**Universidade de São Paulo
Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”**

**Lodo de esgoto como matriz orgânica na formulação de fertilizante organomineral para
a cultura da soja**

Mayra Maniero Rodrigues

Dissertação apresentada para obtenção do título de
Mestra em Ciências. Área de concentração: Solos e
Nutrição de Plantas

**Piracicaba
2019**

Mayra Maniero Rodrigues
Engenheira Agrônoma

**Lodo de esgoto como matriz orgânica na formulação de fertilizante organomineral para
a cultura da soja**

versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011

Orientadora:
Prof^a. Dr^a. **JUSSARA BORGES REGITANO**

Dissertação apresentada para obtenção do título de
Mestra em Ciências. Área de concentração: Solos e
Nutrição de Plantas

Piracicaba
2019

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
DIVISÃO DE BIBLIOTECA – DIBD/ESALQ/USP

Rodrigues, Mayra Maniero

Lodo de esgoto como matriz orgânica para formulação de fertilizante organomineral para a cultura da soja / Mayra Maniero Rodrigues. - - versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011. - - Piracicaba, 2019.

70 p.

Dissertação (Mestrado) - - USP / Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”.

1. Biossólido 2. Resíduo orgânico 3. Atividade enzimática I. Título

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho ao meu avô Francisco de Assis Maniero (*in memorian*).

Saudade.

À minha família Enori, José Carlos e Lucas,
pelo apoio incondicional e amor.

AGRADECIMENTOS

À Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” e ao Departamento de Ciência do Solo pela oportunidade.

À professora Dra. Jussara Borges Regitano pela oportunidade, confiança e aprendizado.

Ao Dr. Fernando Carvalho Oliveira por colaborar com a construção do trabalho e apoio financeiro.

À empresa Tera Ambiental LTDA pela colaboração e suporte financeiro.

Aos professores Dr. Carlos Eduardo Pellegrino Cerri, Dr. Rafael Otto e Dr. Paulo Sérgio Pavinato pela contribuição intelectual e material para a condução deste projeto.

Ao professor Dr. Fernando Dini Andreote e técnicos do Laboratório de Microbiologia do Solo, em especial Denise C. Mescolotti e Luis Fernando Baldesin pelos ensinamentos adquiridos.

Ao Professor Dr. Pablo Vidal-Torrado por conceder a coleta e transporte dos solos.

Aos meus colegas e amigos Adijailton José de Souza, Douglas Gomes Viana, Guilherme Lucio Martins e Luiz Gustavo Paulon pelo apoio e colaboração.

Ao meu irmão Lucas Maniero Rodrigues pelo apoio emocional e por estar sempre a disposição para me auxiliar na condução do experimento.

À equipe do Laboratório de Nutrição Mineral de Plantas: Marcos A. F. de Camargo, técnicos Anderson L. Scarazate e Karina Dilho e estagiária Aline.

Ao Senhor Laudo Bernandes e empresa GranTec pela granulação do fertilizante organomineral e aprendizado.

À empresa Industria e Comércio Chavantes por fornecer a peletização do fertilizante organomineral.

Aos funcionários do Dep. de Ciência do Solo em especial Reginaldo Nogueira (Rossi), Vanda M. Zancheta, Marina Colzato, Luiz A. Silva Jr., Paulo Jaoudé, Sueli Bovi, Moisés Arroio e Dorival Grisotto.

À técnica Lenita Maria C. Pacheco Oliveira do Laboratório de Análises Químicas.

À Doutoranda Cátia Simon por compartilhar sua experiência em Microbiologia do Solo.

Ao Dr. Marcelo Corrêa Alves pelo apoio e contribuição pertinente às análises estatísticas.

A todos os meus amigos que me apoiaram nessa trajetória, em especial a Sara Manoel, Caio Cugler, Andréia M. Pazzian, Juliana Zucolotto, Marco A. Bragaia e Heloísa F. Dante.

A todos que contribuíram de alguma maneira para que eu pudesse concluir mais esta etapa em minha vida.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001

Muito obrigada!

A perfeição

*“O que me tranquiliza é que tudo o que existe,
existe com uma precisão absoluta.*

*O que for do tamanho de uma cabeça de alfinete
não transborda nem uma fração de milímetro
além do tamanho de uma cabeça de alfinete.
Tudo o que existe é de uma grande exatidão.*

*Pena é que a maior parte do que existe
com essa exatidão nos é tecnicamente invisível.*

*O bom é que a verdade chega a nós
como um sentido secreto das coisas.*

Nós terminamos adivinhando, confusos, a perfeição.”

Clarice Lispector

SUMÁRIO

RESUMO.....	8
ABSTRACT.....	9
LISTA DE TABELAS.....	10
LISTA DE FIGURAS.....	11
1. INTRODUÇÃO.....	13
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	15
2.1 Lodo de esgoto: benefícios e desafios para uso agrícola.....	15
2.2 Cultivo e manejo nutricional da soja no Cerrado.....	17
2.3 Aspectos de fertilidade relacionados a fertilizantes organominerais.....	18
2.4 Efeitos da aplicação de fertilizante organomineral na atividade microbiana do solo.....	20
3. OBJETIVOS E HIPÓTESES	23
3.1 Objetivo geral.....	23
3.1.2 Objetivos específicos.....	23
3.2 Hipóteses.....	23
4. MATERIAL E MÉTODOS.....	25
4.1 Coleta e caracterização dos solos.....	25
4.2 Caracterização do lodo de esgoto.....	25
4.3 Definição, preparo e caracterização da formulação organomineral farelada.....	27
4.3.1 Granulada.....	27
4.3.2 Peletizada.....	28
4.4 Instalação e condução do experimento.....	28
4.5 Parâmetros fitotécnicos.....	30
4.6 Análise química do tecido vegetal.....	31
4.7 Análises microbiológicas.....	31
4.7.1 Respiração basal do solo.....	31
4.7.2 Carbono da biomassa microbiana.....	31
4.7.3 Atividade enzimática.....	32
4.8 Análise dos resultados.....	32
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	33
5.1 Caracterização dos solos.....	33

5.2 Caracterização do lodo de esgoto.....	34
5.3 Fertilizante organomineral.....	35
5.4 Parâmetros fitotécnicos.....	38
5.5 Análise química do tecido vegetal.....	43
5.5.1 Macronutrientes.....	43
5.5.2 Micronutrientes.....	47
5.6 Análises microbiológicas dos solos.....	51
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	57
REFERÊNCIAS.....	59

RESUMO

Lodo de esgoto como matriz orgânica na formulação de fertilizante organomineral para a cultura da soja

O lodo de esgoto é associado a altas concentrações de poluentes inorgânicos em amplitudes que podem inviabilizar o uso direto em solo agrícola, de acordo com os limites máximos normatizados pela legislação, cujo destino final são aterros sanitários que, apesar de ser uma alternativa de menor impacto ambiental, é uma prática onerosa e finita. Entretanto, esse material é rica fonte matéria orgânica, macro e micronutrientes para as plantas como boro, cobre, cobalto, ferro, manganês, molibdênio, níquel e zinco para as plantas, comumente deficientes em solos tropicais. Em nosso estudo, exploramos esse subproduto como matriz orgânica para a formulação de um fertilizante organomineral (FOM) como alternativa à adubação mineral convencional para a cultura da soja em solos de Cerrado, além de possíveis alterações na comunidade microbiana do solo. O experimento foi conduzido em casa de vegetação utilizando dois Latossolos Vermelhos distróficos de texturas distintas (argiloso e franco-argilo-arenoso), diferentes doses de aplicação de FOM (40%, 60%, 80%, 100% e 120%) em três formas físicas (granulada, peletizada e farelada), em comparação com a adubação mineral convencional com (M+Mi+S) e sem (M+S) os micronutrientes B e Zn, além do tratamento sem adubação (CT). O delineamento utilizado foi de blocos inteiramente casualizados. As plantas foram conduzidas até os 60 dias após o plantio (DAP) e foram avaliados os parâmetros fitotécnicos pertinentes a massa seca da parte aérea (MSPA), massa seca de raiz (MSR), altura de plantas, diâmetro do colmo e número de nódulos ativos. A análise química da parte aérea (macro e micronutrientes) foi utilizada para cálculo do teor de nutrientes acumulados no tecido vegetal. Para avaliar a atividade microbiana dos solos utilizou-se a respiração basal do solo (RBS), carbono da biomassa microbiana (C-BM) e atividade das enzimas urease, fosfatase ácida e β -glucosidase. Em ambos os solos, tanto o FOM em menores doses (40% e 60%) quanto os tratamentos minerais, apresentaram desempenhos fitotécnicos semelhantes entre si, bem como o acúmulo de nutrientes no tecido vegetal das plantas, exceto para os elementos P, K e B. Não foram observadas diferenças significativas no desenvolvimento das plantas e nos atributos microbiológicos que possam ser atribuídas as formas físicas do FOM. Embora a RBS tenha indicado aumento na atividade microbiana dos solos a partir da adição de doses crescentes de FOMs, isso não refletiu nos demais parâmetros fitotécnicos ou microbiológicos avaliados, indicando que a planta foi a principal moduladora do comportamento da comunidade microbiana e da dinâmica de nutrientes. Adicionalmente, as análises enzimáticas mostraram-se pouco efetivas diante de condições de estresse observadas neste estudo para gerar respostas em função dos tratamentos. Conclui-se que a utilização de lodo de esgoto como matriz orgânica na formulação de FOMs pode ser uma alternativa agronomicamente viável e sustentável à adubação mineral convencional para a fertilização da soja em solos de Cerrado.

ABSTRACT

Sewage sludge as an organic matrix in the organomineral fertilizer formulation for soybean cultivation

Sewage sludge is associated with high concentrations of inorganic pollutants in amplitudes that may make direct use in agricultural soil unfeasible, in accordance with the maximum limits established by legislation, the final destination of which are sanitary landfills, which, despite being a lower impact alternative is an onerous and finite practice. However, this material is rich source organic matter, macro and micronutrients for plants such as boron, copper, cobalt, iron, manganese, molybdenum, nickel and zinc for plants, commonly deficient in tropical soils. In our study, we explored this by-product as an organic matrix for the formulation of an organomineral fertilizer (FOM) as an alternative to the conventional mineral fertilization for soybean cultivation in Cerrado soils, as well as possible changes in the soil microbial community. The experiment was conducted in a greenhouse using two different dystrophic Red Latosols of different textures (clayey and sandy loam), different doses of FOM application (40%, 60%, 80%, 100% and 120%) in three (M + Mi + S) and without (M + S) the micronutrients B and Zn, besides the treatment without fertilization (CT). The design was completely randomized blocks. The plants were harvested up to 60 days after planting (DAP) and the relevant plant breeding parameters were evaluated for aerial dry mass (MSPA), dry root mass (DMW), plant height, shoot diameter and number of nodules active. The chemical analysis of aerial part (macro and micronutrients) was used to calculate the nutrient content accumulated in the vegetal tissue. Soil microbial biomass (C-BM) and activity of the enzymes urease, acid phosphatase and β -glucosidase were used to evaluate soil microbial activity. In both soils, FOM at lower doses (40% and 60%) and mineral treatments presented similar phytotechnical performances as well as nutrient accumulation in the plant tissue of the plants, except for the elements P, K and B. No significant differences were observed in the development of the plants and in the microbiological attributes that can be attributed to the physical forms of FOM. Although RBS indicated an increase in microbial activity of the soils from the addition of increasing doses of FOMs, this did not reflect the other phytotechnical or microbiological parameters evaluated, indicating that the plant was the main modulator of microbial community behavior and nutrient dynamics. In addition, the enzymatic analyzes showed little effectiveness in the stress conditions observed in this study to generate responses depending on the treatments. It is concluded that the use of sewage sludge as an organic matrix in the formulation of FOMs can be an agronomically viable and sustainable alternative to conventional mineral fertilization for soybean fertilization in Cerrado soils.

Keywords: Biosolids; Organic waste; Enzymatic activity

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Tipo de fertilizante utilizado no experimento, dose e quantidade equivalente de nutrientes.....	29
Tabela 2 - Atributos químicos e físicos dos solos: LVd, argiloso e LVd franco-argilo-arenoso.....	33
Tabela 3 - Caracterização química do lodo de esgoto proveniente da ETE Rio Preto, localizada no município de São José do Rio Preto – SP.....	34
Tabela 4 - Quantidade de agentes patogênicos no lodo de esgoto e limites estabelecidos pela legislação para que este seja considerado Classe A, expressos em base seca.....	35
Tabela 5 - Parâmetros de interesse agrônômico e teores de contaminantes inorgânicos presentes no fertilizante organomineral nas diferentes formas físicas: farelada, granulada e peletizada.....	36
Tabela 6 - Caracterização granulométrica da massa (M1) granulada (M2) utilizada no fertilizante organomineral granulado.....	37

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Etapas de recebimento, secagem do lodo de esgoto em casa de vegetação e em estufa de temperatura controlada.....	26
Figura 2 - Fertilizante organomineral nas formas físicas farelada, granulada e peletizada utilizadas no experimento.....	35
Figura 3 - Grânulos obtidos com matérias prima padrão e após nova moagem em ensaio realizado pela empresa GranTec Tecnologia de Materiais.....	37
Figura 4 - Massa seca da parte aérea (MSPA) (A, B) e massa seca de raiz (MSR) (C, D) considerando a condução de duas plantas de soja por vaso aos 60 DAP. Dados transformados via Box-Cox. Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si a 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.....	39
Figura 5 - Fertilizantes organominerais aderidos às raízes de soja aos 60 DAP.....	39
Figura 6 - Altura de plantas (A, B) e diâmetro do colmo (C, D) da soja considerando a média de duas plantas conduzidas em cada vaso aos 60 DAP. Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si a 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.....	40
Figura 7 - Número de vagens considerando duas plantas conduzidas em cada vaso. Dados transformados via Box-Cox. Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si a 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.....	41
Figura 8 - Número de nódulos viáveis considerando a condução de duas plantas de soja por vaso conduzidas aos 60 DAP. Dados transformados via Box-Cox. Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si a 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.....	42
Figura 9 - Quantidade acumulada de nitrogênio (A, B), enxofre (C, D), cálcio (E, F) e magnésio (G, H) na parte aérea considerando duas plantas de soja por vaso aos 60 DAP. Dados normalizados via Box-cox. Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si a 5%.....	44
Figura 10 - Quantidade acumulada de fósforo (A, B), potássio (C, D) na parte aérea considerando duas plantas de soja por vaso aos 60 DAP. Dados normalizados via Box-cox. Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si a 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.....	46
Figura 11 - Quantidade média de cobre (A, B), ferro (C, D), manganês (E, F) e zinco (G, H) acumulado na parte aérea das plantas de soja 60 DAP. Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si a 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.....	48
Figura 12 - Quantidade média de boro acumulado na parte aérea das plantas de soja 60 DAP. Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si a 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.....	50
Figura 13 - Sintomas de toxidez de boro nas plantas de soja no tratamento M+M+S.....	51
Figura 14 - Respiração basal dos solos acumulada após 28 dias de incubação.....	52
Figura 15 - Carbono da biomassa microbiana (C-MB). Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si a 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.....	53
Figura 16 - Atividade das enzimas urease (A, B), fosfatase ácida (C, D) e β -glucosidase (E, F). Dados normalizados via Box-cox. Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si a 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.....	55

1. INTRODUÇÃO

A necessidade imperativa de alinhar a produção agrícola com práticas de manejo sustentáveis, impulsionada pelo crescimento demográfico assistido nas últimas décadas, tem sido grande desafio para a agricultura brasileira. Sua liderança no abastecimento da população mundial coloca sobre o país a missão de gerar alimentos, fibras e óleos tendo como alicerce a manutenção e preservação dos ecossistemas naturais.

Entre as *commodities* que sustentam o agronegócio nacional, a soja tem se consolidado como fonte proteica indispensável na alimentação humana e animal, além de ser matéria prima para indústrias de diferentes seguimentos. As perspectivas nos próximos anos são positivas, tendo em vista a ascensão econômica e populacional de países asiáticos, principais mercados consumidores, sendo indispensável a manutenção de alta produtividade e o uso de tecnologias sustentáveis. O cerrado brasileiro, que concentra a maior parte da produção de soja no país, convive com grandes desafios, entre eles, solos altamente intemperizados de média a baixa fertilidade, reduzidos teores de matéria orgânica e deficiência de micronutrientes, principalmente boro, molibdênio e zinco. Em contrapartida, são produzidos no Brasil cerca de 800 milhões de toneladas de resíduos orgânicos de origem industrial, agroindustrial e urbana, entre eles, o lodo de esgoto gerado nas estações de tratamento (ETEs). Esse material tem ganhando destaque por ser rica fonte em matéria orgânica, nitrogênio, fósforo e micronutrientes como zinco, cobre, manganês, ferro, molibdênio e níquel. (CAMARGO & BETTIOL, 2000; YAMADA, 2004; BETTIOL & CAMARGO; 2006).

Uma alternativa para o manejo ambientalmente adequado do lodo de esgoto consiste em utilizar este resíduo na agricultura. As principais vantagens são as melhorias nas condições químicas e físicas dos solos ao favorecer a estabilidade dos agregados na superfície, infiltração e permeabilidade, reduzindo a vulnerabilidade aos processos erosivos. Além disso, sua aplicação pode alterar a comunidade microbiana do solo, considerada um de seus componentes mais sensíveis e dinâmicos, funcionando como estoque lábil de nutrientes. Por esta razão, é fundamental monitorar o seu comportamento como índice da qualidade do solo, através de parâmetros como a avaliação da respiração basal do solo, biomassa microbiana e atividades enzimáticas, os quais refletem o funcionamento do ecossistema do solo, a ciclagem de nutrientes e a decomposição de resíduos orgânicos (BETTIOL *et al.*, 2006; SCHLOTER *et al.*, 2018).

A administração de lodo de esgoto deve ser realizada com cautela a fim de evitar toxicidade em solo, plantas e animais, estando em concordância com as premissas estabelecidas pela legislação, principalmente àqueles gerados em regiões metropolitanas altamente industrializadas, que apresentam elevadas concentrações de metais pesados, que restringem seu uso na agricultura. Para tanto, uma possibilidade de seu uso seguro consiste na formulação de fertilizantes organominerais, aproveitando o comum excesso de micronutrientes para suprir as deficiências naturais dos solos tropicais, sendo uma interessante combinação para aumentar a eficiência agronômica dos nutrientes minerais, reduzindo suas perdas no solo. (BRASIL, 2006; DE MARIA *et al.*, 2007; KIEHL, 2008).

Elementos que podem ser considerados contaminantes através da aplicação exclusiva de lodo, principalmente pela necessidade do uso de elevadas taxas de aplicação no campo, podem ser reduzidas quando comparadas a eventual formulação organomineral. Entre as vantagens desses produtos em relação ao uso de fertilizantes minerais é que os primeiros apresentam liberação lenta e contínua dos nutrientes às plantas. Em contraste, os adubos químicos podem ser facilmente lixiviados para áreas mais profundas das zonas das raízes, impedindo seu uso integral pelas culturas, podendo contaminar recursos hídricos (KIEHL, 2010; OLIVEIRA, 2016; KOMINKO *et al.*, 2017).

Diante do exposto, com os avanços nas legislações e os investimentos crescentes em saneamento básico no Brasil, tem-se ampliado a geração de lodo de esgoto e a busca por novas tecnologias que facilitem a sua utilização na agricultura. O seu emprego na forma de fertilizantes organominerais permite aproveitar suas potencialidades em solos tropicais, além da redução dos custos com fertilização mineral e necessidade de criação de novos aterros sanitários, sendo uma alternativa promissora para o destino ambientalmente adequado deste resíduo.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Lodo de esgoto: benefícios e desafios para uso agrícola

A quantidade de lodo de esgoto tratado produzida no Brasil é estimada em 150 a 220 mil toneladas de matéria seca por ano e corresponde a aproximadamente 46% deste material gerado em todo país. Seu destino final são aterros sanitários que, apesar de serem uma alternativa de menor impacto ambiental, é uma prática onerosa, finita e insustentável. Apesar dos recentes investimentos em saneamento básico, cerca de 5,5 mil toneladas de esgoto são depositadas diariamente em rios, lagos e corpos d'água, causando a contaminação de águas e solos, redução da qualidade do ar e questões vinculadas à saúde pública. (MUCELIN & BELLINI, 2008; IPEA, 2012; MARQUES, 2014; TRATA BRASIL, 2018).

O lodo gerado nas ETEs é uma complexa mistura de materiais orgânicos originados a partir de diversas moléculas como proteínas, lipídeos, compostos fenólicos, celulose, lignina, microrganismos, entre outras. Sua composição varia principalmente em função da época do ano, sistema de tratamento e origem, tal como doméstico e industrial. Pode ainda apresentar quantidades elevadas de metais pesados como Hg, Zn, Ni, Cr, Fe, Cd, Co e Pb, poluentes orgânicos e contaminantes sanitários. Devido a necessidade de passar por diversos processos com finalidade a reduzir a carga de patógenos e odor, a apresentação deste material é dada na forma líquida, semissólida ou seca (BERTON & NOGUEIRA, 2010; TYAGI & LO, 2013).

O uso agrícola de lodo de esgoto tem se tornado foco de diversas pesquisas com o objetivo de alinhar a sua disposição final ambientalmente adequada com a fertilidade dos solos. Alguns autores mostraram que seu uso na agricultura apresenta resultados positivos para diversas culturas como cana-de-açúcar, soja, pupunha, algodão, mamona, girassol, pastagem com *Brachiaria decumbens*, revegetação de área degradada, substrato alternativo para mudas de café, entre outros (DA SILVA *et al.*, 1998; RODRIGUES *et al.*, 2001; VEGA *et al.*, 2005; VIEIRA *et al.*, 2005; SOFIATTI *et al.*, 2007; ARAÚJO *et al.*, 2009; CHIARADIA *et al.*, 2009; DA SILVA *et al.*, 2010). Seus principais benefícios são o aporte de matéria orgânica, macronutrientes como fósforo e nitrogênio, melhorias nas condições físicas dos solos ao favorecer a estabilidade dos agregados na superfície, aumento da retenção de umidade do solo, infiltração e permeabilidade. Isso contribui para redução da vulnerabilidade dos solos aos processos erosivos, além de ser excelente fonte de micronutrientes. Esses últimos são exigidos em quantidades menores pelas plantas e seu papel

no metabolismo se dá principalmente como catalizadores enzimáticos (CAMARGO & BETTIOL, 2000; RESENDE, 2005; DE MARIA *et al.*, 2007).

Alguns países europeus têm destinado esforços para utilização de lodo de esgoto na fertilização e condicionamento dos solos, principalmente após a Diretiva 1999/31/EC, que proíbe a criação de novos aterros sanitários. Entretanto, a alta carga de nutrientes, eutrofização, acidificação, além das emissões de gases causadores do efeito estufa, proliferação de patógenos e disseminação de poluentes orgânicos persistentes no ambiente, têm comprometido a aplicação direta desse material na agricultura (EU, 1999; RAHEEM *et al.*, 2017). Para minimizar esses efeitos, a compostagem é a prática comumente adotada e consiste na decomposição de material orgânico pela ação de microrganismos aeróbios, com a liberação de gás carbônico, vapor de água e calor, gerando um composto homogêneo e estável. Esse processo é capaz de reduzir a carga de patógenos, umidade e volume da torta de lodo, além da estabilização de metais pesados (ALVARENGA *et al.*, 2015; KULIKOWSKA, 2016). Porém, a maior parte da geração de lodo está associada a proximidade com grandes centros urbanos que concentram as ETEs, cuja compostagem é dificultada devido a necessidade de espaço físico disponível, além da distância das áreas agrícolas, elevando o custo de aplicação e tornando-se uma opção pouco atraente aos produtores (LANDAU & MOURA, 2016).

Uma alternativa que tem sido explorada está na utilização de lodo de esgoto como matriz orgânica para a produção de fertilizantes organominerais, geralmente na forma de grânulos ou pellets, complementado com fontes minerais como ureia, nitrato ou sulfato de amônio, fosfato monoamônico ou diamônico, cloreto de potássio, entre outros. Essa prática tem sido adotada por países europeus e Estados Unidos pois facilita o manejo do lodo nas áreas agrícolas devido as menores taxas de aplicação e reduz a dependência aos fertilizantes minerais (KOMINKO *et al.*, 2017). Isso pode ainda reduzir uma importante limitação do uso de lodo de esgoto que consiste no comportamento sazonal de sua composição, a medida em que permite o seu ajuste de acordo com as necessidades nutricionais das culturas e dos atributos químicos dos solos (SOMMERS *et al.*, 1976; TSUTIYA, 2000). Por exemplo, um estudo realizado utilizando lodo gerado pela ETE Barueri, uma das maiores da América Latina e que trata esgotos doméstico e industrial da região metropolitana de São Paulo, mostrou que variações pluviométricas interferem em suas características, principalmente em relação aos elementos Si, Al, Na, K, Ca, S, Cr, Ni e Zn. (PINHEIRO, 2008).

Um dos entraves para o aproveitamento do lodo de esgoto diretamente em solo agrícola é evidenciado por Nascimento (2016) ao analisar lodos de esgoto gerados em 19 ETEs da região sudeste do país e observou que esse material possui potencial para uso na agricultura, sendo fonte de N, cálcio (Ca), enxofre (S), P, magnésio (Mg) e potássio (K). Entretanto, é necessário seu tratamento prévio, uma vez que a maioria das amostras excederam valores máximos de cádmio (Cd), cromo (Cr), mercúrio (Hg) e Ni estabelecidos pela legislação. Com isso, é possível sugerir que a elevada carga de contaminantes inorgânicos pode ser diluída com o emprego de lodos associados a fertilizantes organominerais, devido à necessidade de menores taxas de aplicação no solo, além de ser uma alternativa à disposição desse material em aterros sanitários (KOMINKO *et al.*, 2017).

2.2 Cultivo e manejo nutricional da soja no Cerrado

Inicialmente introduzida no Rio Grande do Sul em meados da década de 30, a sojicultura no Brasil é a mais produtiva no mundo com 3.333 kg ha^{-1} , seguida dos Estados Unidos com 3.299 kg ha^{-1} e Argentina, 2.800 kg ha^{-1} , na safra 2017/2018. O mercado de grãos e seus derivados, como óleo e farelo, têm gerado ganhos de aproximadamente US\$ 31 bilhões, cerca de 14% de todas as exportações brasileiras. A estimativa para a safra 2018/2019 é de que a área cultivada seja de 32,1 milhões de hectares e que a produção alcance 120 milhões de toneladas em todo país (SEDIYAMA *et al.*, 2015; CONAB, 2018b; USDA, 2018).

O sucesso da sojicultura deve-se, principalmente, aos investimentos em programas de melhoramento, permitindo sua expansão para outros Estados, desde o centro-oeste ao sul do país. O Cerrado é o bioma que concentra 52% da produção, ocupando uma área aproximada de 15,6 milhões de hectares. Os Estados do Mato Grosso e Goiás são os maiores produtores, seguidos pela crescente participação da nova fronteira agrícola denominada MATOPIBA, que contempla os Estados do Maranhão, Tocantins, Piauí e Bahia, contribuindo atualmente com cerca de 22% da soja cultivada nesta região (QUERCI & MAZZARA., 2006; MORAIS & BORÉM, 2015; CARNEIRO FILHO & COSTA, 2016).

Apesar dos avanços tecnológicos terem proporcionado vantagens operacionais, o manejo nutricional das lavouras depende intimamente da aquisição de fertilizantes, que correspondem a cerca de 25% do custo total da produção para cada hectare de soja cultivada no país (IMEA, 2018). Com isso, é comum que cultivos menos intensivos priorizem a aplicação de macronutrientes, principalmente fósforo (P), o que ocasiona desequilíbrios

nutricionais nas lavouras devido a deficiência de micronutrientes. Um exemplo disso é o nitrogênio (N), elemento de maior demanda pela soja, obtido cerca de 72 a 94% pela associação simbiótica das raízes com bactérias do gênero *Bradyrhizobium*. No entanto, para que a inoculação seja satisfatória, é fundamental a presença de cobalto (Co) e molibdênio (Mo). O primeiro participa da síntese de cobamida e leg-hemoglobina nos nódulos radiculares e o segundo está associado ao transporte de elétrons em reações bioquímicas por ser cofator de enzimas importantes como nitrogenase e nitrato redutase (RESENDE, 2004; OLIVEIRA *et al.*, 2007; CÂMARA, 2015).

O micronutriente cuja deficiência é a mais observada na região central do Brasil é o zinco (Zn) devido aos reduzidos teores presentes no material de origem, excesso de calagem, uma vez que a elevação de pH reduz a sua disponibilidade para as plantas e aplicação de fósforo, capaz de induzir efeitos antagônicos. Sua ausência compromete uma série de reações bioquímicas como a síntese proteica ao devido a redução da síntese de RNA, além de atuar na ativação de enzimas precursoras do ácido indolacético, hormônio responsável pelo crescimento e alongamento celular (PRIMAVESI, 2002; SFREDO & BORKERT, 2004; FAQUIN, 2005).

Outro elemento de importância reconhecida é o níquel, responsável por catalisar a hidrólise da ureia na formação de NH_3 e CO_2 , que se acumulam nas folhas causando manchas necróticas em casos de deficiência. Além disso, apresenta efeito direto e indireto sobre fitopatógenos como vírus, bactérias, fungos e nematoides. Também é fundamental para a eficiência da fixação biológica de nitrogênio (FBN) por ser constituinte da enzima hidrogenase, responsável pelo reprocessamento do H_2 resultante da redução de H^+ no interior dos nódulos, que pode competir com a redução do N_2 na formação de NH_3 . Entretanto, não há consenso em relação as doses ideais para a cultura da soja, apesar de sua essencialidade ser reconhecida a mais de três décadas. (MALAVOLTA & MORAES, 2007; ZOBIOLE *et al.*, 2010; CÂMARA., 2014; DOS REIS *et al.*, 2014). Demais micronutrientes como boro (B), manganês (Mn) e cobre (Cu) também desempenham funções fundamentais para a nutrição adequada e manutenção de altas produtividades na cultura da soja, através da participação em reações bioquímicas complexas e vitais no metabolismo da planta (HANSEL & OLIVEIRA., 2016).

2.3 Aspectos de fertilidade relacionados a fertilizantes organominerais

Os fertilizantes organominerais no Brasil são definidos pela legislação como produtos originados a partir da mistura física ou combinação de adubos minerais e orgânicos, sendo esta fração proveniente, principalmente de resíduos industriais e agropecuários, que representam 34% e 32%, respectivamente, do total utilizado pelas empresas fabricantes. Destas, mais da metade possuem em seu portfólio produtos organominerais, correspondendo a 13% do faturamento da indústria de tecnologia em nutrição vegetal. (ABISOLO, 2018; BRASIL, 2004).

As matrizes orgânicas podem ser de oriundas de diversas fontes principalmente esterco de aves e suínos, farinha de ossos, resíduos de abatedouros, lodos provenientes do tratamento de água e esgoto, e aquelas resultantes do setor sucroenergético como a vinhaça, torta de filtro e bagaço de cana. Até o final dos anos 2000 a turfa era a mais utilizada, entretanto, foi gradualmente substituída por fontes orgânicas renováveis (CRUZ *et al.*, 2017).

Os benefícios associados a utilização de fertilizantes organominerais estão intimamente relacionados ao conteúdo de matéria orgânica e sua complexa interação com os atributos físicos, químicos e biológicos do solo. Seus efeitos vão desde a sorção de metais e agroquímicos a formação de agregados, dinâmica da água, capacidade de troca de cátions (CTC), atividade microbiana dos solos, além de funcionar como estoque de nutrientes como nitrogênio, fósforo, magnésio, cálcio, enxofre e micronutrientes que são liberados à medida em que se decompõe, o que pode evitar perdas por lixiviação, além de apresentar efeito residual no solo. Entretanto, não há clareza em relação aos possíveis efeitos sinérgicos ou inibitórios da mistura da fração orgânica com fertilizantes minerais bem como a participação e influência de cada um desses compartimentos no fornecimento adequado de nutrientes para as plantas. (CUNHA *et al.*, 2015; LYNCH, 2015; LANNA *et al.*, 2018).

Pesquisas têm mostrado resultados positivos em relação ao uso de fertilizantes organominerais e a possibilidade de substituição total ou parcial da adubação mineral em solos tropicais. Mumbach (2017) observou que não houve diferença na eficiência agrônômica de doses equivalentes de cama aviária, fertilizante organomineral obtido a partir da mistura de cama aviária e fosfato monoamônico (MAP) e o tratamento mineral constituído de MAP, uréia e cloreto de potássio (KCl), em cultivo de feijoeiro e trigo. Relatou-se também a solubilização mais lenta de P nos dois primeiros fertilizantes em detrimento ao mineral, o que favorece o seu melhor aproveitamento pelas plantas uma vez que este elemento é fixado principalmente pelos óxidos amorfo de ferro, alumínio e manganês presentes em solos intemperizados, tornando-o indisponível na solução do solo (MALAVOLTA, 1989).

Resultados semelhantes foram obtidos por Magela (2017) ao testar fertilizantes organominerais para a cultura do milho, cujas matrizes orgânicas foram lodo de esgoto e torta de filtro em diferentes doses (60%, 80%, 100%, 120% e 140%). Ao comparar com um tratamento mineral e outro sem adubação, observou-se aumento nos níveis de P no solo, independente do resíduo orgânico utilizado na formulação. Doses a partir de 100% resultaram em maior disponibilidade deste elemento e o formulado com lodo de esgoto na dose de 80% forneceu 36% a mais de P em comparação com a adubação estritamente mineral.

Problemas relacionados a aplicação exclusiva de adubação orgânica também têm sido atenuados com o uso de fertilizantes organominerais como evidenciado por Benites *et al.* (2010) que sugerem haver vantagens no uso de fertilizantes organominerais em relação a aplicação superficial de resíduos orgânicos *in natura* como, por exemplo, aqueles oriundos da criação de aves e suínos, uma vez que há a minimização de perdas de N por volatilização da amônia e, assim, melhor aproveitamento deste elemento.

2.4 Impacto da aplicação de fertilizante organomineral na atividade microbiana do solo

Apesar da crescente utilização de fertilizantes organominerais, são escassas as pesquisas relacionadas ao efeito de sua aplicação na comunidade microbiana, principalmente em solos tropicais. Esta, por sua vez, está intimamente associada a complexos processos que ocorrem entre solo e planta, desempenhando funções importantes que incluem desde a supressão de doenças até o fornecimento e ciclagem de nutrientes, decomposição de material orgânico, entre outros. Dessa maneira, o estudo de atributos microbiológicos é fundamental no entendimento das alterações no ecossistema do solo por sua alta sensibilidade à adoção de práticas de manejo, sendo importante ferramenta para a avaliação da qualidade do solo (VEZZANI & MIELNICZUK, 2009; ANDREOTE *et al.*, 2014).

A respiração basal do solo (RBS) é utilizada por sua sensibilidade em relevar alterações no comportamento da comunidade microbiana e contempla as funções metabólicas nas quais há a geração de CO₂, resultante da degradação da matéria orgânica (DA SILVA *et al.*, 2007). Os principais organismos do solo associados com este processo são fungos, algas, bactérias e protozoários e pode ser afetado por fatores abióticos como umidade, temperatura e presença de contaminantes (ÖLINGER *et al.*, 1996; NOGUEIRA *et al.*, 2013). De maneira complementar, a biomassa microbiana dos solos (BM) é importante indicador que retrata a parte viva da matéria orgânica responsável por participar da ciclagem e ser estoque de

nutrientes (N, P e S). Além disso, pode representar de 1 a 5% do carbono orgânico dos solos (JENKINSON & LADD, 1981; DIONÍSIO *et al.*, 2016; SINGH & GULPTA, 2018). Vários estudos utilizaram a RBS e BM para avaliar influência da aplicação de material orgânico em solos como lodo de esgoto, cama de frango, vinhaça, entre outros (LAMBAIS & CARMO, 2008; YADA *et al.*, 2015; DA SILVA *et al.*, 2015).

Outros indicadores biológicos mais sensíveis às mudanças nas funções dos solos consistem no uso de enzimas capazes de fornecer informações sobre distúrbios causados pela manipulação dos solos, associadas a respostas sobre a produtividade e efeitos deletérios de poluentes (DE ARAÚJO & MONTEIRO, 2007; DOTANIYA *et al.*, 2019). Entre as mais utilizadas em solos tropicais como indicadoras da qualidade dos solos destacam-se as enzimas urease, fosfatase ácida e β -glucosidase, envolvidas respectivamente nos ciclos dos elementos N, P e C. A urease é uma enzima intra e extracelular encontrada nos solos a partir de células vegetais e microbianas, responsável por catalisar a hidrólise da ureia em amônia e dióxido de carbono. A fosfatase ácida faz parte de um grupo de enzimas que participa da hidrólise de moléculas orgânicas (éster e anidridos de fosfato) em ácido fosfórico e é secretada pelas raízes das plantas em condições de estresse onde há baixa disponibilidade de P. Já a β -glucosidase é amplamente encontrada nos solos e é responsável por realizar a hidrólise da celobiose em glicose, fonte de C para a comunidade microbiana e pode auxiliar na compreensão da capacidade de um solo em estabilizar material orgânico (EIVAZI & TABATABAI, 1988; TABATABAI, 2003; CALDWELL, 2005; BALOTA *et al.*, 2013; UTOBO & TEWARI, 2015).

Não há consenso em relação as implicações do uso de fertilizantes organominerais em atributos microbiológicos do solo, uma vez que a composição da matriz orgânica apresenta elevada variabilidade, além da participação da planta e sua capacidade em moldar a atividade microbiana diante dos mais diversos estímulos (SCHLOTTER *et al.*, 2018). São crescentes os estudos realizados a partir do uso de materiais orgânicos aplicados ao solo como lodo de esgoto, cama de frango, esterco, resíduos do setor sucroenergético complementados com fertilizantes minerais que utilizam tais parâmetros (ZHANG *et al.*, 2015; CORRÊA *et al.*, 2016; PRADO *et al.*, 2016; SUBRAMANIAN *et al.*, 2016). Dessa forma, o monitoramento da atividade microbiológica dos solos através de indicadores biológicos pode fornecer subsídios para a compreensão do impacto gerado pelo uso de fertilizantes organominerais a partir de resíduos orgânicos.

3. OBJETIVOS E HIPÓTESES

3.1 Objetivo geral

Propor a formulação de um fertilizante organomineral para uso em solos de Cerrado utilizando o lodo de esgoto como matriz orgânica e fonte de micronutrientes, principalmente cobre, zinco e níquel, para a cultura da soja.

3.1.2 Objetivos específicos

Avaliar a eficiência agronômica do fertilizante organomineral em três formas físicas diferentes (farelada, granulada e peletizada) em solos com texturas contrastantes.

Avaliar o impacto do uso do fertilizante organomineral na atividade microbiana dos solos.

3.2 Hipóteses

A associação entre lodo de esgoto e fertilizantes minerais simples resulta em um fertilizante organomineral com maior eficiência agronômica em relação ao estritamente mineral.

Há diferenças na eficiência agronômica da formulação organomineral que possa ser atribuída a forma física sendo farelada, granulada ou peletizada.

O lodo de esgoto é eficiente em atender as necessidades nutricionais da cultura soja em relação aos micronutrientes.

O uso de fertilizantes organominerais a partir de lodo de esgoto não altera negativamente a atividade microbiana dos solos.

4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Coleta e Caracterização dos solos

Foram utilizados dois Latossolos Vermelho distróficos (LVd), ambos com horizonte A moderado, sob cobertura de Floresta secundária semidecídua, de texturas contrastantes sendo argilosa e outro franco-argilo-arenosa, coletados respectivamente nos municípios de Araraquara e Piracicaba, Estado de São Paulo. Para tanto, aproximadamente 450 kg de ambos os solos referentes a camada 0-20 cm foram coletados e peneirados em peneira de malha de 4 mm e secos em casa de vegetação durante 48 horas sob lona plástica. Em sequência, foram retiradas amostras para a realização das análises químicas e físicas no Departamento de Ciência do Solo da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, campus da Universidade de São Paulo (ESALQ/USP).

Em relação as características químicas, foram determinadas o pH (CaCl_2 0,01 M), acidez potencial (pH-SMP), K^+ , Ca^{2+} e Mg^{2+} trocáveis e P disponível (extração pela resina de troca iônica e quantificação por espectrofotometria de absorção atômica), Al^{3+} trocável (extração via KCl e quantificação por titulação com NaOH), S-SO_4^{-2} (extração por solução de fosfato de cálcio e quantificação por turbidimetria), Cu^{2+} , Zn^{2+} , Mn^{2+} , Fe^{2+} (método DTPA a pH 7,3 e quantificação por espectrofotometria de absorção atômica), B (extração com solução de cloreto de bário no micro-ondas e quantificação por colorimetria), Matéria Orgânica (M.O) (oxidação por íons dicromato e quantificação por colorimetria) de acordo com Raij *et al.* (2001). A partir dos resultados obtidos calculou-se a soma de bases (SB), capacidade de troca de cátions potencial ($\text{CTC}_{\text{pH } 7,0}$), saturação por bases (V%) e saturação por alumínio (m%).

Os teores de metais nos solos (As, Ba, Cd, Pb, Co, Cu, Cr, Hg, Mo, Ni, Se e Zn) foram determinados conforme método SW-846 3051a (USEPA, 2007), com digestão assistida em forno micro-ondas e extração via ácido nítrico concentrado. A determinação foi realizada por espectrometria de emissão atômica por plasma acoplado indutivamente (ICP-OES).

Em relação aos atributos físicos, a análise granulométrica foi realizada pelo método do densímetro de Bouyoucos e determinou-se areia total, silte e argila, além da densidade dos solos.

4.2 Caracterização do lodo de esgoto

Foram coletados 600 kg de torta de lodo de esgoto como amostra representativa da Estação de Tratamento de Esgoto Rio Preto (ETE Rio Preto), que apresenta níveis elevados de

zinco e níquel, localizada no município de São José do Rio Preto, na região noroeste do Estado de São Paulo, cujo processo de tratamento utilizado consiste no uso de reatores UASB (*Upflow Anaerobic Sludge Blanket*) seguidos de Lodos Ativados Convencional.

Inicialmente, coletou-se uma amostra composta do material para análise de contaminantes inorgânicos. A umidade do lodo foi estimada em 80% e, posteriormente, seco ao ar sobre lona plástica em casa de vegetação, reduzindo esse teor a 8%. Em sequência, encaminhado para secagem em estufa de temperatura controlada durante 48 horas à 65 °C, a fim de eliminar possíveis patógenos remanescentes. O material seco foi moído e armazenado em baldes vedados de 20 L (Figura 1) .

Figura 1. Etapas de recebimento, secagem do lodo de esgoto em casa de vegetação e em estufa de temperatura controlada.

A caracterização dos parâmetros de interesse agrônômico do material seco e moído foi realizada no Laboratório de Fertilizantes, Corretivos e Resíduos Orgânicos do Departamento de Ciência do Solo da ESALQ-USP e consistiu na determinação do pH (CaCl₂ 0,01M), Umidade (60-65°C), densidade, carbono orgânico (via dicromato seguido de titulação), dos teores totais de N (Kjeldahl), P (P₂O₅, determinação por espectrofotômetro do ácido molibdovanadofosfórico), K⁺ (K₂O) e Na⁺ (fotometria de chama), S (gravimetria de sulfato de bário), B (espectrofotometria da azometina-H), Ca²⁺, Mg²⁺, Cu²⁺, Mn²⁺, Zn²⁺ e Fe²⁺ (extração com HCl e determinação via espectrofotômetro de absorção atômica), cálculo da relação C/N e CTC (BRASIL, 2017). Também foram determinados a matéria orgânica total (MO, via combustão) de acordo com Alcarde (2009) e a capacidade de retenção de água (CRA) segundo Silva (2009).

Os teores de metais (As, Cd, Pb, Cr, Hg, Ni, Se, Cu, Fe, Mn, Mo, Zn e Cr^{6+}) foram determinados pela empresa Bioagri Ambiental Ltda conforme metodologia 3051a (USEPA, 2007).

As análises referentes a presença de agentes patogênicos foram realizadas pelo Centro de P&D de Solos e Recursos Ambientais do Instituto Agronômico de Campinas (IAC), onde foram determinados os teores de Coliformes Termotolerantes, *Salmonella sp.* e Ovos viáveis de Helmintos, de acordo com o método de ensaio EPA part 503 (USEPA, 1993).

4.3 Caracterização, definição e preparo da formulação organomineral farelada

A elaboração do fertilizante organomineral foi realizada em concordância com a Instrução Normativa 25, de 23 de julho de 2009, que estabelece as diretrizes em relação a especificações, garantias, tolerâncias, registro, embalagem e sua rotulagem para uso na agricultura. Sendo assim, seguiu-se as seguintes premissas:

- a) Carbono orgânico: mínimo de 8%;
- b) Umidade máxima: 30%;
- c) CTC mínima: $80 \text{ mmol}_c \text{ kg}^{-1}$.

De acordo com os resultados analíticos do lodo de esgoto, a mistura farelada do fertilizante organomineral foi formulada e complementada com fertilizantes minerais simples, seguindo as proporções mássicas: 67,5% de lodo de esgoto; 14,8% de fosfato monoamônico (MAP); 13,7% de cloreto de potássio (KCl); 0,65% de enxofre elementar (S^0); 0,35% de ácido bórico (H_3BO_3) e 3% de amido pré-gelatinizado como agente aglomerante. A formulação final obtida foi $04\text{-}08\text{-}08 + 0,65\% \text{ S} + 0,035\% \text{ B} + 0,07\% \text{ Zn}$

A partir da mistura farelada, foram obtidas as formas físicas granulada e peletizada. Ao final, foram determinados os mesmos parâmetros de interesse agronômico e os teores de metais observados no lodo de esgoto, além da leitura da condutividade elétrica (CE) da amostra em água (BRASIL, 2017).

4.3.1 Granulada

O fertilizante organomineral na forma granulada foi obtido pela empresa GranTec Tecnologias de Materiais, localizada no município de São Simão – SP, com uso de misturador-granulador de alta intensidade. Para isso, foram realizados dois ensaios

preliminares para a obtenção de uma massa granulada a fim de avaliar a granulometria ideal das matérias-primas na formação dos grânulos.

4.3.2 Peletizada

A peletização do fertilizante organomineral foi realizado pela empresa Indústria e Comércio Chavantes Ltda, localizada no município de Xavantes-SP. Para a produção do pellet, a mistura farelada foi adicionada na peletizadora CHV de 7,5 HP de potência. Para a correção da umidade adicionou-se 1 ml de água para cada 20 ml do produto e a massa obtida foi pressionada em molde de aço reforçado ou matriz peletizadora, resultando na formação de pellets de 10 mm de comprimento e 3,2 mm de diâmetro. Ao final, os pellets foram coletados e resfriados a temperatura ambiente devido ao aquecimento provocado pelo atrito do material com o interior da máquina.

4.4 Instalação e condução do experimento

O experimento foi instalado em casa de vegetação no Departamento de Ciência do Solo da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, campus da Universidade de São Paulo, no município de Piracicaba – SP.

O delineamento experimental adotado foi o esquema de blocos casualizados em fatorial $5 \times 3 + 3$ sendo cinco doses de FOM (40%, 60%, 80%, 100% e 120%), três formas físicas (granulada, farelada e peletizada) e três tratamentos adicionais que consistiram em dois tratamentos com adubação mineral convencional com (M+Mi+S) e sem (M+S) os micronutrientes Zn e B mais um tratamento sem adubação (CT), com quatro repetições. Ambos os tratamentos minerais basearam-se no uso da formulação 0-18-18 por ser uma das formulações mais utilizadas na região central do país para a cultura da soja e foram referência para o estabelecimento das doses de FOMs, considerando a necessidade de 100 kg ha^{-1} de P_2O_5 , com objetivo de obter alta produtividade de grãos (VITTI & TREVISAN, 2000). Assim, para o plantio da soja considerou-se a condução de 2 plantas por vaso, sendo fixadas 12 plantas por metro e espaçamento entre linhas de 0,45 m, com população estimada em 266.667 de plantas por hectare. Dessa forma, foram definidas as taxas de aplicação da adubação mineral com e sem a adição de zinco e boro, além do fertilizante organomineral com suas respectivas subdoses (Tabela 1).

Tabela 1. Tipo de fertilizante utilizado no experimento, dose e quantidade equivalente de nutrientes.

Fertilizante	Dose		N	P ₂ O ₅	K ₂ O	S	B	Zn
	kg ha ⁻¹	g vaso ⁻¹	----- kg ha ⁻¹ -----					
M + S								
MAP	192,31	1,44	21,15	100	-	-	-	-
KCl	166,67	1,25	-	-	100	-	-	-
Gesso	230,77	1,73	-	-	-	30	-	-
M + Mi + S								
MAP	192,31	1,44	21,15	100	-	-	-	-
KCl	166,67	1,25	-	-	100	-	-	-
Gesso	230,77	1,73	-	-	-	30	-	-
H ₃ BO ₃	11,76	0,09	-	-	-	-	2	-
ZnSO ₄	8,69	0,06	-	-	-	-	-	2
FOM								
40%	480	3,75	20	40	40	3,10	0,20	0,76
60%	720	5,63	30	60	60	4,65	0,30	1,15
80%	960	7,50	40	80	80	6,20	0,40	1,53
100%	1250	9,38	50	100	100	7,75	0,50	1,91
120%	1440	11,25	60	120	120	9,30	0,60	2,29
CONTROLE								
0%	-	-	-	-	-	-	-	-

De acordo com a análise química de ambos os solos foi necessário a elevação da saturação por bases a 60%, de acordo com a necessidade requerida pela cultura da soja. Assim, para a correção da acidez utilizou-se calcário dolomítico de acordo com a metodologia de Saturação por Bases do solo. Para o solo LVd argiloso aplicou-se a quantidade equivalente de 3,9 t ha⁻¹ e para o LVd franco-argilo-arenoso 4,1 t ha⁻¹ de calcário. Os solos corrigidos foram colocados em vasos plásticos com capacidade de 5 L. Para evitar perdas de material, foi alocado dentro de cada vaso um recorte de manta para drenagem 100% poliéster com 20 cm de comprimento e 15 cm de largura. Foram mantidos cerca de 3 cm de espaçamento entre a boca do vaso e os solos para facilitar operações de adubação, plantio e irrigação. Em relação a esta última, a quantidade de água deionizada aplicada baseou-se na manutenção da umidade na capacidade de campo de cada solo sendo de 0,28 g g⁻¹ no solo LVd argiloso e 0,17 g g⁻¹ no LVd franco-argilo-arenoso, com intervalo de rega de três dias.

A adubação de plantio foi realizada um mês após a calagem onde os fertilizantes foram aplicados à 5 cm de profundidade e, em seguida, cobertos com solo. A semeadura da soja no solo LVd argiloso foi realizada em 13 de dezembro e do solo LVd franco-argilo-arenoso em 27 de dezembro de 2018, utilizando cinco sementes por vaso a 3 cm de profundidade do cultivar Desafio 8473 RSF. Suas principais características são a alta

exigência a solos férteis, hábito de crescimento indeterminado, ciclo médio de 115 dias, altura média de plantas de 75 cm, além de possuir a tecnologia *Roundup Ready*, proporcionando resistência ao herbicida Glifosato. As sementes foram tratadas com o fungicida sistêmico e de contato Vitavax Thiram® 200 SC, considerando a dose de 300 ml para cada 100 kg de sementes. Em seguida, aplicou-se 2 ml kg⁻¹ do produto Scudero® CoMo para fornecimento de cobalto e molibdênio, apenas nas sementes onde foram aplicados os fertilizantes minerais. Finalmente, realizou-se a inoculação de todas as sementes com inoculante turfoso Masterfix® Soja na dose de 100 g para cada 50 kg de sementes.

Por meio de desbaste em pós-emergência entre os estádios VE (emergência) e VC (cotilédone) foram mantidas duas plantas por vaso. A irrigação foi realizada a fim de manter os solos com 90% da umidade na capacidade de campo. A temperatura média na casa de vegetação foi estimada em 29,8°C ± 2,6 °C e a umidade relativa média de 41% ± 11,7%. Em ambos os solos a soja foi conduzida até os 60 DAP (dias após o plantio).

4.5 Parâmetros fitotécnicos

No momento da colheita das plantas de soja, foram realizadas medições para auxiliar na estimativa do desempenho agrônômico de cada tratamento. Em relação a parte aérea das plantas, foram avaliados os seguintes parâmetros fitotécnicos:

- a) **Altura de planta**, aferida com auxílio de uma trena, padronizado desde a superfície do solo até a inserção do último trifólio, em centímetros;
- b) **Diâmetro do colmo**, aferido com auxílio de paquímetro digital, 1 cm acima da superfície do solo, em centímetros;
- c) **Número de vagens**;
- d) **Massa seca da parte aérea (MSPA)**, obtido após secagem em estufa de circulação forçada de ar da parte aérea das plantas a 65° C, até peso constante, em gramas.

Já as raízes foram obtidas pelo corte rente ao solo da parte aérea das plantas e lavadas em água corrente, com auxílio de peneira de malha de 2 mm. Assim, determinaram-se:

- a) **Massa seca de raiz (MSR)**, obtido após a secagem em estufa de circulação forçada das raízes das plantas a 65° C, até peso constante, em gramas;
- b) **Número de nódulos viáveis**, obtido pela contagem direta de nódulos ativos observados após o corte com lâmina, que apresentaram coloração rósea.

4.6 Análise química do tecido vegetal

Inicialmente, as plantas colhidas foram colocadas em sacos de papel e levadas para secagem em estufa de ar de circulação forçada a 65°C até peso constante. Em seguida, o material vegetal foi triturado em moinho de aço inoxidável utilizando peneira de malha de 1 mm e acondicionado em sacos plásticos devidamente identificados.

As análises químicas da parte aérea das plantas foram realizadas no Laboratório de Tecidos Vegetais na ESALQ-USP, onde foram determinados todos os macronutrientes primários e secundários. Para o N realizou-se digestão sulfúrica, destilação e posteriormente titulação. Para os elementos P, K, Ca, Mg e S, utilizou-se a extração nítrico-perclórica. A determinação de P foi realizada por colorimetria do metavanadato e o K via fotometria de chama. Já para Ca e Mg a quantificação foi realizada utilizando espectrofotometria de absorção atômica e, finalmente, turbidimetria de sulfato para S. Já para os micronutrientes utilizou-se extração nítrico-perclórica para determinação de Cu, Fe, Mn e Zn e quantificação por espectrofotometria de absorção atômica e o B por incineração e determinação colorimétrica via azometina (MALAVOLTA *et al.*, 1989). Com os resultados analíticos, foi calculada a quantidade acumulada de nutrientes na parte aérea das plantas pelo produto do teor de nutriente (g kg^{-1} ou mg kg^{-1}) e a MSPA (g).

4.7 Análises microbiológicas

4.7.1 Respiração basal do solo

A avaliação da atividade respiratória da microbiota dos solos ou respiração basal dos solos (RBS) foi realizada através do método da Respirometria (ALEF, 1995), baseado na quantificação do CO_2 resultante do metabolismo microbiano em ensaio realizado em paralelo à condução do experimento em casa de vegetação.

Foram reproduzidos os mesmos tratamentos feitos em casa de vegetação, em triplicata. Os fertilizantes foram misturados aos solos de maneira homogênea e colocados em frascos vedados para incubação, cuja umidade foi ajustada em cerca de 60% da capacidade de campo. A quantificação do CO_2 foi realizada aos 4, 7, 14, 21 e 28 dias com auxílio de bureta digital de alta precisão.

4.7.2 Carbono da biomassa microbiana

A determinação do carbono associado a biomassa microbiana (C-MB) dos solos foi realizada após a retirada das plantas de soja e utilizou-se o método indireto da Fumigação-Extração, de acordo com Vance *et al.* (1987), no Laboratório de Microbiologia do Solo do Departamento de Ciência do Solo da ESALQ-USP.

4.7.3 Atividade enzimática

Foram determinadas as atividades das enzimas dos solos relacionadas aos elementos carbono e fósforo: β -glucosidase e fosfatase ácida, respectivamente, de acordo com método descrito por Tabatabai (1994). Também se quantificou a enzima urease relacionada ao comportamento do nitrogênio no solo, segundo a metodologia proposta por Tabatabai & Bremner (1972).

4.8 Análise dos resultados

A normalidade dos resíduos dos dados foi verificada pelo teste de Shapiro-Wilk, seguido de análise de variância (ANOVA) e teste F considerando 5% de significância. Em casos onde houve diferenças entre os tratamentos, procedeu-se o teste de Tukey ($p < 0,05$) para comparação de médias utilizando o Software Sisvar[®] (FERREIRA, 2000). Nos casos onde não houve normalidade dos dados, utilizou-se a transformação de Box-cox. Nas variáveis que, mesmo após transformação não se enquadraram nos requisitos de normalidade, utilizou-se o teste não-paramétrico de Kruskal-Wallis ($p < 0,05$) e posterior comparação de médias através do teste de Dunn, com auxílio do Software Past[®] (HAMMER *et al.*, 2001). Todos os gráficos foram elaborados com auxílio do software SigmaPlot 12.0 e os dados estão apresentados como média e erro padrão da média.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Caracterização dos solos

Apesar das diferenças nas classes texturais, os solos apresentam elevada acidez (pH) e saturação por alumínio (m%), além de baixa saturação por bases (V%), confirmando seu caráter distrófico (Tabela 2). Em ambos, o teor de Mn^{2+} é considerado alto, Mg^{2+} , K^+ e P são considerados baixos e o B encontra-se em níveis médios. No solo LVd argiloso, os teores de Ca^{2+} , Cu^{2+} , Mn^{2+} e $S-SO_4^{2-}$ são considerados altos, Zn^{2+} em nível médio e baixos teores de Fe^{2+} . Já no solo LVd franco-argilo-arenoso, o teor de Cu^{2+} é considerado médio, seguido de baixos teores de Ca^{2+} , Cu^{2+} , Mn^{2+} , $S-SO_4^{2-}$ e Zn^{2+} (RAIJ *et al.*, 1997). Em relação aos teores de metais, por terem sido coletados em área de vegetação nativa, encontram-se abaixo dos valores orientadores de referência de qualidade estabelecidos pela legislação, ou seja, são solos considerados livres de contaminação (CETESB, 2014).

Tabela 2. Atributos químicos e físicos dos solos: LVd, argiloso e LVd franco-argilo-arenoso.

Atributos	Unidade	LVd argiloso	LVd franco- argilo-arenoso
pH CaCl ₂	-	4,4	4,1
MO	g dm ⁻³	28,6	22,2
P	mg dm ⁻³	3,3	4,4
K ⁺	mmol _c dm ⁻³	1,16	0,85
Ca ²⁺	mmol _c dm ⁻³	11,2	1,8
Mg ²⁺	mmol _c dm ⁻³	3,3	1,4
S	mg dm ⁻³	12,7	4,1
B	mg dm ⁻³	0,32	0,32
Cu	mg dm ⁻³	1,34	0,60
Fe	mg dm ⁻³	26,7	52,0
Mn	mg dm ⁻³	7,7	7,6
Zn	mg dm ⁻³	0,90	0,38
Al	mmol _c dm ⁻³	11,0	14,3
H+Al	mmol _c dm ⁻³	64	58
SB	mmol _c dm ⁻³	15,6	4,0
CTC _{pH7,0}	mmol _c dm ⁻³	79,6	62,4
m	%	41,4	77,9
V	%	19,6	6,5
As	mg kg ⁻¹	0,7	1,4
Ba	mg kg ⁻¹	0,0	6,8
Cd	mg kg ⁻¹	0,42	3,4
Cr	mg kg ⁻¹	1,8	98,8
Hg	mg kg ⁻¹	0,3	0,6
Mo	mg kg ⁻¹	0,0	0,0
Ni	mg kg ⁻¹	0,0	9,3

Co	mg kg ⁻¹	0,0	4,4
Pb	mg kg ⁻¹	4,3	8,8
Se	mg kg ⁻¹	0,0	0,0
Areia	g kg ⁻¹	327	687
Silte	g kg ⁻¹	97	60
Argila	g kg ⁻¹	577	254
Densidade	g dm ⁻³	0,98	1,17

5.2 Caracterização do lodo de esgoto

O lodo de esgoto apresenta níveis típicos de matéria orgânica, macro e micronutrientes, pH, C orgânico bem como baixa relação C/N, indicando o favorecimento da mineralização do N orgânico, que corresponde a cerca de 99% do N presente em lodos, podendo ser aproveitado pelas plantas (Tabela 3) (BETTIOL & CAMARGO, 2006; SINGH & AGRAWAL, 2008). Em relação aos teores de metais, há elevada variabilidade na composição média de lodos de esgoto, uma vez que fatores como origem (doméstico ou industrial) e sazonalidade influenciam na quantidade final desses elementos (TSUTIYA, 2000). As concentrações desses elementos indicam que esse material se enquadra nos limites permitidos pela legislação para uso agrícola (CONAMA, 2006). Entretanto, o Zn²⁺ apresenta quantidade média próxima à máxima estabelecida.

Tabela 3. Caracterização química do lodo de esgoto proveniente da ETE Rio Preto, localizada no município de São José do Rio Preto – SP.

Parâmetros	Unidade	Resultados
pH CaCl₂	-	5,8*
Umidade	%	2,47*
MO	%	53,34
C orgânico	%	28,18
N	%	4,96
P	%	1,88
K⁺	%	0,40
Ca²⁺	%	1,92
Mg²⁺	%	0,31
S	%	0,82
B	mg kg ⁻¹	12
Cu	mg kg ⁻¹	544
Fe	mg kg ⁻¹	21133
Mn	mg kg ⁻¹	207
Zn	mg kg ⁻¹	2430
Na	mg kg ⁻¹	2498
As	mg kg ⁻¹	4,43
Cd	mg kg ⁻¹	1,13

Cr	mg kg ⁻¹	514
Cr⁶⁺	mg kg ⁻¹	5,51
Hg	mg kg ⁻¹	0,69
Mn	mg kg ⁻¹	137
Mo	mg kg ⁻¹	7
Ni	mg kg ⁻¹	298
Pb	mg kg ⁻¹	40
Se	mg kg ⁻¹	<1
Relação C/N	-	7*
Densidade	g cm ⁻³	0,77*
CTC	mmolc kg ⁻¹	350
CRA	%	69

*Valores determinados em base úmida.

As quantidades de agentes patogênicos determinados no lodo de esgoto o enquadram como Classe A, logo a sua aplicação é permitida na agricultura, respeitando as restrições previstas pela legislação (Tabela 4).

Tabela 4. Quantidade de agentes patogênicos no lodo de esgoto e limites estabelecidos pela legislação para que este seja considerado Classe A, expressos em base seca.

Parâmetro	Unidade	Resultado analítico	CONAMA 375/2006
Coliformes tolerantes	NMP ⁽¹⁾ g ⁻¹	15,58	<103
Ovos viáveis de helmintos	Ovos g ⁻¹ de ST	0	0,25
<i>Salmonella sp</i>	NMP 10 g ⁻¹	Ausente	Ausente

(1) NMP: número mais provável.

5.3 Fertilizante organomineral

As três formas físicas do FOM atenderam aos requisitos estabelecidos pela legislação (Figura 2) (BRASIL, 2009).

Figura 2. Fertilizante organomineral nas formas físicas farelada, granulada e peletizada utilizadas no experimento.

Os teores de N, P e K estão próximos a formulação inicialmente estimada em 4-8-8 + 0,04% B e 0,15% Zn. Em relação aos teores Ca, Mg, S, MO, C orgânico e Na, não houve alterações em relação aos observados no lodo de esgoto (Tabela 5).

Tabela 5. Parâmetros de interesse agrônômico e teores de contaminantes inorgânicos presentes no fertilizante organomineral nas diferentes formas físicas: farelada, granulada e peletizada.

Parâmetros	Unidade	Farelada	Granulada	Peletizada
pH CaCl ₂	-	5,5*	5,2*	5,3*
Umidade	%	4,7*	1,6*	8*
MO	%	47,3	47,9	47,6
C Orgânico	%	24,9	25,5	24,8
N	%	4,4	5	5,3
P	%	8,9	9,3	8,2
P solúvel ⁽¹⁾	%	7,2	8,5	6,2
K	%	9,2	8	8,1
Ca	%	1,8	1,4	1,8
Mg	%	0,42	0,47	0,42
S	%	0,60	0,66	0,60
B	mg kg ⁻¹	420	384	410
Cu	mg kg ⁻¹	366	344	336
Fe	mg kg ⁻¹	13900	11300	16800
Mn	mg kg ⁻¹	211	167	220
Na	mg kg ⁻¹	2498	2474	2246
Zn	mg kg ⁻¹	1530	1560	1570
As	mg kg ⁻¹	5	<1	6,22
Cd	mg kg ⁻¹	0,93	0,96	1,01
Co	mg kg ⁻¹	4,73	3,29	2,84
Cr	mg kg ⁻¹	289	221	270
Cr ⁶⁺	mg kg ⁻¹	1,6	1,9	2,19
Hg	mg kg ⁻¹	0,92	0,68	0,59
Mo	mg kg ⁻¹	5,2	3,8	4,8
Ni	mg kg ⁻¹	161	179	153
Pb	mg kg ⁻¹	22,2	22,2	24,8
Se	mg kg ⁻¹	<1	<1	<1
Densidade	g cm ⁻³	0,84*	0,77*	0,73*
Relação C/N	-	6*	5*	5*
Sólidos	% p p ⁻¹	95,5	95,4	90
CTC	mmolc kg ⁻¹	250	310	310
CRA	%	69,3	57,2	57,2
CE ⁽²⁾	mS cm ⁻¹	85,8	33	33

(1) Fósforo extraído em citrato neutro de amônio + água; (2) Condutividade elétrica.

*Valores determinados em base úmida

Ao comparar os teores de metais do lodo de esgoto com as médias das três formas físicas do FOM, é possível observar que Mn, Cd e Hg permanecem praticamente constantes.

Já o Zn apresentou redução de 1,5 vezes, seguido dos teores de Cr, Cu, Fe, Mo, Ni e Pb que reduziram pela metade e Cr^{6+} tendo diminuído em 5 vezes. Diante disso, é possível sugerir que a utilização na agricultura de lodos de esgoto com altas concentrações de metais pode ser viabilizada através o seu uso em formulações organominerais, uma vez que há a diluição da concentração desses elementos.

Em relação a forma física granulada, os grânulos obtidos com a matéria prima padrão, ou seja, aquela utilizada na formulação farelada e peletizada (M1), não foi adequada para este fim, uma vez que os grânulos não apresentaram uniformidade na distribuição da fração orgânica com a mineral e reduzida resistência mecânica (Figura 3).

Figura 3. Grânulos obtidos com matérias prima padrão e após nova moagem em ensaio realizado pela empresa GranTec Tecnologia de Materiais.

Assim, utilizou-se a granulometria abaixo da malha de 60 *mesh* ou 0,25 mm resultante de nova moagem (M2). A fração granulométrica abaixo de 1 mm do lodo de esgoto, correspondente a porção fibrosa deste material, foi separada por peneiramento antes da granulação por dificultar a formação dos mesmos devido a sua característica hidrofóbica, dado o reduzido volume da massa necessária para a condução deste experimento (Tabela 6) Vale ressaltar que em condições industriais essa fração é mantida no misturador-granulador.

Tabela 6. Caracterização granulométrica da massa (M1) granulada (M2) utilizada no fertilizante organomineral granulado.

Peneira (mm)	M2
+4,75	0,7
+2,8	26,8
+ 2,0	41,9
+1,0	29,6
+0,5	0,2
+0,25	0,6
-0,25	0,1

5.4 Parâmetros fitotécnicos

Os tratamentos com fertilizantes, tanto mineral como organomineral, foram superiores ao tratamento CT para as variáveis fitotécnicas avaliadas, exceto a nodulação (Figura 8). De maneira geral, não foram observadas diferenças entre os tratamentos minerais com (M+M+S) e sem (M+S) adição dos micronutrientes Zn e B. Em relação aos FOMs, a formulação física e as doses não influenciaram o desenvolvimento das plantas de soja (60 DAP).

A produção de massa seca da parte aérea (MSPA), em média, foi ligeiramente superior no solo LVd argiloso (média = 30 g) do que no solo LVd franco-argilo-arenoso (média = 23 g) (Figura 4 A, B). Para ambos os solos, praticamente não há diferenças entre as adubações minerais convencionais e as organominerais, independente da dose utilizada. Portanto, 40% da dose cheia do FOM já foi suficiente para resultar nos mesmos incrementos que a adubação mineral convencional em relação à MSPA. Já a massa seca de raiz (MSR) foi similar em ambos os solos (média = 5,5 g), sendo que os tratamentos com fertilizantes minerais não diferiram entre si (Figura 4 C, D). Em relação aos FOMs, a MSR diminuiu ligeiramente com o aumento da dose utilizada, principalmente no solo LVd argiloso. Aparentemente, os menores teores de nutrientes disponíveis nas menores doses do FOM estimularam as plantas a promoverem o desenvolvimento radicular, com o objetivo de explorar maior volume de solo e, assim, suprir suas necessidades nutricionais, principalmente em relação ao P (FAGERIA & MOREIRA, 2011; CRUSCIOL *et al.*, 2013). No entanto, o desenvolvimento da parte aérea das plantas não foi comprometido pelo crescimento das raízes (Figura 4).

Figura 4. Massa seca da parte aérea (MSPA) (A, B) e massa seca de raiz (MSR) (C, D) considerando a condução de duas plantas de soja por vaso aos 60 DAP. Dados transformados via Box-Cox. Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si a 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

No final do experimento (60 DAP), observamos que os FOMs ficaram confinados pelas raízes das plantas de soja, sugerindo que sua solubilização foi apenas parcial, independentemente da formulação utilizada (Figura 5). Apesar disso, tanto os tratamentos minerais quanto os organominerais foram capazes de promover respostas fitotécnicas similares às plantas de soja. GURGEL *et al.* (2015) observaram resultados semelhantes com a aplicação de um FOM granulado, oriundo de resíduos do setor sucroalcooleiro (BIOFOM), em plantas de milho. Esses resultados sugerem solubilização gradual dos nutrientes presentes nos FOMs, o que pode gerar efeito residual no solo. Entretanto, não há consenso em relação a capacidade residual destes fertilizantes na literatura (BENEDITO *et al.*, 2010; MAKINDE *et al.*, 2011; MALAQUIAS & SANTOS, 2016; SÁ *et al.*, 2017).

Figura 5. Fertilizantes organominerais aderidos às raízes de soja aos 60 DAP.

A altura e o diâmetro do colmo das plantas foram semelhantes entre os tratamentos minerais e organominerais, independentemente da dose utilizada. Diferentemente do esperado, os valores de altura das plantas foram maiores no LVd franco-argilo-arenoso (médias = 87 *versus* 74 cm), que apresenta menor fertilidade natural (Figura 6 A, B). Já o valor médio do diâmetro de colmos foi superior no solo LVd argiloso (média = 7,1 *versus* 5,5 mm), o que deixa claro que houve estiolamento das plantas no solo LVd franco-argilo-arenoso (Figura 6 B, D).

Figura 6. Altura de plantas (A, B) e diâmetro do colmo (C, D) da soja considerando a média de duas plantas conduzidas em cada vaso aos 60 DAP. Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si a 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

O número de vagens foi maior no solo LVd argiloso (média = 41 *versus* 22), devido à sua maior fertilidade. Para ambos os solos, tanto os tratamentos minerais como os organominerais, independente da dose, foram capazes de fornecer os mesmos incrementos em relação à quantidade de vagens nas plantas, e foram superiores ao tratamento CT (Figura 7). Por outro lado, trabalhos que consideram o final do ciclo produtivo da soja indicam que os fertilizantes orgânicos costumam ser superiores aos minerais em relação à produção de grãos (CARVALHO *et al.*, 2011; MARIANO *et al.*, 2017).

Figura 7. Número de vagens considerando duas plantas conduzidas em cada vaso. Dados transformados via Box-Cox. Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si a 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

A nodulação da soja foi de forma geral baixa, mas maior no solo LVd franco-argilo-arenoso (média = 15 *versus* 5 nódulos ativos) (Figura 8). Os tratamentos CTs não apresentaram nodulação devido à falta de nutrientes disponíveis (O'HARA, 2001). Já a adição de fertilizantes estimulou a nodulação, mas este estímulo foi acentuado pela adição de FOMs. Além disso, para todas as formulações, a nodulação diminuiu com o aumento da dose do FOM, principalmente no solo LVd franco-argilo-arenoso. Parte desse comportamento pode estar associado ao desenvolvimento das raízes, cuja massa seca também diminuiu sutilmente com o aumento das doses do FOM (Figuras 4 C, D). Por outro lado, um estudo identificou que a aplicação de até 6 t ha⁻¹ de lodo de esgoto não afetou a nodulação da soja ao longo de dois anos em um solo de Cerrado (SOUZA *et al.*, 2009).

Figura 8. Número de nódulos viáveis considerando a condução de duas plantas de soja por vaso conduzidas aos 60 DAP. Dados transformados via Box-Cox. Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si a 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

As plantas de soja tendem a nodular mais em condições de estresse nutricional; ou seja, no solo com menor fertilidade (LVd franco-argilo-arenoso) e nas menores doses do FOM. Na contramão desta observação, vem o fato de que mais N foi adicionado aos solos via FOM do que mineral (via MAP) [50 (dose = 100%) *versus* 22 kg N ha⁻¹]. Entretanto, a quantidade de N adicionada via fertilizante mineral está prontamente disponível enquanto que a maioria adicionada via FOM está na forma orgânica (oriunda do lodo de esgoto), sendo apenas gradualmente disponibilizada às plantas na medida em que ocorre o processo de mineralização (PARKER & SOMMERS, 1983; BOEIRA, 2004; KOMINKO *et al.*, 2017). A literatura sugere que plantas leguminosas tendem a formar menos nódulos radiculares quando o teor de N disponível no solo é elevado, a fim de reduzir gastos energéticos (VOISIN *et al.*, 2010; SATURNO *et al.*, 2012). Apesar de Co e Mo não terem sido adicionados à formulação do FOM, a dose de 100% contém aproximadamente 5,8 e 4,5 g ha⁻¹ destes elementos, respectivamente, a partir do lodo de esgoto, o que foi suficiente para não inibir a nodulação.

5.5 Análise química do tecido vegetal

5.5.1 Macronutrientes

Apesar de ambos os solos apresentarem baixa fertilidade, o acúmulo de macronutrientes na parte aérea das plantas de soja foi maior no solo LVd argiloso do que o solo LVd franco-argilo-arenoso, o que seria esperado diante de sua maior capacidade tampão e maiores teores de argila e matéria orgânica (Tabela 2). As diferenças entre os solos foram menos abruptas para o Ca e o Mg, provavelmente pelo fornecimento de altas concentrações destes elementos na forma de calagem. Como esperado, a adição de fertilizantes, tanto minerais como organominerais, aumentaram a absorção de macronutrientes em relação ao tratamento CT e, conseqüente, favoreceram todos os atributos fisiológicos relacionados ao desenvolvimento das plantas (Figuras 4, 6, 7, 8). Além disso, a forma física utilizada na formulação do FOM não influenciou a disponibilidade dos macronutrientes às plantas de soja.

De forma geral, os tratamentos minerais (M+S e M+M+S) apresentaram comportamentos semelhantes entre si quanto à absorção de macronutrientes. Eles também apresentaram comportamentos semelhantes aos FOM para os elementos N, Ca, Mg, e S, independentemente da dose utilizada. Em outras palavras, a dose do FOM pouco influenciou a absorção desses nutrientes, o que poderia ser explicado pelo fato do material orgânico envolvido na formulação (lodo de esgoto) dos FOMs apresentar altas concentrações de N e S e pela realização a priori da calagem dos solos, responsável pelo fornecimento de Ca e Mg em concentrações adequadas e iguais em todos os tratamentos.

Figura 9. Quantidade acumulada de nitrogênio (A, B), enxofre (C, D), cálcio (E, F) e magnésio (G, H) na parte aérea considerando duas plantas de soja por vaso aos 60 DAP. Dados normalizados via Box-cox. Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si a 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

Aparentemente, a absorção de N pelas plantas foi mais eficiente na presença dos FOMs do que dos minerais, principalmente nas maiores doses (100 e 120 %) (Figura 9 A, B). Isto deve-se ao fato de o N estar sendo liberado lentamente às plantas com o decorrer do processo de mineralização da fração orgânica do FOM, oriunda do lodo de esgoto. Desta forma, a formação de nódulos radiculares (Figura 8) e, conseqüentemente, a fixação biológica

de N (FBN) é menos afetada (ANGLE *et al.*, 1992; VIEIRA., 2001; CORRÊA *et al.*, 2008; CÂMARA, 2014). Os fertilizantes minerais apresentaram pior desempenho, principalmente no solo LVd argiloso, talvez pela adição de N via MAP (dose = 22 kg ha⁻¹) que causou efeito antagônico na nodulação e na FBN (GOSS *et al.*, 2002; HUNGRIA *et al.*, 2006; ZUFFO *et al.*, 2018).

O acúmulo de S nas plantas de soja não diferiu entre os tratamentos, independentemente da origem do fertilizante (mineral ou organomineral) ou da dose e forma física do FOM (Figura 9 C, D). Apesar da quantidade de gesso adicionada aos fertilizantes minerais (30 kg ha⁻¹) ser maior que aos FOMs (8 kg ha⁻¹, considerando a dose de 100%), aparentemente as plantas foram capazes de absorver S advindo do lodo. Além disso, a adição de FOMs pode ter estimulado a ação dos microrganismos envolvidos na oxidação do S a SO₄²⁻, processo este influenciado por diversos fatores, entre eles, pela adição de material orgânico (GERMIDA & JANZEN, 1993; SÍGOLO & PINHEIRO, 2010).

Conforme já mencionado, o acúmulo de Ca e Mg nas plantas foi semelhante entre os diferentes tratamentos e em ambos os solos (Figura 9 E, F, G, H). Isto deveu-se a realização prévia da prática da calagem, com a adição de calcário dolomítico em grandes quantidades em todos os tratamentos. Apesar do uso de gesso nos fertilizantes minerais e da presença de Ca e Mg no lodo de esgoto utilizado na produção dos FOMs, isso não refletiu em incrementos na absorção destes elementos pelas plantas de soja. Para o Mg, resultados semelhantes foram obtidos utilizando um FOM obtido a partir da cama de frango na cultura do milho (DA SILVA *et al.*, 2015). Os mesmos autores observaram que doses crescentes de FOM proporcionaram maiores acúmulos de Ca no milho, o que pode ser explicado pela não realização da calagem.

Figura 10. Quantidade acumulada de fósforo (A, B), potássio (C, D) na parte aérea considerando duas plantas de soja por vaso aos 60 DAP. Dados normalizados via Box-cox. Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si a 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

Em termos de acúmulo na planta, o K apresentou comportamento similar ao P (Figura 10). O maior acúmulo de P nas plantas crescidas no solo LVd argiloso deve-se ao seu menor teor no solo (3,3 *versus* 4,4 mg dm⁻³), resultando em maior resposta à adubação (Figura 10 A, B). Para fertilizantes com lenta liberação de P, característica atribuída aos FOM, foram obtidos resultados semelhantes (MACHADO *et al.*, 2012). Para este nutriente, a dose do FOM influenciou a sua absorção pela planta, sendo que a absorção de P foi maior nas maiores doses (Figura 10 A, B). Para ambos os solos, fica evidente que a dose de 40% do FOM gerou resultados inferiores em relação as adubações minerais convencionais. Resultados semelhantes foram obtidos para as culturas da cana-de-açúcar, milho e trigo, o que corrobora a ideia de que os FOMs são capazes de suprir as necessidades de P das culturas em doses equivalentes às utilizadas em fertilizantes minerais (TEIXEIRA *et al.*, 2014; ANTILLE *et al.*, 2017; MAGELA *et al.*, 2019). Apesar disto, a massa seca das raízes e das partes aéreas das plantas não foram afetadas pelo menor acúmulo de P nas menores doses do FOM. No entanto, o impacto da dose somente será adequadamente testado em condições de campo, em que a planta poderá completar seu ciclo.

O teor de K nas plantas aumentou com a dose do FOM, principalmente a partir da dose 60%, em que o acúmulo de K é semelhante ao dos tratamentos com fertilizantes minerais

(Figura 10 C, D). Vale destacar que o lodo de esgoto apresenta comumente baixos níveis de K (0,15-0,4%), sendo necessária sua complementação a partir de fontes minerais (HAYNES *et al.*, 2009), o que foi realizado neste trabalho. Apenas a dose de 40% do FOM foi inferior aos outros tratamentos. Aparentemente, as plantas foram capazes de absorver K advindo da fração orgânica do FOM em doses adequadas as necessidades das plantas a partir da dose de 60%. Novamente, em casa de vegetação, o acúmulo de K não traduziu em melhor desenvolvimento das plantas até 60 dias. A literatura mostra que as plantas absorvem mais eficientemente os nutrientes N, P e K quando adicionados na forma de FOM devido ao maior desenvolvimento do sistema radicular das plantas e à melhoria nas propriedades físico-químicas e biológicas do solo (DUARTE *et al.*, 2013; YADAV *et al.*, 2018). No nosso estudo, em casa de vegetação, esses benefícios não puderam ser categoricamente comprovados.

5.5.2 Micronutrientes

Similarmente aos macronutrientes, a absorção de micronutrientes pela soja aumentou com as adubações (em relação ao CT), tanto na forma mineral como organomineral e a forma física utilizada na formulação dos FOMs não influenciou de forma consistente a disponibilidade destes nutrientes às plantas (Figuras 11 e 12). O acúmulo de Fe e Mn na parte aérea das plantas de soja foi maior no solo LVd argiloso do que o solo LVd franco-argilo-arenoso, enquanto diferenças visíveis não foram observadas para o Cu e o Zn (Figura 11 A, B, C, D). Como os teores desses elementos (Cu e Zn) são maiores no solo LVd argiloso (Tabela 2), especula-se que o maior teor de matéria orgânica deste solo seria responsável pela complexação desses elementos, limitando sua absorção pelas plantas (LOPES, 1998; RESENDE, 2004).

Figura 11. Quantidade média de cobre (A, B), ferro (C, D), manganês (E, F) e zinco (G, H) acumulada na parte aérea das plantas de soja 60 DAP. Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si a 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

De maneira geral, os tratamentos minerais não diferiram dos organominerais quanto à absorção de Cu, Zn, Fe e Mn (Figura 11). Apesar de conter esses elementos em sua composição, principalmente altas concentrações de Zn, o uso do FOM nas diferentes doses testadas não representou em sua maior disponibilização às plantas. Similarmente, a aplicação

de resíduos orgânicos (esterco bovino e lodo de esgoto) em cereais mostrou que os teores de Cu, Mn e Zn foram semelhantes nas plantas, ou seja, estes nutrientes não foram facilmente disponibilizados às plantas (HAMNÉR & KIRCHMANN, 2015). VIEIRA *et al* (2004), estudando o uso de lodo de esgoto em plantas de soja, observaram que não houve diferenças nos teores de B, Mn, Fe, Zn e Cu acumulados nos grãos ao longo de dois anos de cultivo, corroborando com os resultados encontrados neste trabalho. Por último, a adição de sulfato de zinco no tratamento com fertilizante mineral e micronutrientes (M+M+S) não aumentou significativamente a absorção de Zn pelas plantas (Figura 11 C, D) em comparação aos tratamentos com FOMs, mesmo na dose de 40%. Portanto, a utilização de lodo de esgoto com alto teor de Zn na formulação do FOM pode ser fundamental no suprimento deste nutriente às plantas, principalmente em solos de Cerrado normalmente deficientes neste elemento. Apesar do teor de Zn no lodo estar muito próximo ao limite estabelecido pela legislação para uso agrícola (CONAMA 375/2006), o seu uso na formulação de FOM seria estratégia ideal para solução de problemas ambientais relacionados ao seu descarte em aterros sanitários e de problemas agrônômicos relacionados à baixa fertilidade natural de nossos solos. Neste caso, o teor de elementos metálicos tóxicos é diluído pela formulação e, naturalmente, pela menor dose de aplicação no solo em relação ao uso direto do lodo na agricultura.

Em plantas de café, o acúmulo de micronutrientes foram semelhantes nos tratamentos com fertilizantes organominerais (tanto sólido quanto líquido) e minerais (FERNANDES *et al.*, 2007). Em plantas de batata, o FOM advindo de cama de frango compostada mostrou ser uma interessante fonte de micronutrientes, proporcionando maior acúmulo de B, Cu, Fe, Mn e Zn do que o uso de fontes estritamente minerais (ALMEIDA *et al.*, 2018). Entretanto, os autores sugeriram que são necessárias pesquisas para compreender o efeito dos diferentes solos, clima e manejo sobre o uso de FOM e o fornecimento de micronutrientes às plantas.

O boro apresentou comportamento peculiar. As suas quantidades acumuladas no tecido vegetal das plantas de soja aumentaram com as doses do FOM, sendo este aumento mais acentuado no solo LVd argiloso (Figura 12). Isto pode ser explicado pela maior adição de material orgânico (lodo de esgoto) nas maiores doses do FOM e pelo maior teor de matéria orgânica no solo argiloso, uma vez que a fração orgânica é a principal fonte de B em solos (adicionar citação). Por outro lado, o tratamento com fertilizante mineral e micronutrientes (M+M+S) representou o maior teor acumulado de B no tecido vegetal das plantas, provavelmente devido a utilização de ácido bórico como fonte deste elemento (equivalente a 2 kg ha⁻¹). Apesar desta dose ser compatível com a necessidade da cultura, as plantas de soja

apresentaram sintomas de fitotoxicidade de B (Figura 13), o que poderia ser explicado pela sua pronta disponibilização no solo e pelo seu estreito limite entre deficiência e toxicidade, uma vez que os solos apresentaram teores médios deste elemento (Tabela 2). Sinais leves de toxidez também foram observados nas maiores doses do FOM (100% e 120%), mesmo sendo baixas as quantidades de B adicionadas (0,4 a 0,6 kg ha⁻¹). A adsorção de B na forma mineral (adubação mineral) foi maior que na forma orgânica (material oriundo de resíduo de destilação), sugerindo que o uso resíduos orgânicos pode favorecer o aumento de B na solução do solo e, conseqüentemente, maior absorção e acúmulo pelas plantas (DIANA *et al.*, 2010). Os autores destacam que não há consenso em relação a este efeito na literatura.

Figura 12. Quantidade média de boro acumulado na parte aérea das plantas de soja 60 DAP. Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si a 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

Figura 13. Sintomas de toxidez de boro nas plantas de soja no tratamento M+M+S.

O acúmulo de micronutrientes nas plantas de soja foram coerentes com a produção de massa seca de raízes e da parte aérea, não havendo diferenças entre os tratamentos, apenas com o controle. Ambas as fontes de fertilizantes, mineral e organomineral, não diferiram na produção de biomassa de plantas de soja. Aparentemente, a dose de 40% do FOM foi suficiente para suprir a necessidade nutricional das plantas de soja em relação aos micronutrientes, sendo que doses elevadas deste tipo de fertilizante, quando oriundo de lodo de esgoto, pode resultar em sintomas de toxidez de B, pelo menos nos estágios iniciais de desenvolvimento das plantas.

5.6 Análises microbiológicas dos solos

A respiração basal acumulada após 28 d foi pouco discrepante entre os solos, apenas levemente maior no solo LVd argiloso ($3,85 \text{ mg CO}_2 \text{ g}^{-1}$) do que no solo LVd franco-argilo-arenoso ($3,01 \text{ mg CO}_2 \text{ g}^{-1}$) (Figura 14). Esta relativa similaridade, apesar das diferenças texturais, deve-se ao fato de ambos os solos terem sido coletados de áreas com matas nativas, as quais apresentam condições favoráveis para o equilíbrio da comunidade microbiana nos solos (CARDOSO & ANDREOTE, 2016). Além disso, a forma física do FOM não influenciou a respiração basal dos solos, o que traduz a sua atividade microbiana.

A atividade microbiana dos solos foi avaliada na ausência de plantas (em estudo paralelo) e aumentou com a aplicação dos fertilizantes, principalmente nas maiores doses do FOM devido à maior contribuição da fração orgânica (ÖLINGER *et al.*, 1996), o que corrobora com os resultados da literatura (CHANG & TROFYMOW, 1996; RASTOGI *et al.*, 2002; SEVERINO *et al.*, 2005; SHINJO *et al.*, 2006; SORRENTI *et al.*, 2008; SILVA *et al.*,

2016; ALVES *et al.*, 2019). Em outras palavras, o uso de FOMs, principalmente nas doses > 60%, estimulou mais a atividade microbiana dos solos do que as adubações minerais convencionais, com (M+M+S) e sem (M+S) a adição dos micronutrientes B e Zn (Figura 14). CHERUBIN *et al.* (2015) observaram resultados semelhantes ao comparar o uso de fertilizante mineral e aplicação de dejetos líquidos de suínos em um Latossolo Vermelho, sob diferentes sistemas de manejo. BOEIRA *et al.* (2009) concluíram que a adição de lodo de esgoto, quando as doses são estabelecidas com base em critérios adequados, pode ser interessante fonte de matéria orgânica aos solos agrícolas de regiões tropicais, em que os teores de matéria orgânica são, de modo geral, baixos, pois melhoram a atividade microbiana dos solos.

Figura 14. Respiração basal dos solos acumulada após 28 dias de incubação.

Apesar dos incrementos na atividade microbiana dos solos na presença do FOM, principalmente nas maiores doses, isto não traduziu em incrementos na biomassa das plantas (Figuras 4, 6, 7, 8), ou seja, não houve aumento nas massas secas das partes aéreas e das raízes das plantas de soja; e nem em incrementos nos outros indicadores biológicos da qualidade do solo, tais como a biomassa microbiana (Figura 15) e atividades enzimáticas

(Figura 16). Estes indicadores foram avaliados na presença de plantas e, aparentemente, são as plantas que modulam a comunidade e a atividade microbiana dos solos (ANDREOTE *et al.*, 2014), podendo superar o efeito da adição de resíduos orgânicos na respiração basal dos solos e, desta forma, alavancando a atividade microbiana do solo. O fato dos valores do C-BM e das atividades enzimáticas do tratamento CT terem sido expressivos e próximos aos dos outros tratamentos corrobora para esta hipótese. Por outro lado, o tratamento CT produziu menor biomassa de plantas, o que se deve exclusivamente a aspectos relacionados ao estado nutricional das plantas; ou seja, o papel da microbiota do solo no desenvolvimento de plantas é secundário quando os nutrientes essenciais estão ausentes.

Figura 15. Carbono da biomassa microbiana (C-MB). Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si a 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

A textura do solo tende a influenciar a biomassa microbiana do solo mediante a aplicação de resíduos, tais com os biossólidos (LAMBAIS & CARMO, 2008). Neste trabalho, em média, os valores do C-BM foram similares entre os tratamentos e entre os solos (médias = 0,34 mg C g⁻¹ solo seco), provavelmente por serem coletados em matas nativas. De forma geral, o C-BM não foi influenciado pela aplicação de diferentes doses de FOM e nem pela sua formulação física. O menor valor do C-BM para o tratamento com fertilizante mineral e

micronutrientes (M+M+S), inclusive menor que o CT, no solo LVd argiloso pode estar associado a presença de B e Zn em concentrações tóxicas, capaz de afetar a comunidade microbiana do solo (VERA *et al.*, 2019; SULLIVAN & GADD, 2019). No entanto, esta explicação fica enfraquecida pelo fato do mesmo comportamento não ter sido observado no solo LVd argilo-franco-arenoso.

A atividade da urease foi em média semelhante em ambos os solos, nos diferentes tratamentos (média = $1,7 \mu\text{g N-NH}_4^+ \text{ g}^{-1} \text{ solo } 2 \text{ horas}^{-1}$), exceto para a adição da formulação granulada do FOM no solo LVd argilo-franco-arenoso. Esta mesma tendência não foi observada para o LVd franco-argilo-arenoso (Figura 16 A, B). As enzimas β -glucosidase (Figura 16 B, C) e fosfatase ácida (Figura 16 D, E) apresentaram comportamentos paralelos entre si. Ambas apresentaram atividade ligeiramente maior no solo LVd franco-argilo-arenoso (média = $26,3 \text{ versus } 21,8 \mu\text{g PNF kg}^{-1} \text{ solo hora}^{-1}$ para a β -glucosidase e média = $267,2 \text{ versus } 177,2 \mu\text{g PNF kg}^{-1} \text{ solo hora}^{-1}$ para a fosfatase ácida). Aparentemente, a aplicação de fertilizantes, tanto mineral como organomineral, não influenciou de forma consistente a atividade das enzimas estudadas.

Figura 16. Atividade das enzimas urease (A, B), fosfatase ácida (C, D) e β -glucosidase (E, F). Dados normalizados via Box-cox. Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si a 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

As enzimas avaliadas servem como importantes indicadores da qualidade e da atividade microbiana dos solos. No entanto, a eficiência destes estudos torna-se questionável

quando eles são incapazes de comprovar os efeitos dos tratamentos, como por exemplos: *i*) as relativamente altas atividades enzimáticas nos tratamentos controles não justificam a menor produção de biomassa de plantas neste tratamento e *ii*) atividades enzimáticas semelhantes não justificam a maior produção de biomassa de plantas no solo LVd argiloso. ARMENTA *et al* (2012) observaram aumento na atividade da urease e da fosfatase ácida e decréscimo na β -glucosidase com o aumento das doses aplicadas de lodo de esgoto ($18-36 \text{ t ha}^{-1}$); enquanto que TRANNIN *et al* (2007) observaram aumento nas atividades da urease e β -glucosidase e redução da fosfatase ácida utilizando doses similares de lodo de esgoto ($0-24 \text{ t ha}^{-1}$), ambos em milho. MORAIS & GATIBONI (2015) mostraram diferenças temporais nas atividades da β -glucosidase e da fosfatase ácida quando avaliaram o contraste entre um fertilizante mineral e outro organomineral (oriundo da cama de frango) na disponibilidade de P. Os autores concluíram que esse comportamento dinâmico se deve à quebra (“lise”) das células e a subsequente liberação de enzimas ao longo do tempo, as quais podem ser complexadas pela fração coloidal dos solos. Portanto, fica claro que esses resultados controversos se devem à sensibilidade desses indicadores biológicos aos mais diversos estímulos (DICK, 1984; BETTIOL *et al.*, 2006; CARNEIRO *et al.*, 2009; MAGGIERO *et al.*, 2011; FRAZÃO *et al.*, 2019).

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

- O uso de FOM em doses menores que a adubação mineral convencional, adicionada ou não de micronutrientes, é capaz de promover incrementos equivalentes no desenvolvimento vegetativo da soja aos 60 DAP. Portanto, o uso de lodo de esgoto como matriz orgânica para a formulação do FOM para uso na cultura da soja é uma alternativa agronomicamente viável para aproveitamento deste resíduo;
- Independente da dose, a absorção de macro e micronutrientes foi similar nos tratamentos com FOM e mineral, exceto para o P, K e B. Portanto, a eficiência das doses do FOM precisa ser testada em condições de campo, em que se pode chegar ao final do ciclo produtivo da cultura (soja);
- A relativa alta eficiência agrônômica do FOM nas menores doses (40 e 60%) se deve primariamente a fatores relacionados ao estado nutricional da planta favorecido pela presença de material orgânico oriundo do lodo de esgoto, sendo secundário o papel da microbiota do solo.
- O FOM estimulou a respiração basal do solo na ausência de plantas. No entanto, é a planta quem dita a atividade microbiana em solos agrícolas uma vez que a biomassa microbiana e a atividade enzimática dos solos (urease, β -glucosidase e fosfatase ácida) medidas aos 60 DAP foram semelhantes entre todos os tratamentos, inclusive o CT;
- Condições mais estressantes, como as encontradas no solo com menor fertilidade (LVd franco-argilo-arenoso), estimulam a nodulação das plantas e a atividade das enzimas fosfatase ácida e β -glucosidase como mecanismo compensatório para garantir da produtividade da cultura.
- A formulação física do FOM não influenciou a eficiência agrônômica, a absorção de nutrientes, ou a atividade microbiana dos solos;
- A adição de B no tratamento com fertilizante mineral, mesmo na dose recomendada à cultura, foi tóxico às plantas de soja;
- O uso de FOM em doses mais elevadas tende a diminuir a nodulação da soja, principalmente em solos com menor fertilidade;
- Apesar da alta concentração de Zn no lodo de esgoto, este elemento não foi tóxico às plantas e nem a microbiota do solo quando formulado na forma de FOM, além de ser um micronutriente essencial à planta, usualmente deficiente em solos de Cerrado.

Portanto, esse resíduo orgânico merece um destino mais nobre que os aterros sanitários.

REFERÊNCIAS

- ALCARDE, J. C. (2009). **Manual de Análise de Fertilizantes**. Fundação de Estudos Agrários Luiz de Queiroz, Piracicaba - SP.
- ALMEIDA, Leandro da Silva, *et al.* Accumulation and export of micronutrients in potato fertilized with organic-mineral fertilizer. *Biosci. j.(Online)*, 2018, 34.6 Supplement 1: 71-80.
- 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**, New York, v.40, n.3, p.44-52, 2015.
- ALVES, P. R. L., Estrada-Bonilla, G. A., Bini, D., & Cardoso, E. J. B. N. (2019). Changes in the Microbial Metabolism of Agricultural Tropical Soils Amended with Sugarcane Vinasses. *Sugar Tech*, 21(2), 364-369.
- ANDREOTE, F. D.; GUMIERE, T.; DURRER, A. Exploring interactions of plant microbiomes. *Sci. agric. (Piracicaba, Braz.)*, Piracicaba. v. 71, n. 6, p. 528-539, Dec. 2014. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S010390162014000600013&lng=en&nrm=iso.> Acesso em: 04 abr 2019. <http://dx.doi.org/10.1590/0103-9016-2014-0195>.
- ANGLE, J. S.; MADARIAGA, G. M.; HEGER, E. A. Sewage sludge effects on growth and nitrogen fixation of soybean. *Agriculture, ecosystems & environment*, 1992, 41.3-4: 231-239.
- ANTILLE, D. L., et al. Field-scale evaluation of biosolids-derived organomineral fertilizers applied to winter wheat in England. *Agronomy Journal*, 2017, 109.2: 654-674.
- ARAUJO, F. F. D.; CARMONA GIL, F.; TIRITAN, C. S. Lodo de esgoto na fertilidade do solo, na nutrição de *Brachiaria decumbens* e na atividade da desidrogenase. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 39, n. 1, 2009. ISSN 1517-6398
- ARMENTA, R., et al. Microbiological and biochemical properties of an agricultural Mexican soil amended with sewage sludge. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 2012, 36.5: 1646-1655.
- AYENI, L. S., et al. Comparative effect of organic, organomineral and mineral fertilizers on soil properties, nutrient uptake, growth and yield of maize (*Zea mays*). *International Research Journal of Agricultural Science and Soil Science*, 2012, 2.11: 493-497.
- BALOTA, E. L., et al. Enzimas e seu papel na qualidade do solo. *Tópicos em Ciência do Solo, Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo*, 2013, 8: 189-249.
- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução CONAMA nº 375. Define critérios e procedimentos para o uso agrícola de lodos de esgoto gerados em estações de tratamento de esgoto sanitário e seus produtos derivados. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, n. 167, p. 141-146, 30 ago 2006.
- _____. Instrução Normativa n. 25, de 23 de julho de 2009. Normas sobre as especificações, as garantias, as tolerâncias, o registro, a embalagem e a rotulagem dos fertilizantes orgânicos simples, mistos, compostos, organominerais e biofertilizantes destinados à agricultura. Diário

Oficial [da] República Federativa do Brasil, Brasília, 28 jul. 2009. Disponível em: <<http://extranet.agricultura.gov.br/sislegisconsulta/consultarLegislacao.do?operacao=visualizar&id=20542>>. Acesso em: 18 de set. 2017.

_____. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Manual de métodos analíticos oficiais para fertilizantes e corretivos / Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Secretaria de Defesa Agropecuária. – Brasília: MAPA, 2017. 240 p.

BENITES, V. D. M., CORREA, J., MENEZES, J., & POLIDORO, J. **Produção de fertilizante organomineral granulado a partir de dejetos de suínos e aves no Brasil**. In Embrapa Solos-Artigo em anais de congresso (ALICE). REUNIÃO BRASILEIRA DE FERTILIDADE DO SOLO E NUTRIÇÃO DE PLANTAS, 29.; REUNIÃO BRASILEIRA SOBRE MICORRIZAS, 13.; SIMPÓSIO BRASILEIRO DE MICROBIOLOGIA DO SOLO, 11.; REUNIÃO BRASILEIRA DE BIOLOGIA DO SOLO, 8., 2010, Guarapari. Fontes de nutrientes e produção agrícola: modelando o futuro: anais. Viçosa: SBCS, 2010.

BENEDITO, D, S, et al. Eficiência agronômica de compostos organominerais obtidos pelo Processo Humifert. *Bragantia*, 2010, 69.1.

BERTON, R. S.; NOGUEIRA, T. A. R. Uso de lodo de esgoto na agricultura. In: COSCIONE, A. R.; NOGUEIRA, T. A. R.; PIRES, A. M. M. (Org.). **Uso agrícola de lodo de esgoto**. Botucatu: FEPAF, 2010. p. 31-50.

BETTIOL, W.; DE CAMARGO, O. A. Lodo de esgoto: impactos ambientais na agricultura. **Embrapa Meio Ambiente-Livros científicos (ALICE)**, 2006.

BETTIOL, W.; FERNANDES, S. A. P.; CERRI, C. C. Efeito do lodo de esgoto na atividade microbiana do solo. *Embrapa Meio Ambiente-Capítulo em livro científico (ALICE)*, 2006.

BOEIRA, R. C. Uso de lodo de esgoto como fertilizante orgânico: disponibilização de nitrogênio em solo tropical. *Embrapa Meio Ambiente-Comunicado Técnico (INFOTECA-E)*, 2004.

BOEIRA, R. C.; LIGO, MAV; MAXIMILIANO, VCB. Emissão de C-CO₂ em solo tropical suplementado com lodo de esgoto. In: *Embrapa Meio Ambiente-Artigo em anais de congresso (ALICE)*. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGRONOMIA, 26., 2009, Gramado. Agricultura forte: alimento, energia e meio ambiente. Gramado: CONFAEAB: SARGS, 2009. 1 CD-ROM., 2009.

BREMNER, J. M; MULVANEY, R. L (1978) Urease activity in soil. In: Burns RG (ed) Soil enzymes. Academic Press, London, pp 149–196.

CALDWELL, B. A. Enzyme activities as a component of soil biodiversity: a review. *Pedobiologia*, 2005, 49.6: 637-644.

CÂMARA, G. M. S. Fixação biológica de nitrogênio em soja. *Informações Agronômicas*, Piracicaba, v. 147, p. 1-9, 2014.

CÂMARA, G.M.S. Adubação. Soja: do plantio à colheita. / editores Tuneo Sedyama, Felipe Silva, Aluízio Borém. – Viçosa, MG: Ed. UFV, p. 110-148. 2015.

CAMARGO, O. D.; BETTIOL, W. Agricultura: opção animadora para a utilização de lodo de esgoto. **Revista O Agrônomo**, v. 52, n. 2/3, p. 13-16, 2000.

CARDOSO, E. J. B. N.; ANDREOTE, F. D. Microbiologia do solo. [S.l: s.n.], 2016. Disponível em: DOI: 10.11606/9788586481567.

CARNEIRO FILHO, A.; COSTA, K. **A expansão da soja no Cerrado: Caminhos para a ocupação territorial, uso do solo e produção sustentável**, 2016.

CARNEIRO, M. A. C, et al. Atributos físicos, químicos e biológicos de solo de cerrado sob diferentes sistemas de uso e manejo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 2009, 33.1

CARVALHO, E. R., et al. Fertilizante mineral e resíduo orgânico sobre características agrônômicas da soja e nutrientes no solo. **Rev. Ciênc. Agron.**, Fortaleza, v. 42, n. 4, p. 930-939, Dec. 2011. Disponível em:

<http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S180666902011000400015&lng=en&nrm=iso>. Acesso em: 26 Jun. 2019.

<http://dx.doi.org/10.1590/S180666902011000400015>.

CETESB. Valores orientadores para solo e água subterrânea no estado de SP. Companhia Ambiental do Estado de São Paulo, São Paulo, 2014.

CHANG, S. X.; TROFYMOW, J. A. Microbial respiration and biomass (substrate-induced respiration) in soils of old-growth and regenerating forests on northern Vancouver Island, British Columbia. *Biology and fertility of soils*, 1996, 23.2: 145-152.

CHIARADIA, J. J. *et al.* Produtividade e nutrição de mamona cultivada em área de reforma de canal tratado com lodo de esgoto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, n. 3, 2009. ISSN 0100-0683.

CHERUBIN, M. R., et al. Qualidade física, química e biológica de um Latossolo com diferentes manejos e fertilizantes. *Revista Brasileira de Ciência do solo*, 2015, 39.2.

CONAB. COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. Perspectivas para a Agropecuária. Volume 6. Safra 2018/2019: Brasília: Companhia Nacional de Abastecimento. 2018a. Disponível em: <<https://www.conab.gov.br/perspectivas-para-a-agropecuaria>> . Acesso em: 27 nov 2018.

CONAB. COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. Safras 2018b. Disponível em: <<https://portaldeinformacoes.conab.gov.br/index.php/safra-evolucao-dashboard>> Acesso em: 11 set. 2018.

COUTO, F. M. M. D. Fungemia e ação antifúngica e antitumoral de isoflavonas da soja e hidroxipiridonas. 2016.

CORRÊA, J. C., et al. Aplicação superficial de escória, lama cal, lodos de esgoto e calcário na cultura da soja. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 2008, 1209-1219.

CRUSCIOL, C., et al. Desenvolvimento radicular e aéreo, nutrição e eficiência de absorção de macronutrientes e zinco por cultivares de arroz de terras altas afetadas pela adubação fosfatada. *Semina: Ciências Agrárias*, 2013, 2061-2076

CUNHA, T. J. F.; MENDES, A. M. S.; GIONGO, V. **Matéria orgânica do solo**. In: NUNES, R. R.; REZENDE, M. O. O. (Org.). Recurso solo: propriedades e usos. São Carlos: Cubo, 2015. cap. 9, p. 273-293.

DA SILVA, E. E.; DE AZEVEDO, P. H. S.; DE-POLLI, Helvécio. Determinação da respiração basal (RBS) e quociente metabólico do solo (qCO₂). *Embrapa Agrobiologia-Comunicado Técnico (INFOTECA-E)*, 2007

DA SILVA, F. C. *et al.* Cana-de-açúcar cultivada em solo adubado com lodo de esgoto: nutrientes, metais pesados e produtividade. **Pesquisa agropecuária brasileira**, v. 33, n. 1, p. 1-8, 1998. ISSN 1678-3921

DA SILVA, H. P. *et al.* Qualidade física de sementes de girassol produzido sob doses de lodo de esgoto. **Revista Verde** (Mossoró–RN–Brasil), v. 5, n. 1, p. 01-06, 2010.

DA SILVA, R. F., *et al.* Alterações na biomassa microbiana do solo adubado com vinhaça e cultivado com adubos verdes. In: *Embrapa Agropecuária Oeste-Artigo em anais de congresso (ALICE)*. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 35., 2015, Natal. O solo e suas múltiplas funções: anais. Natal: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2015., 2015.

DE ARAÚJO, A. S. F.; MONTEIRO, R. T. R. Indicadores biológicos de qualidade do solo. *Bioscience Journal*, 2007, 23.3.

DE MARIA, I.C.; KOCSSI, M. A.; DECHEN, S.C.F. Agregação do solo em área que recebeu lodo de esgoto. *Bragantia*, Campinas, v. 66, n.2 p. 291-298, 2007.

DIANA, G.; BENI, C.; MARCONI, S. Comparison of adsorption isotherm equations to describe boron behavior in soils affected by organic and mineral fertilization. *Communications in soil science and plant analysis*, 2010, 41.9: 1112-1128.

DICK, W. A. Influence of Long-Term Tillage and Crop Rotation Combinations on Soil Enzyme Activities 1. *Soil Science Society of America Journal*, 1984, 48.3: 569-574.

DIONÍSIO, J. A; PIMENTEL, I. C; SIGNOR, D; PAULA, A. M. de; MACEDA, A; MATTANA, A. L. Guia prático de biologia do solo. I. SBCS, organizador. Curitiba; 2016.

DOS REIS, A. R.; RODAK. A.R.; PUTTI, F.F.; DE MORAES, M.F. Papel fisiológico do níquel: essencialidade e toxidez em plantas. IPNI. 2014

DOTANIYA, M. L.; APARNA, K; DOTANIYA, C. K; SINGH, M; REGAR, K. L Chapter 33 - Role of Soil Enzymes in Sustainable Crop Production, Editor(s): Mohammed Kuddus, *Enzymes in Food Biotechnology*, Academic Press, 2019, Pages 569-589, ISBN 9780128132807, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813280-7.00033-5>.

EIVAZI, F.; TABATABAI, M. A. Glucosidases and galactosidases in soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 1988, 20.5: 601-606.

EMBRAPA. Visão 2030: o futuro da agricultura brasileira. – Brasília, DF: Embrapa, 2018. 212 p.: il. color.; 18,5 cm x 25,5 cm. ISBN 978-85- 7035-799-1.

FAGERIA, N. K; MOREIRA, A. The role of mineral nutrition on root growth of crop plants. *Advances in Agronomy*, New York, v. 110, n. 1, p. 251-331, 2011.

FAQUIN, V. *Nutrição Mineral de Plantas*. Lavras-MG: Universidade Federal de Lavras/FAEPE, 2005. 186 p.

FERNANDES, A. L. T, et al. Avaliação do uso de fertilizantes organominerais e químicos na fertirrigação do cafeeiro irrigado por gotejamento. 2007.

FERREIRA, D.F. Análises estatísticas por meio do Sisvar para Windows versão 4.0. In... REUNIÃO ANUAL DA REGIÃO BRASILEIRA DA SOCIEDADE INTERNACIONAL DE BIOMETRIA, 45, 2000. Anais... São Carlos, SP: SIB, p. 255-258, 2000.

FRAZÃO, J. J, et al. Agronomic effectiveness of a granular poultry litter-derived organomineral phosphate fertilizer in tropical soils: Soil phosphorus fractionation and plant responses. *Geoderma*, 2019, 337: 582-593.

GERMIDA, J. J.; JANZEN, H. H. Factors affecting the oxidation of elemental sulfur in soils. *Fertilizer research*, 1993, 35.1-2: 101-114.

GOSS, M. J., et al. N₂ fixation by soybeans grown with different levels of mineral nitrogen, and the fertilizer replacement value for a following crop. *Canadian journal of soil science*, 2002, 82.2: 139-145.

GURGEL, M. N. do A. et al. Technology for sugarcane agroindustry waste reuse as granulated organomineral fertilizer. **Eng. Agríc.**, Jaboticabal, v. 35, n. 1, p. 63-75, Feb. 2015. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S010069162015000100063&lng=en&nrm=iso>. Acesso em: 03 de jun. 2019. <http://dx.doi.org/10.1590/1809-4430Eng.Agric.v35n1p63-75/2015>.

HAMMER, O.; D.A.T. HARPER & P.D. RYAN. 2001. PAST: Paleontological Statistic software package for education and data analysis. *Paleontologia Eletrônica* 4 (1): 1-9. http://palaeoelectronica.org/2001_1/past/issue1_01.htm

HAMNÉR, K.; KIRCHMANN, H. Trace element concentrations in cereal grain of long-term field trials with organic fertilizer in Sweden. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2015, 103.3: 347-358.

HANSEL, F. D.; OLIVEIRA, M. L. Importância dos micronutrientes na cultura da soja no Brasil. *Informações Agronômicas – IPNI*, v. 153, 2016.

HAYNES, R. J.; MURTAZA, Ghulam; NAIDU, Ravi. Inorganic and organic constituents and contaminants of biosolids: implications for land application. *Advances in agronomy*, 2009, 104: 165-267.

HUNGRIA, M., et al. Nitrogen nutrition of soybean in Brazil: contributions of biological N₂ fixation and N fertilizer to grain yield. *Canadian Journal of Plant Science*, 2006, 86.4: 927-939.

IMEA. Instituto Mato-grossense de Economia Agropecuária. Custo de produção da soja – Safra 2019/20. Disponível em: <

http://www.imea.com.br/upload/publicacoes/arquivos/R410_CPMensal_Soja_Out_18.pdf>

Acesso em: 6 de dez. de 2018.

IPEA. (2012). Diagnóstico dos Resíduos Sólidos Urbanos. Relatório de Pesquisa. Disponível em<http://www.ipea.gov.br/agencia/images/stories/PDFs/relatoriopesquisa/121009_relatorio_residuos_solidos_urbanos.pdf>. Acesso em: 9 set. 2018.

JENKINSON D. S, LADD, J. N (1981) Microbial biomass in soil: measurement and turnover. In: Paul EA, Ladd JM (eds) Soil biochemistry, vol 5. Decker, New York, pp 415–471

KIEHL, E. J. **Fertilizantes Organominerais**. Piracicaba: Editora Degaspari, 2008. 148 p.

KIEHL, E. J. **Novo fertilizantes orgânicos**. 1 ed. Edição do autor. Piracicaba/SP, 2010.

KULIKOWSKA, D. Kinetics of organic matter removal and humification progress during sewage sludge composting. **Waste Management**, v. 49, p. 196-203, 2016.

KOMINKO, H.; GORAZDA, K.; WZOREK, Z. The Possibility of Organo-Mineral Fertilizer Production from Sewage Sludge. [Waste and Biomass Valorization](#), p. 1-11, 2017.

LAMBAIS, M. R; CARMO, J. B do. Impactos da aplicação de biossólidos na microbiota de solos tropicais. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 2008, 32.3: 1129-1138.

LANNA, N. B. L et al. Residual effect of organic fertilization on radish production. **Hortic. Bras.**, Vitoria da Conquista, v. 36, n. 1, p. 47-53, Mar. 2018. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S010205362018000100047&lng=en&nrm=iso>. Acesso em: 10 de mai. 2019. <http://dx.doi.org/10.1590/s0102-053620180108>.

LANDAU, E. C.; MOURA, L. Variação geográfica do saneamento básico no Brasil em 2010: domicílios urbanos e rurais. 1. ed. Brasília-DF: Embrapa, 2016. 975p.

LISBOA, B. B., et al. Indicadores microbianos de qualidade do solo em diferentes sistemas de manejo. *Revista brasileira de ciência do solo. Viçosa. Vol. 36, n. 1 (jan./fev. 2012), p. 33-44*, 2012. Matéria orgânica e estímulo da atividade microbiana

LOPES, A. S. Manual internacional de fertilidade do solo. *Piracicaba: Potafos*, 1998, 79-85.

LYNCH, D. H. Nutrient cycling and soil health in organic cropping systems-Importance of management strategies and soil resilience. *Sustainable Agriculture Research*, v. 4, n. 526-2016-37939, 2015.

MACHADO, V. J.; DE SOUZA, C. H. E. Disponibilidade de fósforo em solos com diferentes texturas após aplicação de doses crescentes de fosfato monoamônico de liberação lenta. *Bioscience Journal*, 2012, 28.1.

MAGELA, M. L. M.; CAMARGO, R.; LANA, R. M. Q. ; MIRANDA, M. C. C. ; MOTA, R. P. . Efficacy of organomineral fertilizers derived from biosolid or filter cake on early maize development. *AUSTRALIAN JOURNAL OF CROP SCIENCE (ONLINE)*, v. 13, p. 662, 2019.

MAGIERO, E. C., et al. Carbono e nitrogênio da biomassa microbiana, atividade de urease e emissão de N₂O com aplicação de esterco e urina de ovinos. In: *Embrapa Agropecuária*

Oeste-Artigo em anais de congresso (ALICE). In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 33., 2011, Uberlândia. Solos nos biomas brasileiros: sustentabilidade e mudanças climáticas: anais. [Uberlândia]: SBSC: UFU, ICIAG, 2011. 1 CD-ROM., 2011

MAKINDE, E. A.; AYENI, L. S.; OJENIYI, S. O. Effects of Organic, Organomineral and NPK Fertilizer Treatments on The Nutrient Uptake of *Amaranthus Cruentus* (L) on Two Soil Types in Lagos, Nigeria. *Journal of Central European Agriculture*, 2011, 12.1: 114-123.

MALAQUIAS, C. A. A.; SANTOS, A. J. M. Adubação organomineral e NPK na cultura do milho (*Zea mays* L.). *PUBVET*, 2016, 11: 424-537.

MALAVOLTA, E. **ABC da adubação**. São Paulo: Ceres, 1989. 250p.

MALAVOLTA, E.; MORAES, M. F. **Níquel - de tóxico a essencial**. IPNI, 2007.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G.C.; OLIVEIRA, S.A. de. Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações. Piracicaba: Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fósforo, 1989. 201p.

MARIANO, S. C. et al. Qualidade no desenvolvimento fisiológico da soja sob efeito da adubação química e orgânica. Anais da XI SEAGRO, Agronomia, FAG. 2017

MARQUES, R. F. D. P. V. Impactos ambientais da disposição de resíduos sólidos urbanos no solo e na água superficial em três municípios de Minas Gerais. 2014.

MUCELIN, C. A.; BELLINI, M. Lixo e impactos ambientais perceptíveis no ecossistema urbano. **Sociedade & natureza**, v. 20, n. 1, p. 111-124, 2008. ISSN 0103-1570.

MUMBACH, G. L. Eficiência agrônômica de fertilizante organomineral à base de cama aviária e fósforo monoamônio. 2017. 94 p. Dissertação (Mestrado) - Universidade do Estado de Santa Catarina, Lages, SC.

MORAES, E. R. de. Aplicação De Fertilizante Organomineral De Lodo De Esgoto E Bioestimulante Na Cana-De-Açúcar. 2017. 84 f. Tese (Doutorado em Agronomia) - Universidade Federal de Uberlândia, 2017.

MORAIS, F. A.; GATIBONI, L. C. Phosphorus availability and microbial immobilization in a Nitisol with the application of mineral and organo-mineral fertilizers. **An. Acad. Bras. Ciênc.**, Rio de Janeiro, v. 87, n. 4, p. 2289-2299, Dec. 2015. Disponível em <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S000137652015000502289&lng=en&nrm=iso>. Acesso em: 25 jun 2019. Epub Nov 27, 2015. <http://dx.doi.org/10.1590/00013765201520140008>.

MORAIS, P. P. P & BORÉM, A. Cultivares transgênicos. In: SEDIYAMA, T.; SILVA, F.; BORÉM, A. Soja: do plantio à colheita. **Viçosa: UFV**, 2015. cap 7, p 168-191.

NOGUEIRA, M. A; HUNGRIA, M. Indicadores microbiológicos da qualidade do solo. In: *Embrapa Soja-Artigo em anais de congresso (ALICE)*. In: REUNIÃO PARANAENSE DE CIÊNCIA DO SOLO, 3., Londrina. Sistemas conservacionistas de produção e sua interação com a Ciência do Solo: resumos. Londrina: IAPAR, 2013. p. 539-544., 2013.

O'HARA, G. W. Nutritional constraints on root nodule bacteria affecting symbiotic nitrogen fixation: a review. *Australian Journal of Experimental Agriculture*, 2001, 41.3: 417-433.

ÖLINGER, R., et al. Soil respiration. In: *Methods in Soil Biology*. Springer, Berlin, Heidelberg, 1996. p. 93-110.

OLIVEIRA, F. A. de. *et al.* Fertilidade do solo e nutrição da soja. **Londrina: Embrapa Soja**, Circular Técnica, v. 50, 2007.

OLIVEIRA, D. P. Fontes de matéria orgânica para a formulação de fertilizantes organominerais peletizados no desenvolvimento da cultura do sorgo. 2016.

PARKER, C. F.; SOMMERS, L. E. Mineralization of Nitrogen in Sewage Sludges 1. *Journal of Environmental Quality*, 1983, 12.1: 150-156.

PINHEIRO, C. H. R. **Zn, Ni, Cr, Cu, Fe e S em Iodo de esgoto: comportamento químico, adsorção e proposta de tratamento**. 2008. Tese (Doutorado em Geoquímica e Geotectônica) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008. doi:10.11606/T.44.2008.tde-15052008-153050. Acesso em: 2019-01-03.

PRADO, Marcelo RV, et al. Liquid organomineral fertilizer containing humic substances on soybean grown under water stress. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 2016, 20.5: 408-414.

PRIMAVESI, A. **Manejo ecológico do solo: a agricultura em regiões tropicais**. NBL Editora, 2002. ISBN 8521300042.

QUERCI, M. & MAZZARA, M. Characteristics of Roundup Ready™ Soybean, MON810 maize and Bt-176 maize. In M. Querci, M. Jermini & G. V. Eede Den (Eds.), *The analysis of food samples for the presence of genetically modified organisms* (pp. 1116). Luxemburg: **European Commission Joint Research Centre**, 2006.

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

RAIJ, B. van; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A.; FURLANI, A. M. C., eds., **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. 2 ed. rev. atual. Campinas: Instituto Agrônomo de Campinas/Fundação IAC, 1997. 285p. (Boletim Técnico, 100).

RAHEEM, A. *et al.* Opportunities and challenges in sustainable treatment and resource reuse of sewage sludge: A review. **Chemical Engineering Journal**, 2017.

RASTOGI, M., SINGH, S., & PATHAK, H. (2002). Emission of carbon dioxide from soil. *Current science*, 82(5), 510-517.

RESENDE, A. V. de. Adubação da soja em áreas de cerrado: micronutrientes. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2004. 29 p. (Embrapa Cerrados. Documentos, 115).

RESENDE, A. V. de. Micronutrientes na agricultura brasileira: disponibilidade, utilização e perspectivas. **Série Estudos e Documentos**. Coletânea Fertilizantes, 9. Centro de Tecnologia Mineral – Ministério da Ciência e Tecnologia, 2005. 37p.

RODRIGUES, C. *et al.* Avaliação do lodo de esgoto, vermicomposto e palha-de-café, na composição de substratos para a formação de mudas de cafeeiro (*Coffea arabica* L.) em sacolas de polietileno. Trabalho apresentado no Simpósio de Pesquisa dos Cafés do Brasil (2: 2001: Vitória, ES). Resumos. Brasília, D.F.: Embrapa Café, 2001. 181p.: il.

SA, J. M. et al. Agronomic and P recovery efficiency of organomineral phosphate fertilizer from poultry litter in sandy and clayey soils. **Pesq. agropec. bras.**, Brasília, v. 52, n. 9, p. 786-793, 2017. Disponível em <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100204X2017000900786&lng=en&nrm=iso>. Acesso em: 26 jun. de 2019. <http://dx.doi.org/10.1590/s0100204x2017000900011>.

SATURNO, D. F., et al. Efeito do N-mineral sobre a fixação biológica de nitrogênio em soja: I. Cultivares com hábito de crescimento indeterminado. In: *Embrapa Soja-Artigo em anais de congresso (ALICE)*. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE FERTILIDADE DO SOLO E NUTRIÇÃO DE PLANTAS, 30.; REUNIÃO BRASILEIRA SOBRE MICORRIZAS, 14.; SIMPÓSIO BRASILEIRO DE MICROBIOLOGIA DO SOLO, 12.; REUNIÃO BRASILEIRA DE BIOLOGIA DO SOLO, 9.; SIMPÓSIO SOBRE SELÊNIO NO BRASIL, 1., 2012, Maceió. A responsabilidade socioambiental da pesquisa agrícola: anais. Viçosa: SBCS, 2012. 4 p. Trab. 2081., 2012

SCHLOTTER, M. *et al.* Microbial indicators for soil quality. **Biology and Fertility of Soils**, v. 54, n. 1, p. 1-10, 2018.

SFREDO, G. J. & BORKERT, C.M. Deficiência e toxicidades de nutrientes em plantas de soja: Descrição dos sintomas e ilustração com fotos. Londrina, Embrapa, 2004. 44p. (Documentos, 231)

SFREDO, G. J & DE OLIVEIRA, M. C. N. Soja: molibdênio e cobalto. *Embrapa Soja-Documentos (INFOTECA-E)*, 2010.

SEDIYAMA, T.; SILVA, F.; BORÉM, A. Soja: do plantio à colheita. **Viçosa: UFV**, 2015.

SEVERINO, L. S., et al. (2005). Mineralização da torta de mamona, esterco bovino e bagaço de cana estimada pela respiração microbiana. *Revista de Biologia e Ciências da Terra*, 5 (1), 0.

SÍGOLO, J. B.; PINHEIRO, C. H. R. Lodo de esgoto da ETE Barueri-SP: Proveniência do enxofre elementar e correlações com metais pesados associados. *Geologia USP. Série Científica*, 2010, 10.1: 39-51.

SILVA, F. C. **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes**. - Brasília, DF: Embrapa, 2009.

SILVA, K. C., et al. Respiração basal do solo submetida a doses crescentes de composto orgânico. *Revista Univap*, 2016, 22.40: 85.

SINGH, R. P.; AGRAWAL, Manindra. Potential benefits and risks of land application of sewage sludge. *Waste management*, 2008, 28.2: 347-358.

SHINJO, H., et al. (2006). Carbon dioxide emission derived from soil organic matter decomposition and root respiration in Japanese forests under different ecological conditions. *Soil science and plant nutrition*, 52(2), 233-242.

SINGH, J. S.; GUPTA, V. K.. Soil microbial biomass: a key soil driver in management of ecosystem functioning. *Science of The Total Environment*, 2018, 634: 497-500.

SOFIATTI, V. *et al.* Cinza de madeira e lodo de esgoto como fonte de nutrientes para o crescimento do algodoeiro. **Embrapa Algodão-Artigo em periódico indexado (ALICE)**, 2007.

SOMMERS, L. E., NELSON, D. W.; YOST, K. J. 1976. Variable Nature of Chemical Composition of Sewage Sludges1. *J. Environ. Qual.* 5:303-306. doi:10.2134/jeq1976.00472425000500030017x

SORRENTI, G. B. et al. Influência da adubação orgânica no crescimento de tangerineira cv Clemenules e nos atributos químicos e microbiológicos do solo. **Rev. Bras. Frutic.**, Jaboticabal, v. 30, n. 4, p. 1129-1135, Dec. 2008. Disponível em <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S010029452008000400047&lng=en&nrm=iso>. Acesso em: 24 de jun. 2019. <http://dx.doi.org/10.1590/S010029452008000400047>.

SUBRAMANIAN, S., et al. Impact of Organic Manure and Inorganic Fertiliser on Soil Enzymatic Activity and Microbial Diversity in the States of Tamil Nadu and Madhya Pradesh, India. *Malaysian Journal of Soil Science*, 2016, 20: 147-162.

SULLIVAN, T. S, GADD, G, M. Chapter Three - Metal bioavailability and the soil microbiome. *Advances in Agronomy*, Academic Press, v 155, 2019, p 79-120, ISSN 0065-2113, ISBN 9780128174081, <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2019.01.004>.

TABATABAI, M. Ali. Soil enzymes. *Encyclopedia of Agrochemicals*, 2003.

TRATA BRASIL, Relatório ranking do saneamento Instituto Trata Brasil, 2018. Disponível em <<http://www.tratabrasil.org.br/images/estudos/itb/ranking-2018/realatorio-completo.pdf>>. Acesso em: 10 jan. 2019.

TRANNIN, I. C. de B.; SIQUEIRA, J. O.; MOREIRA, F. M. de S. Características biológicas do solo indicadoras de qualidade após dois anos de aplicação de bio sólido industrial e cultivo de milho. **Rev. Bras. Ciênc. Solo**, Viçosa, v. 31, n. 5, p. 1173-1184, Oct. 2007. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S010006832007000500032&lng=en&nrm=iso>. Acesso em: 25 Jun 2019. <http://dx.doi.org/10.1590/S010006832007000500032>.

TEIXEIRA, W. G.; DE SOUSA, R. T. X.; KORNDÖRFER, G. H. Resposta da cana-de-açúcar a doses de fósforo fornecidas por fertilizante organomineral. *Bioscience Journal*, 2014, 30.6.

TSUTIYA, M. T. Alternativas de disposição final de biossólidos gerados em estações de tratamento de esgotos. In: BETTIOL, W; CAMARGO, O. A. **Impacto ambiental do uso agrícola do lodo de esgoto**. Embrapa, 2000. 312 p.

TYAGI, V. K.; LO, S. Sludge: A waste or renewable source of energy and resources recovery? *Renew. Sust. Energ. Rev.*, v. 25, p. 708-728, 2013.

UE - UNIÃO EUROPÉIA UE. Conselho da União Europeia. (1999) Directiva 1999/31/EC - Relativa à deposição de resíduos em aterros, 26 de abril de 1999.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY - USEPA. Title 40 CFR – Part 503. Final rules: Standards for the use or disposal of sewage sludge. *Federal Register*, 58:9387-9415, 1993.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY – USEPA. **Microwave assisted acid digestion of sediments, sludges, soils and oils**. (Technical Resource Document, EPA SW-846/3052). Disponível em: <<http://www.epa.gov/epaoswer/hazwaste/test/pdfs/3052.pdf>>. Acesso em 21 nov. 2018.

USDA – UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE. Disponível em <<http://www.usda.gov>> Acesso em: 12 set. 2018.

UTOBO, E. B.; TEWARI, L. Soil enzymes as bioindicators of soil ecosystem status. *Applied ecology and environmental research*, 2015, 13.1: 147-169.

VEGA, F. V. A. et al. Lodo de esgoto e sistema radicular da pupunheira. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 29, n. 2, 2005. ISSN 0100-0683.

VERA, A., et al. Boron in soil: The impacts on the biomass, composition and activity of the soil microbial community. *Science of The Total Environment*, 2019.

VEZZANI, F. M.; MIELNICZUK, J. Uma visão sobre qualidade do solo. *Rev. Bras. Ciênc. Solo*, Viçosa, v. 33, n. 4, p. 743-755, Aug. 2009. Disponível em <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S010006832009000400001&lng=en&nrm=iso>. Acesso em: 27 Ab de 2019. <http://dx.doi.org/10.1590/S010006832009000400001>.

VIEIRA, R. F. et al. Disponibilidade de nutrientes no solo, qualidade de grãos e produtividade da soja em solo adubado com lodo de esgoto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 40, n. 9, p. 919-926, 2005. ISSN 1678-3921.

VIEIRA, R. F.; TANAKA, R. T.; SILVA, C. M. M. S. Utilização de lodo de esgoto na cultura de soja. *Embrapa Meio Ambiente. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento*, 2004.

VIEIRA, R. Sewage sludge effects on soybean growth and nitrogen fixation. *Biology and Fertility of Soils*, 2001, 34.3: 196-200.

VITTI, G.C. & TREVISAN, W. Manejo de macro e micronutrientes para alta produtividade de soja. *Informações Agronômicas*. Piracicaba, POTAFÓS, 2000. 16p. (Encarte Técnico, 90)

VOISIN, A. S.; MUNIER-JOLAIN, N. G.; SALON, C. The nodulation process is tightly adjusted to plant growth. An analysis using environmentally and genetically induced variation of nodule number and biomass in pea. *Plant and Soil*, 2010, 337.1-2: 399-412.

VOLLÚ, R. E. et al. Response of the Bacterial Communities Associated With Maize Rhizosphere to Poultry Litter as an Organomineral Fertilizer. **Frontiers in Environmental Science**, v. 6, n. 118, 2018-October-16 2018. ISSN 2296-665X. Disponível em: < <https://www.frontiersin.org/article/10.3389/fenvs.2018.00118>>.

YADA, M. M. et al. Chemical and Biochemical Properties of Oxisols after Sewage Sludge Application for 16 Years. **Rev. Bras. Ciênc. Solo**, Viçosa, v. 39, n. 5, p. 1303-1310, Oct. 2015. Available from <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-06832015000501303&lng=en&nrm=iso>. access on 21 June 2019. <http://dx.doi.org/10.1590/01000683rbcs20140728>.

YADAV, N. et al. Assessment of effects of sewage-sludge, zinc, boron and sulphur application on concentration and uptake of nutrients by mustard. **International Journal of Chemical Studies**, 2018; 6(4): 363-367. Disponível em: < <http://www.chemijournal.com/archives/?year=2018&vol=6&issue=4&ArticleId=3033&si=false>> Acesso em: 17 de junho de 2019.

YAMADA, T. Boro: será que estamos aplicando a dose suficiente para o adequado desenvolvimento das plantas. **Informações Agronômicas**, 2000, 90: 1-5.

YAMADA, T. Deficiências de micronutrientes, ocorrência, detecção e correção: o sucesso da experiência brasileira. **Informações agronômicas**, v. 105, n. 1, p. 1-12, 2004.

ZHANG, Qian, et al. Effects of different organic manures on the biochemical and microbial characteristics of albic paddy soil in a short-term experiment. *PLoS One*, 2015, 10.4: e0124096

ZOBIOLE, L.H.S. et al. Effect of glyphosate on symbiotic N₂ fixation and nickel concentration in glyphosate-resistant soybeans. *Applied Soil Ecology*, v.44, p.176-180, 2010a. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science?_ob=PublicationURL&_tokey=%23TOC%234970%232010%23999559997%231578639%23FLA%23&_cdi=4970&pubType=J&_auth=y&_acct=C000050221&_version=1&_urlVersion=0&_userid=10&md5=f9c20a05f5645cf4565a53f18df6d45f>. Acesso em: 27 de abr. 2010. doi:10.1016/j.apsoil.2009.12.003.

ZUFFO, Alan Mario *et al.* Quality of soybean seeds in response to nitrogen fertilization and inoculation with *Bradyrhizobium japonicum* 1. *Pesqui. Agropecu. Trop.*, Goiânia, v. 48, n. 3, p. 261-270, Dec. 2018. Disponível em <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S198340632018000300261&lng=en&nrm=iso>. Acesso em 12 jun. 2019. <http://dx.doi.org/10.1590/1983-40632018v4851638>.