatos	Peneira – 4mm	Peneira – 1 mm
FR	100	99
SFT	74,63	6,35

O lodo utilizado neste estudo é proveniente da ETE de Botucatu, sendo resultado do tratamento do esgoto de cerca de 95% da população de Botucatu, através de Sistema de Reator Anaeróbio de Fluxo Ascendente (UASB) seguido por lodo ativado convencional, com 85% de umidade. O bagaço da cana-de-açúcar

utilizado é proveniente da Usina São Manoel, localizada no município de São Manoel-SP.

No momento da instalação do experimento foi coletado uma amostra composta de cada material e enviadas Laboratório de Fertilizantes e Corretivos pertencente ao Departamento de Solos e Recursos Ambientais pertencente a Faculdade de Ciências Agrônomicas da UNESP de Botucatu-SP, sendo determinados os teores totais em porcentagem (%) ao natural de nitrogênio total, P_2O_5 , K_2O , cálcio, magnésio, enxofre, umidade, matéria orgânica (M.O.), carbono (C) e os teores totais em $mg\ kg^{-1}$ ao natural de sódio, boro, cobre, ferro, manganês e zinco, além das características químicas ao natural como pH, e relação carbono/nitrogênio (C/N), segundo metodologia descrita no Manual de Métodos Analíticos Oficiais para Fertilizantes e Corretivos (2014). Os resultados da análise química do lodos de esgoto e do bagaço de cana estão apresentados na Tabela 05.

Tabela 5 - Caracterização química das fontes orgânicas, em base seca, utilizadas na compostagem.

Material Orgânico	N	P_2O_5	K_2O	Ca	Mg	S	Um	MO-total	C-Total
	-----%-----								
Bagaço	0,7	0,4	0,1	0,1	0,1	0,4	32	85,3	47,1
Lodo 05/05/17	3,6	7,2	ND*	0,8	0,4	6,8	75	44,0	24,0
Lodo 19/05/17	4,0	7,0	ND	1,0	0,5	6,5	80	50,0	30,0
	Na	B	Cu	Fe	Mn	Zn	C/N total		pH
	----- $mg\ kg^{-1}$ -----						ao natural		
Bagaço	379	ND	ND	2555	76	14	64/1		5,6
Lodo 05/05/17	1120	48	112	39100	288	616	7/1		7,5
Lodo 19/05/17	980	45	110	38900	275	585	8/1		6,7

ND= não detectado.

3.1.5 Cálculo da MS do composto e da quantidade de fertilizante mineral adicionado

Foi coletado 20 L do lodo de esgoto “in natura” e 20 L do bagaço de cana. Esse material foi homogeneizado e assim retirou-se uma amostra composta desse volume

(Figura 05). Esse material foi colocado em um béquer com capacidade de três litros, foi pesado úmido e posteriormente foi levado a estufa de circulação de ar forçado a 65 °C até atingir peso constante, assim foi retirado a umidade do material. O peso da massa seca foi extrapolado para o volume que as leras tinham, considerando que a cada metro linear tem 2,25 m³ e que cada tratamento teve 7 metros lineares, assim foi calculado as quantidades de P adicionadas no composto para cada tratamento, com base na massa seca.

Figura 5 - A: mistura do lodo+ bagaço a ser amostrado; B: peso úmido de três litros da mistura.



O cálculo da quantidade de fertilizante mineral adicionado a cada tratamento foi realizado utilizando o teor total de P₂O₅ contido em cada fonte mineral e a transformando em P, a quantidade de fertilizante mineral adicionado a cada tratamento consta na tabela 06.

Tabela 6 - Quantidades de fertilizante mineral adicionado a cada tratamento.

Tratamentos	% de P adicionada	Fonte mineral (Kg)	
		Superfosfato Triplo	Fosfato Reativo
T1	0	-	-
T2	1,5	220	-
T3	3,0	440	-
T4	4,5	660	-
T5	0	-	-
T6	1,5	-	340
T7	3,0	-	680
T8	4,5	-	1025

3.1.6 Avaliações no composto

3.1.6.1 pH

Foi monitorado durante os 60 dias da compostagem, sendo avaliado duas vezes por semana. Essa determinação foi realizada conforme o método descrito no Manual de Métodos Analíticos Oficiais para Fertilizantes e Corretivos (2014).

3.1.6.2 Temperatura

A temperatura de cada pilha de compostagem foi monitorada através de três termopares inseridos cerca de 50 cm em seu centro e confeccionados a partir dos metais de cobre e o constantan, conectados a um multiplex e datalog. Os termopares foram inseridos a 50 cm no centro das leiras. A temperatura de cada pilha foi registrado a cada um minuto, gerando um valor médio a cada 1 hora.

3.1.6.3 Umidade

A umidade foi monitorada uma vez por semana, sendo coletadas quatro amostras simples para formação de uma amostra composta em cada repetição, com auxílio de pá. As amostras foram coletadas sempre após o revolvimento da leira, para que o material fosse representativo para todo o perfil. Após a coleta, as amostras foram pesadas, colocadas para secar em estufa a 65°C e pesadas novamente, segundo metodologia estabelecida por Brasil/MAPA (2014).

3.1.6.4 Fósforo

As amostras de composto foram coletadas quinzenalmente foram realizadas as seguintes determinações: fósforo total (T), fósforo solúvel em ácido cítrico (AC), fósforo solúvel em citrato neutro de amônio (CNA) e fósforo solúvel em água (H₂O). Essas determinações foram feitas seguindo o Manual de Métodos Analíticos Oficiais para Fertilizantes e Corretivos (2014).

3.1.6.5 Caracterização química

As amostras de composto foram coletadas quinzenalmente e foi realizadas as seguintes determinações: C, N, P, K, Ca, Mg, Cu, Fe, Mn e Zn de acordo com metodologia estabelecida por Brasil/MAPA (2014).

3.1.6.6 Metais pesados

Ao final do processo de compostagem foram determinadas as concentrações de As, Ba, Cd, Pb, Cu, Co, Cr, Hg, Mo, Ni, Se e Zn, através da metodologia estabelecida por EPA-SW-846-3051, com determinação e ICP-AES (2004).

3.1.7 Análise Estatística

Os dados foram submetidos a análise de variância pelo teste F ao nível de significância de 5% de probabilidade de erro, considerando o delineamento inteiramente casualizado no esquema fatorial duplo, com avaliação do efeito de tratamentos e comparação de médias pelo teste tukey ($p < 0,05$) e, utilizando o pacote estatístico Agroestat.

3.2 EXPERIMENTO II - Fertilidade do solo e eficiência agrônômica de fertilizantes orgânicos a base de lodo de esgoto e enriquecidos com fosfatos.

3.2.1 Localização e Caracterização da área experimental

O experimento foi conduzidos na área experimental pertencente ao Departamento de Solos e Recursos Ambientais da Faculdade de Ciências Agrônômicas da Universidade Estadual Paulista - UNESP - campus de Botucatu, que apresenta altitude de 786 m, sendo o clima classificado como temperado quente (mesotérmico) com chuvas no verão e seca no inverno (Cfa – Koppen) e a temperatura média mais quente superior a 22° C (CUNHA & MARTINS, 2005). O experimento foi conduzidos no período entre novembro de 2017 a de março de 2018.

A casa de vegetação utilizada foi do tipo arco, coberta com plástico transparente, fechada lateralmente com tela anti-afídeo, com área total de 168 m², pé direito de 2,6m e 3,0m no vão central.

A figura 6 demonstra as médias da temperatura diária no período de condução do experimento.

3.2.2 Caracterização do solo utilizado no experimento

O solo utilizado nos experimentos foi um Latossolo Vermelho Distroférico (LVdf) de textura argilosa, classificado de acordo com Embrapa (2006). Coletado na Fazenda Lageado no município de Botucatu-SP. Este solo estava sob cultivo de *Urochloa ssp.* e isento do recebimento de fertilizantes ou corretivos.

Este solo apresentava baixo teor de fósforo disponível. As amostras do solo foram coletadas à profundidade de 0,0 – 0,2 m, secas ao ar e em seguida homogeneizadas e passadas em peneira com malha de 2 mm de abertura, foram retiradas subamostras e submetidas à caracterização química para fins de fertilidade (Tabela 7) determinados conforme os métodos descritos por Raji et al. (2001).

O solo em seu montante total utilizado no experimento foi passado em peneira com malha de 4 mm de abertura, retirando-se raízes, palhas e torrões.

A caracterização granulométrica foi realizada pelo método do densímetro segundo Embrapa (1997), apresentando os seguintes resultados: 391, 162 e 447 g kg⁻¹ de areia, silte e argila, respectivamente. Sendo classificado como classe de textura argilosa de acordo com a Sociedade Brasileira de Ciência do Solo (EMBRAPA, 1999).

Figura 6 - Temperatura mínima, máxima e média (°C) registradas durante a condução do experimento, nos anos agrícolas de 2017 e 2018. Botucatu-SP. Fonte: Departamento de solos e Recursos Ambientais – FCA/UNESP.

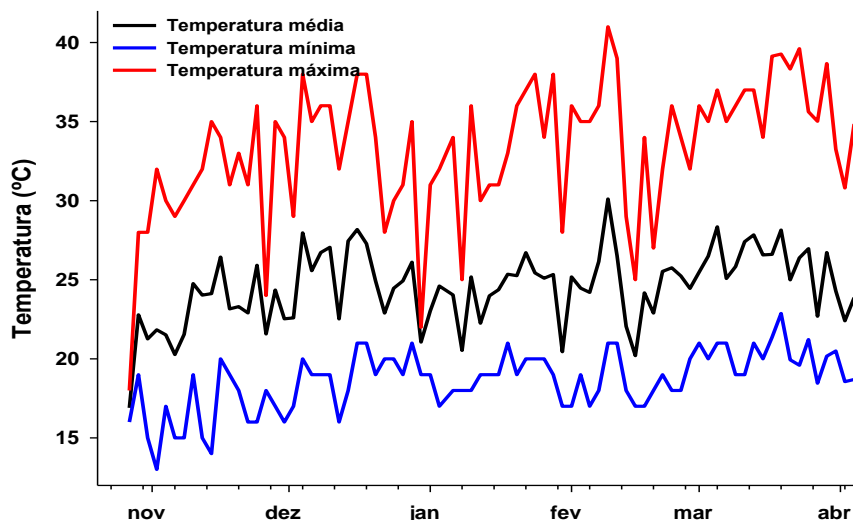


Tabela 7 - Características químicas das amostras de solo utilizadas nos experimento.

pH	M.O.	P _{resina}	Al	H+Al	K	Ca	Mg	SB	CTC	V
CaCl ₂	g dm ⁻³	mg dm ⁻³	-----			mmol _c dm ⁻³ -----		%		
4,3	22	5	7	58	2,4	31	9	42	100	42

Antes da implantação deste ensaio foi incorporado ao solo um calcário dolomítico (PRNT = 96; CaO = 37,56%; MgO = 13,70%), com base nos resultados da análise de química do solo (Tabela 7), para elevar a saturação por bases a 70% conforme método descrito por Raij et al. (1997). Este solo permaneceu incubados por 30 dias com umidade de 70% da capacidade de campo.

3.2.3 Caracterização do Experimento

O experimento foi conduzido com um delineamento em blocos casualizados em esquema fatorial 10x5, com quatro repetições em vasos contendo 7 dm⁻³ de solo. Os tratamentos foram constituídos de dez fertilizantes fosfatados em interação com cinco doses de fósforo (P), os tratamentos constam na tabela 8. Foi cultivado milho sendo feito dois cultivos sequenciais, seguindo sempre o mesmo delineamento.

Tabela 8 - Fertilizantes utilizados neste experimento e dosagens de P.

Fertilizante	Dose de P (mg dm⁻³)
Superfosfato triplo (ST)	
Fosfato reativo (FR)	
LC 0% ST*	
LC 1,5% ST	
LC 3,0% ST	0, 25, 50, 75, 100
LC 4,5% ST	
LC 0% FR*	
LC 1,5% FR	
LC 3,0% FR	
LC 4,5% FR	

*LC 0% ST: lodo compostado enriquecido com 0% de P via Superfosfato triplo

*LC 0% FR: lodo compostado enriquecido com 0% de P via Fosfato reativo

3.2.4 Fertilizantes minerais e produção dos fertilizantes enriquecidos com fosfatos

O superfosfato triplo e o fosfato reativo utilizado neste experimento foram caracterizados conforme a porcentagem de fósforo total (T), fósforo solúvel em ácido cítrico (AC), fósforo solúvel em citrato neutro de amônio (CNA) e fósforo solúvel em água (H₂O), os resultados estão demonstrados na tabela 9, esses fertilizantes também foram caracterizados quanto a sua natureza física os valores encontram-se na tabela 10. O ST foi utilizado na forma de grânulo e o FR na forma de farelo. Estes mesmo fertilizantes foram utilizados para enriquecer os fertilizantes orgânicos utilizados neste estudo. Os fertilizantes orgânicos enriquecidos resultam do processo de compostagem do lodo de esgoto com bagaço de cana, na proporção de 1:1, ou seja, uma parte de lodo para uma parte de bagaço de cana.

O enriquecimento com superfosfato triplo e o fosfato reativo, foi feito adicionando doses destas fontes nas proporções de 0%, 1,5%, 3,0% e 4,5% equivalentes em P da fonte mineral em relação ao peso seco da mistura dos materiais orgânicos, o cálculo foi feito transformando o teor de P₂O₅ de cada fonte mineral para P. O processo de compostagem durou 60 dias o composto foi revolvido quatorze vezes nesse período. Após esse período os fertilizantes enriquecidos foram acondicionados em “bags” com capacidade para 1m³. Os teores totais de nutrientes encontram-se na tabela 11.

O lodo utilizado neste estudo é proveniente da ETE de Botucatu, sendo resultado do tratamento do esgoto de cerca de 95% da população de Botucatu, é um lodo digerido de reatores UASB. O bagaço da cana-de-açúcar utilizado é proveniente da Usina São Manoel, localizada no município de São Manoel-SP que fica próximo ao local onde foi realizada a produção dos fertilizantes orgânicos enriquecidos sendo uma fonte de carbono de fácil acesso e produzida em grande quantidade na região de Botucatu.

Os fertilizantes orgânicos foram homogeneizados, sendo passados a peneira de 4 mm e só então foram pesados e preparados para uso.

Tabela 9 - Teores de P₂O₅ total, solúvel em ácido cítrico a 2%, solúvel em CNA e solúvel em H₂O das fontes de fósforo mineral usadas no experimento.

Fertilizantes	P ₂ O ₅ - Total	P ₂ O ₅ - AC	P ₂ O ₅ - CNA	P ₂ O ₅ - H ₂ O
	----- % -----			
Fosfato reativo	29	10	5	ND
Superfosfato triplo	48	44	46	40

Tabela 10 - Composição granulométrica das fontes de fósforo utilizadas.

Fosfatos	Peneira – 4mm	Peneira – 1 mm
FR	100	99
SFT	74,63	6,35

Tabela 11 - Caracterização química das fontes orgânicas utilizadas na compostagem dos fertilizantes orgânicos na base seca.

Material Orgânico	N	P	K ₂ O	Ca	Mg	S	Um	MO-total	C-Total
	----- % (Base seca) -----								
LC 0% ST	2,8	1,7	0,1	2,2	0,2	2,8	47	49	27
LC 1,5% ST	3,0	3,4	0,1	3,7	0,3	2,8	47	50	28
LC 3,0% ST	3,2	5	0,1	4,5	0,3	2,7	48	46	26
LC 4,5% ST	2,8	6,5	0,1	5,2	0,3	2,5	47	47	26
LC 0% FR	3,0	1,7	0,1	2,6	0,2	3,2	37	46	26
LC 1,5% FR	2,6	3	0,1	5,9	0,3	3,0	30	41	23
LC 3,0% FR	2,1	5	0,1	17,1	0,3	2,7	33	36	20
LC 4,5% FR	1,9	6	0,1	17,2	0,3	2,7	28	32	18
	Na	B	Cu	Fe	Mn	Zn	C/N total		pH
	-----mg kg ⁻¹ (Base seca) -----						Ao natural		
LC 0% ST	1000	246	152	40416	332	578	9/1	6,2	
LC 1,5% ST	1306	286	142	34983	280	612	9/1	6,1	
LC 3,0% ST	1473	362	136	31800	256	659	8/1	5,8	
LC 4,5% ST	1726	388	129	26266	216	675	9/1	5,1	
LC 0% FR	1006	262	166	41450	337	623	8/1	6,6	
LC 1,5% FR	1726	249	160	36166	292	610	8/1	6,7	
LC 3,0% FR	2493	289	143	30083	244	556	9/1	6,8	
LC 4,5% FR	3033	249	126	24250	198	504	9/1	7,0	

3.2.5 Primeiro Cultivo

No momento da montagem dos vasos, as doses de P foram incorporadas ao solo de cada unidade experimental juntamente de 30 mg\vaso de N e 120 mg\vaso de K₂O na forma de sulfato de amônio e cloreto de potássio. Aos 10 dias após a semeadura foi realizada a aplicação de 0,3; 0,75; 5; 5,5 mg dm⁻³ de cobre, zinco, boro e manganês na forma de cloreto de cobre, cloreto de zinco, ácido bórico e cloreto de manganês respectivamente, sendo aplicado com quantidades idênticas para todos os tratamentos com o objetivo de fornecer alta disponibilidade destes para as plantas.

Após quinze dias de emergência foi aplicado semanalmente 30 mg\vaso de N na forma de sulfato de amônio.

A cultivar de milho (*Zea mays* L.) utilizada foi a 2B587 PW da Dow AgroSciences. É um híbrido simples, convencional, de ciclo precoce. A cultura do milho foi escolhida por ser responsiva a adubação fosfatada e apresentar um rápido crescimento e desenvolvimento.

As sementes de milho foram tratadas com o fungicida Vitavax Thiram 200 SC (carboxina + tiram) na dose de 300ml para 100kg de sementes (cálculo feito para 1 kg de sementes), e com o inseticida Cruiser 700 WS (tiametoxam) na dose de 150 ml para 100 kg de sementes (cálculo feito para 1 kg de sementes). Foi semeado 6 plantas de milho e aos 7 dias de emergidas foi feito o desbaste para 5 plantas por vaso. A partir do desbaste as plantas foram conduzidas até completarem 45 dias, tendo entre 6 e 7 folhos totalmente expandidas.

Os vasos foram mantidos sob irrigação com água, visando manter a umidade do solo próximo à 70% da capacidade de campo durante toda a condução do experimento.

3.2.6 Segundo cultivo

Para o segundo cultivo foram empregadas as mesmas doses de N e K e micronutrientes sendo que a adubação foi feita na forma fluida.

3.2.7 Coleta do solo

Após a colheita das plantas do segundo cultivo o conteúdo de solo total dos vasos foi colocado em uma bandeja, homogeneizado, retirado três sub amostras e destas três fez-se uma amostra, essa amostra foi peneirada em peneira de 2 mm, encaminhada para o laboratório para análise.

3.2.8 Avaliações no solo

No solo foi avaliado: pH, P resina, Ca, Mg, K, H+Al, matéria orgânica (M.O.S.), B, Cu, Fe, Mn, Zn, Metais para os seguintes tratamentos: LC ST 0%, ST 0%, ST1,5%, FR 0% e FR 1,5% (Raij et al.,2001).

3.2.9 Avaliações na planta

3.2.9.1 Matéria seca da parte aérea

Aos trinta e cinco dias após a emergência para cada cultivo foi realizado a colheita das plantas para a determinação da matéria seca da parte aérea. As plantas foram cortadas rente ao solo, acomodadas em sacos de papel devidamente identificados, colocadas para secar em estufa de ventilação forçada a 65°C até atingirem peso constante (4 dias), sendo posteriormente pesadas em balança de precisão.

3.2.9.2 Acúmulo de fósforo

Após a pesagem do material seco as amostras foram trituradas em moinho tipo Wiley e posteriormente realizada análise do teor de P no tecido conforme Malavolta et al. (1997). O teor de fósforo (g kg^{-1}) de cada amostra foi multiplicando pela produção de massa seca de cada amostra respectiva (g vaso^{-1}), obteve-se assim o acúmulo de P (g vaso^{-1}) da parte aérea das plantas.

3.2.9.3 Altura e diâmetro

As medições de altura e diâmetro do colmo, foram realizadas com o auxílio de uma régua milimetrada e um paquímetro digital. A altura compreendia a distância do solo até a ponta da folha completamente expandida e o diâmetro foi medido entre o solo e o primeiro entrenó.

3.2.9.4 Índice de eficiência agrônômica (IEA)

Define a eficiência das fontes em relação ao superfosfato triplo, podendo ser calculada pela produção ou pelo acúmulo de P. Foi calculada através da seguinte fórmula

$$IEA = \frac{(\text{Produção da fonte} - \text{Produção testemunha})}{(\text{Produção SFT} - \text{Produção testemunha})} \times 100$$

3.2.10 Análise Estatística

Os dados foram submetidos a análise de variância pelo teste F ao nível de significância de 5% de probabilidade de erro, considerando o delineamento em blocos casualizados no esquema fatorial duplo, com avaliação do efeito de tratamentos e comparação de médias pelo teste tukey ($p < 0,05$) utilizando o pacote estatístico AgroEstat.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Experimento I - Produção de fertilizantes orgânicos compostados a partir do lodo de esgoto e bagaço de cana, e enriquecimento com fosfatos.

4.1.1 Temperatura

Os valores de temperatura nas pilhas da compostagem são apresentados na Figura 7. Observou-se para o tratamento onde ocorreu a adição de P como ST na quantidade equivalente a 1,5% da massa seca, que a temperatura atingiu 71°C 10 dias após o início do processo. Este comportamento foi semelhante a testemunha onde o P não foi adicionado, porém, foi diferente nas pilhas onde o ST foi adicionado na quantidade equivalente a 3% e 4,5% de P na massa seca, que apresentou uma elevação de temperatura até os 13 dias após o início do processo, diminuindo a partir desta data para valores abaixo de 45°C.

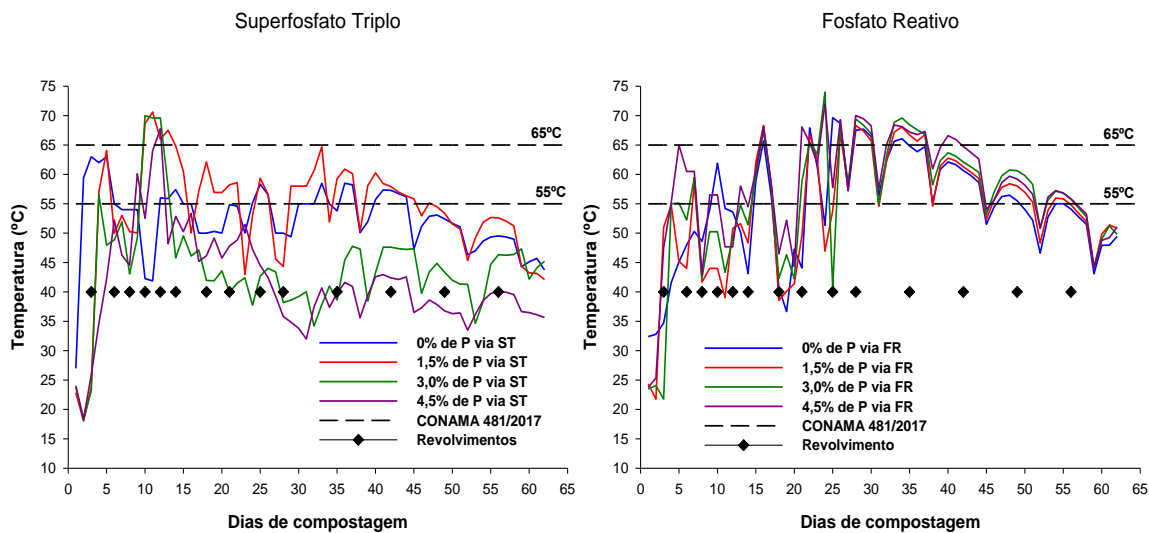
Os resultados obtidos para a testemunha do ST (0%) e o enriquecimento de 1,5% com ST na massa do composto são próximos aos obtidos em trabalhos que tiveram o mesmo objetivo, mas usaram materiais orgânicos diferentes na compostagem (PEIXOTO et al., 1989; CÉZAR 2005). Isso permite inferir que concentrações de até 1,5% de P adicionado pelo ST não afetou o processo normal de compostagem, uma vez que a temperatura é fator de relevância para avaliação da normalidade do processo (MARQUEZ et al., 2011; FERNANDES et al., 2009), e no caso do lodo de esgoto para reduzir ou eliminar microrganismos patogênicos (FATUNLA et al., 2017; DUMONTET et al., 1999; PEREIRA NETO et al., 1986).

Deve-se destacar que as pilhas enriquecidas com 3,0 e 4,5% de P na massa seca, o tempo que permaneceram com temperatura mais elevada foi muito curto, o que compromete a desinfecção nas pilhas quanto aos micro-organismos patogênicos. Dessa forma, o enriquecimento em P na massa a ser compostada com concentrações superiores a 1,5% de P proveniente do ST afetou o processo de compostagem, limitando principalmente a atividade microbiana. A partir dos 25 dias o efeito na temperatura da pilha foi mais pronunciado para o tratamento com 4,5% de P via ST, a partir da qual a temperatura não mais se elevou.

O ST tem um resíduo ácido, proveniente da reação do ácido fosfórico que é misturado ao concentrado fosfático na produção deste fertilizante (MALAVOLTA,

1967; CEKINSI, 1990) e, portanto, esta acidez é transferida a pilha e proporciona mudança no pH, que por sua vez, altera a população microbiana da massa. Esta mudança promoveu uma menor atividade na decomposição dos radicais carbônicos e conseqüentemente na temperatura da pilha.

Figura 7 - Temperatura da compostagem ao longo de 60 dias em função da adição de ST e FR.



Para que o lodo de esgoto compostado possa ser comercializado, a resolução nº 481/2017 do CONAMA, determina que e durante o processo de compostagem o período termofílico mínimo necessário para redução de agentes patogênicos seja acima de 55°C por um período de 14 dias ou temperatura acima de 65°C por um período de 3 dias. Caso contrário, este material não poderá ser comercializado e classificado como fertilizante orgânico Classe D, conforme a Instrução Normativa nº 25/2009 do MAPA.

Para os tratamentos com a adição do FR observa-se na figura 10 que inicialmente a T não se elevou a valores máximos na pilha, que ocorreram em uma fase posterior (20 a 30 dias após o início do processo). Uma explicação para isso é que, em um primeiro momento, até os 20 dias aproximadamente, a atividade microbiana não foi tão intensa devido a produção de amônia, que é um gás tóxico e pode inibir a população microbiana. Com a volatilização dessa amônia, a atividade microbiana foi mais intensa e promoveu aumento da T que atingiu os 70°C.

O Fosfato Reativo contém em sua composição bases, que promovem pequeno aumento de pH. Este efeito favorece a transformação química do amônio em amônia, que por sua vez é uma base forte.

Ao longo do período de compostagem avaliado, a temperatura dos tratamentos com fosfato reativo foram, a partir dos 30 dias, sempre as mais elevadas, demonstrando que também com esta fonte de P, houve efeito no processo de compostagem, neste caso favorecendo a atividade microbiana e permitindo temperatura acima de 55°C conforme exigência da Legislação com relação a desinfecção do lodo de esgoto.

4.1.2 Umidade

O comportamento da umidade para os tratamentos ao longo de 60 dias de compostagem é apresentado na Tabela 12 e Figura 8. Como era previsto, houve diminuição da umidade das pilhas ao longo do período de compostagem, uma vez que, o processo gera calor e a água contida na massa se condensa e forma vapor de água que se desprende da massa, principalmente durante o revolvimento. Esse vapor também é observado pela manhã, quando a temperatura do ambiente é mais baixa. Outro fator que influenciou no processo de redução da umidade é o número de revolvimentos, neste estudo foi realizado 14 revolvimentos, que além de fornecer oxigênio para atividade microbiana e redução da temperatura, expõe partes do composto que, ao longo do tempo, contribui para redução da umidade.

O decaimento da umidade ocorreu de forma mais intensa na pilha onde o FR foi aplicado, atingindo ao final de 60 dias 32%. Para mesma época o tratamento com ST atingiu, em média 47% de umidade. Esta diferença de 15% no conteúdo de água na pilha se deve a temperatura que foi mais elevada para as pilhas com FR quando comparadas com ST.

A umidade da pilha onde foi aplicado FR foi inversamente proporcional a porcentagem de P, ou seja, para os tratamentos com 4,5 % FR obteve-se a menor umidade na pilha aos 60 dias após o início do processo de compostagem.

Deve-se considerar também, que a massa de FR adicionada à pilha interferiu na umidade do composto, visto que o FR é um pó seco e, portanto quanto maior a

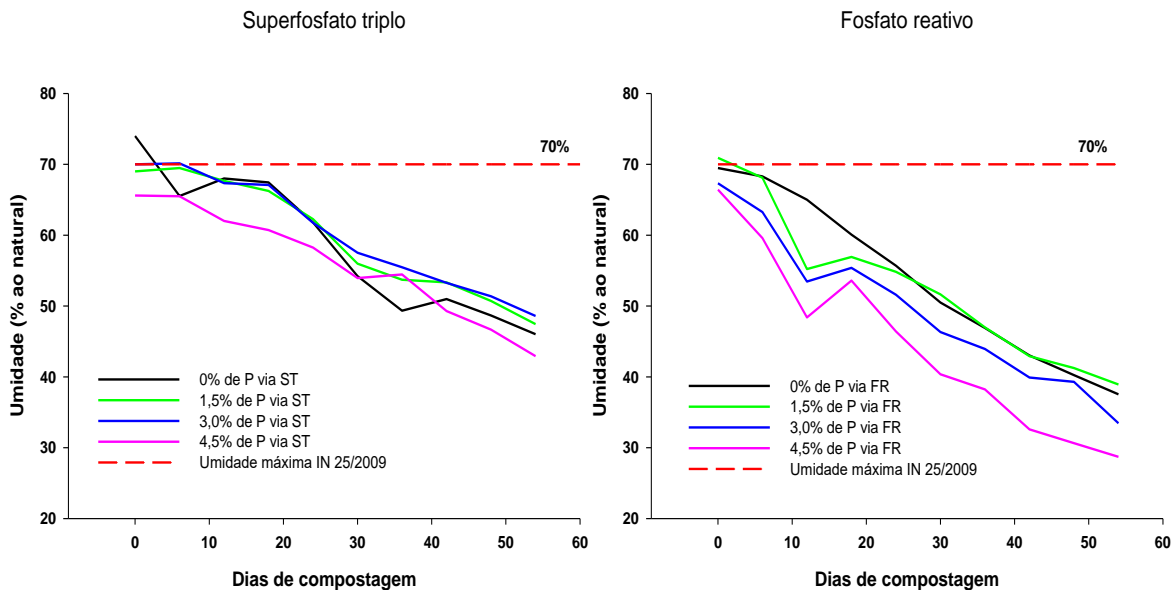
dose aplicada menor umidade na pilha, nos tratamentos com o FR foi adicionado 340, 680 e 1025 kg do FR para as concentrações de 1,5%; 3,0% e 4,5% respectivamente.

Tabela 12 - Valores de umidade em composto orgânico em diferentes dias após a aplicação de doses de fertilizantes fosfatados minerais.

Fertilizante	Doses de P (% base seca)				Média
	0%	1,5%	3,0%	4,5%	
Um (% ao natural)					
0 Dias					
Superfosfato Triplo	74	70	58	66	66,8 a
Fosfato Reativo	70	69	67	65	67,5 a
Média	72,0 a	69,3 a	65,1 a	62,3 a	-
15 dias					
Superfosfato Triplo	68	68	67	62	66,2 a
Fosfato Reativo	58	62	60	56	58,9 b
Média	62,8 a	65,0 a	63,5 a	59,0 a	-
30 dias					
Superfosfato Triplo	63 aAB	62 aAB	66 aA	60 aB	62,5
Fosfato Reativo	55 bA	55 bA	51 bAB	46 bB	51,9
Média	58,8	58,5	58,3	53,1	-
45 dias					
Superfosfato Triplo	52 aA	53 aA	56 aA	55 aA	53,9
Fosfato Reativo	43 bA	43 bA	40 bA	33 bB	39,5
Média	47,5	48,0	47,6	43,8	-
60 dias					
Superfosfato Triplo	48	48	48	48	47,1 a
Fosfato Reativo	37	30	34	28	32,2 b
Média	42,6 a	41,0 a	38,8 a	37,8 a	-

Médias seguidas por letras distintas (minúsculas na vertical e maiúsculas na horizontal) diferem pelo teste Tukey ($p \leq 0,05$).

Figura 8 - Comportamento da umidade do composto em função da adição de doses de Superfosfato triplo e Fosfato reativo.



A IN nº25 de 2009 (MAPA) estabelece as especificações para fertilizantes orgânicos que utiliza de matéria-prima oriunda do tratamento de despejos sanitários, onde a umidade máxima permitida é de 70%, assim todos os tratamentos atingiram a exigência da legislação aos 60 dias de compostagem.

4.1.3 pH

Na tabela 13 verifica-se que o pH a análise da interação fontes e doses no composto. Para os tratamentos sem adição de fertilizantes minerais (0% de ST e 0% de FR), o valores do pH reduziram ao longo do processo e ao final da compostagem obtiveram valores entre 6,2 e 6,6, esses resultados diferem dos valores de pH obtidos por pesquisadores que estudaram lodo de esgoto compostado com diversos materiais estruturantes (ZHANG et al., 2018; FATUNLA et al., 2017; NAFEZ et al., 2015; LEITE 2015; WU et al., 2010; SILVA et al.,2008), onde os valores de pH tenderam sempre para alcalinidade variando de 7 a 8,9, ao final do processo. Possivelmente o decréscimo do pH ao longo do processo de compostagem ocorreu na medida que amônia se dispersou no ambiente através da volatilização, a amônia é uma base forte e manteria o pH mais elevado junto a esse fator o próprio processo de nitrificação ocorrendo concomitante; outro fator que pode ter favorecido esses valores de pH é a própria decomposição da matéria orgânica que produz CO₂, que ao reagir com água

forma ácido carbônico, esse ácido ao se dissociar libera H^+ . Segundo Casco & Bernat (2011) o uso microbiano de ácidos orgânicos, a proteólise e a passagem da amônia para amônio levam um aumento gradual do pH ao final do processo os níveis de pH estabilizam em valores próximos da neutralidade, quando esta estabilização não é alcançada, é considerado como falta de maturidade do composto.

Na Tabela 13 verifica-se que nas leiras de compostagem onde ST foi aplicado decréscimo significativo no pH em função do tempo, mas principalmente em função da dosagem de P aplicado na massa. Conforme já comentado na discussão da temperatura da pilha, o resíduo de ácido fosfórico contido no ST gerou o efeito de redução do pH que foi proporcional a porcentagem de P. O pH neste caso, quanto maior a porcentagem, menor o pH.

Os tratamentos relativos ao enriquecimento com 3,0% e 4,5% de P via ST, não atingiram as exigências da IN nº 25 de 2009 (MAPA), onde o pH mínimo exigido para comercialização do composto é de 6 unidades. Esses tratamentos atingiram respectivamente pH 5,8 e 5,1. Ao longo do 60 dias de compostagem esses valores variaram de 5,6 á 5,8 e de 5 a 5,3 respectivamente, segundo Casco & Bernat (2011) valores de pH abaixo de 5,5 os processos de decomposição microbiana, especialmente por parte das bactérias, reduzem e pode chegar ao ponto de cessar completamente. Sundberg et al. (2004) trabalhando com compostagem de resíduos

Tabela 13 - Valores de pH em composto orgânico em função de diferentes dias após a aplicação de doses de fertilizantes fosfatados minerais.

Fertilizante	Doses de P (% base seca)				Média
	0%	1,5%	3,0%	4,5%	
pH					
Dia 0					
Superfosfato Triplo	7,6 bA	6,1 bB	5,6 bBC	5,2 bC	6,1
Fosfato Reativo	8,1 aA	8,1 aA	8,1 aA	7,9 aA	8,0
Média	7,8	7,1	6,9	6,5	-
Dia 15					
Superfosfato Triplo	6,8 aA	6,4 bA	5,8 bB	5,0 bC	6,0
Fosfato Reativo	7,0 aA	7,1 aA	7,1 aA	7,2 aA	7,1
Média	6,9	6,8	6,5	6,1	-
Dia 30					
Superfosfato Triplo	6,6 aA	6,2 bB	5,8 bC	5,0 bD	5,9
Fosfato Reativo	6,4 aB	6,5 aB	6,8 aA	7,0 aA	6,7
Média	6,5	6,4	6,3	6,0	-
Dia 45					
Superfosfato Triplo	6,4 aA	6,3 bA	5,7 bB	5,3 bC	5,9

Fosfato Reativo	6,5 aA	6,6 aA	6,7 aA	6,7 aA	6,6
Média	6,47	6,50	6,24	6,01	-
Dia 60					
Superfosfato Triplo	6,2 bA	6,1 bA	5,8 bB	5,1 bC	5,8
Fosfato Reativo	6,6 aB	6,7 aA	6,8 aA	7,0 aA	6,7
Média	6,4	6,4	6,3	5,9	-

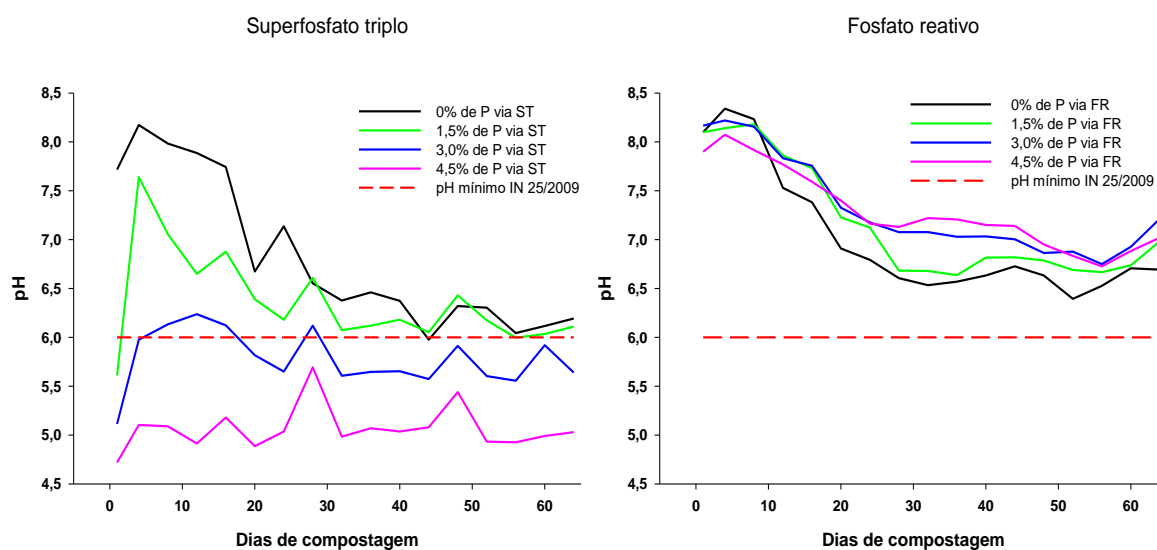
Médias seguidas por letras distintas (minúsculas na vertical e maiúsculas na horizontal) diferem pelo teste Tukey ($p \leq 0,05$).

alimentares com palha de trigo observaram que pH abaixo de 6 e temperaturas entre 46°C a taxa de respiração microbiana foi fortemente reduzida e o processo de compostagem foi inibido, fazendo o composto levar mais tempo para concluir o processo. Isso reforça o efeito destes tratamentos na temperatura, já discutidos anteriormente. Yang et al. (2015) obteve decréscimos na temperatura durante a fase mesofílica da compostagem, possivelmente a atividade dos microrganismos termofílicos terem sido inibidos.

Nas leiras enriquecidas com o FR o composto, nota-se que inicialmente o pH encontra-se alcalino (pH em torno de 8,0), lodos de esgoto tem natureza levemente alcalina não interferindo no processo de compostagem. Aos 15 dias atingiu a neutralidade (pH próximo de 7,0), diminuindo pouco a partir desse período. O pH atingido nos tratamentos com as doses de FR, diferiram dos tratamentos onde foi aplicado o ST, e as doses não diferiram entre si, mas diferiram da testemunha. As bases neutralizantes contidas no FR (NOVAIS & SMITH, 1999) foram as que geraram o aumento de pH observado de forma mais intensa quando 4,5% de P foi aplicado como FR. Essas doses mantiveram o pH das leiras dentro dos valores recomendados, onde é favorecido a atividade microbiana principalmente de microrganismos termofílicos (CASCO & BERNAT 2011); KIEHL 2004; CHEUNG et al., 2010; SUNDBERG et al., 2004), o que reforça também os valores de temperatura obtidos por esses tratamentos em relação ao ST.

Na Figura 9 é possível observar o efeito mais intenso da acidez gerada pelo ST em relação ao efeito do FR, que mesmo considerando seu caráter alcalino, diminuiu o pH das leiras ao longo do tempo.

Figura 9 - Valores de pH ao longo do tempo de compostagem em função da adição de doses de Superfosfato triplo e Fosfato reativo.



4.1.4 Nitrogênio

As fontes usadas de P não contém nitrogênio, portando o nitrogênio analisado no composto é proveniente do próprio material orgânico. Na Tabela 14 nota-se que ao final dos 60 dias de compostagem houve interação das fontes com as doses.

Dentro das doses de P via ST, nota-se que o tratamento com a doses de 4,5% de P via ST concentrou menos N em relação as doses de 1,5% e 3,0%, esse resultado é explicado devido a quantidade de fertilizante adicionada a leira ter proporcionado uma redução do pH a ponto do processo de compostagem ter ficado lento ou até cessado, como foi discutido em itens acima.

Tabela 14 - Porcentagem de nitrogênio total em composto orgânico em diferentes dias após a aplicação de doses de fertilizantes fosfatados minerais.

Fertilizante	Doses de P (% base seca)				Média
	0%	1,5%	3,0%	4,5%	
Teor de N (% base seca)					
Dia 0					
Superfosfato Triplo	2,3	2,3	2,5	3,0	2,5 a
Fosfato Reativo	2,3	2,1	2,2	2,1	2,2 a
Média	2,3 a	2,2 a	2,3 a	2,5 a	-
Dia 15					
Superfosfato Triplo	2,6 aA	2,6 aA	2,8 aA	2,7 aA	2,7
Fosfato Reativo	2,8 aA	2,7 aAB	2,4 bBC	1,9 bC	2,4
Média	2,7	2,7	2,6	2,3	-

Dia 30					
Superfosfato Triplo	3,1	3,0	3,1	2,5	2,9 a
Fosfato Reativo	2,6	2,9	2,4	2,0	2,5 b
Média	2,9 a	3,0 a	2,8 a	2,3 b	-
Dia 45					
Superfosfato Triplo	2,8 bA	2,8 bA	2,8 aA	2,7 aA	2,8 a
Fosfato Reativo	3,3 aA	3,0 aB	2,7 aC	2,1 bD	2,8 a
Média	3,0	2,9	2,8	2,4	-
Dia 60					
Superfosfato Triplo	3,0 aB	3,0 aAB	3,2 aA	2,8 aB	3,0
Fosfato Reativo	2,8 aA	2,6 bB	2,1 bC	1,9 bC	2,4
Média	2,9	2,8	2,7	2,3	-

Médias seguidas por letras distintas (minúsculas na vertical e maiúsculas na horizontal) diferempelo teste Tukey ($p \leq 0,05$).

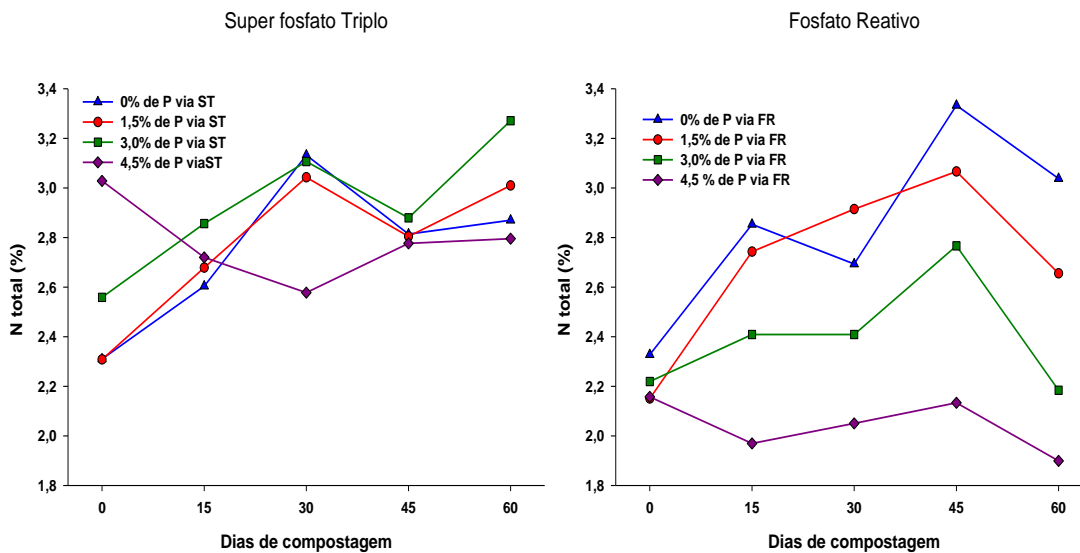
Os tratamentos com ST apresentaram concentrações maiores de nitrogênio na leira em relação ao FR, chegando ao final da compostagem com acúmulos maiores na ordem de 0,4%, 1,1% e 0,9% para a adição das doses crescentes dos fertilizantes. Este resultado pode ser explicado pela mudança de pH que os materiais promoveram na pilha, sendo que no caso do ST pelo caráter ácido gerado, a amônia que é gerada no processo de decomposição, rapidamente era convertida em amônio, devido a presença de íons H^+ , esse amônio reagem com o ortofosfato produzindo um fosfato diamônico (PROCHNOW et al. 2001; CORREA et al. 2015), aumentando assim o conteúdo de nitrogênio no composto final. Yuan et al. (2018) obteve correlação positiva com o pH do composto que foi adicionado superfosfato simples e com o teor de NH_4^+ também reduziu a emissão de NH_3 em 36% em relação a testemunha.

Já para o para o FR, que gerando alcalinidade na sua mistura, promoveu ainda mais volatilização e perdas de N para a atmosfera, refletindo em menor concentração na N na leira, concomitante a esse efeito o pH próximo do recomendado pela literatura, que aumenta a atividade de microrganismos termofilos favorecendo a perda de nitrogênio. Com o aumento das doses de FR houve decréscimo de 7,15%, 25% e 50% na concentração de N, quando comparado os tratamentos 0% com as doses de 1,5%, 3,0% e 4,5% de P. Sánchez-Monedero et al. (2017) demonstram que o pH e a temperatura das misturas juntamente com a concentração de NH_4^+ foram os principais fatores determinantes da perda de N através da volatilização da amônia.

A Figura 10 apresenta variações da concentração de nitrogênio no composto ao longo dos dias, não mantendo uma tendência de acréscimos ou decréscimo. Este resultado pode estar relacionado ao fato de haver mais de um fator que influencie a

concentração de N, como por exemplo, a diminuição de umidade, que leva a um aumento de concentração de N no material, as perdas por volatilização afeta negativamente esta característica, a redução da massa seca total devido à perda de carbono via CO_2 , esses fatores contribuem com as oscilações das concentrações de N ao longo dos 60 dias de compostagem. Ao final do período os tratamentos testemunha (0% de enriquecimento) concentraram mais nitrogênio em relação ao dia 0.

Figura 10 - Comportamento da concentração de nitrogênio ao longo do tempo de compostagem em função da adição de doses de superfosfato triplo e fosfato reativo.



4.1.5 Fósforo

Nas Tabelas 15, 16, 17 e 18 são apresentados os resultados obtidos pela extração dos diferentes métodos para o fósforo contido no composto, amostrado em 5 momentos e, provenientes da mistura em diferentes quantidades de ST e FR. Na Tabela 17 e 18 os resultados são expressos em % de P e na Tabela 19 e 20 os valores encontram-se em porcentagem, tendo como referência (100%) o P total.

Deve-se observar que para ambas as fontes de P houve aumento da concentração de P na pilha em função das doses misturada aos resíduos orgânicos. Os valores observados nas duas testemunhas foram muito semelhantes, mostrando que a mistura lodo mais o material estruturante gerou uma massa homogênea, mesmo considerando no início do processo (tempo 0). O aumento da concentração de P é atribuído ao efeito de concentração como consequência da degradação dos compostos orgânicos que reduz a massa seco do composto (WEI et al. 2018).

Quando se observa o teor total de P para as duas fontes, apesar dos resultados no tempo 0 serem semelhantes, nas determinações feitas posteriormente o ST sempre mostrou resultados superiores ao FR, significando que pode ter havido perda de P ao longo do processo. Uma hipótese para esta diferença, no que se refere ao P total, pode ser justificada pela perda de P no FR, na forma de pó, gerado durante o revolvimento do material, principalmente na fase final, quando o FR diminuiu a umidade mais rapidamente em relação ao ST. Outra hipótese para as diferenças também podem estar relacionada a taxa de decomposição e conseqüentemente perdas de CO₂ do composto das diferentes fontes de P, já justificada em função do pH.

Os valores alcançados de P total, ao 0, 15, 30, 45 e 60 dias para dose de 4,5% no enriquecimento foram para o ST 4,6; 6,9; 6,9; 5,9; 6,7 e para o FR 4,8; 4,4; 4,1; 5,7; 6,0. Com a massa menor em função da perda de carbono na forma de CO₂, aumentou relativamente a concentração de P (WEI et al., 2016; RIBEIRO 2018), gerando o diferencial entre os materiais, porém com aumento na concentração de P

Tabela 15 - Teor de fósforo no composto extraído com 4 diferentes extratores e em 5 épocas de amostragem após a aplicação de doses P via superfosfato triplo (ST).

Método	Doses de P (% base seca)				Média
	0	1,5	3,0	4,5	
-----%-----					
DIA 0					
P Total	1,0 aC	2,7 aB	3,9 aAB	4,6 aA	3,1
P CNA	0,7 aC	2,5 aB	3,8 aA	4,3 aA	2,8
P AC	0,4 aB	2,1 aB	3,4 aA	3,9 aA	2,4
P Água	0,0 aA	0,1 bA	0,1 aA	0,8 bA	0,3
Média	0,6	1,8	2,8	3,4	-
DIA 15					
P Total	1,4 aD	2,8 aC	4,1 aB	6,9 aA	3,8
P CNA	1,1 aD	2,4 aC	3,9 aB	5,5 bA	3,3
P AC	0,7 abD	2,2 aC	3,6 aB	5,3 bA	3,0
P Água	0,0 bA	0,0 bA	0,0 bA	0,8 aA	0,2
Média	0,8	1,9	2,9	4,6	-
DIA 30					
P Total	1,5 aD	3,0 aC	5,3 aB	6,9 aA	4,1
P CNA	1,2 aD	2,7 aC	4,0 bB	5,5 bA	3,3
P AC	0,9 aD	2,3 aC	3,9 bB	5,4 bA	3,1
P Água	0,0 bA	0,0 bA	0,0 cA	0,7 cA	0,2
Média	0,9	2,0	3,3	10,6	-

DIA 45					
P Total	1,6 aD	3,0 aC	4,7 aB	5,9 aA	3,8
P CNA	1,4 aD	2,8 aC	4,2 aB	5,4 aA	3,4
P AC	1,0 abD	2,6 aC	3,7 aB	4,9 aA	3,1
P Água	0,0 bA	0,0 bA	0,1 bA	0,7 bA	0,2
Média	1,0	2,1	3,2	4,2	-
DIA 60					
P Total	1,5 aD	3,4 aC	5,0 aB	6,7 aA	4,2
P CNA	1,5 aD	3,3 aC	4,8 aB	6,2 abA	4,0
P AC	1,2 aD	3,0 aC	4,6 aB	5,9 bA	3,7
P Água	0,0 bB	0,0 bB	0,3 bB	1,2 cA	0,3
Média	1,1	2,4	3,7	5,0	-

Médias seguidas por letras distintas (minúsculas na vertical e maiúsculas na horizontal) diferem pelo teste Tukey ($p \leq 0,05$)

para as duas fontes e todas as doses estudadas. Esse efeito também é relatado por Nishanth & Biswas (2008) e por Moharana & Biswas (2016), que trabalharam com compostos enriquecidos com fosfatos naturais, verificaram incrementos na quantidade total de P, independente do material a ser compostado e da fonte de P. RIBEIRO (2018) trabalhando com lodo de esgoto compostado com diferentes materiais estruturante, obteve aumentos significativos ao longo do processo de compostagem independente do material estruturante utilizado.

Ainda avaliando o P total, nota-se que aos 60 dias os valores da testemunha somados a 4,5% de P geraram resultados próximo ao esperado, no caso do ST 1,5% (da testemunha) + 4,5% = 6,0% de P, sendo o valor encontrado 6,7% e para o FR 1,7% (test) + 4,5% = 6,2% sendo o valor encontrado 6,0% de P. Deve-se lembrar, no entanto, que houve redução de massa e que era de se esperar valores ainda mais elevados, uma vez que o cálculo da adição de P, ainda que feito na base seca, não considerou a perda de massa, devido a decomposição (perdas de CO₂, NH₃).

Quanto à avaliação dos extratores, sabe-se que no caso da fonte solúvel em água, o ST, mais de 90% do P presente no fertilizante é solúvel em água, sendo 100% solúvel em CNA + Água (NOVAIS et al., 2007; ALCADE, 1998; CHIEN, 2011; MALAVOLTA, 1981; SOUSA et al., 2010), portanto o CNA deveria ser bem próximo ao P total, excluindo o P presente na matéria orgânica na mistura lodo + material estruturante.

Considerando a concentração de P no tratamento testemunha (0 de P) para fonte ST nota-se que inicialmente a concentração no tempo 0 para o extrator CNA e expressa em porcentagem (Tabela 19) foi de 70% sendo crescente nas demais

coletas:79, 80, 88%, chegando a 100% na amostragem final (60 dias). Isto significa dizer que parte do P, inicialmente indisponível para o extrator (30%) no caso do ST passou a disponível ao final da compostagem, indicando que no processo, a forma química com o P presente no lodo e no material estruturante se modificam quimicamente ao longo da compostagem. O mesmo pode ser notado para o extrator AC, que apesar de não atingir valores como o do CNA, apresentou a solubilidade em AC crescente em função do momento da amostragem, alterando de 40% de P solúvel em AC no tempo 0 e chegando a 80% de P solúvel em AC no tempo 60 dias após o início de compostagem. No entanto, nenhuma porção de P presente nos materiais residuais estava solúvel em água.

Esses resultados são condizentes com os obtidos por Moharana & Biswas (2016), que obtiveram um aumento linear no conteúdo de P extraído pelo CNA, em cinco compostos com diferentes matérias estruturante, com a decomposição até 120 dias.

Tabela 16 - Teor de fósforo no composto extraído com 4 diferentes extratores e em 5 épocas de amostragem após a aplicação de doses P via de fosfato reativo (FR).

Método	Doses de P (% base seca)				Média
	0	1,5	3,0	4,5	
-----%-----					
DIA 0					
P Total	1,1 aD	2,5 aC	3,7 aB	4,8 aA	3,0
P CNA	0,9 aC	1,6 bB	2,1 bA	2,5 bA	1,7
P AC	0,3 bC	1,4 bB	2,3 bA	2,7 bA	1,7
P Água	0,0 bA	0,0 cA	0,0 cA	0,0 cA	0,0
Média	0,6	1,4	2,0	2,4	-
DIA 15					
P Total	1,2 aD	2,5 aC	3,2 aB	4,4 aA	2,8
P CNA	0,9 abB	1,6 bA	1,9 bA	2,0 cA	1,6
P AC	0,6 bC	1,6 bB	2,0 bB	2,6 bA	1,7
P Água	0,0 cA	0,0 cA	0,0 cA	0,0 dA	0,0
Média	0,7	1,4	1,7	2,3	-
DIA 30					
P Total	1,5 aC	2,7 aBC	4,6 aA	4,1 aAB	3,2
P CNA	1,3 aA	1,7 aA	2,4 bA	2,9 abA	1,9
P AC	0,7 aB	1,7 aAB	2,1 bA	1,6 bcA	1,7
P Água	0,0 a	0,0 b	0,0 c	0,0 c	0,0
Média	10,9	1,5	2,3	2,2	-
DIA 45					
P Total	1,5 aD	2,5 aC	4,0 aB	5,7 aA	3,4

P CNA	1,2 aB	1,7 abAB	2,2 bAB	2,4 bA	1,9
P AC	0,8 abC	1,4 bBC	2,3 bAB	2,9 bA	1,8
P Água	0,0 bA	0,0 cA	0,0 cA	0,0 cA	0,0
Média	0,9	1,4	4,8	6,3	-
DIA 60					
P Total	1,7 aD	3,0 aC	4,9 aB	6,0 aA	3,9
P CNA	1,6 aB	2,2 bA	2,6 cA	2,6 cA	2,2
P AC	1,2 aC	2,7 abB	3,2 bAB	3,4 bA	2,6
P Água	0,0 bA	0,0 cA	0,0 dA	0,0 dA	0,0
Média	1,1	2,0	2,7	3,0	-

Médias seguidas por letras distintas (minúsculas na vertical e maiúsculas na horizontal) diferem pelo teste Tukey ($p \leq 0,05$)

Para os tratamentos com ST em doses de 1,5 a 4,5% notou-se que houve variação na solubilidade nos diferentes extratores, quer em função do momento da amostragem, quer em relação a porcentagem, variando de 80 a 96% da porcentagem de P solúvel em CNA em relação ao P total. A estas variações não se encontra uma tendência que possa explicar o ocorrido.

Tabela 17 - Comparação em porcentagem do teor de P na pilha de compostagem em relação ao P total (100%) e os demais extratores em 5 épocas de amostragem após a aplicação de doses P via superfosfato triplo (ST).

Método	Doses de P (% base seca)				
	0	1,5	3,0	4,5	Média
-----%-----					
DIA 0					
P Total	100	100	100	100	100
P CNA	70	93	97	93	88
P AC	40	78	87	85	72
P Água	0	4	3	17	6
DIA 15					
P Total	100	100	100	100	100
P CNA	79	86	95	80	85
P AC	50	79	88	77	73
P Água	0	0	0	12	3
DIA 30					
P Total	100	100	100	100	100
P CNA	80	90	75	80	81
P AC	60	77	74	78	72
P Água	0	0	0	10	3
DIA 45					
P Total	100	100	100	100	100
P CNA	88	93	89	92	90
P AC	63	87	79	83	78

P Água	0	0	2	12	3
DIA 60					
P Total	100	100	100	100	100
P CNA	100	97	96	93	96
P AC	80	88	92	88	87
P Água	0	0	6	18	6

Ainda com relação ao ST, porém com o extrator AC, os valores variaram de 74 a 92% do P total. Também neste caso não se constata uma tendência que possa indicar um motivo claro desta variação. Apesar disso, os maiores valores de P solúvel em AC foram observados aos 60 dias após o início de compostagem.

Com o uso do ST era de se esperar P solúvel em água em maior porcentagem no início da compostagem, uma vez que não se esperava que logo no início parte de P já se transformasse na leira. O que se observou, no entanto, foi uma baixa concentração de P (4 e 3% de P solúvel em água em relação ao P total para as pilhas como 1,5 e 3% de P adicionado), chegando a 17% do P em relação ao total de P na pilha, quando a dose aplicada foi para elevar em 4,5% o teor de P. Como no superfosfato triplo mais de 90% é solúvel em água (MALAVOLTA, 1967; CEKINAKI, 1990), estes valores estão muito aquém do que era previsto, significando que este P não estava mais disponível em água, ou que de alguma forma a presença do material orgânico não permitiu uma leitura adequada deste extrator, a hipótese atribuída a esse resultado é que a atividade microbiana ao longo do processo, pode ter imobilizado o P solúvel disponível no ST, sendo que esse estava prontamente disponível (CÉZAR 2005) e que ao longo do processo espécies que possuem a capacidade necessária para sobreviver e competir com sucesso durante o processo, mas espécies transitórias podem ir morrendo devido a desvantagens competitivas e acabam mineralizando o P imobilizado (WEI et al. 2018).

Sabe-se que a matéria orgânica apresenta cargas positivas e também negativas, e que o P solúvel em água ($H_2PO_4^-$) pode ter ficado adsorvido a cargas positivas do material, não se tornando disponível para o extrator. Para os tratamentos com adição do ST os valores de P solúvel em água foram ainda menores nas demais coletas, sendo que em duas delas (15 e 30 dias) o P solúvel somente foi determinado nas doses com 4,5% de P. Também no caso do P solúvel em água, a maior concentração foi observada na coleta aos 60 dias, apesar das diferenças serem pequenas em relação aos outros extratores. Para a dose de 1,5%, exceto no tempo

0, não foi possível determinar P solúvel em água. Para a dose de 3% inicialmente tinha-se 3% (tempo 0) e passou a 6%. Para a dose de 4,5% a concentração de P solúvel em água passou de 17% (tempo 0) para 18% (tempo 60) do total de P solúvel.

Quando se avalia o uso do FR na tabela 20, nota-se que no tratamento testemunha (sem P) há um comportamento semelhante ao discutido para dose 0 no ST. Quando se avalia o extrator CNA no tratamento testemunha, notou-se variação do teor de P comparado com o P total de 75 a 94% em função da época de coleta, sendo o maior valor observado aos 60 dias. Para o efeito das doses há um decréscimo de solubilidade P solúvel em CNA em função do aumento da concentração de P na mistura da pilha, quando comparado com o teor total e a testemunha.

Era esperado para a fonte FR um maior conteúdo de P pelo extrator CNA devido a contribuição de mais P pela fonte, pela decomposição do material orgânico, o aumento da demanda de P pela população microbiana e a liberação de ácidos orgânicos aumentando a atividade do H^+ pudesse ocorrer a solubilidade do P do FR (SINGH & AMBERGER 1998; NOVAIS et al., 2007; NISHANTH & BISWAS 2008; MOHARANA & BISWAS 2016), porem isso não ocorreu. Uma hipótese é que o conteúdo do P no lodo já era suficiente para atividade dos microrganismos

Tabela 18 – Comparação em porcentagem do teor de P na pilha de compostagem em relação ao P total (100%) e os demais extratores em 5 épocas de amostragem após a aplicação de doses P via fosfato reativo (FR).

Método	Doses de P (% base seca)				
	0	1,5	3,0	4,5	Média
-----%					
DIA 0					
P Total	100	100	100	100	100
P CNA	82	64	57	52	64
P AC	27	56	62	56	50
P Água	0	0	0	0	0
DIA 15					
P Total	100	100	100	100	100
P CNA	64	56	45	61	75
P AC	64	63	59	59	50
P Água	0	0	0	0	0
DIA 30					
P Total	100	100	100	100	100
P CNA	63	52	71	68	87
P AC	63	46	39	49	47
P Água	0	0	0	0	0
DIA 45					

P Total	100	100	100	100	100
P CNA	68	55	42	61	80
P AC	56	58	51	54	53
P Água	0	0	0	0	0
DIA 60					
P Total	100	100	100	100	100
P CNA	94	73	53	43	66
P AC	71	90	65	57	71
P Água	0	0	0	0	0

solubilizadores não havendo necessidade de atuarem no FR. Esses microrganismos além de assimilar o fosfato, o solubilizam, disponibilizando-o em proporções maiores que as consumidas (FERNÁNDEZ et al., 2007; RESTREPO-FRANCO et al., 2015), e essa atividade está relacionada ao pH do meio, onde reduzem o pH atuando sobre o P insolúvel presentes nos matérias que contem fosfato tricálcico, fosfato dicálcico e rocha fosfórica (KHAN et al., 2007; LARA et al., 2011). Esse efeito é bem demonstrado com o aumento das doses e a redução do P disponível em CNA para o dia 60.

Quando avaliado do extrator AC, os valores variaram de 27 a 71% em relação ao P total para testemunha e é observado uma queda conforme é adicionado FR. Os resultados, portanto, indicam que a compostagem pode ter promovido alterações na forma química do P o que é proveniente do material orgânico, e não da alteração química do FR, que foi observada pelos extratores CNA e AC principalmente após 60 dias de compostagem.

4.1.6 Teor de Cálcio

Na tabela 19 encontra-se os resultados da concentração de cálcio em função das doses de fósforo na forma de ST e FR em mistura com o lodo e material rico em carbono, em diferentes momentos durante a compostagem.

Nota-se que com a maior porcentagem de P em mistura com o composto ocorre aumento proporcional de cálcio, tanto para o ST como FR, uma vez que ambos fertilizantes apresentam teores consideráveis de cálcio em sua composição.

Tabela 19 - Porcentagem de cálcio em composto orgânico em diferentes dias após a aplicação de doses de fertilizantes fosfatados minerais.

Fertilizante	Doses de P (% base seca)				Média
	0%	1,5%	3,0%	4,5%	
	Teor de Ca (% base seca)				
0 Dias					
Superfosfato Triplo	0,9 aA	1,8 bA	2,4 bA	2,8 bA	2,0
Fosfato Reativo	0,7 aD	4,2 aC	8,6 aB	11,7 aA	6,3
Média	0,8	3,0	5,5	7,3	-
Dia 15					
Superfosfato Triplo	1,6 aC	2,7 aBC	3,9 bAB	5,5 bA	3,4
Fosfato Reativo	0,8 aC	4,0 aB	5,8 aB	9,5 aA	5,0
Média	1,2	3,4	4,9	7,5	-
Dia 30					
Superfosfato Triplo	1,7 aA	3,1 aA	4,2 bA	4,8 bA	3,5
Fosfato Reativo	1,6 aB	5,5 aB	13,9 aA	18,8 aA	10,0
Média	1,7	4,3	9,1	11,8	-
Dia 45					
Superfosfato Triplo	2,0 aA	3,2 bA	4,2 bA	4,8 bA	3,5
Fosfato Reativo	2,3 aC	9,7 aB	14,4 aAB	17,4 aA	10,9
Média	2,2	6,5	9,3	11,1	-
Dia 60					
Superfosfato Triplo	2,2 aA	3,7 aA	4,5 bA	5,2 bA	3,93
Fosfato Reativo	2,6 aB	5,9 aB	17,1 aA	17,2 aA	10,72
Média	2,4	4,8	10,8	11,2	-

Médias seguidas por letras distintas (minúsculas na vertical e maiúsculas na horizontal) diferem pelo teste Tukey ($p \leq 0,05$).

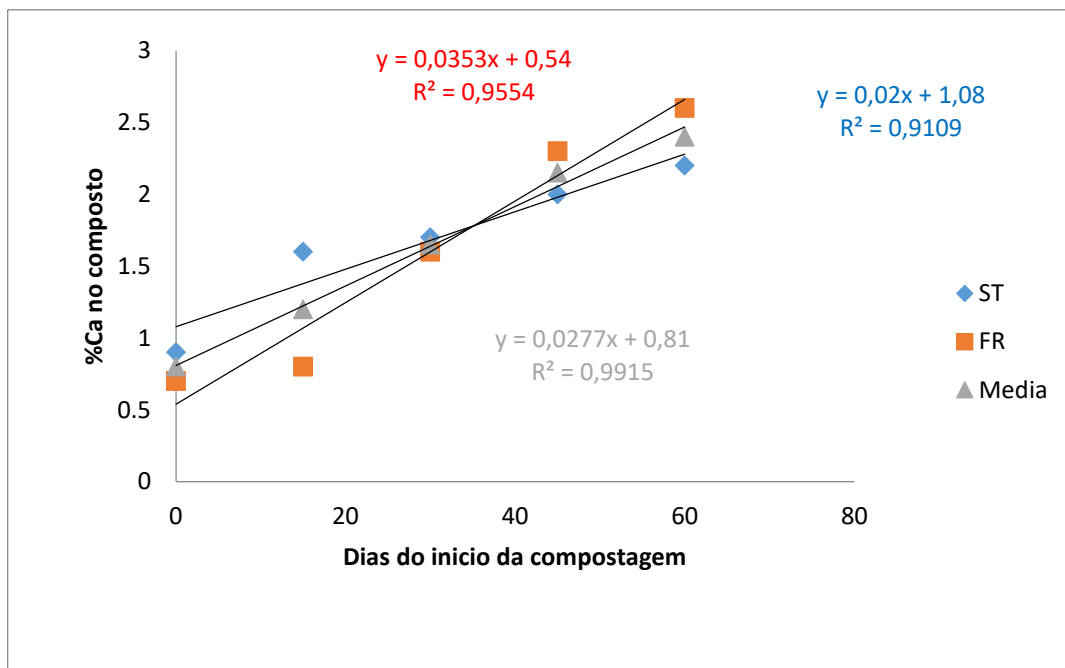
Quando se considera apenas as testemunhas (0 de P aplicado) tanto para o ST como para FR nota-se que a concentração de Ca da amostra aumentou com o tempo. Fazendo uma média dos dois tratamentos, nota-se que houve um aumento do teor de Ca de cerca de 3 vezes, 0,8 para 2,4% de Ca.

Como o Ca presente na massa é considerado Ca total e os resultados estão na base seca, portanto já descontado a perda de umidade, pode-se inferir que a massa de material reduziu cerca de 3 vezes. Desta forma pode-se, de modo indireto, sugerir que devido as perdas de umidade, e outros gases que se desprendem da massa do composto para a atmosfera (CO_2 , NH_3), a massa de composto reduziu aproximadamente em 2/3. Portanto, este valor pode ser uma inferência sobre a redução de massa ocorrida na compostagem, bem como a estimativa de quanto de composto deve ficar ao final do processo, indicando o rendimento da compostagem.

Apesar dessa hipótese de estimativa da diminuição de massa pela concentração de Ca na pilha, e usando os mesmos argumentos para calcular a perda de massa usando a concentração de P, nota-se que o coeficiente angular entre os

dois parâmetros é diferente. Se considerar que a perda de massa levaria a um aumento proporcional de P e Ca no composto, pode-se inferir que este indicativo deva ser melhor estudado (Figura 11).

Figura 11 - Concentração de Ca ao longo do tempo de compostagem para a testemunha (dose 0 de ST e dose 0 de P para o FR) e da média das duas testemunhas.



4.1.7 Carbono Orgânico Total

Na tabela 20 encontra-se os resultados da concentração de carbono orgânico total. Os teores de C diminuíram ao longo do período de compostagem passando em média de 38 para 26% no tratamento onde o P não foi aplicado. Quando o P foi aplicado em dosagens diferentes, houve decréscimo na concentração de C, proporcional a dose de fertilizantes fosfatados e também em função do momento de amostragem. Esse resultado é condizente com Andreoli et al. (2001) que aponta a diminuição do teor de matéria orgânica é uma dos objetivos do tratamento do lodo de esgoto.

Esses resultados também estão condizentes como os obtidos por Ribeiro (2018) que trabalhou com diferentes materiais estruturantes na compostagem de lodo de esgoto, onde ocorreu a redução dos teores de carbono orgânico total ao longo de 90 dias de compostagem.

Zhang et al. (2018) avaliando o desempenho da compostagem de lodo de esgoto com a fração orgânica de resíduos sólidos urbanos em diferentes proporções

obteve uma redução gradativa dos teores da matéria orgânica do composto obtendo uma redução da matéria orgânica entre 35% e 46 % e uma redução do COT que variou entre 32% e 40%, já aos 15 dias de compostagem.

A diminuição em função do tempo de amostragem denotam a perda de carbono do material na forma de CO₂ refletindo a decomposição da massa orgânica promovida pelos micro-organismos que incorporam uma parte de carbono na sua carcaça e eliminam partes na forma de CO₂ (SILVA, 2007; KIEHL, 2004) e também pelo efeito da mineralização do material orgânico (CORRÊA et al., 2006; ZHANG et al. 2018). Por outro lado, a diminuição na concentração de C, para o FR, ocorre com a adição crescente de P é atribuída a massa de fertilizante misturada ao lodo e ao material estruturante, promovendo efeito diluição do carbono na massa.

Nota-se que a diminuição é mais intensa quando se utiliza o FR devido a maior quantidade desse fertilizante que foi misturado ao composto para atender as doses de P em relação ao ST. Portanto, as diferenças significativas observadas aos 45 e 60 dias entre fontes e doses podem ser explicadas por este efeito diluição, não sendo possível distinguir se também houve maior decomposição dentro da mesma época em função das doses de P.

A IN nº 25 do MAPA (BRASIL, 2009) estabelece o valor mínimo de 15% de carbono orgânico para compostos orgânicos, assim os valores de COT ao final da compostagem atendem o exigido pela legislação vigente.

Tabela 20 - Porcentagem de carbono total em composto orgânico em diferentes dias após a aplicação de doses de fertilizantes fosfatados minerais.

Fertilizante	Doses de P (% base seca)				
	0%	1,5%	3,0%	4,5%	Média
Teor de C Total (% base seca)					
Dia 0					
Superfosfato Triplo	40	32	34	34	35,0 a
Fosfato Reativo	37	30	24	23	28,6 a
Média	38,5 a	31,2 a	29,0 a	28,5 a	-
Dia 15					
Superfosfato Triplo	31	29	27	25	27,9 a
Fosfato Reativo	28	26	29	27	27,9 a
Média	29,4 a	27,6 a	28,7 a	26,0 a	-
Dia 30					
Superfosfato Triplo	28	27	25	24	26,3 a
Fosfato Reativo	24	26	23	22	23,7 a

Média	26,1 a	26,4 a	24,4 a	23,1 a	-
Dia 45					
Superfosfato Triplo	27 aA	27aA	25 aA	26 aA	26,6 a
Fosfato Reativo	28 aA	25 aB	22 bC	20 bC	24,0 b
Média	27,6 a	26,4 a	23,6 b	23,6 b	-
Dia 60					
Superfosfato Triplo	27 aA	27 aA	25 aA	26 aA	26,7 a
Fosfato Reativo	25 aA	22 bB	19 bC	17 bC	21,5 b
Média	26,4 a	25,3 a	22,6 b	22,1 b	-

Médias seguidas por letras distintas (minúsculas na vertical e maiúsculas na horizontal) diferem pelo teste Tukey ($p \leq 0,05$)

4.1.8 Relação C:N

Os resultados da relação C/N apresentados na tabela 21 mostram que houve diminuição desta relação ao longo do período de compostagem e também em função das doses de P, esses resultados são condizentes com os obtidos por Jouraiphy et al. (2005), que compostando lodo de esgoto com resíduos vegetais frescos verificaram uma redução de 30/1 para 12/1 ao longo de 135 dias de compostagem. O mesmo foi observado por Moretti (2013) que compostou lodo de esgoto com podas de árvores, onde a relação C/N reduziu de 25/1 para 12/1.

Tabela 21 - Valores da relação C\N total em composto orgânico em diferentes dias após a aplicação de doses de fertilizantes fosfatados minerais.

Fertilizante	Doses de P (% base seca)				Média
	0%	1,5%	3,0%	4,5%	
C\N total (base seca)					
0 Dias					
Superfosfato Triplo	17	15	13	11	14 a
Fosfato Reativo	17	14	12	11	13 a
Média	17 a	14 a	13 a	11 a	
15 dias					
Superfosfato Triplo	12	11	10	9	11 a
Fosfato Reativo	10	10	13	14	10 a
Média	11 a	10 a	11 a	12 a	
30 dias					
Superfosfato Triplo	9	9	8	10	9 a
Fosfato Reativo	9	9	9	11	9 a
Média	9 ab	9 ab	8 b	10 a	
45 dias					

Superfosfato Triplo	10 aAB	10 aA	8,7 aB	10 aAB	9,5 a
Fosfato Reativo	8 bB	8,3 bB	8,0 aB	10 aA	8,5 b
Média	9 ab	9 a	9 b	9 a	
60 dias					
Superfosfato Triplo	9	9	7	9	9 a
Fosfato Reativo	8	8	9	9	8 a
Média	8 a	8 a	8 a	9 a	-

Médias seguidas por letras distintas (minúsculas na vertical e maiúsculas na horizontal) diferem pelo teste Tukey ($p \leq 0,05$).

Para entender estes resultados tem-se que lembrar que há uma diferencial na concentração de carbono, quer pela entrada de fósforo, que diluiu tanto o C como o N na massa, há o efeito de volatilização de N promovido pela fonte FR, diminuindo significativamente o teor de N quanto maior a dose desse fertilizante aplicado. Há o efeito do ST com carácter ácido, reagindo com parte da amônia que iria volatilizar naturalmente pelo processo. Somado a todos estes fatores, ocorrem as perdas de C pela ação dos micro-organismos. Todas estas reações ocorrem ao mesmo tempo, não permitindo distinguir qual delas está sendo mais intensiva e promovendo as concentrações apresentadas na tabela 20.

A relação C/N obtida ao final do processo de compostagem, em todos os tratamentos, para o composto produzido neste estudo está abaixo de 20/1, esse valor é o limite máximo permitido pela legislação para que esses compostos possam ser classificados como compostos orgânicos classe D (BRASIL, 2009), além disso os valores da C/N para o composto pronto é um indicador de qualidade do processo de compostagem e do composto, sendo comumente recomendado uma relação abaixo de 20/1 (ZHANG et al. 2018; BERNAL et al 2009; MÁRQUEZ 2011; KIEHL,2004; JOURAIPHY et al. 2005)

4.1.9 Concentração de potássio (K₂O), magnésio (Mg), enxofre (S) e micronutrientes nos compostos produzidos.

Os teores de K, Mg e S do composto gerado a partir das misturas com doses de ST e FR são apresentados na Tabela 22. O potássio, como era de se esperar, apresentou baixa concentração no composto e inclusive, para as doses de ST houve diferenças significativas, indicando que possivelmente havia resíduos de K no ST. Já para o FR além da diferença em relação a testemunha, nota-se também entre as doses.

Tabela 22 – Concentração de K₂O, Mg e S em composto orgânico após sessenta dias de compostagem com a aplicação de doses de fertilizantes fosfatados minerais.

Tratamentos	K ₂ O	Mg	S
	% em base seca		
0%ST	0,12 d	0,30a	2,88 ab
1,5%ST	0,15 c	0,31a	2,83 bc
3,0% ST	0,16 b	0,31a	2,72 bc
4,5%ST	0,19 a	0,34a	2,52 c
0%FR	0,11 d	0,27a	3,26 a
1,5%FR	0,11 d	0,32a	3,06 ab
3,0%FR	0,11 d	0,34a	2,72 bc
4,5%FR	0,11 d	0,33a	2,77 bc

Medias seguidos de letras iguais na linha não diferem entre si no nível 5% pelo teste de Tukey.

A explicação do efeito diluição também se aplicada para o S , onde a adição do fertilizante, diluiu a concentração de S na pilha, porém não pode se descartar a possível perda de S da pilha, principalmente em função do aumento de pH, observado onde o FR foi aplicado em maior dosagem.

O teor de Mg não alterou entre os tratamentos e o de S apresentou valores elevados e diferentes significativamente entre os tratamentos. Para os tratamentos com ST, percebe-se uma diminuição em função das doses, principalmente em relação a testemunha.

Os valores de K₂O, Mg e S ficaram bem abaixo dos valores obtidos por (LEITE 2015) que avaliou diversos lotes de composto de lodo de esgoto com poda de árvore e casca de eucalipto, esse pesquisador obteve valores de 3,8 g/kg, 9,0 g/kg e 8,0 g/kg de K, Mg e S.

Os teores de B, Cu, Fe, Mn, Zn e Na do composto gerado a partir das misturas com doses de ST e FR são apresentados na Tabela 23. Para micronutrientes, destaca-se o aumento de B nos tratamentos onde se aumentou a concentração de ST, a concentração do Cu diminuiu com aumento das doses de fósforo, denotando efeito diluição em função da massa de fertilizante misturado, o mesmo sendo observado para Fe e Mn.

O Cu mesmo sendo um nutriente essencial para o desenvolvimento das plantas, tem potencial para contaminar o solo e a água em elevadas concentrações,

tendo em vista que esse elemento também é um metal pesado (RODRIGUES et al., 2016; ZUBA Jr. et al., 2011). Nenhum dos tratamentos atingiu o valor mínimo estabelecidos pela IN nº 25/2009 do MAPA (BRASIL 2009) que é de 500 mg kg⁻¹ e ficando bem abaixo dos níveis máximos do permitido pelo CONAMA nas resolução nº 380/2006 que é de 1500 mg kg⁻¹.

Para o Fe, a IN nº 25/2009 do MAPA (BRASIL 2009) estabelece que as concentrações mínimas para este nutriente em fertilizantes orgânicos não pode ser maior que 2000 mg kg⁻¹, neste estudo os valores de Fe variando de 24500 mg kg⁻¹ a 40000 mg kg⁻¹, ou sejam muito superiores ao mínimo demandado pela legislação, logo é necessário cautela quanto ao uso devido esse elemento em excesso causar fitotoxides as plantas.

A concentração de Zn aumento com adição de ST (possivelmente resíduo de micronutriente presente neste fertilizante) e diminuiu com o FR (efeito diluição).

Para o Na, praticamente não se observa diferenças entre as doses de fosforo, porém aumentou com as doses de FR, devido à presença desse elemento na sua composição.

Tabela 23 – Concentração (mg kg⁻¹) de boro (B), cobre (Cu), ferro (Fe), manganês (Mn), zinco (Zn) e sódio (Na) do composto coletado aos 60 dias após o início da compostagem.

Tratamentos	B	Cu	Fe	Mn	Zn	Na
-----mg kg ⁻¹ -----						
0%ST	246 b	152 bc	40416 ab	332 ab	578 de	1000 d
1,5%ST	286 b	142 cd	34983 cd	280 cd	612 cd	1306 cd
3,0% ST	362 a	136 de	31800 cd	256 cde	659 ab	1473 c
4,5%ST	288 a	129 e	26266ef	216 ef	675 a	1726 c
0%FR	262 b	166 a	41450 a	337 a	623 bc	1006 d
1,5%FR	249 b	160 ab	36166 c	292 bc	610 cd	1726 c
3,0%FR	289 b	143 cd	30083 de	244 de	556 e	2493 b
4,5%FR	249 b	126e	24250 f	198 f	504 f	3033 a

Medias seguidos de letras iguais na linha não diferem entre si no nível 5% pelo teste de Tukey

4.1.10 Metais Pesados

Em relação aos metais pesados presentes nos compostos orgânicos produzidos a partir dos 8 tratamentos (Tabela 24), de acordo com a IN 07/2016 de 12/04/2016, o único parâmetro não adequado é o cádmio, sendo observados valores

acima de 3 mg/kg em todos os tratamentos. Foram analisados os fertilizantes fosfatados utilizados para enriquecimento dos compostos (FR e ST) e os dois apresentaram elevados valores de cádmio em sua composição, sendo 4,8 mg/kg para FR e 18,4 mg/kg para ST. Entretanto, os valores de cádmio estão elevados até mesmo nas testemunhas, onde não foi aplicado nenhum dos fertilizantes mencionados. Assim, é necessário que se faça um estudo mais detalhado em relação a esse parâmetro, para detectar sua origem e determinar a forma mais adequada para atender a legislação vigente.

Tabela 24 - Análise de metais pesados dos compostos gerados em cada tratamento ao final do processo de compostagem e comparação com valores vigentes na legislação (IN nº 7 de 12/04/2016).

Tratamentos	As	Ba	Cd	Pb	Cu	Cr	Hg	Mo	Ni	Se	Zn
	-----mg kg ⁻¹ -----										
0%ST	< 6,3	206	7,0	11,4	122	36	<1	10	10	<6	421
1,5%ST	< 6,3	187	7,3	10,4	105	38	<1	10	8,9	<6	434
3,0% ST	< 6,3	182	8,3	10,2	102	42	<1	11	9,4	<6	477
4,5%ST	< 6,3	160	9,1	9,0	91	44	<1	11	9,6	<6	480
0%FR	< 6,3	218	6,7	12,1	128	35	<1	14	10	<6	450
1,5%FR	< 6,3	199	6,6	10,8	108	34	<1	15	10	<6	408
3,0%FR	< 6,3	177	6,3	8,9	95	33	<1	13	8,5	<6	371
4,5%FR	< 6,3	150	5,9	6,7	78	31	<1	11	9,4	<6	317
Valor Máximo	20	-	3	150	-	2	1	-	70	80	-

4.1.11 Considerações Finais

A adição de ST nas concentrações de 3 e 4,5% da massa seca do material a ser compostado afetou negativamente a temperatura, não permitindo, segundo a legislação a desinfecção dos patógenos contidos na massa. O contrário ocorreu com a aplicação de 1,5% de ST.

A T na pilha com o FR foi adequada para a compostagem a partir dos 20 dias após o início do processo, para as 3 doses de P estudadas.

A umidade do composto diminuiu mais intensamente nas pilhas com FR em relação ao ST.

O pH foi distinto para as duas fontes, sendo que no caso do ST as doses abaixaram o pH de forma significativa, enquanto para o FR houve tendência de aumento.

A concentração de N foi afetada pelas fontes e doses de P misturadas à pilha, sendo que para o ST foram observados maior concentração de N em relação ao FR, principalmente para as maiores doses de P misturadas aos materiais.

A fonte de P proveniente do ST gerou maior concentração de P na massa, de forma proporcional a dose misturada.

Com o uso do CNA e AC houve modificação na extração de P na pilha, que aumentou ao longo do tempo.

Os teores de Ca no composto aumentaram com as doses, sendo mais elevado para o FR.

Houve diminuição no teor de C e da relação C/N ao longo do tempo.

4.2 EXPERIMENTO II - FERTILIDADE DO SOLO E EFICIÊNCIA AGRONÔMICA DE FERTILIZANTES ORGÂNICOS A BASE DE LODO DE ESGOTO E ENRIQUECIDOS COM FOSFATOS.

4.2.1 Produção de Massa Seca nas plantas de milho

De modo geral, no primeiro cultivo, se observa que a quantidade de massa seca de milho aumentou de acordo com as doses de P aplicada no solo (Tabela 25), o que variou foi a quantidade de MS incrementada pelos diferentes fertilizantes. Para a adubação de P para a cultura do milho, o efeito positivo do lodo de esgoto “in natura”, do lodo compostado e de fertilizantes fosfatados minerais já é confirmado com incrementos tanto em massa seca como em produção de grãos (CRUZ et al, 2018; MARTINS et al, 2003; SIMONETE et al 2003; RESENDE et al, 2006; FRANZINI et al 2009; CORRÊA et al 2017).

A maior massa seca de milho foi observada nos tratamentos LC 0% ST, LC 0% FR e LC 4,5% ST na dose de 100 mg de P e na sequência estão os tratamentos onde o P do ST foi adicionado no momento da compostagem. Esses tratamentos atingiram médias maiores que o ST para essa dose, com um aumento de 27% em relação ao ST, isso demonstra que o processo de compostagem feito no estudo descrito e discutido, foi eficiente para que a produção de massa seca de milho fosse superior ao ST. Esses resultados estão condizentes com os obtidos por Junio et al. (2013) que trabalhando com doses de lodo de esgoto compostado com palha de feijão, em um Cambissolo Háplico, obteve incrementos na produtividade de grãos de milho em até 4,63 t há⁻¹ com doses de até 75 toneladas de lodo por há. Lemainski & Silva (2006) constataram que o uso de lodo de esgoto úmido em Latossolo Vermelho distrófico argiloso, produziu cerca de 21% mais eficiente que o fertilizante mineral para produção de milho.

Ainda avaliando os tratamentos LC 0% ST, LC 0% FR e LC 4,5% ST, no primeiro cultivo, é observado um incremento de MS significativo com o aumento das doses. Esses resultados estão condizentes como os resultados obtidos por Martins et al. (2003), onde trabalhou com lodo de esgoto “in natura” em um Latossolo Vermelho distrófico típico, observou um aumento linear na produção de massa seca e de grãos da cultura do milho, esse pesquisador atribui o aumento da produção do milho principalmente ao fornecimento de nutrientes, dentre eles o P.

Tabela 25 - Produção de massa seca (g/vaso) da parte aérea de plantas de milho, em resposta a aplicação de fertilizantes fosfatados minerais e orgânicos enriquecidos, em dois cultivos sequenciais.

Fertilizante	Dose de P (mg dm ⁻³)					Média
	0	25	50	75	100	
Massa seca (g/vaso)						
1º Cultivo						
ST	7,0 aC	37,2 aB	37,7 aB	48,6 aA	40,8 bcAB	34,3
FR	6,9 aB	16,6 cdAB	23,0 cdA	22,1 bA	24,1 eA	18,6
LC 0% ST	7,0 aD	20,8 bcdC	33,3 abcB	41,7 aB	54,2 aA	31,4
LC 1,5% ST	6,9 aC	27,8 abcB	34,1 abcAB	42,4 aA	44,1 abA	31,1
LC 3,0% ST	7,0 aB	30,0 abA	34,0 abcA	40,2 aA	36,6 bcdA	29,6
LC 4,5% ST	6,7 aD	28,8 abC	35,5 abBC	39,8 aB	53,4 aA	32,9
LC 0% FR	6,4 aD	24,0 bcdC	35,5 abB	43,1 aB	55,0 aA	32,8
LC 1,5% FR	6,7 aC	14,2 dBC	20,4 dAB	27,3 bA	26,7 deA	19,0
LC 3,0% FR	6,4 aC	15,9 cdBC	24,9 bcdAB	24,7 bAB	31,7 cdeA	20,7
LC 4,5% FR	6,7 aC	19,5 cdB	22,7 cdAB	26,5 bAB	30,3 cdeA	21,1
Média	6,8	23,5	30,1	35,6	39,7	-
2º Cultivo						
ST	7,8 aB	28,5 aA	28,4 aA	33,5 aA	29,2 bcA	25,5
FR	7,9 aB	16,9 cdeA	20,3 bcdA	19,0 bA	20,6 dA	16,9
LC 0% ST	7,8 aD	17,8 cdeC	24,8 abcB	28,5 aB	35,1 abA	22,8
LC 1,5% ST	7,8 aD	21,6 bcdC	25,2 abBC	30,6 aA	29,4 bcAB	22,9
LC 3,0% ST	7,8 aB	24,1 abA	25,9 abA	28,0 aA	26,0 cdA	22,4
LC 4,5% ST	7,6 aD	22,7 abcC	25,7 abBC	28,9 aB	37,4 aA	24,d
LC 0% FR	7,2 aD	19,3 cdeC	25,1 abB	29,2 aB	34,7 abA	23,1
LC 1,5% FR	7,9 aD	13,7 eC	18,2 dBC	21,8 bAB	26,1 cdA	17,5
LC 3,0% FR	7,2 aC	15,6 deB	21,1 bcdA	20,3 bAB	23,7 cdA	17,5
LC 4,5% FR	7,9 aC	18,0 cdeB	18,9 cdAB	20,8 bAB	24,0 cdA	17,9
Média	7,7	19,8	23,4	26,1	28,6	-

Médias seguidas por letras distintas (minúsculas na vertical e maiúsculas na horizontal) diferem pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$).

Para o tratamento LC 4,5% ST de P, do ponto de vista de uso na agricultura, a maior quantidade de ST presente no composto melhora o rendimento no momento da aplicação deste fertilizante ao campo, sendo necessário um menor volume para obter uma determinada dose, uma vez que esse tratamento obteve resultado superiores ao ST para a dose 100 mg e resultados idênticos ao lodo compostado com bagaço de cana.

Para os tratamentos onde foi adicionada o ST no momento da compostagem (LC 1,5% ST, LC 3,0% ST, LC 4,5% ST) a produção de MS esta próxima ao total produzido pelo ST, esse efeito pode estar relacionado ao efeito da matéria orgânica

adicionada, via composto, bloquear as hidroxilas nas superfícies de óxidos de ferro e alumínio (LEAL & VELOSO 1973; CORRÊA et al., 2017; GROHSKOPF 2017).

Esse efeito para os tratamentos onde foi adicionada o ST no momento da compostagem (LC 1,5% ST, LC 3,0% ST, LC 4,5% ST) também pode estar relacionado aos compostos de ferro e alumínio que estão no lodo (Zhang et al.2019), então, o P adicionado com fertilizante solúvel pode ter ficado adsorvido a esses compostos, reduzindo a eficiência no uso do P.

Os tratamentos com FR adicionado a compostagem geraram os menores resultados na produção de massa seca de plantas, com valores semelhantes ao tratamento onde apenas o FR foi adicionado. Para testemunha onde apenas o composto forneceu P para plantas de milho, os resultados foram superiores ao ST para dose 100 mg, e para as demais doses esse tratamento ficou próximo ao ST ou ficaram próximo dos tratamentos onde se misturou lodo e ST em diferentes doses. Esse efeito é explicado pelo fato do FR não ser solúvel em água, e ter a liberação de forma gradativa, não fornecendo o P de forma imediata (NOVAIS & SMYTH,1999).

Os resultados obtidos para o enriquecimento com o FR, corroboram com os obtidos por Garcia (2014) avaliando fontes alternativas de P para a cultura do milho em um Latossolo Vermelho distrófico, obteve as maiores produções de massa seca do milho com o ST e as menores produções com o FR.

De forma geral quanto mais se aumentou a dose de FR na massa do composto, menor foi a produção de massa seca do milho em comparação ao lodo compostado com bagaço e com a adição de ST, esses resultados demonstram que o processo de compostagem não foi suficiente para que houvesse solubilização de quantidades suficientes de P do FR a ponto de fornecer P em quantidades satisfatórias para a plantas de milho. Esses resultados são explicados pelo fato do fosfato reativo aumentar o conteúdo de Ca e elevar os valores de pH, o que favorece a estabilização da rocha fosfática em vez de solubilizar o P da fonte (MALUF et al. 2018; BUSTAMANTE et al. 2016).

No segundo cultivo houve redução da massa seca das plantas de milho, sendo a diminuição mais acentuada nos tratamentos onde o ST foi aplicado. Houve diminuição na massa seca dos tratamentos com FR, que no segundo cultivo também apresentaram valores inferiores ao ST, no entanto, a diminuição de massa foi menos acentuada, provavelmente devido ao efeito residual que no FR ser maior do que no ST. Isso demonstra a redução do potencial das fontes e do solo em fornecer P, devido

a exportação de nutriente no primeiro cultivo e o efeito das reações de fixação do P ao longo do tempo (SCIVITTARO et al. 1997).

Cruz et al. (2018) trabalhando com a eficiência na disponibilidade de P para a cultura do milho em resposta a adubação com ST em Latossolo Vermelho sob efeito residual de fontes alternativas de P, observou uma maior resposta da cultura em produção de massa seca em dois cultivos, quando o solo apresentava efeito residual do FR Bayóvar.

Resende et al. (2006) avaliaram a aplicação de fontes de P com solubilidade variável em um Argissolo Vermelho Distrófico, com baixa disponibilidade de P observaram aumentos semelhantes em três diferentes ciclos de milho ao usar uma fonte de FR. Esses autores inferiram que, no médio prazo fontes de baixa solubilidade como o FR poderiam fornecer os mesmos benefícios ao rendimento de grãos de milho como as fontes solúveis.

Ainda avaliando o segundo cultivo, o ST manteve o mesmo comportamento observado no primeiro cultivo, ou seja, produziu as maiores médias até a dose de 75 mg. Os tratamentos LC 0% ST, LC 0% FR e LC 4,5% ST obtiveram os maiores efeitos residuais a partir da dose de 75 mg. Esses resultados são compatíveis com os observados por Lemainski & Silva (2006), esses autores aplicaram doses de lodo úmido e obtiveram um efeito residual a partir das doses intermediárias (30 e 45 t ha⁻¹) onde a produção de milho foi em torno de 80% das obtidas no primeiro cultivo.

Segundo Tian et al. (2016) o tempo de permanência do lodo seco no solo pode variar de dois a seis anos, isso corrobora com os dados de massa seca deste experimento, podendo inferir que o lodo compostado com bagaço de cana tem um efeito residual no solo significativo, isso ajuda a explicar o efeito do tratamento do LC 4,5% ST para as doses de 75 e 100 mg, nestas doses tem-se o efeito residual do ST somado ao do composto de lodo com bagaço.

4.2.2 Acúmulo de P na parte aérea das plantas de milho

Para o acúmulo de P na parte aérea das plantas, houve efeito significativo nos dois cultivos, notou-se que os resultados da Tabela 26, o acúmulo de P na planta de milho aumentou significativamente em todos os tratamentos com as doses crescentes de P nos dois cultivos. A razão do acúmulo significativo em todos os tratamentos está relacionado ao baixo teor de P no solo (RAIJ et al. 1999). Os solos brasileiros são naturalmente de carga variável e deficiente em fósforo (BOLAN et al. 2013), o que permite alcançar respostas aos fertilizantes aplicados já para a menor dose.

Tabela 26 - Acúmulo de P (mg/vaso) na parte aérea de plantas de milho, em resposta a aplicação de fertilizantes fosfatados minerais e orgânicos enriquecidos, em dois cultivos sequenciais.

Fertilizante	Dose de P (mg dm ⁻³)					Média
	0	25	50	75	100	
Acúmulo de P (g kg⁻¹)						
1º Cultivo						
ST	5,0 aC	26,0 abB	36,0 aB	50,0 aA	58,2 aA	35,0
FR	5,0 aB	12,0 dAB	17,0 bcA	18,2 cA	22,0 dA	14,8
LC 0% ST	5,2 aD	16 bcdC	27,0 abcB	38,0 abA	47,7 abA	26,8
LC 1,5% ST	5,5 aC	24,5 abB	31,2 aAB	41,2 abA	41,7 bcA	28,8
LC 3,0% ST	5,2 aC	25,7 abB	32,5 aAB	41,0 abA	33,0 cdAB	27,5
LC 4,5% ST	5,5 aD	29,7 aC	31,0 aBC	40,7 abB	52,2 abA	31,8
LC 0% FR	4,5 aD	18,7 bcC	27,5 abBC	37,2 bB	51,5 abA	27,9
LC 1,5% FR	4,7 aC	9,7 dBC	14,7 cABC	19,5 cAB	24,2 dA	14,6
LC 3,0% FR	4,5 aC	10,7 dBC	18,0 bcAB	20,2 cAB	24,5 dA	15,6
LC 4,5% FR	4,7 aC	13,2 cdBC	17,5 bcAB	21,7 cAB	24,0 dA	16,2
Média	5,0	18,6	25,2	32,8	37,9	-
2º Cultivo						
ST	6,2 aC	28,2 aB	32,0 aB	46,7 aA	48,5 bA	32,3
FR	6,0 aC	13,7 deB	20 bcAB	21,2 dA	24,7 cA	17,1
LC 0% ST	6,2 aE	15,2 cdeD	26,5 abC	35,5 bcB	48,7 bA	26,4
LC 1,5% ST	5,7 aD	20,7 abcC	30,0 aB	43,7 abA	49,7 bA	30,0
LC 3,0% ST	6,0 aD	23,5 abcC	31,2 aB	40,7 abcA	43,5 bA	29,0
LC 4,5% ST	6,2 aE	24,5 abD	34,2 aC	44,0 abB	60,0 aA	33,7
LC 0% FR	5,0 aD	16,2 cdeC	26,2 abB	32,7 cB	44,5 bA	24,9
LC 1,5% FR	6,0 aC	12,5 deBC	14,0 cB	19,0 dB	29,0 cA	16,1
LC 3,0% FR	5,0 aB	12,0 eB	19,7 bcA	20,7 dA	25,0 cA	16,5
LC 4,5% FR	6,0 aD	14,5 deC	18,0 bcBC	22,2 dAB	26,7 cA	17,5
Média	5,8	18,1	25,1	32,6	40,0	-

Médias seguidas por letras distintas (minúsculas na vertical e maiúsculas na horizontal) diferem pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$).

As maiores quantidades de P na planta foram alcançadas no tratamento com ST seguidos daqueles onde o ST foi misturado em maior porcentagem ao composto (LC 4,5% ST) e na sequência LC 3,0% ST e LC 1,5% ST. Para a dose de 25 mg o maior incremento foi observado para o tratamento LC 4,5% ST, para dose de 50 mg os tratamentos LC 1,5% ST, LC 3,0% ST e o LC 4,5% ST, proporcionaram efeitos iguais ao ST, já nas demais doses o ST proporcionou os maiores acúmulos de P. Sandin (2016) também verificou maiores incrementos de biomassa seca de milho para doses de 40, 80 e 120 mg dm⁻³ em um Latossolo Vermelho distrófico com baixo teor de P disponível.

O composto de lodo sem adição de P apresentou valores intermediários entre o lodo com ST e lodo com FR., este último gerou menor acúmulo de P nas plantas de milho. Portanto, pode-se inferir que para o acúmulo de P o efeito da adição de ST no composto é benéfico para absorção do P, variando conforme a dose utilizada. Já a adição de FR, o acúmulo de P é prejudicado, ficando abaixo do ST, dos tratamentos com adição do ST e das testemunhas (LC 0% ST e LC 0% FR).

O lodo de esgoto permite um aporte e liberação mais lenta de P disponível no solo, o que reduz a concentração de P no tecido das plantas de milho em comparação com fontes solúveis em água (TIAN et al. 2016), outro fator é presença da matéria orgânica do composto que permite uma liberação mais lenta do P no solo (CORREA et al. 2016). Isso ajuda a explicar o efeito do acúmulo observado nos tratamentos, onde ocorreu uma variação entre os tratamentos e as doses quando o composto foi elaborado como ST e no composto sem adição de fertilizantes.

No segundo cultivo, os tratamentos com composto enriquecido com ST e no composto sem adição de fertilizantes, o mesmo comportamento foi observado para o segundo cultivo, porém no caso do tratamento ST e LC 4,5% ST proporcionam os maiores acúmulos, o que é curioso, pois o P já se encontrava solúvel e, portanto, em maior contato com o solo que ocorreu com o segundo cultivo, aumentaria o potencial de fixação de P na argila do solo, tornando-o menos disponível em as outras fontes.

Ainda avaliando o segundo cultivo onde tratamento FR foi aplicado, gerou valores mais elevados em relação ao primeiro cultivo, esse fato foi observado também para os tratamentos onde foi utilizado FR. Isso ocorreu devido as características da rocha, que se solubiliza a medida em que entra em contato com a acidez do solo, esse segundo cultivo promoveu maior solubilização e, portanto, mais P foi liberado para a solução do solo (MOHARANA et al. 2015 ; NOVAIS & SMYTH,1999; CRUZ et al.

2018). Mesmo com esse efeito os tratamentos com o enriquecimento com FR proporcionaram os menores acúmulos de P em relação aos demais tratamentos, este resultado demonstra que o processo de compostagem não foi eficiente em melhorar a solubilidade desta fonte.

Para os tratamentos LC 0% ST e LC 0% FR os resultados obtidos demonstram um efeito residual satisfatório, principalmente quando utilizados na doses acima de 50 mg dm⁻³, esse efeito é de grande importância para a utilização de lodos compostados na agricultura, uma vez que as reservas de rocha fosfática de alta qualidade estão progressivamente se tornando escassas, assim a pressão no uso de recursos minerais ricos em P poderia ser aliviada pela reciclagem do P presente nos lodos de esgoto (TORRI et al. 2017).

Para os tratamentos onde ocorreu diminuição do acúmulo de P, o fato pode ser explicado pela maior fixação de P ao solo (MONTALVO et al. 2015), uma vez que não houve reposição da adubação fosfatada mineral e nem do composto, pois o objetivo do segundo cultivo foi avaliar o efeito residual. Outro fator importante é redução do P disponível devido a extração do primeiro cultivo, o que reduz a disponibilidade de P na solução do solo (FERNANDES et al. 2015).

Ono et al. (2009) em um experimento onde um Latossolo Vermelho Distroférrico com baixo teor de P disponível foi adubado com doses de fosfato natural de Arad e de superfosfato triplo e foi cultivado a cultura da soja e do milho em casa de vegetação, verificaram que os teores de P nas folhas de soja e milho foi superior para o ST na maior dose utilizada em comparação com o fosfato de arad, o mesmo foi observado para este experimento porem para todas as doses utilizadas.

Com esses resultados é possível afirmar que o composto de lodo de esgoto + bagaço de cana com ou sem adição de ST, disponibiliza P em quantidades satisfatórias para a cultura do milho.

4.2.3 Altura de plantas

A adubação com os fertilizantes fosfatados minerais e orgânicos enriquecidos testados em interação com as dosagens de P (Tabela 27) influenciaram significativamente a altura das plantas de milho apenas no primeiro cultivo. O milho é uma cultura que apresentou aumento de altura em função das doses de fósforo, independente da fonte utilizada, em solos com baixo teor de P disponível (TIRITAN et

al. 2010; LUCENA et al. 2000; GARCIA 2014; GUTIERREZ et al. 2008; JUNIO et al. 2013).

As maiores alturas de planta foram obtidas para os tratamentos LC 0% ST, LC 4,5% ST, LC 0% FR, ST, LC 1,5% ST e LC 3,0% ST para a dose de 100 mg de P, demonstrando o mesmo comportamento obtido para o acúmulo de P e massa seca, ou seja, quanto maior a participação da fonte de P solúvel no composto enriquecido, maior foi o efeito na altura de planta para o primeiro cultivo. Esses resultados demonstram um efeito positivo na altura de plantas quanto ao enriquecimento do composto de lodo com o ST.

Para o tratamento ST é observado um incremento significativo das doses até 75 mg de P. Lucena et al. (2000), avaliando o efeito de doses de P (0 kg ha⁻¹, 60 kg ha⁻¹, 120 kg ha⁻¹, 180 kg ha⁻¹ e 240 kg ha⁻¹ de P₂O₅) na cultura do milho, verificaram aumento da altura de plantas de milho, até a dose de 177 kg ha⁻¹ de P₂O₅.

No segundo cultivo não houve efeito significativo na interação fonte x dose e o incremento em altura foi observado até a dose de 75 mg de P.

Tabela 27 - Altura de plantas de milho (cm), em resposta a aplicação de fertilizantes fosfatados minerais e orgânicos enriquecidos em dois cultivos sequenciais.

Fertilizante	Dose de P (mg dm ⁻³)					Média
	0	25	50	75	100	
Altura de planta (cm)						
1º Cultivo						
ST	36 aC	67 aD	73 aAB	78 aA	73 abAB	65
FR	34 aB	50 cdA	59 bcA	56 dA	57 cA	51
LC 0% ST	36 aD	54 bcdC	65 abcB	71 abAB	80 aA	61
LC 1,5% ST	31 aD	61 abcC	65 abcBC	75 aA	72 abAB	61
LC 3,0% ST	36 aB	66 aA	67 abA	69 abcA	70abA	61
LC 4,5% ST	31 aC	64 abB	67 abB	68 abcB	79 aA	62
LC 0% FR	34 aC	57 bcdB	66 abAB	73 aA	75 abA	61
LC 1,5% FR	36 aD	46 dC	55 cBC	59 cdAB	67 bcA	52
LC 3,0% FR	34 aC	47dB	58 bcA	60 cdA	67 bcA	53
LC 4,5% FR	36 aC	54 cdB	56 cAB	59 cdAB	65 bcA	54
Média	34	57	63	67	71	-
2º Cultivo						
ST	45	55	58	57	57	54 a
FR	46	54	57	56	61	55 a
LC 0% ST	45	54	56	58	58	54 a
LC 1,5% ST	46	57	58	57	57	55 a
LC 3,0% ST	45	57	58	59	58	55 a
LC 4,5% ST	46	55	57	57	58	54 a
LC 0% FR	46	54	57	55	56	54 a
LC 1,5% FR	48	52	54	55	57	53 a
LC 3,0% FR	46	54	53	55	53	52 a
LC 4,5% FR	48	55	55	58	62	55 a
Média	46 c	55 b	56 ab	57 a	57 a	-

Médias seguidas por letras distintas (minúsculas na vertical e maiúsculas na horizontal) diferem pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$).

4.2.4 Diâmetro do colmo

Para o diâmetro do colmo houve diferença significativa apenas no primeiro cultivo (Tabela 28). Para o segundo cultivo não houve efeito significativo da interação fonte x dose, sendo que as doses não diferiram significativamente entre si, mas diferiram em relação a testemunha.

Tabela 28 - Diâmetro de plantas de milho (cm), em resposta a aplicação de fertilizantes fosfatados minerais e orgânicos enriquecidos, em dois cultivos sequenciais.

Fertilizante	Dose de P (mg dm ⁻³)					Média
	0	25	50	75	100	
Diâmetro (cm)						
1º Cultivo						
ST	0,65 aB	1,2 aA	1,22 abA	1,35 aA	1,27 bcdA	1,14
FR	0,67 aC	0,9 bcB	1,07 bAB	1,02 cAB	1,12 dA	0,96
LC 0% ST	0,65 aD	1,0 abcC	1,22 abBC	1,32 abAB	1,42 abA	1,13
LC 1,5% ST	0,67 aC	1,10 aB	1,22 abAB	1,30 abAB	1,37 abcA	1,15
LC 3,0% ST	0,65 aB	1,10 aA	1,22 abA	1,35 aA	1,32 bcdA	1,14
LC 4,5% ST	0,65 aB	1,20 aA	1,30 aA	1,30 abA	1,35 abcA	1,16
LC 0% FR	0,67 aC	1,12 abB	1,30 aAB	1,32 abA	1,47 aA	1,18
LC 1,5% FR	0,65 aD	0,90 cC	1,05 bBC	1,17 abcAB	1,30 bcdA	1,01
LC 3,0% FR	0,67 aC	0,95 bcB	1,12 abAB	1,12 bcAB	1,25 bcdA	1,02
LC 4,5% FR	0,65 aB	1,02 abcA	1,10 bA	1,15 abcA	1,20 cdA	1,02
Média	0,66	1,07	1,18	1,24	1,31	-
2º Cultivo						
ST	0,77	0,92	0,90	0,92	0,92	0,89 a
FR	0,77	0,95	0,97	0,92	0,95	0,91 a
LC 0% ST	0,77	0,87	0,92	0,95	0,92	0,89 a
LC 1,5% ST	0,72	0,92	0,90	0,92	0,90	0,87 a
LC 3,0% ST	0,77	0,95	0,92	0,95	0,92	0,90 a
LC 4,5% ST	0,72	0,97	0,95	0,92	0,92	0,90 a
LC 0% FR	0,77	0,90	0,90	0,92	0,92	0,88 a
LC 1,5% FR	0,80	0,90	0,90	0,97	0,90	0,89 a
LC 3,0% FR	0,77	0,92	0,97	0,95	0,92	0,91 a
LC 4,5% FR	0,80	0,97	0,90	0,92	0,92	0,90 a
Média	0,77 b	0,93 a	0,92 a	0,93 a	0,92 a	-

Médias seguidas por letras distintas (minúsculas na vertical e maiúsculas na horizontal) diferem pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$).

O diâmetro do colmo tem correlação com a produtividade da cultura do milho, por se tratar de um órgão de reserva da planta, além disso o colmo atua como estrutura de reserva de substâncias que serão utilizadas na o desenvolvimento e produção de grãos (CRUZ et al. 2008; FANCELLI & DOURADONETO, 2000).

A única fonte que não diferiu significativamente com o aumento das doses foi o ST, as demais fontes de fósforo diferiram significativamente em função do aumento das doses de P, obtendo incrementos no diâmetro do colmo.

Dentro das fontes, os fertilizantes LC 0% ST e LC 0% FR foram os que mais obtiveram incrementos com o aumento das doses de P para o parâmetro diâmetro do colmo.

Gutierrez et al. (2008), observaram incrementos significativos no diâmetro do colmo quanto da fertilização fosfatada da parte aérea do milho corroborando os

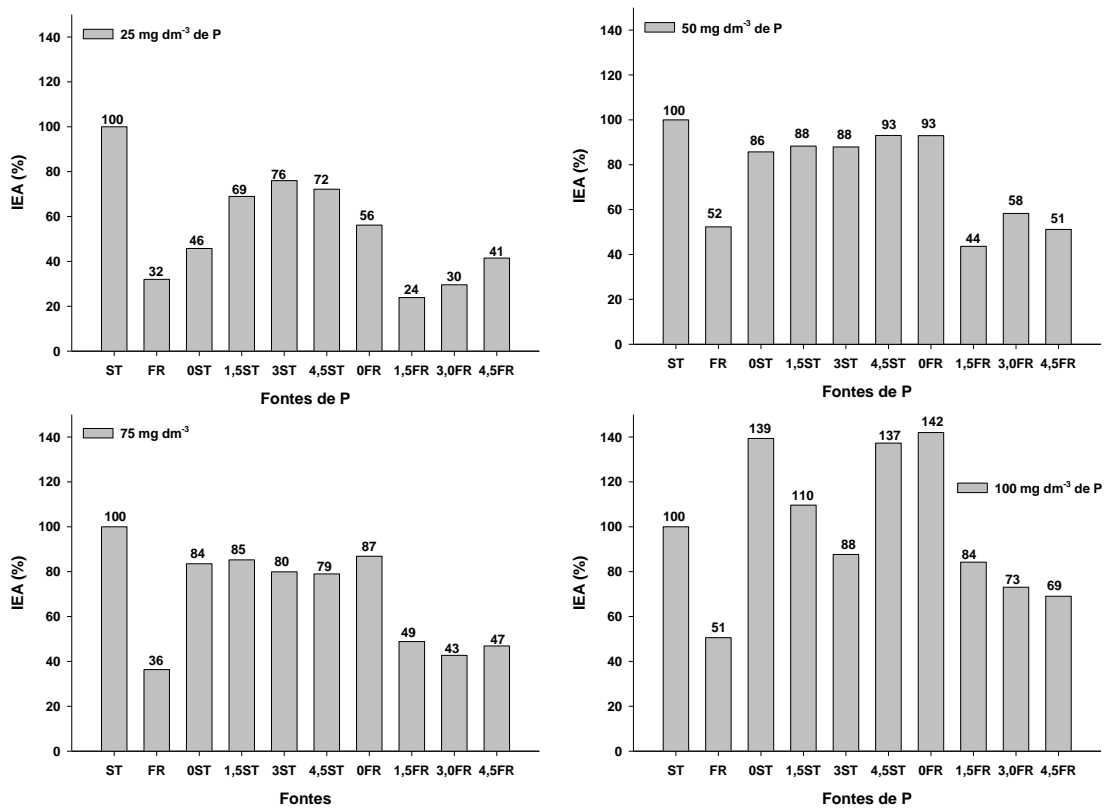
resultados encontrados no presente estudo, onde o aumento das doses de fósforo proporcionou maior diâmetro do colmo.

4.2.5 Índice de Eficiência Agronômica – IEA

O índice de eficiência agronômica (IEA) foi calculado com base na MS e no fósforo acumulado na parte aérea das plantas de milho para os dois cultivos.

Para o IEA na dose de 25 mg com base na MS do primeiro cultivo (Figura 15) observa-se que o ST foi superior em relação a todos os outros tratamentos. Conforme aumentou-se a concentração da fonte não solúvel em água no composto (FR) aumentou-se o IEA, porém não foi o suficiente para equiparar os tratamentos 0% ST e 0% FR. Para os tratamentos 0% ST e 0% FR foi observado valores superiores em relação ao FR na ordem de 14% e 24% respectivamente, indicando que para dose de 25mg em relação ao FR o composto orgânico é superior. Com esses resultados é possível inferir que para doses menores, fontes solúveis em água como o ST são mais eficientes.

Figura 12 – Índice de eficiência agronômica do cultivo 1 em função da produção de massa seca das plantas de milho.



Destaca-se para as doses de 50 e 75 mg de P comportamento semelhante para todos os tratamentos, sendo que conforme aumentou-se a concentração de fertilizante solúvel no composto ocorreu melhor eficiência agrônômica. Todos os tratamentos com enriquecimento de P via fonte não solúvel foi verificado um IEA inferior em relação ao enriquecimento da fonte solúvel.

Para a dose de 100 mg em particular, observou-se expressivo IEA em comparação com o ST, onde os maiores valores foram obtidos pelas fontes 0% FR, 0% ST, 4,5% ST, 1,5% ST, essas fontes alcançaram valores de IEA superiores ao ST que é a fonte padrão de comparação, cerca de 42%, 39%, 37% e 10% respectivamente. Esses dados para os tratamentos 0% FR, 0% ST corroboram com os de Lemainski & Silva (2006), que utilizaram um lodo de esgoto úmido proveniente da CAESB, e verificaram que em média o lodo úmido foi 21% mais eficiente na produção de grãos de milho, quando comparado ao fertilizante mineral.

Para as doses 50, 75 e 100 mg aplicadas neste estudo, quando se compara os valores de IEA onde o composto foi enriquecido com o FR, independente da dose empregada para o cultivo do milho, é observado um efeito na redução dos valores do IEA para estas fontes em relação ao ST mineral. Conforme aumentou-se a proporção do FR no composto verifica-se uma queda dos IEAs. Esses resultados permitem inferir que o processo de compostagem não solubilizou P desta fonte em quantidade suficiente para que possa ser considerada a compostagem um método eficiente para solubilizar P do FR.

Se subtrairmos o valor do IEA, para dose de 100 mg de P, do tratamento 0 FR com o FR, o valor obtido é de 91%, ou seja, o lodo compostado com bagaço para essa dose é 91% mais eficiente em produzir massa seca do milho em relação ao FR. Isso permite inferir que os valores de IEA para os tratamentos 1,5FR, 3FR e 4,5FR advém em maior quantidade da proporção de P que compõe a massa de lodo de esgoto compostado e não do P do FR.

Sandin (2016) avaliando o índice de eficiência agrônômica de fontes de fosforo, onde uma das fontes era um FR, para doses de 40, 80 e 120 mg dm⁻³ de P em dois Latossolos Vermelho distrófico um com elevado teor de P e outro com nível baixo, verificou que o FR obteve IEA em variando de 41% a 3 % para um cultivo de milho, ou seja, são índices baixos quando comparada a fonte de referência ST em ambos os solos, e no Latossolo com baixo teor de P disponível essa fonte obteve os menores

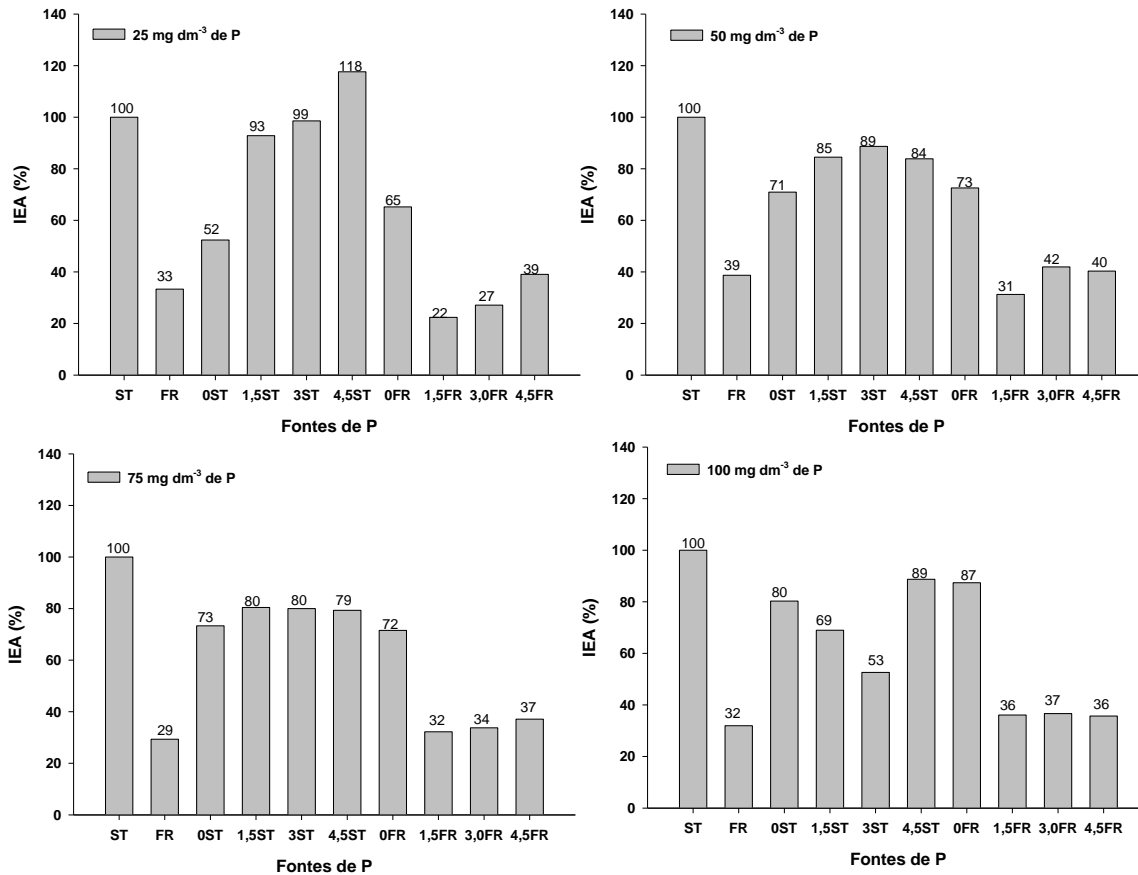
valores, demonstrando que essa fonte é pouco eficiente para o uso em condições de acidez corrigida e em cultivos com plantas de ciclo curto.

O FR é pouco eficiente em condições onde a acidez foi corrigida e em condições onde a saturação por bases também foi corrigida (CRUZ et al. 2018; GARCIA 2014), assim neste estudo a acidez natural do solo foi corrigida e a saturação por bases foi elevada para 70% via calagem, era esperado um menor IEA para esta fonte, porém é observado um IEA para o FR maiores que os obtidos em trabalhos na literatura (CRUZ et al. 2018; SANDIN 2016; GARCIA 2014) para um cultivo de milho.

Esse efeito é atribuído a essa fonte ter sido incorporada ao solo o que aumenta a superfície de contato desta fonte com o solo e com as raízes. Resende et al. (2006) trabalhando com o fosfato natural reativo de Arad a lanço, em área total e incorporado observaram maiores produtividade de grãos de milho quando o fosfato de Arad foi espalhado e incorporado, em comparação ao aplicado de forma localizada.

Na Figura 16 são apresentados os resultados do IEA com a base nos valores de P extraído pela parte aérea das plantas de milho no primeiro cultivo. Nota-se que há variações nos resultados conforme é aumentado a dose de P para cada fonte. Contudo, existe um padrão de comportamento se repetindo em relação as fontes.

Figura 13 - Índice de eficiência agrônômica para cultivo 1 em função da extração de P do solo.



Onde os maiores índices de eficiência são observados para os tratamentos onde foi adicionado o P solúvel em água e para os tratamentos onde se tem o composto de lodo.

Para a dose de 25 mg, observa-se que com o aumento da concentração de fosfato solúvel ocorreu incremento de IEA, onde os tratamentos 1,5% ST, 3,0% ST e 4,5% ST obtiveram IEA na ordem de 93%, 99% e 118%, respectivamente. Os tratamentos 1,5% FR, 3,0% FR e 4,5% FR apresentaram IEA de 22%, 27% e 39%, respectivamente, ficando próximos do valor do FR e abaixo do valor obtido com 0% FR.

Para a dose de 50 mg e 75 mg de P, foi observado efeito semelhante ao do IEA para a produção de massa seca, ou seja, onde ocorreu aumento da concentração de fertilizante solúvel no composto ocorreu maior eficiência agrônômica. Os tratamentos FR, 1,5% FR e 3,0% FR ficaram abaixo do IEA da fonte 0% FR, porém apresentaram melhores resultados em relação ao FR.

Para dose de 100 mg os melhores IEA foram os tratamentos 4,5% ST, 0% FR e 0% ST. Os tratamentos 1,5% FR, 3,0% FR e 4,5% FR apresentaram valores superiores em relação ao FR, porém com incrementos não muito substanciais.

Esse efeito dos menores valores de IEA para o acúmulo de P nos tratamentos com o FR está relacionado a esta fonte não ser solúvel em água e fornecer o P de forma gradativa, outro fator é a forte interação que o P tem com a fase mineral deste solo, formando complexos de alto grau de estabilidade e de ligação específica (SHEN et al., 2014; ERNANI 2016), tornando o P pouco disponível de forma mais imediata, o que é limitante para uma cultura de rápido crescimento como o milho.

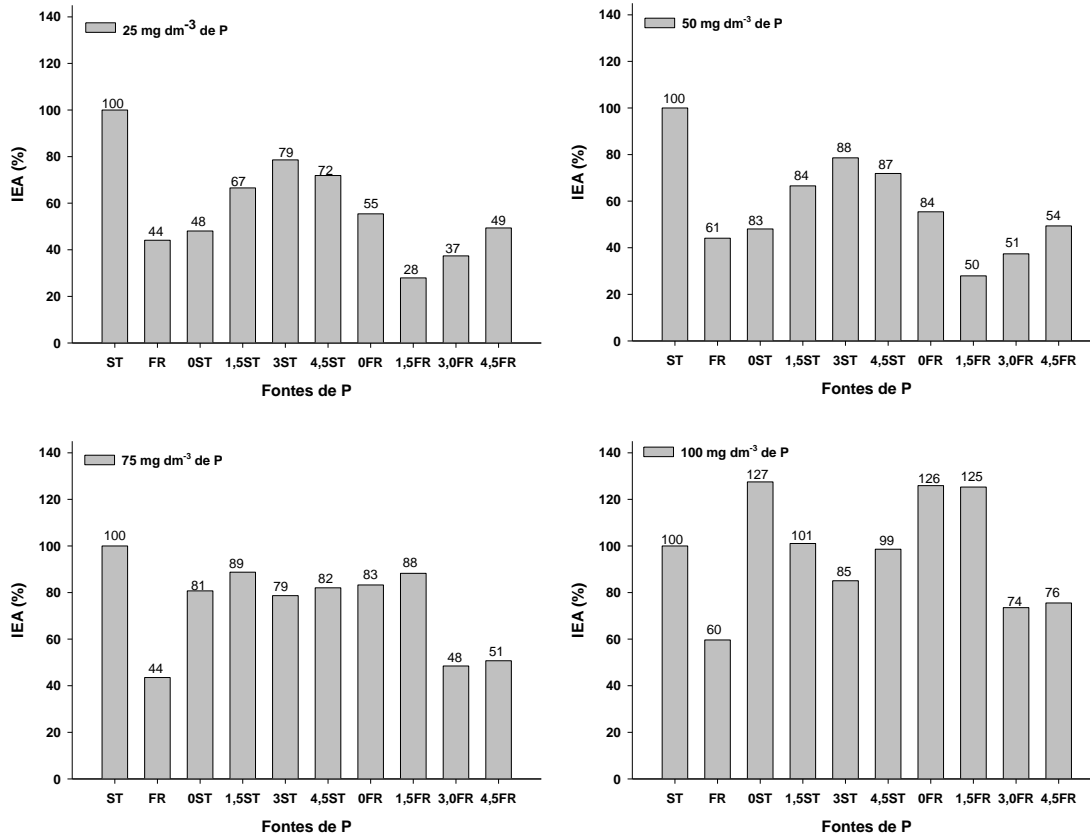
Na Figura 17 são apresentados os resultados do IEA com base na massa seca da parte aérea de plantas de milho obtidas no cultivo 2. Nota-se que há variações nos resultados conforme aumenta-se as doses de P.

Para as doses de 25 mg e 50 mg de P o comportamento do IEA para todas as fontes testadas é semelhante e segue o padrão observado para as doses de 50 e 75 mg no IEA da massa seca do primeiro cultivo.

Para a dose de 100 mg de P os tratamentos 0% ST, 1,5% ST, 0% FR e 1,5% FR foi observado um valor de IEA superior ao do ST, com médias de 127%, 101%, 126% e 125%, demonstrando que para produção de massa seca esses tratamentos apresentaram efeito residual positivo. Ainda nesta dose para o tratamento 4,5ST foi observado uma queda de 39% do IEA em relação ao primeiro cultivo, esse efeito é explicado pela exportação de P neste fertilizante no primeiro cultivo, devido a presença de maiores quantidade de P solúvel em água nesta fonte.

Segundo Tian et al. (2016) o tempo de permanência do lodo seco no solo pode variar de dois a seis anos, isso corrobora com os dados de massa seca deste experimento, podendo inferir que o lodo compostado com bagaço de cana tem um efeito residual no solo significativo, isso ajuda a explicar o efeito dos tratamentos 0% ST, 1,5% ST, 0% FR e 1,5% FR para as doses de 75 e 100 mg, nestas doses tem-se o efeito residual do ST e FR somado ao do composto de lodo com bagaço.

Figura 14 - Índice de eficiência agrônômica do cultivo 2 em função da produção de massa seca das plantas de milho.



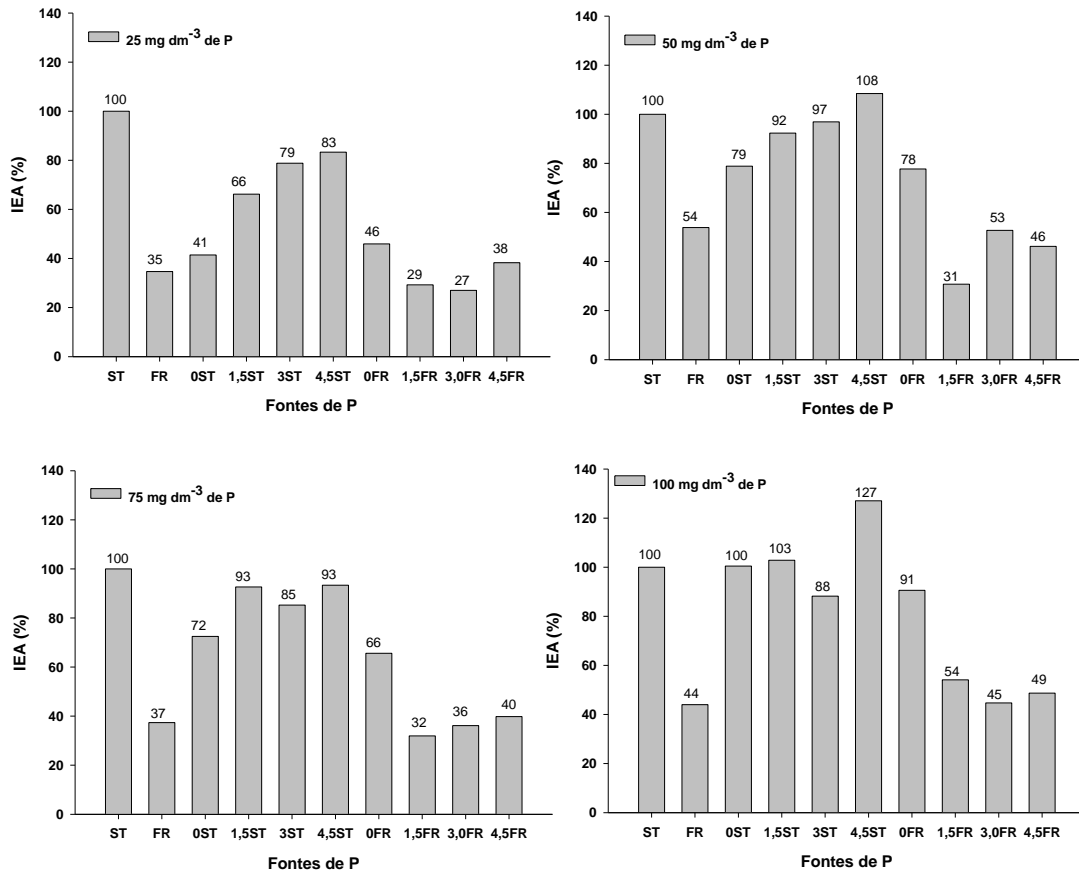
Para a fonte FR em particular foi observado um aumento no IEA em média de 10% para todas as doses empregadas neste estudo em relação ao primeiro cultivo.

Na Figura 18 são apresentados os resultados do IEA com base na extração de P pela parte aérea das plantas de milho no cultivo 2. Nota-se que há variações nos resultados conforme aumenta-se as doses de P.

Para as doses de 25 mg, 50 mg e 75 mg, foram observados efeitos semelhantes aos do IEA para a produção de massa seca, ou seja, conforme aumentou-se a concentração de fertilizante solúvel no composto ocorreram melhores IEA. Os tratamentos FR, 1,5% FR e 3,0% FR ficaram abaixo do IEA da fonte 0% FR, porém apresentaram melhores resultados em relação ao FR.

Para a dose de 100 mg de P foi observado um IEA acima do ST pelas fontes 1,5% ST e 4,5% ST. As fontes 1,5% FR, 3,0% FR e 4,5% FR apresentaram valores acima do FR, porém ficaram abaixo das fontes 0% ST e 0% FR.

Figura 15. Índice de eficiência agrônômica do cultivo 2 em função da extração de P.



4.2.6 Avaliações no Solo

4.2.6.1 Matéria Orgânica no Solo (M.O.S.)

Em relação ao aumento do teor de MOS a adubação por alguns dos fertilizantes orgânicos a base de lodo de esgoto e enriquecidos com fontes fosfatadas de P promoveram o aumento de M.O.S. no solo, foi observado interação significativa entre as fontes e as doses utilizadas (tabela 29), porém é observado uma variação nos resultados em relação as doses dos fertilizantes testados, o que dificulta a interpretação dos dados. Lembrando que a coleta do solo foi feita após o período dos dois cultivos das plantas de milho.

Tabela 29 - Teor de matéria orgânica (g dm^{-3}) em Latossolo Vermelho distrófico (LVd) em resposta a aplicação de fertilizantes fosfatados minerais e orgânicos enriquecidos em, dois cultivos sequenciais.

Fertilizante	Dose de P (mg dm^{-3})					Média
	0	25	50	75	100	
	MO (g dm^{-3})					
ST	30 aAB	24 dB	33 abcA	33 abA	31 bcdA	30
FR	30 aA	28 cdA	28 cA	27 bA	36 dA	28
LC 0% ST	30 aA	30 bcdA	32 abcA	32 abA	33 bcdA	31
LC 1,5% ST	29 aB	37 bA	39 aA	38 aA	39 abA	36
LC 3,0% ST	30 aB	36 bcAB	40 aA	37 aA	36 abcAB	36
LC 4,5% ST	30 aC	48 aA	38 abB	40 aB	40 aB	39
LC 0% FR	31 aB	38 bAB	37 abAB	34 abAB	41 aA	36
LC 1,5% FR	34 aA	36 bcA	34 abcA	33 abA	37 abcA	34
LC 3,0% FR	34 aA	34 bcA	36 abcA	34 abA	29 cdA	34
LC 4,5% FR	34 aA	36 bcA	30 bcA	31 abA	30 cdA	32
Média	31	35	35	34	34	-

Médias seguidas por letras distintas (minúsculas na vertical e maiúsculas na horizontal) diferem pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$).

Os tratamentos FR, LC 0% ST, LC 1,5%FR, LC 1,5% FR e LC 4,5% FR não diferiram quanto as doses em relação a dose 0, ou seja, não aumentaram os teores de MOS no solo. Melo et al (2018) avaliando o efeito da aplicação de 0; 50; 100 e $147,5 \text{ t ha}^{-1}$ em um Latossolo argiloso, não observou resultados significativos com a utilização do lodo no acúmulo de MOS no solo, esses pesquisadores atribuíram esse resultado a alta capacidade de decomposição da MO em regiões tropicais, os altos teores de proteínas do lodo favorecendo a decomposição acelerada deste material e a incorporação destes materiais com a grade também teria favorecido o não acúmulo de MOS.

Os tratamentos LC 1,5% ST, LC 3,0% ST, LC 4,5% ST, LC 0% FR aumentaram significativamente os teores de MOS no solo. Esses tratamentos, a partir da dose de 25 mg dm^{-3} de P já diferiram em relação a outros tratamentos, com incrementos que variam de 6 a $18 \text{ g de MOS por dm}^{-3}$. Esses resultados podem ser explicados pelo fato do composto com adição do ST ter apresentado maiores teores de C orgânico em relação ao composto com adição do FR.

Simonete, (2003) avaliando um Argissolo Vermelho Amarelo que estava sob efeito da aplicação de doses de lodo de esgoto, em casa de vegetação, tratado com

0; 10; 20; 30; 40 e 50 Mg ha⁻¹ base seca, verificou incrementos significativos nos teores de matéria orgânica variando de 3 a 6 %.

Hamdi et al. (2019) trabalhando com a aplicação de longo prazo com lodo de esgoto em um estudo de campo, utilizando doses de 0, 40, 80 e 120 t ha⁻¹ ano, para um solo franco arenoso e um solo arenoso, observou incrementos significativos para o acúmulo de carbono orgânico total nos dois solos testados, esses autores atribuem a textura arenosa e franco arenosa apresentarem naturalmente um baixo teor de MOS. Vários outros pesquisadores obtiveram resultados expressivos no aumento da MOS no solo, com a aplicação de lodo de esgoto ou compostos orgânicos (LATARE et al. 2014; ZOGHLAMI et al. 2014; OLIVEIRA et al., 2002; SOARES 2005) com doses de lodo variando de 4 t ha⁻¹ a 240 t ha⁻¹.

O aumento da matéria orgânica no solo em solos das regiões tropicais e subtropicais também pode estar relacionado com a quantidade de lodo aplicado e com o tempo de avaliação dos experimentos. Esses autores utilizaram grandes quantidades anuais deste resíduo, o que favorece o acúmulo de matéria orgânica no solo (MELO et al., 2018).

4.2.6.2 Fósforo Disponível

Para o teor de P disponível no solo, é observado na tabela 30, que houve interação significativa entre os fatores para o teor de P disponível no solo, onde o maior valor de P disponível é verificado no tratamento ST para a dose de 100 mg de P com incremento de 58 mg de P disponível dm⁻³, seguido do tratamento LC 4,5% ST na dose de 100 mg de P que incrementou 45 mg de P por dm⁻³.

As doses de P acarretaram diferentes teores para cada fonte de fósforo utilizada. Para doses de 25 e 50 mg dm⁻³, o composto enriquecido com a fonte mineral de menor solubilidade proporcionou incrementos de P disponível no solo próximos ao FR. Conforme a quantidade de P aplicada aumentou, o incremento maior ocorreu nos tratamentos enriquecidos com fonte solúvel e com a fonte solúvel pura.

Segundo Raij et al., (2001) os tratamentos ST, LC 0% ST, LC 1,5% ST, LC 3,0% ST, LC 4,5% ST e LC 0% FR apresentaram para as doses de 50 e 75 mg dm⁻³ teores médios de P disponível e os tratamentos LC 4,5% ST e ST apresentaram para as doses de 75 e 100 mg dm⁻³ teores alto de P disponível. Com esses resultados é possível inferir que essas fontes são boas para elevar os teores de P disponível no

solo, considerando que solos das regiões de clima tropical e subtropical normalmente apresentam baixa disponibilidade de P para as plantas (NOVAIS et al., 2007) e que esses solos apresentam uma forte interação entre sua fase mineral e o P adicionado via fertilizante, formando assim complexo muito estáveis diminuindo assim a disponibilidade deste nutriente para as plantas (SHEN et al., 2014; SHUAI; ZINATI, 2009; ERNANI 2016; GROHSKOPF 2017).

Tabela 30 - Teor de fósforo extraído pela resina (mg dm^{-3}) disponível em Latossolo Vermelho distrófico (LVd) em resposta a aplicação de fertilizantes fosfatados minerais e orgânicos enriquecidos em dois cultivos sequenciais.

Fertilizante	Dose de P (mg dm^{-3})					Média
	0	25	50	75	100	
P resina (mg dm^{-3})						
ST	5 aD	17 aC	23 aC	44 aB	63 aA	30
FR	5 aB	9 aAB	11 bAB	13 cdAB	15 eA	10
LC 0% ST	5 aD	9 aCD	16 abBC	23 bcAB	32 cdA	17
LC 1,5% ST	5 aC	12 aBC	16 abB	28 bA	36 cdA	20
LC 3,0% ST	5 aC	8 aC	23 aB	31 bAB	39 bcA	21
LC 4,5% ST	6 aC	14 aBC	22ab aB	49 aA	51 bA	28
LC 0% FR	5 aB	10 aB	15 abB	27 bA	32 cdA	19
LC 1,5% FR	5 aB	8 aB	13 abB	13 cdB	33 cdA	14
LC 3,0% FR	5 aB	9aB	12 abB	13 cdB	25deA	18
LC 4,5% FR	5 aA	7 aA	10 bA	11 dA	15 eA	10
Média	5	10	16	25	34	-

Médias seguidas por letras distintas (minúsculas na vertical e maiúsculas na horizontal) diferem pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$).

As fontes LC 0% ST e LC 0% FR apresentaram incrementos para as doses de 50, 75 e 100 mg de 11, 18 e 27 mg de P em relação a testemunha (dose 0), também foi verificado incrementos iguais ao ST e FR para dose de 25 mg e incrementos de 6, 12 e 17 mg de P em comparação com o FR para as doses de 50, 75 e 100 mg de P. Isso demonstra o potencial agrônômico em elevar os níveis de P no solo utilizando-se lodo de esgoto compostado em comparação a fonte mineral FR.

Bonini et al., (2015) estudaram a influência do lodo de esgoto e adubação mineral solúvel em um Latossolo degradado, verificaram um aumento significativo no teor de P-resina no solo quando foi utilizado doses de 30 a 60 Mg ha⁻¹ de lodo de esgoto em relação a adubação com fontes solúveis. Melo et al., (2019) verificou que o teor de P disponível em um Latossolo Vermelho aumentou significativamente após dez anos de aplicações de lodo de esgoto, essa resposta foi observada com a dose de 50 Mg ha⁻¹, e essa mesma dose foi suficiente para elevar os teor de P no solo cerca de 100% em comparação a fonte mineral solúvel. Vaca et al. (2011) estudaram o efeito de lodo de esgoto e de lodo de esgoto compostado nas características químicas de um Gleissolo Háplico e no rendimento de plantas de milho observaram que houve aumento nas concentrações de fósforo no solo nos tratamentos com lodo de esgoto e com composto de lodo de esgoto quando comparados ao tratamento com adubação mineral. Essas diferenças são explicadas devido as doses de P via lodo que estes pesquisadores utilizaram terem sido maiores em relação as doses de P via fertilizante mineral para o fornecimento de P.

O mesmo comportamento para o acúmulo de P na planta foi observado para o teor de P disponível no solo, onde conforme aumentou-se a concentração da fonte não solúvel no composto, diminui-se o efeito de disponibilidade do P no solo. Com esses resultados podemos inferir que o lodo de esgoto compostado é mais eficiente em aumentar o teor de P disponível no solo em relação ao FR. Verifica-se para o tratamento LC 4,5% FR que as doses elevaram os teores de P no solo cerca de 10 mg dm⁻³ em relação à testemunha, essa mistura foi menos eficiente em relação as outras misturas.

O efeito de superioridade dos tratamentos LC 0% ST e LC 0% FR em relação aos tratamentos FR, LC 3,0% FR e LC 4,5% FR é explicado pela relação C/N de 9/1 destes materiais após a compostagem, onde ocorre maior mineralização do P em relação ao FR, outro fator é que a matéria orgânica do lodo quando aplicada a solos de regiões tropicais é rapidamente degradada (MELO et al. 2019), o que favorece a disponibilização do P contido no lodo. Outro fato relevante para o efeito da menor disponibilidade de P do FR é que neste estudo foi realizada a calagem para elevar o pH entre 6 e 6,5, esse efeito diminui a capacidade de solubilização desta fonte no solo (CRUZ et al. 2018; GARCIA 2014).

4.2.6.3 pH, Al, H+AL, K, Ca, Mg, SB, CTC, V% e Boro (B)

Os valores obtidos para esses parâmetros estão demonstrados nas tabela 31. Não foi obtido para esses parâmetros valores significativos de interação entre fonte x dose, efeito de fonte e efeito de dose. Esse fenômeno ocorreu devido a calagem para o cultivo do milho ter fornecido os nutrientes Ca e Mg em quantidades ótimas e ter corrigidos o solo onde o Al não está em uma forma toxicas para as plantas. Outro fato importante é que em solos que foram previamente corrigidos não é observado efeito das fontes para esses parâmetros da fertilidade do solo.

Para o K, há ausência de resposta é claramente evidenciada pôr os fertilizantes não apresentarem K em sua composição e pela adição de KCl para atingir níveis satisfatórios para o bom desenvolvimento e crescimento das plantas.

Quanto a saturação por bases, os resultados foram próximos ao do pH, isso é justificado devido a relação entre estes dois parâmetros.

Tabela 31. Médias para pH, Al+H, K, Ca, Mg, SB, CTC, V% e Boro disponível em Latossolo Vermelho distrófico (LVd) em resposta a aplicação de fertilizantes fosfatados minerais e orgânicos enriquecidos em dois cultivos sequenciais.

Fertilizante	pH	Al	H+Al	K	Ca	Mg	SB	CTC	V	B
	CaCl ₂	-----mmolc dm ⁻³ -----						%	mg dm ⁻³	
ST	5,3	0	38	0,8	34	15	50	87	57	0,46
FR	5,2	0	37	0,9	34	14	49	87	56	0,40
LC 0% ST	5,1	0	37	0,9	36	15	53	90	59	0,40
LC 1,5% ST	5,2	0	35	0,9	38	15	55	90	61	0,42
LC 3,0% ST	5,1	0	35	0,9	37	15	55	90	61	0,40
LC 4,5% ST	5,2	0	38	0,9	37	16	52	90	58	0,43
LC 0% FR	5,0	0	38	0,9	35	15	52	90	58	0,40
LC 1,5% FR	5,1	0	37	0,9	35	15	51	88	58	0,47
LC 3,0% FR	5,2	0	35	0,9	37	15	53	88	60	0,40
LC 4,5% FR	5,2	0	38	0,9	35	15	51	89	57	0,44

Médias seguidas por letras distintas (minúsculas na vertical e maiúsculas na horizontal) diferempelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$).

4.2.6.4 Cu, Fe, Mn e Zn

Observa-se na Tabela 32 que para o Cu, os maiores incrementos de cobre no solo foi verificado para fonte LC 0% ST. Com o aumento da dose de fósforo aplicada no solo, houve uma redução dos teores de cobre no solo para os tratamentos orgânicos e orgânicos enriquecidos, isso ocorre pois houve absorção deste nutriente com o crescimento e desenvolvimento das plantas. Para a dose 0, fica nítido que com a restrição de P ocorre uma menor absorção de Cu.

Todos os tratamentos apresentaram níveis altos deste nutriente segundo Raij et al. (2001), isso é o resultado de um nível alto deste no solo e também devido todos os tratamentos terem recebido Cu via adubação.

Tabela 32 - Teor de cobre (mg dm^{-3}) em Latossolo Vermelho distrófico (LVd) em resposta a aplicação de fertilizantes fosfatados minerais e orgânicos enriquecidos, em dois cultivos sequenciais.

Fertilizante	Dose de P (mg dm^{-3})					Média
	0	25	50	75	100	
Cu (mg dm^{-3})						
ST	5,8 aA	4,6 bB	4,5 bB	4,7 bB	4,5 bB	4,8
FR	5,8 aA	4,7 bB	4,7 bB	4,7 bB	4,8 bB	5,0
LC 0% ST	5,8 aA	5,8 aA	5,7 aAB	5,3 aB	5,8 aA	5,7
LC 1,5% ST	5,5 aA	5,5 aA	4,7 bB	4,6 bB	4,7 bB	5,0
LC 3,0% ST	5,8 aA	4,7 bB	4,7 bB	4,7 bB	4,7 bB	4,9
LC 4,5% ST	5,8 aA	4,6 bB	4,7 bB	4,9 abB	4,7 bB	4,9
LC 0% FR	4,6 bA	4,7 bA	4,6 bA	4,7 bA	4,5 bA	4,6
LC 1,5% FR	4,6 bA	4,6 bA	4,7 bA	4,7 bA	4,9 bA	4,7
LC 3,0% FR	4,6 bA	4,7 bA	4,7 bA	4,7 bA	4,8 bA	4,7
LC 4,5% FR	4,6 bA	4,8 bA	4,7 bA	4,8 bA	4,7 bA	4,7
Média	5,3	4,9	4,8	4,8	4,8	-

Médias seguidas por letras distintas (minúsculas na vertical e maiúsculas na horizontal) diferem pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$).

Observa-se na Tabela 33 que os teores de Fe no solo que todos os tratamentos atingiram níveis altos deste nutriente segundo Raij et al. (2001), chegando até a quantidade de 33 mg dm^{-3} para o tratamento LC 0% ST, isso ocorreu também devido

a adição deste nutriente via cobertura no solo. Quanto maior a contribuição do lodo na fonte utilizada maior foi o teor de Fe com o aumento das doses, ao contrário a este resultado conforme se aumentou a concentração de fertilizantes minerais nas fontes menor foi a contribuição destas para o teor de Fe no solo.

Tabela 33 - Teor de ferro (mg dm^{-3}) em Latossolo Vermelho distrófico (LVd) em resposta a aplicação de fertilizantes fosfatados minerais e orgânicos enriquecidos, em dois cultivos sequenciais.

Fertilizante	Dose de P (mg dm^{-3})					Média
	0	25	50	75	100	
Fe (mg dm^{-3})						
ST	18 aA	14 cB	14 cB	16 bcAB	16 dAB	15
FR	18 aA	14 cB	15 bcB	14 cAB	16 dAB	15
LC 0% ST	18 aC	21 aC	25 aB	26 aB	33 aA	25
LC 1,5% ST	16 abB	19 abAB	17 bcAB	18 bcAB	20 bcA	18
LC 3,0% ST	18 aA	15 cB	17 bcAB	17 bcAB	18 cdA	17
LC 4,5% ST	18 aA	15 bcA	15 bcA	17 bcA	16 cdA	16
LC 0% FR	13 bC	17 bcB	19 bB	19 bAB	22 bA	18
LC 1,5% FR	13 bB	14 cB	15 bcB	16 bcAB	19 bcdA	15
LC 3,0% FR	13 bB	14 cAB	16 bcAB	15 cAB	16 cdA	15
LC 4,5% FR	13 bB	15 cAB	16 bcAB	16 bcA	16 cdA	15
Média	16	16	17	17	19	-

Médias seguidas por letras distintas (minúsculas na vertical e maiúsculas na horizontal) diferem pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$).

Analisando os teores de Mn no solo na Tabela 34, verifica-se que todos os tratamentos tem teores altos deste nutriente, a adição deste nutriente visando atingir o nível alto contribui para esses valores, porém ao longo das doses crescente houve uma redução dos níveis de Mn no solo.

Tabela 34 - Teor de manganês (mg dm^{-3}) em Latossolo Vermelho distrófico (LVd) em resposta a aplicação de fertilizantes fosfatados minerais e orgânicos enriquecidos em, dois cultivos sequenciais.

Fertilizante	Dose de P (mg dm^{-3})					Média
	0	25	50	75	100	
Mn (mg dm^{-3})						
ST	31 aA	13 aB	16 aB	14 aB	14 aB	17
FR	31 aA	14 aB	22 aAB	18 aAB	19 aAB	21
LC 0% ST	31 aA	18 aAB	23 aAB	14 aB	19 aAB	21
LC 1,5% ST	31 aA	18 aA	22 aA	18 aA	18 aA	18
LC 3,0% ST	31 aA	15 aB	26 aAB	22 aAB	19 aAB	23
LC 4,5% ST	31 aA	15 aB	18 aAB	27 aAB	18 aAB	22
LC 0% FR	14 bA	23 aA	23 aA	19 aA	16 aA	19
LC 1,5% FR	14 bA	15 aA	18 aA	15 aA	26 aA	18
LC 3,0% FR	14 bA	18 aA	18 aA	17 aA	18 aA	17
LC 4,5% FR	14 bA	23 aA	22 aA	19 aA	19 aA	19
Média	22	17	21	19	19	-

Médias seguidas por letras distintas (minúsculas na vertical e maiúsculas na horizontal) diferem pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$).

Na tabela 35 é observado os teores de Zn no solo, só não houve incremento deste no solo com o aumento das doses para o tratamento ST, isso é explicado pelo fato desta fonte não ter em sua composição Zn.

Para todas as fontes orgânicas e orgânicas enriquecidas, conforme houve o aumento das doses de P, também houve um aumento no deste elemento no solo, isso ocorre uma vez que apresenta uma grande quantidade deste nutriente no lodo que foi utilizado para compor os fertilizantes orgânicos.

Tabela 35 - Teor de zinco (mg dm^{-3}) em Latossolo Vermelho distrófico (LVd) em resposta a aplicação fertilizantes fosfatados minerais e orgânicos enriquecidos em dois cultivos sequenciais.

Fertilizante	Dose de P (mg dm^{-3})					Média
	0	25	50	75	100	
	Zn (mg dm^{-3})					
ST	0,75 aA	0,55 bcA	0,52 bA	0,60 cdA	0,70 efA	0,62
FR	0,75 aA	0,50 cB	0,57 bAB	0,52 dAB	0,60 fAB	0,59
LC 0% ST	0,75 aC	0,87 aC	1,22 aB	1,37 aB	1,90 aA	1,22
LC 1,5% ST	0,55 abC	0,75 abcC	0,77 bBC	1,00 bAB	1,10 bcA	0,83
LC 3,0% ST	0,75 aB	0,62 abcB	0,70 bB	0,80 bcAB	1,02 cdA	0,78
LC 4,5% ST	0,75 aAB	0,57 bcB	0,65 bAB	0,85 bcA	0,80 defAB	0,72
LC 0% FR	0,50 abE	0,80 abD	1,15 aC	1,42 aB	1,77 aA	1,13
LC 1,5% FR	0,47 bC	0,55 bcBC	0,72 bB	0,75 bcdB	1,32 bA	0,76
LC 3,0% FR	0,47 bC	0,65 abcBC	0,70 bBC	0,75 bcdB	1,02 cdA	0,72
LC 4,5% FR	0,47 bC	0,60 bcBC	0,70 bABC	0,77 bcdAB	0,87 cdeA	0,68
Média	0,62	0,64	0,77	0,88	1,11	-

Médias seguidas por letras distintas (minúsculas na vertical e maiúsculas na horizontal) diferem pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$).

4.2.7 Considerações Finais

Para produção e massa seca do milho, houve incremento em relação a testemunha para todos os fertilizantes e suas respectivas dosagens. Os tratamentos LC 0% ST, LC 0% FR e LC 4,5% ST na dose de 100 mg proporcionaram os maiores incrementos de massa.

Os compostos enriquecidos com o FR proporcionaram os menores valores de massa seca da cultura do milho, o que indica que o processo de compostagem de lodo com bagaço de cana não é capaz de solubilizar quantidades satisfatórias de P do fertilizante mineral FR.

Os maiores acúmulos de P nas plantas de milho é observado para os tratamentos ST, LC 4,5% ST, LC 3,0% ST e LC 1,5%, e os compostos enriquecidos com o FR demonstram o efeito residual desta fonte.

As fontes demonstraram comportamento diferente em relação ao índice de eficiência agrônômica para cada dose utilizada, e os menores IEA são observados para os tratamentos onde a fonte mineral utilizada no enriquecimento é FR, quando comparada ao fertilizante padrão que é o ST. Esses resultados reforçam o efeito da não solubilização de P do FR no processo de compostagem, e demonstra a participação maior do composto em fornecer P em relação ao FR.

Para M.O.S. é verificado um aumento em relação a testemunha, a variações nos valores obtidos.

Para os teores de P disponível no solo os tratamentos ST e LC 4,5% ST na dose de 100 mg de P foram o que alcançaram os maiores valores de P no solo. O efeito observado para produção de massa seca, acúmulo de P e IEA para os compostos enriquecidos com o FR, é o mesmo observado para o teor de P no solo. O que reforça o efeito da não solubilização do FR no processo de compostagem.

O enriquecimento, do lodo de esgoto no processo de bioestabilização, com fontes de P solúveis, deve ser usada com acautela, principalmente em função do pH e da concentração de Fe e Al no composto. Surge a hipótese que esses compostos podem formar compostos pouco solúveis e inibem a disponibilidade de P fornecido via ST.

Para o pH, Al, H+AL, K, Ca, Mg, SB, CTC, V% e Boro não é verificado aumento em relação a testemunha, esse efeito é em função da padronização do solo para o

bom desenvolvimento das plantas de milho, e também para evitar efeito de outros atributos químicos que não fossem exclusivamente dos tratamentos testados.

Para os micronutrientes Cu, Fe, Mn e Zn o efeito no aumento no solo está relacionado ao teor destes no lodo utilizado para a produção dos compostos orgânicos enriquecidos, onde é evidenciado o aumento nos teores destes nutrientes no solo com a maior participação do lodo nos compostos produzidos.

5 CONCLUSÕES

O uso da fonte superfosfato triplo na dose de 1,5% de P no enriquecimento em base seca e a fonte fosfato reativo no enriquecimento para as doses de 1,5%, 3,0% e 4,5% em base seca, não interferem negativamente no processo de compostagem e possibilitam que ocorra de forma eficiente, podendo ser utilizadas para o enriquecimento.

O processo de compostagem por si só, não foi eficiente em solubilizar e disponibilizar em quantidades satisfatórias o P contido no fosfato reativo. Esse resultado é evidenciado na menor produção de MS, acúmulo de P e IEA das fontes enriquecidas com a fonte FR.

As fontes LC 0% ST, LC 1,5% ST, LC 3,0% ST, LC 4,5% ST, LC 0% FR, LC 1,5% FR, LC 3,0% FR incrementam e elevam o teor de P no solo com o aumento das doses, fornecendo P para o solo. Com esses resultados é possível inferir que podem ser utilizadas para elevar os níveis de P no solo em estudo.

O enriquecimento do composto com o superfosfato triplo, presente nos tratamentos, LC 1,5% ST, LC 3,0% ST, LC 4,5% ST, proporcionou os maiores valores de massa seca, acúmulo de P e IEA, demonstrando que essas fontes são mais adequada para o suprimento de P para culturas de ciclo curto, como é o caso do milho.

O enriquecimento, do lodo de esgoto no processo de bioestabilização, com fontes de P solúveis, deve ser usada com cautela, principalmente em função do pH e da concentração de Fe e Al no composto. Surge a hipótese que esses compostos podem formar compostos pouco solúveis e inibem a disponibilidade de P fornecido via ST.

REFERÊNCIAS

- ALCARDE, J. C.; GUIDOLIN, J. A.; LOPES, A. S. Os Adubos e a eficiência das Adubações. **Boletim Técnico ANDA**, São Paulo, p. 35, 1998. 3.ed.
- ALCARDE, J. C.; GUIDOLIN, J. A.; LOPES, A. S. Os adubos e a eficiência das adubações. 2. ed. São Paulo: **ANDA**, 1991. 35 p.
- ALVARENGA P.; MOURINHA C.; FARTO M.; SANTOS T.; PALMA P.; SENGO J.; MORAIS M.C., CUNHA-QUEDA C.. Sewage sludge, compost and other representative organic wastes as agricultural soil amendments: Benefits versus limiting factors. **Waste Management**, Volume 44, October 2015, Pages 227. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.01.027>.
- ANDREOLI, C. V.; et al. Avaliação de alternativas e gerenciamento do lodo na ETE. In: ANDREOLI, C. V.; FERNANDES, F.; SPERLING, M. (Org.) Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental – UFMG; **Companhia de Saneamento do Paraná**, 2001.cap.7.
- ANDREOLI, C. V.; PEGORINI, E. S.; FERNANDES, F. Disposição do lodo no solo. In: ANDREOLI, C. V.; VON SPERLING, M.; FERNANDES, F. (Ed.). **Lodo de esgotos: tratamento e disposição final**. 2. ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2014.Cap. 8. p.317 -395.
- AQUINO, B. F. Conceitos fundamentais em fertilidade do solo. Fortaleza: **UFC**, 2004. 182 p. Apostilas didáticas.
- BERNAL M. P.; ALBURQUERQUE J. A.; MORAL R.; Composting of animal manures and chemical criteria for compost maturity assessment. A review. **Bioresour Technol**. 2009 Nov;100(22):5444-53. doi: 10.1016/j.biortech.2008.11.027
- BERTON, R. S.; NOGUEIRA, T. A. R. Uso do lodo de esgoto na agricultura. In: COSCIONE, A. R.; NOGUEIRA, T. A. R. (Org.). **Uso agrícola de lodo de esgoto:avaliação após a Resolução nº 375 do CONAMA**. 21. ed. Botucatu: FEPAF, 2010.Cap. 2. p. 31-50.
- BETIOL, W.; CAMARGO, O.A. Lodo de esgoto na agricultura: potencial de uso e problemas. **TEC Hoje**, Belo Horizonte, p. 1-4, 2007.
- BOLAN N et al. 2013. Phosphorus-arsenic interactions in variable-charge soils in relation to arsenic mobility and bioavailability. *Science of the Total Environment* 463: 1154-1162.
- BOLAN, N. et al. Phosphorus–arsenic interactions in variable-charge soils in relation to arsenic mobility and bioavailability. **Science of the Total Environment**, v.463-464, p.1154-1162, 2013. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2013.04.016
- BONINI, C. S. B. et al. Lodo de esgoto e adubação mineral na recuperação de atributos químicos de solo degradado, **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 19, n. 4, p.388-393,2015.
- BRASIL. **Instrução Normativa MAPA nº 25**, de 23 de julho de 2009. Estabelece normas sobre as especificações e as garantias, as tolerâncias, o registro, a embalagem e a rotulagem dos fertilizantes orgânicos simples, mistos, compostos,

organominerais e biofertilizantes destinados à agricultura. Brasília: Diário Oficial da República Federativa do Brasil, 2009.

BRASIL. **Resolução CONAMA nº 375**, de 29 de agosto de 2006. Define critérios e procedimentos, para o uso agrícola de lodos em estações de tratamento de esgoto sanitário e seus produtos derivados, e dá outras providências. Brasília: Diário Oficial da República Federativa do Brasil, 2006.

BUDZIAK, C. R.; MAIA, C. B. F.; MANGRICH, A. S. Transformações químicas da matéria orgânica durante a compostagem de resíduos da indústria madeireira. **Quim. Nova**, São Paulo, vol. 27, n.3, p. 399-403, 2004.

BÜLL, L.T. Nutrição mineral do milho. In: BÜLL, L.T.; CANTARELLA, H. (Eds.). *Cultura do milho: fatores que afetam a produtividade*. Piracicaba: **Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato**, 1993. p.63-145.

Bustamant et al. Phosphorus availability from rock phosphate: Combined effect of green waste composting and sulfur addition. **Journal of Environmental Management**, 182 (2016) 557 e 563.

BUSTAMANTE, M.A. et al. Phosphorus availability from rock phosphate: Combined effect of green waste composting and sulfur addition. **Journal of Environmental Management**, v. 182, p. 557-563, 2016.

CASCO, J. M.; BERNAT, S. M. Microbiología y bioquímica del proceso de compostaje. In: CASCO, J. M.; HERRERO, R. M. **Compostaje**. Mundiprensa, 2011. Cap. 5. p. 112-140.

CEKINSKI, E. Fertilizantes fosfatados. In: CEKINSKI, E. (Coord.). **Tecnologia de produção de fertilizantes**. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 1990, cap. 3, p. 95-129.

CÉZAR, V. R. S. Efeito do processo de compostagem sobre a solubilização e a eficiência agrônômica de diferentes fontes de fósforo. 2005. 66 f. **Tese** (Doutorado em Agronomia/Energia na Agricultura) -Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2005.

CHEUNG et al. Microbial-growth inhibition during composting of food waste: Effects of organic acids. **Bioresource Technology**. 101 (2010) 5925–5934.

CHIEN S. H. et al. Agronomic and environmental aspects of phosphate fertilizers varying in source and solubility: an update review. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, Dordrecht, v. 89, p. 229–255, 2011.

CIOTTA, M. N.; BAYER, C.; ERNANI, P. R.; FONTOURA, S. M. V. ; WOBETO, C.; ALBUQUERQUE, J. A. Manejo da calagem e os componentes da acidez de um Latossolo bruno em plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 28, p. 317-326, 2004.

CONTIN, M.; GOI, D.; DE NOBILI, M. Land application of aerobic sewage sludge does not impair methane oxidation rates of soils. **Science of the total environment**, v. 441, p. 10-18, 2012.

CORREA et al. Organic, organomineral, and mineral fertilizers with urease and nitrification inhibitors for wheat and corn under no-tillage. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.51, n.9, p.903-912, 2016. DOI: 10.1590/S0100-204X201600090000x

- CORRÊA, J. C. ; REBELLATTO, A. ; GROHSKOPF, M. A. ; CASSOL P. C.; HENTZ, P. ; RIGO, A. Z. Soil fertility and agriculture yield with the application of organomineral or mineral fertilizers in solid and fluid forms. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 53, p. 633-640, 2018.
- CORRÊA, J. C. et al. Organic, organomineral, and mineral fertilizers with urease and nitrification inhibitors for wheat and corn under no-tillage. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.51, n.9, p.903-912, 2016. DOI: 10.1590/S0100-204X201600090000x
- CORREA, J. C. et al. Soil fertility and agriculture yield with the application of organomineral or mineral fertilizers in solid and fluid forms. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, 2017.
- CORRÊA, R. M., NASCIMENTO, C.W.A., ROCHA, A. T. Adsorção de fósforo em dez solos do Estado de Pernambuco e suas relações com parâmetros físicos e químicos. **Acta Scientiarum. Agronomy**, Maringá, PR, v.33, n. 1, p.153-159, 2011.
- CORRÊA, R. S.; WHITE, R. E.; WEATHERLEY, A. J. Effect of compost treatment of sewage sludge on nitrogen behavior in two soils. *Waste Management*, Áustria, v.26, n.6, p.614-619, 2006.
- CRUZ et al. Adubação do milho com superfosfato triplo em Latossolo Vermelho sob efeito residual de fontes alternativas de fósforo. **Revista de ciências agroveterinárias**. (2018) v. 17, p. 166-173.
- CRUZ, S.C.S. et al. Adubação nitrogenada para o milho cultivado em sistema plantio direto, no Estado de Alagoas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.12, n.1, p.62-68, 2008.
- DUMONTET, S. et al. Pathogen Reduction in Sewage Sludge by Composting and Other Biological Treatments: A Review. **Biological Agriculture and Horticulture**. v.16, 409-430 p. 1999.
- ERNANI, P. R. **Química do Solo e Disponibilidade de Nutrientes**. 2ª edição. Lages, 2016. 256p.
- ERNANI, P. R. **Química do solo e disponibilidade de nutrientes**. Lages:Ed. Do Autor,2008, 230p.
- FAGERIA, N. K. . Efeito da calagem na produção de arroz, feijão, milho e soja em solo de cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 36, n.11, p. 1419-1424, 2001.
- FANCELLI, A. L.; DOURADO-NETO, D. **Produção de milho**. Guaíba: Agropecuária, 2000. 360p
- FANCELLI, A. L.; DOURADO-NETO, D. **Produção de milho**. Guaíba: Agropecuária,
- FARIA M.F. Compostagem de lodo de esgoto e indicadores de patogenicidade. 2018. 112 f. **Tese** (Doutorado em Ciência Florestal) – Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2018.
- FATUNLA, K. et al. Influence of composting and thermal processing on the survival of microbial pathogens and nutrition status of Nigeria sewage sludge. *Int. J. Recycl Org. Waste Agricult*. v 6, p 301-310, 2017. <https://doi.org/10.1007/s40093-017-0177-3>

FERNANDES DM et al. 2015. Fósforo na solução do solo em resposta à aplicação de fertilizantes fluidos mineral e organomineral. **Irriga** 1: 14-27

FERNANDES, F.; SILVA, S. M. C. P. da; TRENNEPOHL, F. G. Duração da fase termófila na compostagem de lodo de esgoto e resíduos vegetais em função de três diferentes tecnologias. **Revista AIDIS de Ingeniería y Ciencias Ambientales**, v. 2, n. 1, 76-83p., 2009.

FERNANDES, F.; SILVA, S.M.C. **Manual prático para compostagem de biossólidos**. São Paulo, 84p. 1999.

Fernández et al. Phosphate-solubilization activity of bacterial strains in soil and their effect on soybean growth under greenhouse conditions. **Biol. Fertil. Soils**, 43:805-809, 2007. DOI 10.1007/s00374-007-0172-3.

FILHO, F. D. **Manual da cultura do milho**. FUNEP, Jaboticabal, 2007, 576p.

FRANZINI, V. I.; MURAOKA, T.; CORASPE-LEON, H. M.; MENDES, F. L. Eficiência de fosfato natural reativo aplicado em misturas com superfosfato triplo em milho e soja. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 44, p. 1092-1099, 2009.

FREIRE, F. M.; FONSECA, D. M.; CANTARUTTI, R. B. Manejo da fertilidade do solo em pastagens. **Informe Agropecuário**, v.26, n.226, p.44-53, 2005.

GARCIA, L. A. Eficiência agrônômica de rejeitos da indústria de fertilizantes fosfatados. Botucatu, 2014. 78 f. **Dissertação** (Mestrado em Agronomia/Agricultura) - Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista.

GATIBONI, L. C.; KAMINSKI, J.; S.; FLORES, J. P. C. Biodisponibilidade de formas de fósforo acumuladas em solo sob sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, p. 691-699, 2007.

GONÇALVES, J. L. M.; FIRME, D. J.; NOVAIS, R.F.&RIBEIRO, A. C. Cinética de adsorção de fósforo em solos de cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 9:107- 111, 1985.

GROHSKOPF, M. A. Interação fósforo x nitrogênio no fertilizante organomineral em Latossolo Vermelho. 2018. 129 f. **Tese** (Doutorado em Agronomia/Agricultura) – Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu. 2018.

HAMDI, et al. Repetitive land application of urban sewage sludge: Effect of amendment rates and soil texture on fertility and degradation parameters. **Catena**, v. 172, p. 11-20, 2019.

HAMMOND. L.L. Research on direct application of phosphate rock in the Agro-Economic Division. **IFDC**, Florence, Alabama. 15p. (Memorandum), 1977.

HINSINGER, P. Bioavailability of soil inorganic P in the rhizosphere as affected by root-induced chemical changes: a review. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 237, n. 2, p. 173–195, 2001.

HOROWITZ, N.; MEURER, E. J. Eficiência agrônômica dos fosfatos naturais, In: YAMADA, T., ABDALLA, S. R. S. (Editores). Fósforo na agricultura brasileira. Piracicaba-SP. **Potafos**, 2004. cap. 24, p. 665-682.

HOROWITZ, N.; MEURER, E. J. Eficiência de dois fosfatos naturais farelados em função do tamanho da partícula. **Ciência Rural**, Santa Maria, RGS, v.33, n.1, p.41-47, jan./fev. 2003.

JOURAIPHY, A. et al. Chemical and spectroscopic analysis of organic matter transformation during composting of sewage sludge and green plant waste. **International Biodeterioration & Biodegradation**. v. 56, 101-108 p. 2005.

JUNIO, G.R.Z.; SAMPAIO, R.A.; NASCIMENTO, A.L.; SANTOS, G.B.; SANTOS, L.D.T.; FERNANDES, L.A. (2013) Produtividade de milho adubado com composto de lodo de esgoto e fosfato natural de Gafsa. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 17, n. 7, p. 706-712.

KAMINSKI, J.; PERUZZO, G. Eficácia de fosfatos naturais reativos em sistemas de cultivo. Santa Maria: **SBCS/NRS**, 1997. 31 p. (Boletim Técnico, 3).

KHAN M.S.; ZAIDI A.; WANI P.A. Role of phosphate-solubilizing microorganisms in sustainable agriculture - A review. **Agron. Sustent. Dev.** , 27, pp. 29 – 43, 2007.

KIEHL, E. J. **Manual de compostagem**: maturação e qualidade do composto. 4. ed. Piracicaba: E. J. Kiehl, 2004. 173 p.

LARA, C.; ESQUIVEL, L.; NEGRETE, J. Bacterias nativas solubilizadoras de fosfato para incrementar los cultivos en el departamento de Córdoba-Colombia. **Biología en el sector agropecuario y agroindustrial**. v. 9, n. 2, p. 114 - 120. 2011.

LATARE, A. M. Direct and residual effect of sewage sludge on yield, heavy metals content and soil fertility under rice–wheat system. **Ecological Engineering**, v. 69, p. 17-24, 2014.

LEAL, J.R. & VELOSO, A.C.S. Adsorção de fosfato em Latossolo sob vegetação de cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**., 8:81-88, 1973.

LEITE T. A. Compostagem termofílica de lodo de esgoto: higienização e produção de biossólido para uso agrícola. 2015. 167 f. **Dissertação** (Mestrado em Ambiente, Saúde e Sustentabilidade) – Faculdade de Saúde Pública, Universidade de São Paulo Botucatu, 2015.

LEMAINSKI, J.; SILVA, J. E. DA. Utilização do biossólido da CAESB na produção de milho no Distrito Federal. **Revista Brasileira de Ciência de Solo**, v.30,741-750, 2006.

LOPES, A.S. **Solos sob "cerrado"**: características, propriedades e manejo. Piracicaba: Potafós, 1984. 162p.

LUCENA, L. F. C. et al. Resposta do milho a diferentes dosagens de nitrogênio e fósforo aplicados ao solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 4, n. 3, p. 334-337, 2000.

LUDWIG, F. et al. Macronutrientes em cultivares de gérbera sob dois níveis de fertirrigação. **Horticultura Brasileira**, Brasília, DF, v. 26, n. 1, p. 68-73, jan./mar. 2008.

LUO, A.; ZHU, J.; NDEGWA, P. M. Phosphorus transformations in swine manure during continuous and intermittent aeration processes. **ASAE**, v. 44, n. 4, p. 967-972, 2001.

MALAVOLTA, E. **Manual de química agrícola: adubos e adubação**. 2.ed. São Paulo, Agronômica Ceres, 1967. 606p

MALUF ET AL. Is Composting a Route to Solubilize Low-Grade Phosphate Rocks and Improve MAP-Based Composts? **Revista Brasileira Ciencia Solo**.2018;42:e0170079

MARQUES, M. O.; NOGUEIRA, T. A. R.; FONSECA, I. M.; MARQUES, T. A. Teores de Cr, Ni, Pb e Zn em Argissolo Vermelho tratado com lodo de esgoto e cultivado com cana-de-açúcar. **Revista de Biologia e Ciências da Terra**, v.7, p.133-143, 2007.

MÁRQUEZ, P. B.; BLANCO, M. J. D.; CAPITÁN, F. C. In: CASCO, J.M.; HERRERO, R. M. (Coord.). *Compostaje*. Madrid: Ediciones Mundi-Prensa, 2011, cap. 4, p. 75-92.

MARTINS, A. L. C.; BATAGLIA, O. C.; CAMARGO, O. A; H. Produção de grãos e absorção de Cu, Fe, Mn e Zn pelo milho em solo adubado com lodo de esgoto, com e sem calcário. **Rev. Bras. Ciênc. Solo [online]**. 2003, vol.27, n.3, p.563-574. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S010006832003000300018&script=sci_abstract&tlng=pt.

MATTENBERGER, H.; FRAISSLER, T.; BRUNNER, T.; HERK,P.; HERMANN, L.; OBERNBERGER, I. Sewage sludge ash to phosphorus fertiliser: Variables influencing heavy metal removal during thermochemical treatment. **Waste Management**, n28, p. 2709–2722, 2008.

MELO, et al. Ten years of application of sewage sludge on tropical soil. A balance sheet on agricultural crops and environmental quality. **Science of the Total Environment**, v. 643, p. 1493-1501, 2018.

MELO, W. J et al. Efeito de doses crescentes de resíduo orgânico sobre frações de matéria orgânica e CTC de um latossolo cultivado com cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.18, n. 3, p.449-455, 1994.

MOHARANA P.C.;BISWAS D. R. Assessment of maturity indices of rock phosphate enriched composts using variable crop residues. **Bioresource Technology**. 222.(2016). 1-13.

MONTALVO D et al. 2015. Agronomic Effectiveness of Granular and Fluid Phosphorus Fertilizers in Andisols and Oxisols. **Soil Science Society of America Journal** 79: 577-584.

MORETTI, S. M. L. Uso de lodo de esgoto com poda de árvore na cultura de cana de açúcar. **Dissertação de mestrado**. Piracicaba: Centro de Energia Nuclear na Agricultura. Universidade de São Paulo. 2013.

NAFEZ et al. Sewage sludge composting: quality assessment for agricultural application. **Environ Monit Assess**. 187: 709. 2015

NISHANTH D, BISWAS D.R. Kinetics of phosphorus and potassium release from rock phosphate and waste mica enriched compost and their effect on yield and

nutrient uptake by wheat (*Triticum aestivum*). **Bioresource Technology**. (2008). 99:3342-3353.

NOGUEIRA, T. A. R. et al. Metais pesados e patógenos em milho e feijão caupi consorciados, adubados com lodo de esgoto. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.11, n.3, p.331–338, 2007.

NOVAIS, R.F. & SMYTH, T.J. **Fósforo em solo e planta em condições tropicais**. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 1999. 399p

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, MG, v.26, n.2, p.505-519, abr/jun. 2002.

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

ONO, F. B. et al. Eficiência agrônômica de superfosfato triplo e fosfato natural de Arad em cultivos sucessivos de soja e milho. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, MG, v. 33, n. 3,p.727-734, 2009.

PEIXOTO R.T. et al. Compostagem de lixo urbano enriquecido com fontes de fósforo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**. Brasília, 24(5):599-606, maio 1989.

PEIXOTO, R. T. G.; DE ALMEIDA, D. L.; FRANCO, A. A. Compostagem de lixo urbano enriquecido com fontes de fósforo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**., Brasília, v. 24(5), p. 599-606, maio 1989.

PEREIRA NETO, J.T., STENTIFORD, E.I.; MARA, D.O. Comparative survival of pathogenic indicators in windrow and static pile. In *Compost: Production, Quality and Use* (M. De Bertoldi, M.P. Ferranti, P. L'Hermite & F. Zucchini, eds.), pp. 276-295. **Elsevier Applied Science**; London & New York. 1986.

PROCHNOW et al. Controle da volatilização de amônia em compostagem, mediante adição de gesso agrícola e superfosfatos com diferentes níveis de acidez residual. **R. Bras. Ci. Solo**, 25:65-70, 2001.

RAIJ, B. VAN et al. **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. Boletim técnico 100. 2 ed. Campinas: Instituto Agrônomo: Fundação IAC, 1996,285 p.

RESENDE, A. V. et al. Fontes e modos de aplicação de fósforo para o milho em solo cultivado da região do cerrado. **Revista Brasileira de Ciência Solo**, 30:453-466, 2006.

RESTREPO F. G. M.; MARULANDA M. S.; Fe-Pérez Y.; DÍAZ-DE - LOS- OSA A.; BALDANI V. L., RODRÍGUEZ A. H. **Bactérias solubilizadoras de fosfato e suas potencialidades de uso na promoção do crescimento de cultivos de importância econômica**. **Rev. CENIC Cienc. Biol.**, 46 (2015), pp. 63 – 76

RIBEIRO L. C. Compostagem de lodo de esgoto: caracterização e bioestabilização. 2018. 93 f. **Dissertação** (Mestrado em Agronomia/Agricultura) – Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2018.

RODRIGUES, A. C. et al. Avaliação do processo de compostagem utilizando lodo de estação de tratamento de efluentes de laticínio. **Ciência e Natura** v.38, n.2, p. 610-619, 2016a.

SÁNCHEZ et al. Compost supplementation with nutrients and microorganisms in composting process. **Waste Management**. 69 (2017) 136-153.

SANDIN, A.S. **Solubilidade, efeito residual e eficiência agrônômica de fontes alternativas de fosfatos**. Botucatu, 2016. 150 f. Tese (Doutorado em Agronomia/Agricultura) – Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista.

SANEPAR. **Manual Técnico para utilização agrícola do lodo de esgoto no Paraná**. SANEAR: 1997. 96p

SCIVITTARO W.B. et al. Eficiência agrônômica de fertilizantes fosfatados fluidos e sólidos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 21, p. 505-511, 1997

SHEN, J. et al. Phosphorus Dynamics: From Soil to Plant. **Plant Physiology**, v.156, p.997–1005, 2014. DOI: 10.1104/pp.111.175232

SHEN, J. et al. Phosphorus Dynamics: From Soil to Plant. **Plant Physiology**, v.156, p.997–1005, 2014. DOI: 10.1104/pp.111.175232

SHUAI, X.; ZINATI, G. Proton charge and adsorption of humic acid and phosphate on goethite. **Soil Science Society of America Journal**, v. 73, n.6, p.2013-2020, 2009. DOI:10.2136/sssaj2009.0119

SHUAI, X.; ZINATI, G. Proton charge and adsorption of humic acid and phosphate on goethite. **Soil Science Society of America Journal**, v. 73, n.6, p.2013-2020, 2009. DOI:10.2136/sssaj

SHUAI, X.; ZINATI, G. Proton charge and adsorption of humic acid and phosphate on goethite. **Soil Science Society of America Journal**, v. 73, n.6, p.2013-2020, 2009. DOI:10.2136/sssaj2009.0119

Silva et al. Compostagem aeróbia Conjugada de lodo de tanque séptico e resíduos sólidos vegetais. **Eng. sanit. ambient**. Vol.13 - Nº 4 - out/dez 2008, 371-379.

SIMONETE, M. A.; KIEHL, J. C.; ANDRADE, C. A.; TEIXEIRA, C. F. A. Efeito do lodo de esgoto em um Argissolo e no crescimento e nutrição de milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.38, p.1187-195, 2003.

SOARES, E. M. B. Impactos de aplicações sucessivas de lodo de esgoto sobre os compartimentos de carbono orgânico em latossolo cultivado com milho. 2005. 81 p. **Dissertação** (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG, 2005.

SOUSA, D.M.G. et al. In: PROCHNOW, L.I.; CASARIN, V.; STIPP, S.R. **Boas práticas para uso eficiente de fertilizantes: nutrientes**. Piracicaba: IPNI – Brasil, 2010. v. 2. p. 71-126.

SOUSA, D.M.G. et al. In: PROCHNOW, L.I.; CASARIN, V.; STIPP, S.R. **Boas práticas para uso eficiente de fertilizantes: nutrientes**. Piracicaba: IPNI – Brasil, 2010. v. 2. p. 71-126.

- SUNDBERG et al. Low pH as an inhibiting factor in the transition from mesophilic to thermophilic phase in composting. **Bioresource Technology**. 95 (2004) 145–150.
- THOMAZ F. L. Manejo de lodo de esgoto em rotações de culturas no sistema de plantio direto. 2010. 198 f. **Tese** (Doutorado em Agronomia/Agricultura) – Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2010.
- TIAN G. et al. Assessment of plant availability and environmental risk of biosolids-phosphorus in a U.S. Midwest Corn-Belt Soil. **Journal of Environmental Management**, v. 172, p. 171-176, 2016.
- TIRITAN, C. S. et al. Produção de Matéria seca de milho em função da adubação fosfatada mineral e organomineral. **Colloquium Agrariae**, Presidente Prudente, v. 6, n. 1, p. 01-07, Jan./jun. 2010.
- TORRI, et al. Biosolid Application to Agricultural Land|a Contribution to Global Phosphorus Recycle: A Review, **Pedosphere**, v. 27, p. 1-16, 2017.
- VACA, R. et al. Effects of sewage sludge and sewage sludge compost amendment on soil properties and *Zea mays* L. plants (heavy metals, quality and productivity).**Rev. Int. Contam. Ambie.**v. 27, n. 4, p. 303-311, 2011.
- WEI et al. Organophosphorus-degrading bacterial community during composting from different sources and their roles in phosphorus transformation. **Bioresource Tecnology**. 264 (2018) 277-284.
- WU et al. Nitrogen transformations during co-composting of herbal residues, spent mushrooms, and sludge. **Biomed & Biotechnol**. 11(7):497-505. 2010.
- YANG, F.; LI, G.; SHI, H.; Wang, Y. Effects of phosphogypsum and superphosphate on compost maturity and gaseous emissions during kitchen waste composting. **Waste Management**. n. 36, p. 70- 76, 2015.
- YUAN et al. Effects of phosphogypsum, superphosphate, and dicyandiamide on gaseous emission and compost quality during sewage sludge composting. **Bioresoure Technology**. 270 (2018) 368-376.
- ZABALA L.A. F. P.; GOMEZ M.A.; M. A. SAGARDOY. **Bactérias solubilizadoras de fosfato inorgânico do suelo da soja**. **Cienc. Suelo**. 23 (2005). pp. 31 - 37
- ZHANG et al. Performance of co-composting sewage sludge and organic fraction of municipal solid waste at different proportions. **Bioresource Technology** 250, , pg. 853-859, 2018.
- ZOGLHAMI, R. I. Changes in light-textured soil parameters following two successive annual amendments with urban sewage sludge. **Ecological Engineering**, v. 95, p. 604-611,2016.
- ZUBA JUNIO, G. R.; SAMPAIO, R. A.; NASCIMENTO, A. L.; Lima, N. N.; FERNANDES, L. A. Crescimento inicial de mamoneira adubada com lodo de esgoto e silicato de cálcio e magnésio. **Revista Caatinga**, v.24, p.157-163,2011.

APENDICE A

APÊNDICE A – Valores de metais pesados (mg kg^{-1}) presente no solo em estudo e valores máximos permitidos pelo CONAMA referenciado na RESOLUÇÃO Nº 420, DE 28 DE DEZEMBRO DE 2009.

Solo	As	Ba	Cd	Pb	Cu	Cr	Hg	Mo	Ni	Se	Zn
	mg kg^{-1}										
Solo Original	2,2	14,0	8,5	3,8	47,0	33,0	1,8	0,5	6,0	3,5	17,3
Solo + calagem	6,3	19,1	12,5	5,0	60,2	22,7	1,0	0,3	4,8	6,0	28,4
LC ST 0%*	6,3	18,0	11,0	4,9	54,0	22,0	1,0	0,3	4,0	6,0	26,5
ST 0%*	6,3	20,0	11,0	4,8	53,0	23,0	1,0	0,3	4,0	6,0	28,5
ST 1,5%*	6,3	16,0	11,0	4,5	51,0	22,0	1,0	0,3	3,8	6,0	26,7
FR 0%*	6,3	17,0	11,0	4,6	51,0	22,0	1,0	0,3	3,7	6,0	28,0
FR 1,5%*	6,3	19,0	11,0	4,6	59,0	22,0	1,0	0,3	4,7	6,0	29,5
Máximo Permitido	35	300	3	180	200	150	12	50	70	-	450

*referente a dose de 100 mg dm^{-3} de P