

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE ENGENHARIA
CÂMPUS DE ILHA SOLTEIRA**

GABRIELA SOUZA DE OLIVEIRA

**PRODUTIVIDADE DO FEIJOEIRO COMUM E MICRONUTRIENTES NO SISTEMA
SOLO-PLANTA EM RESPOSTA AO EFEITO RESIDUAL DE APLICAÇÕES DE
COMPOSTO DE LODO DE ESGOTO**

Ilha Solteira
2022

CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÔNOMICA

GABRIELA SOUZA DE OLIVEIRA

**PRODUTIVIDADE DO FEIJOEIRO COMUM E MICRONUTRIENTES NO SISTEMA
SOLO-PLANTA EM RESPOSTA AO EFEITO RESIDUAL DE APLICAÇÕES DE
COMPOSTO DE LODO DE ESGOTO**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentada à Faculdade de Engenharia de
Ilha Solteira – UNESP como parte dos
requisitos para obtenção do título de
Engenheira Agrônoma.

Nome do orientador
Thiago Assis Rodrigues Nogueira

Ilha Solteira
2022

FICHA CATALOGRÁFICA
Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

O48p Oliveira, Gabriela Souza de.
Produtividade do feijoeiro comum e micronutrientes no sistema solo-planta em resposta ao efeito residual de aplicações de composto de lodo de esgoto / Gabriela Souza de Oliveira. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2022
61 f. : il.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Agrônômica) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, 2022

Orientador: Thiago Assis Rodrigues Nogueira
Inclui bibliografia

1. Phaseolus vulgaris L. 2. Biossólido. 3. Fertilizante orgânico. 4. sustentabilidade.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA "JÚLIO DE MESQUITA FILHO"

FACULDADE DE ENGENHARIA - CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA

CURSO DE ENGENHARIA AGRONÔMICA

ATA DA DEFESA – TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

TÍTULO: Produtividade do feijoeiro comum e micronutrientes no sistema solo-planta em resposta ao efeito residual de aplicações de composto de lodo de esgoto

ALUNO: *Gabriela Souza de Oliveira* RA: 171051921

ORIENTADOR: Thiago Assis Rodrigues Nogueira

Aprovado (X) - Reprovado () pela Comissão Examinadora com Nota: 9,8

Comissão Examinadora:



Prof. Dr. Thiago Assis Rodrigues Nogueira.
Presidente (Orientador)



Me. Raimunda Eliane Nascimento do Nascimento



Me. Adrielle Rodrigues Prates



Gabriela Souza de Oliveira

DEDICATÓRIA

Dedico à meus pais e ao meu tio, que mesmo em espírito deve estar orgulhoso de toda minha trajetória até aqui.

AGRADECIMENTOS

À Deus e aos espíritos amigos que sempre estão ao meu auxílio e proteção.

À meu pai Euripedes e minha mãe Sandra, que sempre acreditaram no meu sonho e em mim, sendo meu alicerce em cada etapa até aqui, fazendo sempre o melhor por mim e para que eu concluísse minha graduação. À minha irmã e meus sobrinhos que são alegrias na minha vida, fazendo com que eu me torne alguém melhor por eles e me dando forças para nunca pensar em desistir independente da dificuldade imposta.

À república vira-latas, pela experiência de ter um segundo lar. Em especial, à Beatriz Souto e Rafaela Guimarães, por me concederem a honra de ter uma segunda família, fazendo papel muitas vezes de mães, irmãs e amigas, ouvindo meus problemas e vibrando com as minhas conquistas. As minhas queridas vizinhas e parte dessa família, Gabriela Boldrini e Beatriz Biancardi, pelas nossas longas conversas e risadas das quais nossos almoços de domingo eram compostos. Sem vocês eu com certeza não saberia o significado de encontro de outras vidas.

À Ana Carolina Bruneri e Jaine de Souza que foram meu aconchego quando cheguei totalmente assustada pela completa mudança de vida e fizeram várias noites de estudos se tornarem momentos de alegria e muitas risadas.

Ao professor Thiago, que sempre me ensinou a ser crítica e buscar a minha melhor versão profissional.

Ao Grupo de Estudo em Nutrição, Adubação e Fertilidade do Solo (GENAFERT), que me proporcionou tanto conhecimento e, o mais importante, me apresentou a uma paixão, a “Fertilidade do Solo”. E, aos membros do grupo, que sempre me ajudaram e me acolheram tão bem durante todo o período do estágio, dando um destaque para Karen, Mariana Bocchi, Guilherme Bueno, Adrielle, Nelson, Felipe, Paulo, Luciano, Aline, Ana Carolina, Mariana Carvalho, Ana Laura, Fernanda, Beatriz e aos demais que eu não tive tanto contato, mas que estão dando sequência a um sonho maior.

Ao Marcos Paulo Dini e Pâmela Barros que sempre me ajudaram em todos os momentos, tanto nas atividades em campo, quanto me apoiando e me dando forças para passar pelas dificuldades que algumas vezes vieram a aparecer.

A Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – UNESP, por ter oportunizado um caminho para os meus sonhos, por meio de realidades que eu ainda não conhecia, além de me proporcionar a maior aquisição de todas que é o conhecimento.

A Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (processo nº 2019/02553-3) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (processo/edital 01/2020 – PIBIC) pela bolsa de Iniciação Científica.

“O bem que praticares, em algum lugar, é teu advogado em toda parte.” Emmanuel
(Psicografado por Francisco Cândido Xavier).

RESUMO

A adubação com micronutrientes constitui uma prática indispensável para obtenção de altos rendimentos da cultura do feijão. O composto de lodo de esgoto (CLE) pode ser utilizado como uma fonte alternativa desses elementos. Todavia, ainda são inexistentes estudos realizados com esse fertilizante visando o fornecimento de micronutrientes, em especial, na região do Cerrado brasileiro. Assim, objetivou-se com o presente estudo, avaliar os teores disponíveis de micronutrientes em duas profundidades do solo e seus efeitos na nutrição, extração e exportação, associados à produtividade de grãos do feijão-comum cultivado em solo da região do Cerrado em resposta aos efeitos residuais da aplicação do CLE por dois anos consecutivos. O experimento foi realizado em condições de campo no município de Selvíria/MS. Cultivou-se arroz (safra) e feijão (segunda safra) nos anos agrícolas de 2017/18 e 2018/19. O delineamento experimental foi em blocos casualizados com parcelas subdivididas no tempo e quatro repetições. Foram testados seis tratamentos principais e dois secundários, sendo: quatro doses de CLE (5,0; 7,5; 10,0 e 12,5 t ha⁻¹, base úmida), o tratamento controle (sem nenhuma aplicação) e a adubação convencional (fornecimento de fertilizantes minerais). Os dois anos agrícolas 2017/18 e 2018/19, foram avaliados como tratamento secundário. Nas amostras de terra coletadas nas camadas de 0–20 e 20–40 cm de profundidade, ao final do ciclo do feijoeiro, foram avaliados os teores disponíveis de B, Cu, Fe, Mn e Zn. Nas plantas de feijão, avaliou-se os teores foliares, a extração e a exportação de micronutrientes, além da produtividade de grãos. Houve maior extração no segundo ano, sendo os valores da adubação mineral similar aos da aplicação das doses de CLE. Os micronutrientes exportados nos grãos foram variáveis entre os anos agrícolas, mas não foram influenciados pelos tratamentos. O estado nutricional da cultura se manteve em níveis adequados. Os teores de micronutrientes no solo e a produtividade não foram influenciados pelos tratamentos. Dentre os micronutrientes, o B e o Zn apresentaram maior variação em relação à aplicação do CLE, no qual as doses fornecidas supriram as necessidades do feijoeiro, de modo similar à adubação mineral. O tratamento secundário apresentou diferenças, mostrando que no segundo ano a cultura exigiu mais micronutrientes e os tratamentos com CLE conseguiram atender a demanda. O CLE poder ser utilizado como fonte alternativa de micronutrientes para o feijoeiro comum, promovendo maior sustentabilidade no processo produtivo dessa cultura.

Palavras-chave: *Phaseolus vulgaris* L.; Biossólido; Fertilizante orgânico; Sustentabilidade.

ABSTRACT

Micronutrient fertilization is an essential practice to obtain high yields from the bean crop. Composted sewage sludge (CSS) can be used as an alternative source of these elements. However, there are no studies that have explored CSS as a micronutrient source, especially in the Brazilian Cerrado region. The objective of the present study was to evaluate the available concentration of micronutrients at two soil depths and their effects on nutrition, extraction, and exportation, associated with the grain yield of common bean grown in the Cerrado region in response to residual effects of the CSS application for two consecutive years. The experiment was carried out under field conditions in Selvíria/MS. Rice (crop) and beans (second crop) were grown in the 2017/18 and 2018/19 crop years. The experimental design was a randomized complete blocks with a split-plot restriction on randomization and four replications. Six main and two secondary treatments were tested, namely: four rates of CSS (5.0; 7.5; 10.0, and 12.5 Mg ha⁻¹, wet basis), a control with no CSS application and the conventional fertilization using mineral fertilizers. The two agricultural years 2017/18 and 2018/19 were evaluated as secondary treatment. In soil samples collected in the 0–20 and 20–40 cm depth, at the end of the bean cycle, the available concentration of B, Cu, Fe, Mn, and Zn were evaluated. In bean plants, leaf micronutrient concentration, shoot micronutrient extraction, grain micronutrient exportation, and yield were evaluated. There was greater extraction in the second year, and the values of mineral fertilization treatment were similar to those with CSS application. Micronutrients exported with grain were variable between crop years, but were not influenced by treatments. The plant nutritional status was maintained at adequate levels. Soil micronutrient concentration and yield were not influenced by treatments. B and Zn showed greater variation in relation to the CSS application, in which the rates supplied met the needs of the common bean in a similar way to mineral fertilization. There were some differences in the second treatment, showing that in the second year the plants required more micronutrients and the treatments with CSS were able to meet the demand. CSS can be used as an alternative source of micronutrients for common bean, promoting greater sustainability in the production process of this crop.

Keywords: *Phaseolus vulgaris* L.; Biosolid; Organic fertilizer; Sustainability.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	- Extração de B (a), Fe (b) e Mn (c) na cultura do feijoeiro em resposta a aplicação de doses de composto de lodo de esgoto (CLE). **, * e ^{NS} – Significativo a 1 e 5% e não significativo, respectivamente.....	31
Figura 2	- Exportação de Fe (a), Mn (b) e Zn (c) na cultura do feijoeiro em resposta a aplicação de doses de composto de lodo de esgoto (CLE). **, * e ^{NS} – Significativo a 1 e 5% e não significativo, respectivamente.....	33
Figura 3	- Teor de B (a), Cu (b) e Zn (c) na folha do feijoeiro em resposta a aplicação de doses composto de lodo de esgoto (CLE). **, * e ^{NS} – Significativo a 1 e 5% e não significativo, respectivamente.....	36
Figura 4	- Teor de B (a) e Zn (b) no solo (0 – 20 cm de profundidade) após o cultivo das plantas de feijão em resposta a aplicação de doses composto de lodo de esgoto (CLE). **, * e ^{NS} – Significativo a 1 e 5% e não significativo, respectivamente.....	41
Figura 5	- Teor de Zn (a) no solo (20 – 40 cm de profundidade) após o cultivo das plantas de feijão em resposta a aplicação de doses composto de lodo de esgoto (CLE). **, * e ^{NS} – Significativo a 1 e 5% e não significativo, respectivamente.....	41
Figura 6	- Produtividade após o cultivo das plantas de feijão em resposta a aplicação de doses composto de lodo de esgoto (CLE). **, * e ^{NS} – Significativo a 1 e 5% e não significativo, respectivamente.....	43

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	- Composição química e microbiológica de amostras do composto de lodo de esgoto (Média $\pm$ desvio-padrão; $n = 3$)	22
Tabela 2	- Atributos químicos ⁽¹⁾ e físicos ⁽²⁾ das amostras de um LATOSSOLO VERMELHO Distrófico típico utilizadas no experimento (Média $\pm$ desvio-padrão; $n = 3$).....	24
Tabela 3	- Extração de micronutrientes (g ha^{-1}) em resposta ao efeito dos tratamentos aplicados e dos anos de cultivo da cultura do feijão.....	29
Tabela 4	- Exportação de micronutrientes (g ha^{-1}) em resposta ao efeito dos tratamentos aplicados e dos anos de cultivo da cultura do feijão.....	32
Tabela 5	- Teor de micronutrientes na folha (mg kg^{-1}) em resposta ao efeito dos tratamentos aplicados e dos anos de cultivo da cultura do feijão.....	35
Tabela 6	- Teores de micronutrientes no solo (mg kg^{-1}), na profundidade de 0 – 20 e 20 – 40 cm em resposta ao efeito dos tratamentos aplicados e dos anos de cultivo da cultura do feijão.....	39
Tabela 7	- Produtividade (kg ha^{-1}) em resposta ao efeito dos tratamentos aplicados e dos anos de cultivo da cultura do feijão.....	42

SUMÁRIO

RESUMO.....	9
1. INTRODUÇÃO	12
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	14
2.1. Solos do Cerrado.....	14
2.2. Lodo de esgoto (LE).....	14
2.3. Composto de Lodo de Esgoto (CLE)	16
2.4. Micronutrientes no solo	17
2.5. Importância da cultura do feijão	18
2.6. Exigência nutricional do feijoeiro	19
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	20
3.1. Descrição da área experimental.....	20
3.2. Delineamento experimental e tratamentos.....	20
3.3. Obtenção e caracterização do composto de lodo de esgoto	21
3.4. Histórico e desenvolvimento do experimento	23
3.5. Parâmetros avaliados nos anos agrícolas 2017/18 e 2018/19	26
a) Teores disponíveis de micronutrientes no solo	26
b) Parâmetros nutricionais da cultura do feijão	26
c) Exportação e produtividade de grãos.....	27
3.6. Análises estatísticas	27
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	27
4.1. Extração e exportação dos micronutrientes.....	27
4.2. Teores de micronutrientes na folha	34
4.3. Teores de micronutrientes presentes no solo	37
4.4. Produtividade	41
5. CONCLUSÕES	44
REFERÊNCIAS.....	45
ANEXOS	55

1. INTRODUÇÃO

O desenvolvimento em grande escala da agricultura brasileira traz consigo um enfoque pela busca de altas produtividades, eficiência e sustentabilidade, ocasionando a este processo produtivo respostas cada vez melhores. Desse modo, é palpável a evolução do cenário agrícola no país, que apesar de ser um detentor de uma enorme quantidade de informações sobre o assunto, vem colocando em prática a pouco tempo todo esse conhecimento (SOUZA JUNIOR, 2019).

Um exemplo são os micronutrientes, que têm seus benefícios conhecidos há anos, porém, só passaram a fazer parte da rotina dos agricultores recentemente, impulsionados pela deficiência desses nutrientes nos solos, devido a utilização e a preferência de adubos NPK altamente concentrados e a aplicação de altas doses de calcário e/ou com uma uniformidade inadequada, além da utilização mais frequente de análises de solo e foliares que contribuiu para evidenciar essas deficiências de micronutrientes, tornando-se um fator limitante para altas produtividades (GALRÃO, 2004; ABREU; LOPES; SANTOS, 2007). Por outro lado, a prática da agricultura em solos que são naturalmente inférteis, como os solos da região do Cerrado, alavancou o uso de cultivares com maior potencial produtivo, sendo eles mais exigentes nutricionalmente (CECCON, 2018).

O Brasil é um país nitidamente agrícola. Apenas no ano de 2020, o agronegócio movimentou cerca de 1,98 trilhão de reais, equivalendo a 26,6% do PIB (CEPEA/CNA, 2021), que engloba a produção de inúmeras culturas e dentre elas têm-se o feijão-comum (*Phaseolus vulgaris* L.). A agricultura brasileira é a maior produtora mundial deste alimento de acordo com a FAO (2018), que apresenta um elevado teor de proteína, cerca de 20 a 25%, tornando-o uma das leguminosas mais importantes para o consumo humano (CARVALHO et al., 2019). Hoje a produção brasileira de feijão é de 3.046 mil toneladas (CONAB, 2022).

Para o feijoeiro, o manejo da nutrição é muito importante, por meio de uma correção bem feita e do fornecimento adequado dos nutrientes para a cultura, leva a bons resultados na produção final da lavoura (FAGERIA et al., 2015). Por apresentar um ciclo curto de sistema radicular superficial, apresenta altas exigências em termos de fertilidade do solo (SOUZA et al., 2011). Os micronutrientes, apesar de serem necessários em pequenas quantidades pela cultura do feijão, apresentam a mesma

importância para a produtividade e desenvolvimento quanto os macronutrientes (CARVALHO et al., 2019).

De acordo com o Osaki (2022) houve um aumento de 32,6% nos custos de fertilizantes para a cultura do feijão, entre o período de fevereiro a março deste ano, já quando comparado o mesmo mês do ano anterior este aumento é de 83,2%, o que implica em 8,3 sacas de feijão para cobrir os gastos com fertilizantes, contra 5,3 sacas necessárias em março de 2021, fatos que torna necessário a busca por fontes alternativas de nutrientes. Nesse sentido, o lodo de esgoto (LE), que é um resíduo orgânico proveniente do tratamento de efluentes e que contém altos teores de matéria orgânica (MO) e de nutrientes de plantas, pode ser utilizado na agricultura como fertilizante orgânico (NASCIMENTO et al., 2020; CHAGAS et al., 2021). Com intuito de diminuir seu volume, torná-lo mais seguro para a aplicação em campo e consequentemente ter um melhor gerenciamento deste resíduo, é realizado uma compostagem do LE (NGUYEN; SHIMA, 2019). Alguns estudos já demonstraram que o composto de lodo de esgoto (CLE), apresenta em sua composição quantidades consideráveis de matéria orgânica, nitrogênio e fósforo e elevados teores de micronutrientes (p.e. B, Cu, Fe, Mn, Mo e Zn), conseguindo incrementar os teores de Zn no solo em função do aumento das doses de CLE (JAKUBUS; BAKINOWSKA, 2018; PRATES et al., 2020, SILVA et al., 2022), pode ser utilizados para substituir, ainda que parcialmente, a aplicação de fertilizantes minerais. Todavia, no Brasil são praticamente inexistentes estudos utilizando o CLE como fonte de micronutrientes para grãos em solo de Cerrado. Nesse sentido, justifica-se a realização desta pesquisa, que busca entender a viabilidade agronômica do CLE, avaliando parâmetros químicos do solo, sua relação com o estado nutricional, desenvolvimento e produtividade da cultura do feijão.

Na presente pesquisa, tem-se como hipóteses: A aplicação de CLE em áreas de Cerrado *i)* aumenta os teores de micronutrientes disponíveis no solo, *ii)* proporciona uma nutrição adequada para a cultura do feijão-comum e assim um bom crescimento e desenvolvimento e *iii)* aumenta a produtividade reduzindo a utilização de fertilizantes minerais. Com isso, objetivou-se avaliar os teores disponíveis de micronutrientes em duas profundidades do solo e seus efeitos na nutrição, extração e exportação desses elementos, associados à produtividade de grãos do feijão-comum cultivado em solo da região do Cerrado e adubado com CLE por dois anos consecutivos.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Solos do Cerrado

Historicamente, o Brasil é conhecido por ter uma agricultura pautada em eficiência e altas produções, que sempre foram concentradas na região sul, sudeste e se estendendo um pouco para o nordeste, porém, este padrão foi se modificando no século XX, onde o Cerrado começou a se tornar uma nova fronteira agrícola, e nos dias atuais responde por cerca de 60% de toda produção agrícola brasileira (SOUZA JUNIOR et al., 2019).

Na América do Sul ele é o segundo bioma com maior extensão territorial, ocupando uma área de 2.036.448 km² (cerca de 22% do território nacional) muito rica em variedade de fauna e flora (BRASIL, 2019). Este bioma brasileiro que é de grande importância para a economia do país, graças a sua crescente produção de commodities agrícolas (ALENCAR et al., 2020), tem como grande parte dos seus solos classificados como Latossolos (BONINI et al., 2015), sendo em sua maioria, altamente intemperizados – muito ácidos, teores de matéria orgânica de baixo a moderado, baixa capacidade de troca catiônica (CTC) e pouca reserva de macro e micronutrientes (WRB 2006; SANTOS et al., 2018).

Com isso, plantas mais rústicas como o arroz e forrageiras do gênero *Urochloa*, foram muito utilizadas no passado, porém, com a alta demanda por produtos provenientes da atividade agrícola, o cultivo de culturas como milho, feijão e soja se tornaram necessários, no entanto, diferente das outras culturas essas não são rústicas, podendo vir a ter problemas de produtividade (SOUZA JUNIOR et al., 2019). Porém, mesmo não sendo um solo com boa fertilidade, podem se tornarem produtivos quando se faz o uso adequado de fertilizantes e outros insumos (BONINI et al., 2015).

2.2. Lodo de esgoto

O lodo de esgoto (LE) é um resíduo urbano proveniente das Estações de Tratamento de Esgoto (ETEs) (CHENG et al., 2007). É a junção de resíduos de alguns tipos de lixos sólidos, como indústrias, comércio, residências, e até as águas residuais urbanas (CURCI et al., 2020). Supondo que há uma coleta e tratamento do esgoto sanitário de toda a população brasileira atual (212,6 milhões de habitantes), o

potencial de produção de lodo de esgoto é de aproximadamente 1,2 milhões de toneladas por ano no país (CARDOSO et al., 2022).

Juntamente como outros produtos como o biocarvão, o LE pode aumentar significativamente a capacidade que a planta tem de extrair micronutrientes do solo, aumentando esses teores nos grãos e na palhada da planta que está sendo cultivada (JATAV et al., 2018), proporcionando aumento na produção. As aplicações deste resíduo podem contribuir para a melhoria da fertilidade do solo, com efeito direto na qualidade da biomassa microbiana e no aumento das atividades enzimáticas no solo (HAMDI et al., 2019). Ademais, ocorre efeito residual da aplicação desse resíduo em solos agrícolas, no qual os nutrientes são liberados de forma lenta e gradual podendo trazer benefícios ao longo de vários cultivos. Tal fato, auxilia na redução do consumo de fertilizantes minerais (SIEBIELEC; SIEBIELEC; LIPSKI, 2018; LOPES et al., 2020).

Muitos países utilizam o LE em áreas agrícolas e florestais, a Irlanda, Espanha, Reino Unido, Luxemburgo, EUA e França, são exemplos de nações que reutilizam mais de 50% do resíduo gerado dentro de seus territórios para aplicação em campo. Nos solos brasileiros, apenas 3% de todo o LE produzido é destinados para a agricultura, o restante é descartado em aterros sanitários (MATOS, 2018).

A pouca adoção do uso agrícola do LE no Brasil está relacionada ao fato deste produto apresentar um potencial problema ambiental, podendo causar poluição do solo e de mananciais, efeitos negativos sobre a biota e riscos à saúde humana (RASTETTER; GERHARDT, 2017). Para as estações de tratamento que são responsáveis pelo resíduo urbano, o LE já estabilizado é um grande desafio para que não ocorra nenhum possível dano a população e ao ambiente (IVANOVÁ et al., 2018). Os agentes patogênicos e os metais pesados que podem estar contidos no LE são os principais motivos que causam preocupação do uso desse resíduo em culturas de interesse agrônômico (PEDROSA et al., 2017). Além de metais pesados e contaminantes, nos dias atuais surge o risco de traços de remédios e drogas ilícitas que podem estar presentes no produto (IVANOVÁ et al., 2018). Deste modo, os órgãos ambientais exigem projetos de gerenciamento do uso agrícola do lodo, como uma maneira de cuidar da saúde humana e do ambiente seguindo a Resolução nº 498 do Conama (Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA, 2020).

Devido a elevada quantidade de nitrogênio (N) e de fósforo (P) presente na composição do LE e, por serem poluentes potenciais nos corpos d'água, os cálculos

das doses de lodo para aplicação em solos agrícolas é baseado no fornecimento desses elementos (CONAMA, 2020). Porém, a quantidade a ser aplicada, considerando o teor de N, é de difícil determinação, devido às formas desse elemento no lodo e sua dinâmica no solo (BOEIRA; MAXIMILIANO, 2009). Se o material for utilizado com base nos seus teores de micronutrientes, consequentemente o volume de aplicação será menor, diminuindo ainda mais os riscos em relação a metais pesados no resíduo.

2.3. Composto de lodo de esgoto (CLE)

A compostagem é um processo utilizado para a estabilização do LE (WANG et al., 2019), promovendo a bioconversão de resíduos orgânicos num produto final estabilizado que permite usos agrícolas (BERNAL; ALBUQUERQUE; MORAL, 2009; YU et al., 2019). Essa prática contempla simultaneamente a mineralização e humificação realizados por microrganismos, nos quais o desenvolvimento e atividade ocorrem invariavelmente na fase de dissolução da água (VIEYRA et al., 2009; YU et al., 2019), com isso, ocorre a redução do volume do material.

No caso do LE, a compostagem pode ajudar a evitar a contaminação dos solos agrícolas, uma vez que esse procedimento modifica a mobilidade de elementos potencialmente tóxicos, fazendo com que sua solubilidade e o seu potencial biodisponível no solo sejam limitados, além de reduzir o teor de patógenos presente nesse resíduo (NOGUEIRA et al., 2007; HE; TIAN; LIANG, 2009; KHALIL et al., 2011). O tratamento do resíduo diminui significativamente a quantidade microrganismos patogênicos presente, como a *Enterococcus* e a *Escherichia coli*, que são utilizadas como indicadores de eficácia do pré-tratamento (PILNÁČEKA et al., 2019), devido ao aumento de temperatura (acima de 55° C), que ocasiona a eliminação de patógenos sensíveis a temperaturas altas (MORETTI et al., 2015).

Vem sendo um procedimento amplamente utilizado em países do qual a mecanização em grande escala é altamente desenvolvida, porém, em países que ainda estão em desenvolvimento como por exemplo o Vietnã, este processo pode envolver problemas de custos operacionais e relacionados a qualidade final do produto, ocasionado pela falta de controle total dos fatores que envolvem a compostagem do material, como a umidade, aeração e temperatura, que são essenciais que o processo seja realizado da maneira adequada, obtendo assim os

benefícios almejados (NGUYEN; SHIMA, 2019).

Apesar de vários fatores como a umidade, pH, oxigenação, relação C/N e etc., terem a capacidade de interferir no processo (CARDOSO et al., 2022), o produto da compostagem deste resíduo, é uma forma de tratamento que torna possível um descarte seguro e simultaneamente corrobora para uma agricultura sustentável (MORSINK-GEORGALI et al., 2022).

2.4. Micronutrientes no solo

Os micronutrientes (B, Cl, Cu, Fe, Mn, Mo, Ni e Zn) são necessários para as plantas em menores quantidades em relação aos macronutrientes (N, P, K, S, Ca e Mg), porém, ainda assim, são essenciais para o desenvolvimento das plantas (ABREU; LOPES; SANTOS, 2007). Eles ficam associados em sua maior parte na solução do solo, superfícies inorgânicas, matéria orgânica, óxidos e minerais primários e secundários (SHUMAN, 1991).

De acordo com Abreu; Lopes; Santos (2007), na matéria orgânica encontra-se grande parte do B que está disponível no solo para as plantas, já o Cu, Fe, Mn, e Zn, geralmente ficam complexados com os ácidos húmicos e fúlvicos presentes também nessa matéria orgânica, o Cu é o elemento que tem mais interações com os compostos orgânicos no solo, tendo a possibilidade de formar compostos estáveis levando a carência do nutriente. O pH tem grande influência sobre a dinâmica dos micronutrientes no solo, na prática, uma calagem realizada de maneira inadequada no solo, pode induzir a deficiência de Mn e Zn (TEIXEIRA et al., 2004).

Há tempos já se sabe que plantas cultivadas em solos com deficiência de micronutrientes, podem apresentar queda no potencial produtivo em até 30% (MALAVOLTA, 1986; MARQUES JUNIOR et al., 2017). Estes elementos são de extrema importância para a sobrevivência dos vegetais, visto que executam funções como: ativação de enzimas, formação de parede celular, transporte de sintetizados, transporte de elétron na fotossíntese, pressão osmótica das células, formação de auxinas, RNA (ácido desoxirribonucleico) e ribossomos, aumento no tamanho e multiplicação celular, crescimento do tubo polínico etc (MALAVOLTA, 2006; DECHEN et al., 2018).

Ao cultivar lavouras sem limitações de micronutrientes, o benefício não é apenas para as plantas e seu desenvolvimento, mas também enriquece as partes que

tem como finalidade o consumo (HARTMAN; RICHARDSON, 2013; BANA et al., 2022), como os grãos. Em todo mundo, cerca de 1,7 milhões de pessoas morrem anualmente, devido à baixa quantidade de micronutrientes consumidos em sua dieta, resultando assim, em desnutrição (WHO, 2014; SHIVAY et al., 2019; BANA 2022) e mostrando que o manejo que é feito no campo, afeta bem mais do que a produtividade da lavoura.

2.5. Importância da cultura do feijão

O feijão é um dos principais alimentos consumidos diariamente pela população brasileira. Trata-se de fonte de proteína e outras excelentes propriedades nutricionais, apresentando na maioria dos cultivares valor proteico que varia de 23 a 26% (BURATTO et al., 2009; FIDELIS et al., 2017). Para mais de 300 milhões de pessoas, este grão é a maior fonte de nutrientes da dieta, representando 65% da proteína que é consumida e fornecendo 32% da energia necessária (PETRY et al., 2015; MOMANYI; NDUKO; OMWAMBA, 2022). Além de ter participação significativa na produção agrícola do Centro-Sul do brasileiro (SORATTO et al., 2015).

No Brasil, no ano agrícola 2017/2018, a produção de feijão de segunda safra chegou a 1,22 milhões de toneladas. A estimativa de área plantada foi de 1,53 milhões de hectares, com aumento de 7,4% se comparada à temporada passada (CONAB, 2018). Já para o ano agrícola 2018/2019, a produção foi de 1,29 milhões de toneladas também para o feijão de segunda safra, com a estimativa de área plantada de até 1,41 milhões de hectares (CONAB, 2019). Para a safra 2021/2022 a estimativa é de 1,43 milhões de toneladas em uma área plantada de 1,38 milhões de hectares, refletindo uma alta na produtividade, visto que, a área plantada de diminuiu (CONAB, 2022).

Existem três safras de feijão-comum no Brasil, e que varia de região para região: a primeira é a safra das águas, que é semeada entre os meses de agosto e novembro, a segunda é da seca que é semeada de novembro a março e a terceira que é denominada de inverno ou irrigada, onde a semeadura ocorre entre abril e julho (WANDER, 2007; SILVA; WANDER, 2018). O feijão de inverno, é mais tecnificado que os demais, utilizando, além da irrigação, outros insumos como sementes de boa qualidade, fertilizantes, corretivos e defensivos, o que possibilitam a obtenção de

produções de três a cinco vezes superiores às obtidas em outras épocas de semeadura (RICHETTI; ITO, 2015). O cultivo de feijão-comum com tecnologia de ponta, com irrigação por aspersão, via pivo central, na terceira safra é mais utilizado pelos agricultores na região do Cerrado do Planalto Central, em especial nos estados de Goiás, Mato Grosso, Minas Gerais, São Paulo e entorno do Distrito Federal (SILVA; WANDER, 2018).

2.6. Exigência nutricional do feijoeiro

Em quase todas as áreas que se produz feijão no Brasil, especialmente nas regiões de Cerrado, a reserva natural de nutrientes não é o bastante para suprir o que é extraído pelas culturas e o que é exportado ao longo dos anos, sendo necessário a reposição via fertilizantes (CARVALHO et al., 2019). E com o intuito de alcançar altas produtividades, é importante que os nutrientes sejam fornecidos no local e no tempo correto, para que desta forma, a planta consiga ter um bom desenvolvimento (ROSOLEM; MARUBAYASHI, 1994; SULINO; BUSO, 2021).

O feijoeiro é conhecido por ser uma planta muito exigente em termos de qualidade de solo, por causa do seu ciclo curto e seu sistema radicular superficial (CARVALHO et al., 2019). Na maioria das plantas, a exigência nutricional vai aumentando quando se inicia a fase reprodutiva, e tem seu pico máximo na formação das sementes, momento em que a translocação de nutrientes é intensa, isso devido ao fato de que para a formação de novos órgãos de reserva a demanda por nutrientes é alta (CARVALHO; NAKAGAWA, 2000; SULINO; BUSO, 2021).

Mesmo que requeridos em menores quantidades, os micronutrientes são vitais ao desenvolvimento de plantas de feijão, sendo mais sensíveis a deficiência de B e Fe, afetando o desenvolvimento e, conseqüentemente, a produtividade dessa cultura (MARQUES JUNIOR et al., 2017). O Zn também é considerado muito importante para o aumento da produtividade da cultura de feijão (LANA et al., 2008). Quando há deficiência dos micronutrientes como Mn e Zn, a atividade metabólica pode ser reduzida, pois, são componentes de enzimas essenciais, além de afetar a estrutura e integridade das membranas (MARSCHNER, 1995; SULINO; BUSO, 2021).

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Descrição da área experimental

O experimento foi desenvolvido em condições de campo, na área experimental do Setor de Produção Vegetal da Fazenda de Ensino, Pesquisa e Extensão (FEPE), pertencente à Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira da UNESP, no município de Selvíria/MS, apresentando as coordenadas geográficas de 20°20'35" S e 51°24'04" W, com altitude de 358 m (Anexo 1). A região apresenta as seguintes médias anuais: precipitação pluvial de 1.370 mm, temperatura de 24,5 °C e umidade relativa do ar de 75%. O tipo climático da região é o Aw segundo classificação de Köppen, caracterizado por verões chuvosos e invernos secos (LOMBARDI NETO; DRUGOWICH, 1994). Durante toda a realização do experimento foram coletados os dados mensais referentes às temperaturas máxima e mínima, umidade relativa do ar e precipitação pluvial (Anexo 2).

Mediante levantamento detalhado (DEMATTE, 1980) e utilizando-se o Sistema Brasileiro de Classificação dos Solos (SANTOS et al., 2018), o solo da área experimental foi classificado como LATOSSOLO VERMELHO Distrófico típico argiloso, o qual vinha sendo cultivado com milho em sistema convencional, sem irrigação, por aproximadamente 10 anos.

3.2. Delineamento experimental e tratamentos

Adotou-se o delineamento em blocos casualizados com parcelas subdivididas no tempo, com seis tratamentos principais, dois tratamentos secundários e quatro repetições, totalizando 48 unidades experimentais e 24 unidades em cada ano agrícola. Os seis tratamentos principais são: quatro doses de composto de lodo de esgoto – CLE (5,0; 7,5; 10,0 e 12,5 t ha⁻¹, base úmida), um tratamento controle (sem aplicação de CLE ou adubos minerais) e um tratamento com adubação mineral convencional (sem aplicação de CLE). Como tratamento secundário foi utilizado o tempo, ou seja, os dois anos agrícolas (2017/18 e 2018/19). Nos dois anos de cultivo do feijoeiro os tratamentos e a condução do experimento foram iguais, visando a comparação em resposta ao efeito residual das duas aplicações do CLE.

3.3. Obtenção e caracterização do composto de lodo de esgoto

O CLE foi obtido na empresa Tera Ambiental Ltda, localizada em Jundiaí, SP (Anexo 3). Trata-se de um fertilizante orgânico composto Classe B, produzido a partir da compostagem termofílica de resíduos orgânicos urbanos diversos. A principal matéria prima que compõe o produto é o lodo de esgoto sanitário, cerca de 70% em massa, advindo do tratamento de esgotos sanitários em Jundiaí e municípios vizinhos. Além do lodo de esgoto, também entra no processo de compostagem, lodos de Sistemas de Tratamento de Águas Residuárias geradas em Agroindústrias.

A compostagem dos resíduos orgânicos é feita em duas concepções: leiras aeradas por revolvimento mecânico e leiras estáticas com aeração forçada. Em ambos os processos a fonte de carbono orgânico utilizada é o cavaco de madeira bruta. O composto, ainda em sua fase de processamento, também é aditivado, em proporções abaixo de 5 % da massa final do produto, com calcário e gesso agrícola. Após higienização e alcance do teor de umidade ideal (cerca de 40%), o composto é peneirado e empilhado para maturação por um mínimo de 15 dias, dando origem ao produto fertilizante orgânico. Foi realizada a caracterização química e microbiológica do CLE, coletando-se amostras em diferentes pontos do composto, seguindo as recomendações preconizadas na Resolução nº 498 do Conama (CONAMA, 2020) (Tabela 1).

Tabela 1. Composição química e microbiológica de amostras do composto de lodo de esgoto (Média $\pm$ desvio-padrão; $n = 3$).

Característica	Unidade	2017/18	2018/19	Valor permitido ⁽¹⁾
<i>Química</i>		Base úmida		
pH _(CaCl₂)	-	7,0 $\pm$ 0,10	7,3 $\pm$ 0,06	-- ⁽²⁾
Umidade (60–65 °C)	%	40,96 $\pm$ 0,26	34,43 $\pm$ 0,53	--
Umidade total	%	45,46 $\pm$ 0,22	35,77 $\pm$ 0,61	--
Matéria orgânica Total	g kg ⁻¹	308,65 $\pm$ 9,95	255,0 $\pm$ 7,37	--
Carbono orgânico	g kg ⁻¹	153,10 $\pm$ 4,80	128,6 $\pm$ 3,57	--
CTC	mmol _c dm ⁻³	520 $\pm$ 20,00	--	--
C/N	-	12 $\pm$ 0,81	9 $\pm$ 0,58	--
Nitrogênio Total	g kg ⁻¹	13,85 $\pm$ 0,25	15,3 $\pm$ 1,53	--
Fósforo (P ₂ O ₅) Total	g kg ⁻¹	12,25 $\pm$ 1,35	14,1 $\pm$ 0,00	--
Potássio (K ₂ O) Total	g kg ⁻¹	6,00 $\pm$ 2,20	8,2 $\pm$ 0,38	--
Cálcio (Ca) Total	g kg ⁻¹	19,40 $\pm$ 4,40	31,1 $\pm$ 1,08	--
Magnésio (Mg) Total	g kg ⁻¹	5,20 $\pm$ 0,50	9,9 $\pm$ 0,21	--
Enxofre (S) Total	g kg ⁻¹	4,75 $\pm$ 0,25	8,4 $\pm$ 1,44	--
Sódio (Na) Total	mg kg ⁻¹	3930 $\pm$ 32,00	3915 $\pm$ 41,22	--
Arsênio	mg kg ⁻¹	3,15 $\pm$ 1,76	--	20,0
Boro	mg kg ⁻¹	94 $\pm$ 4,52	94 $\pm$ 4,58	--
Cádmio	mg kg ⁻¹	1,00 $\pm$ 0,01	--	3,0
Cobre	mg kg ⁻¹	237 $\pm$ 16,54	191,2 $\pm$ 5,77	--
Chumbo	mg kg ⁻¹	18,10 $\pm$ 1,60	--	150,0
Cromo	mg kg ⁻¹	54,25 $\pm$ 1,75	--	--
Ferro	mg kg ⁻¹	16400 $\pm$ 1300	14708 $\pm$ 249	--
Manganês	mg kg ⁻¹	246 $\pm$ 37,00	310 $\pm$ 15,01	--
Mercúrio	mg kg ⁻¹	0,22 $\pm$ 0,09	--	1,0
Molibdênio	mg kg ⁻¹	5,26 $\pm$ 0,23	--	--
Níquel	mg kg ⁻¹	26,52 $\pm$ 0,50	--	70,0
Zinco	mg kg ⁻¹	456 $\pm$ 8,00	684 $\pm$ 7,21	--
<i>Microbiológica</i>				
<i>Salmonella</i> sp.	NMP/10g	Ausente	Ausência em 10 g de MS	
<i>Coliforme Termotolerantes</i>	NMP/g	0	1.000,0	
Ovos viáveis de helmintos	Ovos/g de ST	0,12	1,0	

Fonte: (Prates, 2020).

⁽¹⁾Instrução normativa N° 61 MAPA (2020). ⁽²⁾ Não determinado. NMP = Número mais provável. CTC: Capacidade de troca catiônica.

3.4. Histórico e desenvolvimento do experimento

Como plantas-teste, nos anos agrícolas 2017/18 e 2018/19, foram cultivadas em sucessão, as culturas de arroz de sequeiro (*Oryza sativa* L.) na primeira safra e de feijão (*Phaseolus vulgaris* L.), na segunda safra/inverno. Essas espécies foram escolhidas devido à elevada importância na dieta humana no Brasil e em diferentes países (SOUZA et al., 2013).

Antes da instalação do experimento e aplicação dos tratamentos, foram realizadas análise física (TEIXEIRA et al., 2017) e química do solo (RAIJ et al., 2001) (Tabela 2). O preparo inicial da área foi realizado em setembro de 2017, época em que foi realizada uma escarificação. Com base nos resultados da avaliação da fertilidade do solo, foi realizada a calagem com dose de $2,2 \text{ t ha}^{-1}$, objetivando elevar a saturação por bases a 70% e, em seguida, aplicação de $1,8 \text{ t ha}^{-1}$ de gesso agrícola (RAIJ et al., 1997) (Anexo 4).

Cada unidade experimental foi constituída por sete linhas da cultura do feijão (espaçadas entre si de 0,45 m) de 10 metros de comprimento, totalizando $35,0 \text{ m}^2$ por parcela e 1.400 m^2 de área total. A área útil da parcela para as avaliações foi constituída pelas três linhas centrais, sendo eliminados como bordadura 2,5 m de cada extremidade, totalizando em aproximadamente $7,0 \text{ m}^2$.

Foi realizado uma dessecação da cobertura vegetal antes de instalar o experimento, com a aplicação dos herbicidas glifosato (1.800 g ha^{-1} do i.a.) e 2,4-D (670 g ha^{-1} do i.a.), e antes da semeadura do feijão, foram utilizados herbicidas Verdict R ($37,41 \text{ g ha}^{-1}$ do i.a.) e Gramoxone (300 g ha^{-1} do i.a) (Anexo 5). A aplicação do CLE foi realizada no cultivo do arroz de terras altas (safra 2017/18 e 2018/19), realizando duas aplicações consecutivas do composto na área experimental. O CLE foi distribuído de forma manual na área total dentro de cada parcela experimental (Anexo 6). A aplicação foi realizada cinco dias antes da semeadura do arroz, levando-se em conta a umidade do material.

Tabela 2 – Atributos químicos⁽¹⁾ e físicos⁽²⁾ das amostras de um LATOSSOLO VERMELHO Distrófico típico utilizadas no experimento (Média $\pm$ desvio-padrão; $n = 3$).

Atributos	Unidade	Profundidade (cm)	
		0–20	20–40
pH (CaCl ₂)	-	4,5 $\pm$ 0,06	4,7 $\pm$ 0,06
Matéria orgânica	g dm ⁻³	19 $\pm$ 1,16	14 $\pm$ 0,58
Fósforo	mg dm ⁻³	16 $\pm$ 0,58	9 $\pm$ 0,00
Potássio	mmol _c dm ⁻³	1,7 $\pm$ 0,17	0,7 $\pm$ 0,15
Cálcio	mmol _c dm ⁻³	13 $\pm$ 0,58	11 $\pm$ 0,58
Magnésio	mmol _c dm ⁻³	12 $\pm$ 1,00	10 $\pm$ 0,00
Alumínio	mmol _c dm ⁻³	4 $\pm$ 0,00	2 $\pm$ 0,58
H+Al	mmol _c dm ⁻³	37 $\pm$ 2,31	32 $\pm$ 1,73
SB	mmol _c dm ⁻³	27,0 $\pm$ 1,69	22,1 $\pm$ 0,72
S-SO ₄	mg dm ⁻³	15 $\pm$ 0,58	8 $\pm$ 0,58
CTC	mmol _c dm ⁻³	63,7 $\pm$ 0,86	54,1 $\pm$ 2,45
V	%	42 $\pm$ 3,21	41 $\pm$ 0,58
Boro	mg dm ⁻³	0,22 $\pm$ 0,04	0,15 $\pm$ 0,02
Cobre (DTPA)	mg dm ⁻³	1,8 $\pm$ 0,05	1,4 $\pm$ 0,10
Ferro (DTPA)	mg dm ⁻³	15 $\pm$ 0,58	8 $\pm$ 0,58
Manganês (DTPA)	mg dm ⁻³	18,8 $\pm$ 0,59	7,3 $\pm$ 0,72
Zinco (DTPA)	mg dm ⁻³	0,6 $\pm$ 0,06	0,2 $\pm$ 0,00
Areia (> 0,05 mm)	g kg ⁻¹	553 $\pm$ 12,86	
Silte (> 0,002 e < 0,05 mm)	g kg ⁻¹	81 $\pm$ 3,21	
Argila (< 0,002 mm)	g kg ⁻¹	372 $\pm$ 19,05	
Textura	-	Argilosa	

Fonte: (Prates, 2020).

⁽¹⁾Raij et al. (2001). ⁽²⁾Teixeira et al. (2017). CTC = Capacidade de troca catiônica. SB = Soma de bases. V = Saturação por bases.

Anteriormente a semeadura das culturas, foi realizado o tratamento das sementes por meio dos fungicidas tiofanato metílico + piraclostrobina (5 g + 45 g do i.a. por 100 kg de semente) e do inseticida fipronil (50 g do i.a. por 100 kg de semente). As sementes de feijão também receberam aplicação de CoMo (39,21 mL), para estimular a inoculação que foi feita com *Rhizobium tropici* (80 g de inoculante para cada 50 kg de semente) junto a uma solução açucarada (60 mL). A semeadura do cultivar de arroz BRS Esmeralda na safra (25/11/17 e 03/11/18) e do cultivar de feijão BRS Estilo na segunda safra (05/05/18 e 08/05/19), foram realizadas mecanicamente (Anexo 7).

Os tratamentos com o CLE receberam a complementação mineral para o fornecimento dos macronutrientes levando-se em consideração as análises químicas do solo e as recomendações contidas no Boletim 100 (RAIJ et al., 1997). Para tal, na

adubação de semeadura da cultura do arroz utilizou-se 300 kg ha⁻¹ da formulação NPK 8-28-16 (na forma de ureia, superfosfato triplo e cloreto de potássio), sendo colocados 24 kg ha⁻¹ de N, 84 kg ha⁻¹ de P₂O₅ e 48 g ha⁻¹ de K₂O, na safra dos dois anos agrícolas. Além da adubação de semeadura, para as parcelas referentes ao tratamento com adubação convencional, foram aplicados na fase da emergência 1,0 kg ha⁻¹ de boro usando-se ácido bórico (H₃BO₃) em ambas as safras, e zinco na forma de sulfato de zinco (ZnSO₄) nas doses de 5,0 kg ha⁻¹ e 3,0 kg ha⁻¹ nas safras dos anos agrícolas 2017/18 e 2018/19, respectivamente. A adubação nitrogenada de cobertura (dose de 100 kg ha⁻¹ de N na forma de ureia) no arroz foi parcelada em duas vezes, com metade da dose aplicada na fase do perfilhamento e metade no início da diferenciação da panícula (CANTARELLA; FURLANI, 1997). Após a adubação de cobertura a área foi irrigada via pivô central (lâmina de 14 mm) para minimizar as perdas de N por volatilização.

Na adubação de semeadura do feijoeiro, em ambos os anos agrícolas, foi aplicada a dose de 400 kg ha⁻¹ do adubo de formulação 04-20-20 na forma de ureia, superfosfato triplo e cloreto de potássio, sendo colocados 16 kg ha⁻¹ de N, 80 kg ha⁻¹ de P₂O₅ e 80 kg ha⁻¹ de K₂O. Apenas nas parcelas referentes ao tratamento com adubação convencional, foram aplicados no primeiro ano (2017/18) 1,0 kg ha⁻¹ de boro utilizando o ácido bórico (H₃BO₃), no ano agrícola 2018/19, os teores de B no solo estavam adequados. A adubação de cobertura na cultura do feijão foi realizada conforme as recomendações de Ambrosano et al. (1997a). Desse modo, aplicou-se 90 kg ha⁻¹ de N (via ureia) nas parcelas com os tratamentos que receberam adubação mineral convencional (Anexo 8). Essa dose foi parcelada, sendo aplicado 50,0 e 40,0 kg ha⁻¹ de N aos 15 e 30 dias após a semeadura (DAS), respectivamente. Nos tratamentos que receberam o CLE, foi aplicado 50 kg ha⁻¹ de N (na forma de ureia) apenas aos 15 DAS. A distribuição dos fertilizantes minerais foi realizada de forma manual, sobre a superfície do solo, sem incorporação, ao lado e aproximadamente 8 cm das linhas de semeadura, a fim de se evitar o contato do fertilizante com as plantas. Após as aplicações, a área foi irrigada via pivô central. Nas parcelas referentes ao tratamento controle não foram aplicados fertilizantes minerais ou CLE.

Houve monitoramento do clima durante todo o ciclo da cultura (Anexo 2). A área foi irrigada por um sistema de aspersão do tipo pivô central, com lâmina de água

média de 14 mm e turno de rega de cerca 72 h, quando necessário. A irrigação e o manejo fitossanitário, foram realizados de acordo com os cultivos anteriores e conforme as recomendações técnicas para a cultura na região (Anexo 9).

3.5. Parâmetros avaliados nos anos agrícolas 2017/18 e 2018/19

a) Teores disponíveis de micronutrientes no solo

A amostragem do solo (0–20 e 20–40 cm de profundidade) foi realizada ao final do ciclo da cultura, dentro da área útil de cada parcela. Foram coletadas cinco subamostras por parcela, aleatoriamente, para compor uma amostra composta. Essas amostras foram retiradas com o auxílio de um amostrador mecânico (marca Still). Na sequência, as amostras foram secas ao ar, destorroadas e passadas em peneira com 2 mm de abertura de malha, acondicionadas em sacos de polietileno, identificadas e armazenadas em câmara seca até o momento das análises (Anexo 10).

Os teores disponíveis de Cu, Fe, Mn e Zn no solo foram obtidos por meio do extrator químico DTPA em pH 7,3 (ABREU; ANDRADE, 2001), sendo estes elementos quantificados por espectrometria de emissão atômica por plasma acoplado indutivamente (ICP-AES) – Modelo Varian Vista-MPX, Varian, CA, EUA, com respectivos comprimentos de onda em nm: Cu = 324,7; Fe = 259,9; Mn = 257,6 e Zn = 206,2. O limite de detecção para os elementos analisados foi estabelecido pela leitura do branco da amostra (areia lavada) sete vezes e calculada pela fórmula: $LD = 3.s$, onde s é o desvio padrão. O teor de B no solo foi avaliado por meio de extração com cloreto de bário, usando aquecimento com forno de micro-ondas e quantificado em espectrofotômetro UV-VIS (Modelo Varian Cary-50, Varian, Victoria, Australia) a 420 nm (ABREU et al., 2001).

b) Parâmetros nutricionais da cultura do feijão

O estado nutricional da cultura foi avaliado por ocasião do estágio R6 (florescimento) de desenvolvimento do feijoeiro cultivado na segunda safra nos anos agrícolas 2017/18 e 2018/19. Para tal, foram coletadas aleatoriamente a terceira folha com pecíolo, tomadas no terço médio de 10 plantas por parcela, conforme descrito por Ambrosano et al. (1997b) (Anexo 11). Depois de lavadas, as amostras correspondentes a cada parcela do campo, foram secas em estufa de circulação forçada de ar, à temperatura de 65°C por 72 h, trituradas em moinho tipo Willey e

armazenadas até o momento das análises. Esse mesmo material foi submetido à digestão por via úmida, com ácido nítrico (HNO_3) e ácido perclórico (HClO_4) (MALAVOLTA et al., 1997) para a determinação dos teores de Cu, Fe, Mn e Zn e digestão por via seca (incineração em mufla) para a determinação do B. No estágio de maturação fisiológica foram coletadas 10 plantas para realizar a extração da parte aérea da cultura do feijão (exceto os grãos), sendo multiplicado pelos teores de nutrientes na matéria seca da parte aérea e extrapolado com base na população de plantas.

c) Exportação e produtividade de grãos

Para estimar a produtividade de grãos, todas as plantas da área útil foram colhidas e trilhadas manualmente para evitar perdas, pesadas e, após estes procedimentos, realizou-se os cálculos com extrapolação para kg ha^{-1} e corrigidos para o teor de 13% de umidade (base úmida) (SABUNDJIAN et al., 2016) (Anexo 12). Foram retiradas amostras destes grãos para a análise nutricional, e desta forma, fazer o cálculo de exportação, que é realizado pela produtividade do grão por hectare em matéria seca (obtida por amostras retiradas por ocasião da colheita).

3.6. Análises estatísticas

Os resultados obtidos foram submetidos à análise de variância, sendo aplicado o teste de Tukey ($P \leq 0,05$), comparando os tratamentos principais (doses do CLE, controle e adubação convencional) e os tratamentos secundários (2017/18 e 2018/19). Também, foram realizados estudos de regressão polinomial para as interações significativas e/ou efeitos de doses do CLE, utilizando a parcela controle como dose zero. A análise estatística foi realizada por meio do programa AgroEstat (BARBOSA; MALDONATO, 2009).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Extração e exportação dos micronutrientes

Na extração de micronutrientes realizada pelo feijoeiro de inverno, foi observado diferença para todos os nutrientes analisados dentro do tratamento principal (doses de CLE, controle e a adubação mineral convencional) (Tabela 3).

Na extração de B, o tratamento que recebeu adubação mineral convencional, foi o que obteve os maiores resultados nos dois anos agrícolas, sendo encontrado teores de 26,64 e 50,02 g ha⁻¹ de B, na adubação mineral convencional este micronutriente é fornecido por fontes solúveis, se tornando prontamente disponível para as plantas fazerem uso, já como fontes orgânicas ele é liberado gradativamente. O menor teor de B extraído pelas plantas foi observado no tratamento controle, no qual não foi aplicada nenhuma fonte de micronutrientes, sendo verificado 5,25 e 20,89 g ha⁻¹ de B, no primeiro e no segundo ano avaliado, respectivamente.

Tanto para o Fe quanto para o Mn, nos dois anos agrícolas, notou-se que a extração foi maior no tratamento que recebeu a adubação mineral convencional, podendo-se verificar teores de 370,92 g ha⁻¹ de Fe e 130,50 g ha⁻¹ de Mn no primeiro ano e de 632,30 g ha⁻¹ de Fe e 161,32 g ha⁻¹ de Mn no segundo ano. Já para a extração de Cu e Zn, houve respostas distintas nos dois anos de cultivo do feijoeiro. Para o Cu a maior extração do nutriente ocorreu no primeiro ano, nas análises de solo realizadas em duas profundidades (0–20 e 20–40 cm) (Tabela 6), mostra que para as duas camadas avaliadas o primeiro ano tem teores maiores quando comparado com o segundo ano de cultivo. No caso do Zn, a maior extração ocorreu no segundo ano de cultivo, corroborando com os teores presentes no solo (Tabela 6), que na primeira camada (0–20 cm) apresentou os maiores valores no segundo ano de cultivo. Porém, nos dois casos, o tratamento que apresentou os maiores valores foi o que recebeu adubação mineral convencional, no qual a cultura extraiu 9,33 g ha⁻¹ de Cu no primeiro ano e 47,02 g ha⁻¹ de Zn no segundo ano. A menor extração foi observada no tratamento controle no primeiro ano de cultivo, podendo-se notar médias de 4,24 g ha⁻¹ de Cu e 23,17 g ha⁻¹ de Zn (Tabela 3). De modo geral os valores obtidos no presente estudo foram inferiores ao encontrado por Perez et al., (2013), que avaliou o sistema de plantio direto em diferentes doses e épocas de adubação nitrogenada via adubo mineral (60 kg ha⁻¹ pré-semeadura; 60 kg ha⁻¹ no estágio V4; 60 kg ha⁻¹ na pré-semeadura + 60 kg ha⁻¹ em cobertura) na cultura do feijão.

Em relação aos anos agrícolas (2017/18 e 2018/19), o Cu foi o único nutriente que não diferiu entre os dois anos (Tabela 3). Os micronutrientes B, Fe e Zn apresentaram maiores diferenças para os teores extraídos pelas plantas de feijão comum nos dois anos agrícolas.

Tabela 3. Extração de micronutrientes (g ha⁻¹) em resposta ao efeito dos tratamentos aplicados e dos anos de cultivo da cultura do feijão.

Tratamentos	B		Cu		Fe		Mn		Zn	
	2017/18	2018/19	2017/18	2018/19	2017/18	2018/19	2017/18	2018/19	2017/18	2018/19
Adubação mineral convencional	26,64aB	50,02aA	9,33aA	7,66aA	370,92aB	632,30aA	130,50aA	161,32aA	24,38aB	47,02aA
Controle	5,25bB	20,89cA	4,24bA	5,00aA	89,10bB	269,48bA	28,27bA	52,02bA	17,95aA	23,17cA
5,0 t ha ⁻¹ de CLE (base úmida)	14,17abB	35,36abcA	7,47abA	2,69aB	80,75bB	379,65bA	39,60bA	80,37bA	10,40aB	33,20abcA
7,5 t ha ⁻¹ de CLE (base úmida)	14,23abB	44,28abA	5,54abA	5,53aA	166,22abB	440,10abA	68,47bA	87,10bA	16,40aB	45,95abA
10,0 t ha ⁻¹ de CLE (base úmida)	15,70abB	32,02bcA	5,62abA	4,75aA	139,25bB	345,50bA	53,52bA	74,70bA	16,25aB	30,80bcA
12,5 t ha ⁻¹ de CLE (base úmida)	17,47abB	37,40abA	7,03abA	5,58aA	162,80abB	337,18bA	60,15bA	79,87bA	18,97aB	42,07abA
<i>Teste F</i>										
Tratamentos	11,18**		3,59*		14,31**		46,16**		6,92**	
Anos agrícolas	94,23**		3,32 ^{NS}		55,54**		6,93*		71,47**	
CV (%) Parcelas	26,62		35,70		29,85		19,83		24,09	
CV (%) Subparcelas	28,81		43,31		38,00		44,50		29,58	

**, * e ^{NS} – Significativo a 1 e 5% de probabilidade e não significativo, respectivamente. Médias seguidas da mesma letra (minúsculas para os tratamentos e maiúscula para os anos agrícolas) na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. Adubação mineral convencional = tratamento do qual a fonte de nutrientes para o solo foi inteiramente mineral e as doses recomendadas de acordo com Raji et al. (1997); Controle = tratamento que não foi aplicado nenhuma fonte de nutrientes. CLE = composto de lodo de esgoto.

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Os maiores valores de extração foram observados no ano agrícola de 2018/19. Isso provavelmente se deve ao fato do grande aporte de biomassa no segundo ano, além de bom estado de plantas, resultando maior quantidade extraída por hectare, ocorrendo tanto para os tratamentos com a aplicação do CLE, quanto para a adubação mineral (Tabela 3). Quando essas informações são confrontadas com as obtidas no solo (Tabela 6), é possível notar que no geral o solo se comportou de maneira inversa, sendo que para a maior parte dos micronutrientes os maiores teores foram encontrados no primeiro ano de cultivo, contribuindo para a hipótese de que o segundo de cultivo tenha extraído mais micronutrientes do que o primeiro.

A ordem de micronutrientes extraídos pela parte aérea do feijão foi: $Fe > Mn > Zn > B > Cu$. A adequado atendimento das necessidades nutricionais básicas, regula a capacidade de extração de nutrientes pelo feijão-comum. Assim, quanto mais macronutrientes forem fornecidos, maior será a demanda das plantas por micronutrientes, em especial, para cultivares que consigam expressar um bom potencial produtivo (FERNANDES et al., 2013; FAGERIA et al., 2014).

A extração dos micronutrientes B, Fe e Mn aumentaram linearmente no primeiro ano agrícola em função da aplicação das doses de CLE (Figura 1). Ademais, a extração dos três micronutrientes foi menor quando comparado aos teores obtidos no segundo de cultivo do feijoeiro. No segundo ano, as doses de CLE não influenciaram a extração de B, Fe e Mn, sendo notado teores médios de 33,99, 354,38 e 74,82 g ha⁻¹, respectivamente (Figura 1).

A exportação de micronutrientes realizada pelo feijoeiro (Tabela 4), mostra que apenas o B e o Cu obtiveram respostas aos diferentes tipos de fornecimento de micronutrientes (tratamento principal - adubação convencional, parcelas controle e doses de CLE), já que os outros se mostraram não significativos, mas ainda assim, o B quando utilizado o teste de médias não apresenta nenhuma diferença entre as doses de CLE, o controle e a adubação mineral. Para o Cu, no primeiro ano, também não houve diferença entre as médias, apenas no segundo apresentou diferença, no qual o maior resultado foi no tratamento com a maior dose de CLE, com uma exportação de 83,86 g ha⁻¹.

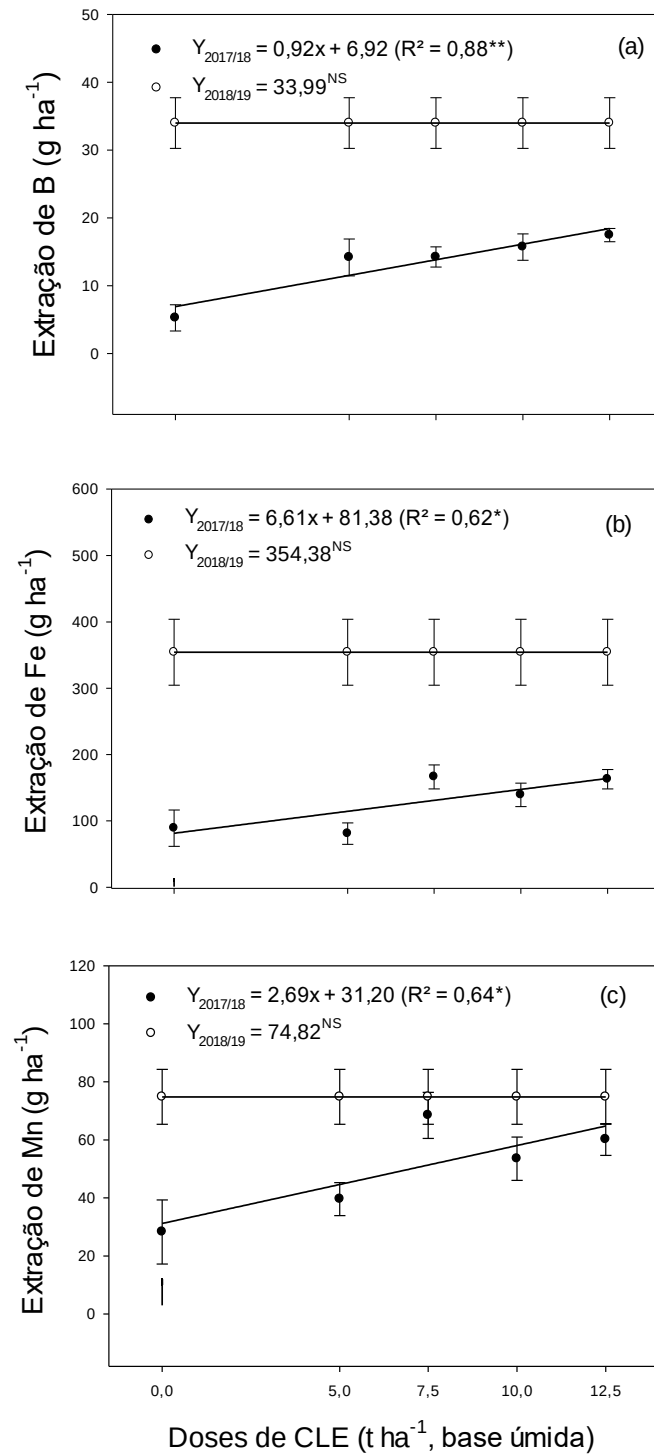


Figura 1. Extração de B (a), Fe (b) e Mn (c) no feijoeiro em resposta a aplicação de doses de composto de lodo de esgoto (CLE). **, * e ^{NS} – Significativo a 1 e 5% e não significativo, respectivamente.

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Tabela 4. Exportação de micronutrientes (g ha⁻¹) em resposta ao efeito dos tratamentos aplicados e dos anos de cultivo da cultura do feijão

Tratamentos	B		Cu		Fe		Mn		Zn	
	2017/18	2018/19	2017/18	2018/19	2017/18	2018/19	2017/18	2018/19	2017/18	2018/19
Adubação mineral convencional	53,65aA	33,93aB	36,25aB	68,63abA	242,98aA	180,67aA	54,49aA	20,87aB	105,31aA	78,76aA
Controle	36,61aA	27,48aA	22,83aB	58,27bcA	128,53bA	179,48aA	35,26bA	21,18aB	48,67bB	84,46aA
5,0 t ha ⁻¹ de CLE (base úmida)	41,41aA	38,23aA	26,82aB	63,43abA	154,12abA	196,89aA	43,34abA	24,58aB	78,88abA	104,39aA
7,5 t ha ⁻¹ de CLE (base úmida)	46,41aA	42,37aA	32,17aA	38,73cA	190,76abA	201,04aA	49,87abA	20,70aB	83,99abA	98,36aA
10,0 t ha ⁻¹ de CLE (base úmida)	45,70aA	43,34aA	31,55aB	72,65abA	185,23abA	215,46aA	49,53abA	22,44aB	87,75abA	100,22aA
12,5 t ha ⁻¹ de CLE (base úmida)	45,05aA	36,86aA	32,58aB	83,86aA	184,12abA	224,20aA	52,22abA	27,14aB	77,88abA	108,28aA
<i>Teste F</i>										
Tratamento principal	2,96*		5,92**		1,77 ^{NS}		1,93 ^{NS}		2,33 ^{NS}	
Anos agrícolas	8,66**		120,50**		2,27 ^{NS}		98,78**		5,81*	
CV (%) Parcelas	19,11		20,83		24,06		22,74		22,26	
CV (%) Subparcelas	22,35		22,61		22,54		24,44		25,02	

**, * e ^{NS} – Significativo a 1 e 5% de probabilidade e não significativo, respectivamente. Médias seguidas da mesma letra (minúsculas para o tratamento principal e maiúscula para os anos agrícolas) na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. Adubação mineral = tratamento do qual a fonte de nutrientes para o solo foi inteiramente mineral e as doses recomendadas de acordo com Raij et al. (1997); Controle = tratamento que não foi aplicado nenhuma fonte de nutrientes. CLE = composto de lodo de esgoto.

Fonte: Elaboração do próprio autor.

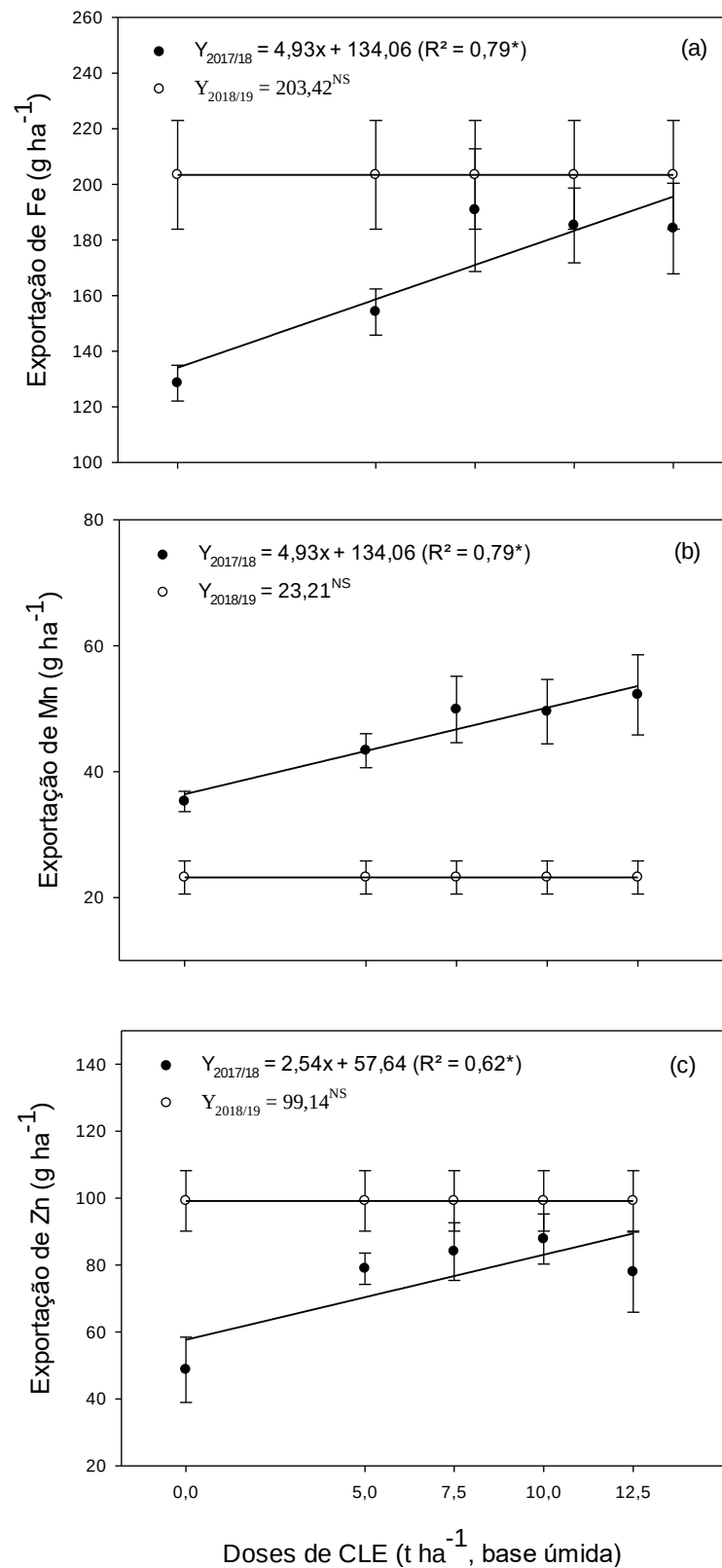


Figura 2. Exportação de Fe (a), Mn (b) e Zn (c) na cultura do feijoeiro em resposta a aplicação de doses de composto de lodo de esgoto (CLE). * e ^{NS} – Significativo a 5% e não significativo, respectivamente.

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Quanto aos anos agrícolas, o Fe é o único nutriente que não diferiu entre os tratamentos. De acordo com o teste de Tukey, apenas a adubação mineral convencional para o B e o tratamento controle para o Zn apresentaram diferenças entre os anos de cultivo, sendo que para B, o maior teor foi no primeiro ano e para Zn no segundo. Comparando os anos de cultivo os maiores valores de exportação de Cu foram no segundo ano, entretanto na dose de $7,5 \text{ t ha}^{-1}$ de CLE as médias foram iguais pelo teste de Tukey. A exportação de Mn diferiu em todos os tratamentos, onde o primeiro ano agrícola obteve valores maiores.

A ordem dos micronutrientes exportados na cultura do feijão, apresentaram comportamento distinto nos dois anos, sendo eles os seguintes: ano agrícola de 2017/18 – $\text{Fe} > \text{Zn} > \text{Mn} > \text{B} > \text{Cu}$; ano agrícola 2018/19 – $\text{Fe} > \text{Zn} > \text{Cu} > \text{B} > \text{Mn}$.

Os resultados obtidos no primeiro ano agrícola corroboram os trabalhos de Fageria et al. (2007) e Fernandes et al. (2013), que avaliaram a exportação de micronutrientes no feijoeiro com doses de fertilizantes minerais. Notou-se que no segundo ano agrícola, a cultura exportou mais Cu, deixando de ser o nutriente menos exportado pelo feijoeiro para ser o terceiro mais exportado. Fageria; Baligar; Zobel (2007) avaliaram três doses de calcário (0, 12 e 24 t ha^{-1}) e sete doses de B (0, 2, 4, 8, 12, 16 e 24 kg ha^{-1}) na cultura do feijão comum, sendo verificado que tanto para a parte aérea quanto para grãos, o Cu apresentou os menores valores de exportação. Em relação à exportação de Fe, Mn e Zn, observou-se incremento linear (Figura 2), aumentando a quantidade exportada conforme houve aumento das doses de CLE. Entretanto, o aumento ocorreu apenas no primeiro ano de cultivo da cultura, sendo que, no segundo ano não houve diferença em relação a dose de CLE aplicada e a quantidade de micronutriente exportada.

4.2. Teores de micronutrientes na folha

Exceto para o Fe na folha diagnose, verificou-se diferenças entre os tratamentos principais para B, Cu, Mn e Zn (Tabela 5). Para B, Cu e Mn no cultivo de 2017/18, os tratamentos principais foram similares, porém, em 2018/19 o B apresentou um teor médio de $19,25 \text{ mg kg}^{-1}$ nas parcelas onde aplicou-se 5 t ha^{-1} de CLE, sendo um valor inferior aos demais tratamentos, já o Cu em resposta a dose de 5 t ha^{-1} de CLE obteve um teor médio na folha de $20,25 \text{ mg kg}^{-1}$, diferenciando-se entre os tratamentos positivamente.

Tabela 5. Teor de micronutrientes na folha (mg kg⁻¹) em resposta ao efeito dos tratamentos aplicados e dos anos de cultivo da cultura do feijão

Tratamentos	B		Cu		Fe		Mn		Zn	
	2017/18	2018/19	2017/18	2018/19	2017/18	2018/19	2017/18	2018/19	2017/18	2018/19
Adubação mineral convencional	41,25aA	34,25aB	16,00aA	11,75abcA	196,25aA	152,00aA	61,75aB	99,00aA	54,25abA	43,75aB
Controle	38,75aA	25,75abB	16,00aA	5,75cB	160,75aA	130,00aA	49,25aA	49,75bA	44,25bA	42,00aA
5,0 t ha ⁻¹ de CLE (base úmida)	43,75aA	19,25bB	16,25aA	20,25aA	124,75aA	137,25aA	52,75aA	53,00bA	53,25abA	51,25aA
7,5 t ha ⁻¹ de CLE (base úmida)	40,00aA	34,00aB	17,00aA	16,25abA	120,00aA	133,75aA	46,75aA	42,75bA	54,75abA	46,75aA
10,0 t ha ⁻¹ de CLE (base úmida)	43,00aA	36,00aB	17,75aA	7,75bcB	133,75aA	144,25aA	50,00aA	43,75bA	50,25abA	47,75aA
12,5 t ha ⁻¹ de CLE (base úmida)	37,75aA	33,50aA	14,75aA	5,00cB	223,25aA	142,00aB	48,25aA	48,25bA	60,00aA	47,00aB
<i>Teste F</i>										
Tratamento principal	1,95 ^{NS}		4,21*		2,51 ^{NS}		22,67**		4,09*	
Anos agrícolas	84,77**		13,68**		1,61 ^{NS}		5,77*		11,19**	
CV (%) Parcelas	17,95		32,66		27,63		14,71		10,26	
CV (%) Subparcelas	10,87		35,30		36,32		12,40		13,31	
<i>Limites de interpretação⁽¹⁾</i>	15– 26		4 – 20		40 – 140		15 – 100		18 – 50	

**, * e ^{NS} – Significativo a 1 e 5% de probabilidade e não significativo, respectivamente. Médias seguidas da mesma letra (minúsculas para o tratamento principal e maiúscula para os anos) na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. ⁽¹⁾ Ambrosano et al. (1997a). Adubação mineral = tratamento do qual a fonte de nutrientes para o solo foi inteiramente mineral e as doses recomendadas de acordo com Raji et al. (1997); Controle = tratamento que não foi aplicado nenhuma fonte de nutrientes.

Fonte: Elaboração do próprio autor.

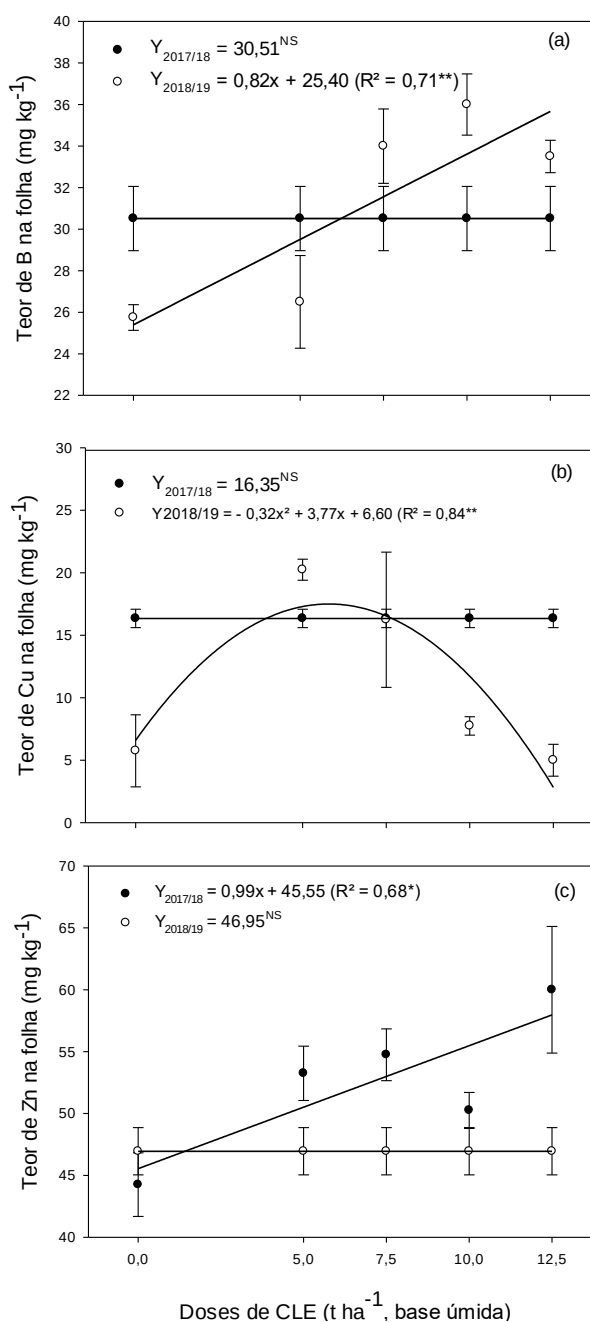


Figura 3. Teor de B (a), Cu (b) e Zn (c) na folha do feijoeiro em resposta a aplicação de doses composto de lodo de esgoto (CLE). **, * e ^{NS} – Significativo a 1 e 5% e não significativo, respectivamente.

Fonte: Elaboração do próprio autor.

O Mn obteve um valor de 99,00 mg kg⁻¹ na adubação mineral, sendo diferente positivamente em relação aos outros tratamentos. Houve diferença para os teores de Zn em relação aos tratamentos estudados no primeiro ano, a dose de 12,5 t ha⁻¹ de CLE alcançou um teor de 60,00 mg kg⁻¹, assim superior aos demais tratamentos.

Na comparação dos anos agrícolas em relação aos micronutrientes na folha do feijoeiro (Tabela 5), o B apresentou os maiores teores no primeiro ano agrícola (2017/18). O Cu apresentou os melhores resultados também no primeiro ano, exceto para a adubação mineral convencional e as doses de 5 e 7,5 t ha⁻¹ de CLE (base úmida), que de acordo com o teste de Tukey não diferiram entre os anos. O Fe diferiu na dose 12,5 t ha⁻¹ de CLE no primeiro ano e o Mn na adubação mineral no segundo ano.

O Zn diferiu entre o tratamento que recebeu apenas adubação mineral e o tratamento no qual foi aplicada a dose 12,5 t ha⁻¹ de CLE (base úmida), obtendo os maiores resultados no primeiro ano agrícola.

Os teores foliares de B e Zn incrementaram linearmente em resposta às doses de CLE aplicadas. Já o Cu se ajustou a um modelo de regressão quadrático (Figura 3). Os teores de B e Cu não foram influenciados pelos tratamentos no primeiro ano agrícola. No segundo ano, a aplicação das doses de CLE aumentou de modo linear os teores foliares de B e promoveu ajuste quadrático para os teores de Cu, sendo observado que a dose de 5,0 t ha⁻¹ de CLE (base úmida) proporcionou o maior teor de Cu nas folhas do feijoeiro (17,70 mg kg⁻¹) (Figuras 3a e 3b). Em contrapartida os teores de Zn na folha só foram diferentes no primeiro ano, sendo que as respostas foram lineares, aumentando o teor foliar de Zn à medida que a dose de CLE também se elevou (Figura 3c). Houve respostas ao CLE nos micronutrientes referidos, porém, não houve um aumento nos teores foliares de micronutrientes em relação a aplicação do adubo mineral e do tratamento controle, assim como constatou Bertolazi et al. (2017) em seu estudo com o cultivo inicial de eucalipto e Prates et al. (2020) com a cultura da soja, ambos em função da aplicação de doses de CLE.

4.3. Teores de micronutrientes presentes no solo

Quanto aos micronutrientes presentes no solo (Tabela 6), o Cu e o Fe apresentaram diferença entre os tratamentos principais no primeiro ano, na profundidade de 0–20 cm pelo teste de Tukey, obtendo ambos o maior teor do micronutriente para a dose de 5,0 t ha⁻¹ de CLE, sendo respectivamente 1,82 e 24,25 mg dm⁻³. No segundo ano o Cu, Mn e Zn apresentaram diferenças entre os tratamentos. O Cu obteve o teor mais alto na dose de 12,5 t ha⁻¹ de CLE. O Mn na adubação convencional e tratamento controle e o Zn na dose de 10,0 t ha⁻¹ de CLE,

apresentando valores de 1,77, 17,10-16,92 e 2,97 mg dm⁻³, respectivamente. Para profundidade de 20–40 cm, no primeiro ano de cultivo, o teor do Zn variou entre os tratamentos, no qual na dose de 12,5 t ha⁻¹ de CLE o teor desse micronutriente no solo em subsuperfície chegou até 1,05 mg dm⁻³. No segundo ano de cultivo, o Mn também variou entre os tratamentos, obtendo no tratamento controle e na dose 12,5 t ha⁻¹ de CLE, seu maior teor no solo (14,47 e 14,57 mg dm⁻³).

Os teores iniciais no solo da área do experimento (Tabela 2), nota-se que para o B e Zn na profundidade de 0–20 cm, houve um incremento no teor desses elementos e na profundidade de 20–40 cm o incremento foi em praticamente todos os micronutrientes estudados, o que demonstra a capacidade do fertilizante orgânico de fornecer esses micronutrientes para o solo, exceto para o Cu, que no segundo ano apresentou uma queda nos teores encontrados no solo. Dentre os micronutrientes estudados, o Zn apresentou um grande aumento no seu teor no solo para as duas profundidades avaliadas, assim como também ocorreu no estudo de Silva et al. (2022), que avaliou as mudanças das propriedades químicas do solo após a aplicação do CLE para o cultivo da cultura da cana-de-açúcar em solo de Cerrado.

Comparando os dois anos de cultivo (2017/18 e 2018/19) para os micronutrientes presentes no solo após o cultivo de feijão (Tabela 6), na profundidade de 0–20 cm todos os elementos estudados apresentaram diferenças entre as respostas dos dois anos agrícolas. Para B, Mn e Zn a diferença foi significativa para o teste F, mas não apresentou diferenças em todos os tratamentos pelo teste de médias Tukey, obtendo os maiores valores para o segundo ano de cultivo da cultura. De acordo com os limites de interpretação descritos por Raji et al. (1997a), do primeiro ano para o segundo o B passou de teor baixo para teor médio. Para Cu e Fe, as diferenças entre os anos foram maiores, porém, os maiores teores foram verificados no primeiro ano agrícola.

Na profundidade de 20–40 cm, apenas o B não apresentou diferença entre os dois anos de cultivo. Nesta profundidade as diferenças foram maiores, e para todos os quatro micronutrientes (Cu, Fe, Mn e Zn), o primeiro ano agrícola obteve teores mais altos, tendo como evidência o Cu.

Tabela 6. Teores de micronutrientes no solo (mg kg^{-1}), na profundidade de 0–20 e 20–40 cm em resposta ao efeito dos tratamentos aplicados e dos anos de cultivo da cultura do feijão comum.

Tratamentos	B		Cu		Fe		Mn		Zn	
	2017/18	2018/19	2017/18	2018/19	2017/18	2018/19	2017/18	2018/19	2017/18	2018/19
0–20 cm										
Adubação mineral convencional	0,18aA	0,30aA	1,52bA	1,33bB	17,50bA	12,67aB	14,15aB	17,10aA	1,07aB	2,40abA
Controle	0,15aA	0,25aA	1,70abA	1,43bB	21,00abA	14,00aB	15,60aA	16,92aA	0,77aA	0,80cA
5,0 t ha^{-1} de CLE (base úmida)	0,17aA	0,23aA	1,82aA	1,43bB	24,25aA	13,67aB	14,77aA	14,47abA	1,15aA	1,57bcA
7,5 t ha^{-1} de CLE (base úmida)	0,22aA	0,28aA	1,72abA	1,37bB	22,50abA	12,33aB	14,67aA	13,52bA	1,30aA	1,50bcA
10,0 t ha^{-1} de CLE (base úmida)	0,19aB	0,34aA	1,80abA	1,60abB	22,00abA	14,00aB	14,47aA	14,72abA	1,82aB	2,97aA
12,5 t ha^{-1} de CLE (base úmida)	0,26aA	0,30aA	1,72abA	1,77aA	20,00abA	16,00aA	14,27aB	16,27abA	1,52aB	2,55abA
<i>Teste F</i>										
Tratamentos	2,56 ^{NS}		4,66**		1,93 ^{NS}		2,10 ^{NS}		9,49**	
Anos agrícolas	13,44**		42,29**		90,78**		6,38*		13,00**	
CV (%) Parcelas	25,53		9,34		15,16		10,25		32,07	
CV (%) Subparcelas	34,49		7,57		15,44		7,69		40,88	
20–40 cm										
Adubação mineral convencional	0,17aA	0,17aA	1,60aA	1,12aB	19,50aA	10,67aB	12,70aA	11,60abA	0,40bA	0,37aA
Controle	0,14aA	0,21aA	1,77aA	1,22aB	22,25aA	14,33aB	15,07aA	14,47aA	0,40bA	0,17aA
5,0 t ha^{-1} de CLE (base úmida)	0,15aA	0,14aA	1,77aA	1,17aB	23,50aA	13,33aB	13,52aA	10,77abB	0,47bA	0,27aA
7,5 t ha^{-1} de CLE (base úmida)	0,18aA	0,17aA	1,72aA	1,12aB	24,75aA	11,67aB	13,57aA	9,30bB	0,63bA	0,40aA
10,0 t ha^{-1} de CLE (base úmida)	0,17aA	0,19aA	1,77aA	1,10aB	22,00aA	10,33aB	13,55aA	9,03bB	0,70abA	0,30aB
12,5 t ha^{-1} de CLE (base úmida)	0,19aA	0,19aA	1,85aA	1,32aB	20,50aA	14,00aB	13,25aA	14,57aA	1,05aA	0,35aB
<i>Teste F</i>										
Tratamentos	0,52 ^{NS}		2,45 ^{NS}		2,83 ^{NS}		4,98**		5,80**	
Anos agrícolas	0,17 ^{NS}		358,64**		76,05**		14,97**		29,00**	
CV (%) Parcelas	33,05		9,42		13,24		14,27		37,59	
CV (%) Subparcelas	43,04		7,13		22,34		14,12		42,02	
<i>Limites de interpretação⁽¹⁾</i>										
Baixo	0–0,20		0–0,2		0–4		0–1,2		0–0,5	
Médio	0,21–0,60		0,3–0,8		5–12		1,3–5,0		0,6–1,2	
Alto	> 0,60		> 0,8		> 12		> 5,0		> 1,2	

**, * e ^{NS} – Significativo a 1 e 5% de probabilidade e não significativo, respectivamente. Médias seguidas da mesma letra (minúsculas para os tratamentos e maiúsculas para os anos agrícolas) na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. ⁽¹⁾Raij et al. (2001). Adubação mineral = tratamento do qual a fonte de nutrientes para o solo foi inteiramente mineral e as doses recomendadas de acordo com Raij et al. (1997); Controle = tratamento que não foi aplicado nenhuma fonte de nutrientes.

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Na profundidade de 0–20 cm apenas para o B e o Zn houve ajuste a um modelo de regressão em resposta às aplicações de CLE (Figura 4). Os dois elementos apresentaram uma resposta linear em relação às doses de CLE. Para o B no primeiro ano notou-se aumento linear, já para o Zn, a diferença entre as doses aplicadas ocorreu no segundo ano de cultivo, também mostrando uma resposta linear.

Apenas o Zn obteve um incremento linear em resposta as doses de CLE aplicadas (Figura 5), para a profundidade de 20–40 cm. Apesar de nos dois anos ter sido notado uma resposta significativa das doses de CLE aplicadas, no primeiro ano agrícola, a resposta foi mais expressiva em relação ao segundo ano.

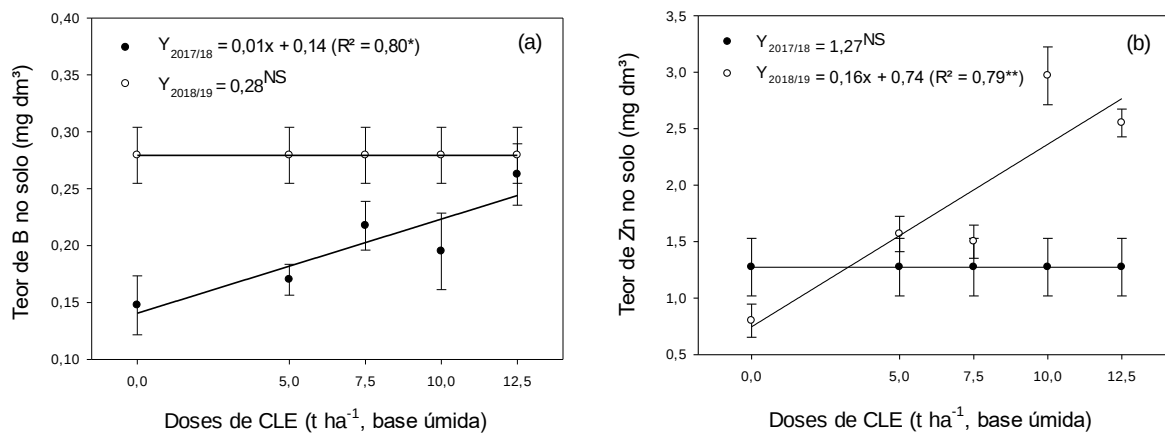


Figura 4. Teor disponível de B (a) e Zn (b) no solo (0–20 cm de profundidade) após o cultivo das plantas de feijão em resposta a aplicação de doses de composto de lodo de esgoto (CLE). **, * e NS – Significativo a 1 e 5% e não significativo, respectivamente. Fonte: Elaboração do próprio autor.

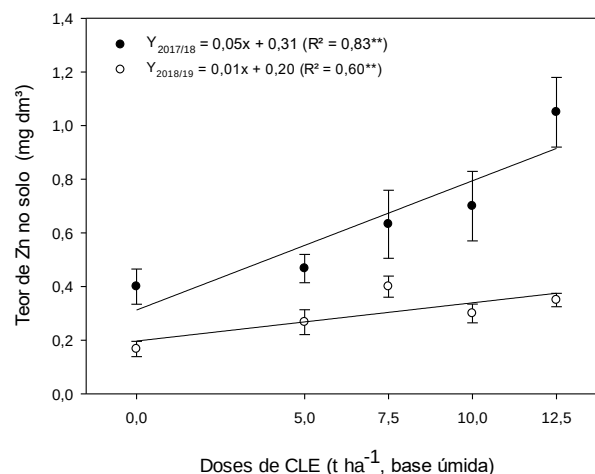


Figura 5. Teor de Zn (a) no solo (20 – 40 cm de profundidade) após o cultivo das plantas de feijão em resposta a aplicação de doses de composto de lodo de esgoto (CLE). ** – Significativo a 1%. Fonte: Elaboração do próprio autor.

Para os teores de micronutrientes presentes no solo, nas duas camadas avaliadas (0–20 e 20–40 cm de profundidade), é importante ressaltar que Cu, Fe, Mn e Zn são determinados no solo pelo método de DTPA, como já mencionado anteriormente e, apesar de ser o método utilizado para avaliar o teor disponível desses nutrientes, é capaz de determinar apenas uma fração desses nutrientes presentes no solo (ABREU; LOPES; SANTOS, 2007). Com isso, outras metodologias podem ser importantes para prever os teores semitotais ($\text{HCl} + \text{HNO}_3$ - USEPA, 2007) e avaliando as ligações (fracionamento químico do solo e da matéria orgânica) desses íons no solo (NOGUEIRA et al., 2010), conseguindo elucidar melhor a dinâmica dos micronutrientes no solo, principalmente, após a aplicação de resíduos orgânicos.

A matéria orgânica presente no CLE, é constituída de ácido húmicos, fúlvicos, polifenóis, aminoácidos, peptídeos, proteínas e polissacarídeos, que são compostos que formam complexos orgânicos com Cu, Fe, Mn e Zn, podendo diminuir a disponibilidade desses elementos se estiverem associados a essas frações no solo (ABREU; LOPES; SANTOS, 2007). Assim, a escolha do método de extração é importante, quando o intuito é entender o mecanismo de retenção de um determinado micronutriente no solo (NOGUEIRA et al., 2013).

4.4. Produtividade

A produtividade do feijoeiro não foi influenciada em resposta aos tratamentos estudados, nos dois anos de cultivo (Tabela 7). Porém, foi possível notar que os valores obtidos nos tratamentos onde aplicou-se o CLE, a produtividade encontrada equiparou-se ao tratamento com adubação mineral. Além disso, a produtividade do feijoeiro comum superou as médias de produção brasileira, tanto para a safra 2017/18 onde o feijão de cores apresentou uma média de 1.268 kg ha^{-1} , quanto para a safra 2018/19 que atingiu 1.474 kg ha^{-1} (CONAB, 2019). Fazendo uma média dos tratamentos que foi adicionado o CLE em comparação com a média do país, houve superação da produção média brasileira de 101% na primeira safra estudada e 82% na segunda.

Tabela 7. Produtividade (kg ha⁻¹) em resposta ao efeito dos tratamentos aplicados e dos anos de cultivo da cultura do feijão

	Produtividade	
	2017/18	2018/19
Tratamentos		
Adubação mineral convencional	2454,62aA	2526,02aA
Controle	1895,77aA	2207,70aA
5,0 t ha ⁻¹ de CLE (base úmida)	2325,00aA	2628,62aA
7,5 t ha ⁻¹ de CLE (base úmida)	2525,50aA	2727,47aA
10,0 t ha ⁻¹ de CLE (base úmida)	2765,17aA	2751,15aA
12,5 t ha ⁻¹ de CLE (base úmida)	2595,05aA	2656,65aA
<i>Teste F</i>		
Tratamentos	2,49 ^{NS}	
Anos agrícolas	1,48 ^{NS}	
CV (%) Parcelas	17,51	
CV (%) Subparcelas	17,74	

**, * e ^{NS} – Significativo a 1 e 5% de probabilidade e não significativo, respectivamente. Médias seguidas da mesma letra (minúsculas para o tratamento principal e maiúscula para os anos) na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. Adubação mineral = tratamento do qual a fonte de nutrientes para o solo foi inteiramente mineral e as doses recomendadas de acordo com Raji et al. (1997); Controle = tratamento que não foi aplicado nenhuma fonte de nutrientes. CLE = composto de lodo de esgoto.

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Utilizando a média geral dos tratamentos onde houve a aplicação do CLE, nota-se também que a produtividade superou a de outros estudos como do Sandrini et al. (2019) que foi de 2.329 kg ha⁻¹, avaliando a produtividade do feijoeiro em função de diferentes doses de nitrogênio. Para outras culturas como a cana-de-açúcar, soja e milho, o CLE já tem mostrado que é capaz de ser uma alternativa viável para aumentar a produtividade sem o uso de fertilizantes minerais (PRATES et al., 2020; PRATES et al., 2022; SILVA et al., 2022). Os resultados encontrados na presente pesquisa evidenciam o CLE também pode ser considerado uma alternativa viável para a cultura do feijão comum. Deve-se ressaltar que se trata de efeito residual das aplicações das doses de CLE.

A produtividade se ajustou a um modelo de regressão linear crescente (Figura 6), que aumenta em resposta as aplicações das doses de CLE para o primeiro ano agrícola, pois, como demonstrado na figura 6, no segundo ano de cultivo não houve influência da aplicação das doses de CLE sendo encontrado uma produtividade média de 2594 kg ha⁻¹. Essa resposta foi semelhante aos estudos realizados por Prates et al., (2020) para cultura da soja, no qual a produtividade apresenta um incremento linear apenas no primeiro ano de cultivo, depois a produção se estabiliza.

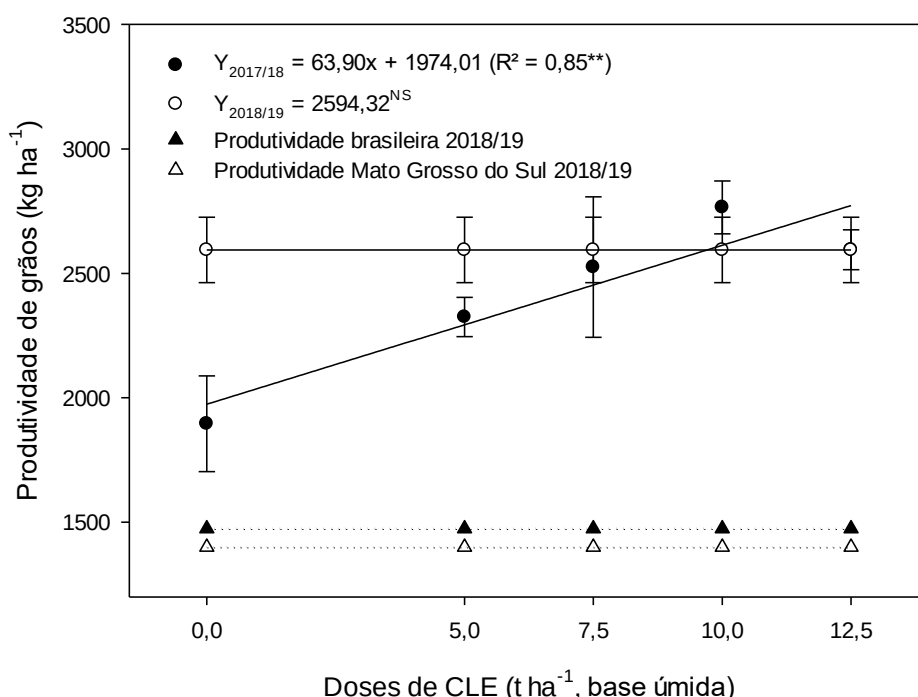


Figura 6. Produtividade de feijão em resposta a aplicação de doses composto de lodo de esgoto (CLE). ** e ^{NS} – Significativo a 1% e não significativo, respectivamente. Produtividade utilizada é a média do feijão de cores segunda safra (CONAB, 2019). Fonte: Elaboração do próprio autor.

5. CONCLUSÕES

1. Para as variáveis avaliadas no estudo do feijoeiro (produtividade, extração, exportação, teor na folha e no solo de micronutrientes) em função das doses de CLE, os resultados apresentaram-se de forma similar quando comparados com a adubação mineral convencional.
2. Os teores foliares de micronutrientes foram superiores no primeiro ano de cultivo, quando comparados com segundo ano. A extração de micronutrientes foi maior no segundo ano de cultivo.
3. Por meio da comparação realizada entre os anos agrícolas foi possível notar variação dentro de cada ciclo produtivo. Todavia, ainda não há um padrão entre as variáveis analisadas sendo necessário estudos a longo prazo.
4. Os teores de micronutrientes nas folhas e no solo ficaram dentro dos limites considerados adequados. Logo, é possível notar que o efeito residual da aplicação do CLE foi capaz de fornecer os nutrientes necessários para um bom desenvolvimento da cultura do feijão comum cultivado em condições de campo.
5. O CLE pode ser utilizado como fertilizante orgânico na complementação da adubação com micronutrientes, em especial, para aumentar os teores de B e Zn no sistema solo-planta.

REFERÊNCIAS

- ABREU, C. A.; LOPES, A. S.; SANTOS, G. Micronutrientes. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ V., V. H.; BARROS, N. F.; FONTES, R. L. F.; CANTARUTTI, R. B.; NEVES, J. C. L. **Fertilidade do Solo**. 1. ed. Viçosa: SBCS, 2007. p. 645–736.
- ABREU, M. F.; ABREU, C. A.; ANDRADE, J. C. Determinação de boro em água quente, usando aquecimento com micro-onda. In: RAIJ, B. van; ANDRANDE, J. C.; CANTARELLA, H.; GUAGGIO, J. A. **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. 1. ed. Campinas: Instituto Agrônomo, 2001. p. 231–239.
- ABREU, M. F.; ANDRADE, J. C. Determinação de cobre, ferro, manganês, zinco, cádmio, cromo, níquel e chumbo em solos usando a solução de DTPA em pH 7,3. In: RAIJ, B. van; ANDRANDE, J. C.; CANTARELLA, H.; GUAGGIO, J. A. **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. 1. ed. Campinas: Instituto Agrônomo, 2001. p. 231–239.
- ALBUQUERQUE, H. C.; ZUBA JUNIO, G. R.; SAMPAIO, R. A.; FERNANDES, L. A.; ZONTA, E.; BARBOSA, C. F. Yield and nutrition of sunflower fertilized with sewage sludge. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 19, n. 6, p. 553–559, 2015.
- ALENCAR, A.; SHIMBO, J. Z.; LENTI, F.; MARQUES, C. B.; ZIMBRES, B.; ROSA, M.; ARRUDA, V.; CASTRO, I.; RIBEIRO, J. P. F. M.; VARELA, V.; ALENCAR, I.; PIONTEKOWSKI, V.; RIBEIRO, V.; BUSTAMANTE, M. M. C.; SANO, E. E.; BARROSO, M. Three Decades of Changes in the Brazilian Savanna Native Vegetation Using Landsat Data Processed in the Google Earth Engine Platform. **Remote Sensing**, v. 12, n. 6, p. 1–23, 2020.
- AMBROSANO, E. J.; TANAKA, R. T.; MASCARENHAS, H. A. A.; RAIJ van, B.; QUAGGIO, J. A.; CANTARELLA, H. Leguminosas e oleaginosas. In: RAIJ, B. van; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A.; FURLANI, A. M. C. **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. 2. ed. Campinas: Instituto Agrônomo de Campinas, 1997b. p. 189–191.
- AMBROSANO, E. J.; WUTKE, E. B.; BULISANI, E. A.; CANTARELLA, H. Feijão. In: RAIJ, B. van; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A.; FURLANI, A. M. C. **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. 2. ed. Campinas: Instituto Agrônomo de Campinas, 1997a. p. 194–195. (Boletim Técnico, 100).
- BANA, R. S.; GROVER, M.; KUMAR, V.; JAT, G. S.; KURI, B. R.; SINGH, D.; KUMAR, H.; BAMBORIYA. Multi-micronutrient foliar fertilization in eggplant under diverse fertility scenarios: Effects on productivity, nutrient biofortification and soil microbial activity. **Scientia Horticulturae**, v. 294, 110781, 2022.
- BARBOSA, J. C.; MALDONATO, J. W. AgroEstat versão 1.0 – Sistema de análises estatísticas de ensaios agrônomicos. Universidade Estadual Paulista, Campus de Jaboticabal, SP. 2009.

BERNAL, M. P.; ALBURQUERQUE, J. A.; MORAL, R. Composting of animal manures and chemical criteria for compost maturity assessment: a review. **Bioresource Technology**, v. 100, n. 22, p. 5444–5453, 2009.

BERTOLAZI, K. B.; DE SOUZA AFÁZ, D. C.; VIANI, R. A. G.; SOUZA, C. F. Viabilidade da aplicação de composto de lodo de esgoto no cultivo inicial de eucalipto. **Revista Ciência, Tecnologia & Ambiente**, Araras, v. 4, n. 1, p. 72–78, 2017.

BOEIRA, R. C.; MAXIMILIANO, V. C. B. Mineralização de compostos nitrogenados após aplicações de lodos de esgoto em quatro cultivos de milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 33, n. 1, p. 207–218, 2009.

BONINI, C. S. B.; DÍAS, R. S.; ALVES, M. C.; ABREU, C. A.; VÁZQUEZ, E. V.; PAZ-FERREIRO, J. Micronutrient contents of a revegetated saprolite exposed by excavation of an Oxisol. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 46, n. 1, p. 283–295, 2015.

BRASIL. **Ministério do Meio Ambiente**. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/biomas/cerradoN>>. Acesso em: 10 fev. 2019.

BURATTO, J. S.; MODA CIRINO, V.; SCHOLZ, M. B. S.; LANGAME, D. E. M.; JÚNIOR, N. S. F.; PRETE, C. E. C. Variabilidade genética e efeito do ambiente para o teor de proteínas em grãos de feijão. **Acta Scientiarum Agronomy**, v. 31, n. 4, p. 593–597, 2009.

CANTARELLA, H.; FURLANI, P. R. Arroz de sequeiro. In: RAIJ, B. van; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A.; FURLANI, A. M. C. **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. 2. ed. Campinas: Instituto Agrônomo de Campinas, 1997. p. 48–49. (Boletim Técnico, 100).

CARDOSO, P. H. S.; GONÇALVES, P. W. B.; ALVES, G. O.; PEGORARO, R. F.; FERNANDES, L. A.; FRAZÃO, L. A.; SAMPAIO, R. A. Improving the quality of organic compost of sewage sludge using grass cultivation followed by composting. **Journal of Environmental Management**, v. 314, 115076, 2022.

CARVALHO, M. C. S.; NUNES, R. S.; NASCENTE, A. S.; SILVEIRA, P. M. Nutrição e adubação do feijão-comum na região do Cerrado. In: FLORES, R. A.; CUNHA, P. P.; MARCHÃO, R. L.; MORAES, M. F. **Nutrição e adubação: de grandes culturas na região do Cerrado**. 1. Ed. Goiânia: Gráfica UFG, 2019. p. 325 – 368.

CARVALHO, N. M., NAKAGAWA, J. **Sementes: ciência, tecnologia e produção**. 4 ed. Jaboticabal: FUNEP, 2000. 588p.

CECCON, G. Milho safrinha no cerrado brasileiro. *Revista Plantio Direto e Tecnologia Agrícola*, p. 5-8, 2018.

CENTRO DE ESTUDOS AVANÇADOS EM ECONOMIA APLICADA (CEPEA) e Confederação Nacional da Agricultura e Pecuária do Brasil (CNA) 2021.

Participação do Agronegócio no PIB do Brasil. Piracicaba: Esalq/USP. Disponível em: <<https://www.cepea.esalq.usp.br/br/releases/pib-agro-cepea-com-avanco-de-24-3-no-ano-pib-agro-alcanca-participacao-de-26-6-no-pib-brasileiro-em-2020.aspx>>. Acesso em: 18 de dezembro de 2021.

CHAGAS, J. K. M.; FIGUEIREDO, C. C.; SILVA, J.; PAZ-FERREIRO, J. The residual effect of sewage sludge biochar on soil availability and bioaccumulation of heavy metals: Evidence from a three-year field experiment, **Journal of Environmental Management**, v. 279, 111824, 2021.

CHENG, H.; XU, W.; LIU, J.; ZHAO, Q.; HE, Y.; CHEN, G. Application of composted sewage sludge (CSS) as a soil amendment for turfgrass growth. **Ecological Engineering, Oxford**, v. 29, n. 1, p. 96-104, 2007.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO – CONAB. **Observatório agrícola – Acompanhamento da safra brasileira: Grãos.** v. 5, n. 12, 2018. Disponível em: <<http://conab.gov.br/>>. Acesso em: 12 dez. 2021.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO – CONAB. **Observatório agrícola – Acompanhamento da safra brasileira: Grãos.** v. 6, n. 12, 2019. Disponível em: <<http://conab.gov.br/>>. Acesso em: 06 dez. 2021.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO – CONAB. **Observatório agrícola – Acompanhamento da safra brasileira: Grãos.** v. 9, n. 10, 2022. Disponível em: <<http://conab.gov.br/>>. Acesso em: 06 ago. 2022.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE – CONAMA. **Resolução nº 498, de 19 de agosto de 2020.** 2020. Disponível em: <https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/resolucao-n-498-de-19-de-agosto-de-2020-273467970>. Acesso em: 12 set. 2020.

CURCI, M.; LAVECCHIA, A.; CUCCI, G.; LACOLLA, G.; DE CORATO, U.; CRECCHIO, C. Short-Term Effects of Sewage Sludge Compost Amendment on Semiarid Soil. **Soil Systems**, Basel, v. 4, n. 48, p. 1-18, 2020.

DECHEN, A. R.; NACHTIGALL, G. R.; CARMELLO, Q. A. C.; SANTOS, L. A.; SPERANDIO, M. V. L. Micronutrientes. In: FERNANDES, M. S.; SOUZA, S. R.; SANTOS, L. A. 2. ed. **Nutrição mineral de plantas.** Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2018. p. 491–562.

DEMATTE, J. L. I. **Levantamento detalhado dos solos do “Campus Experimental de Ilha Solteira”**, Piracicaba: Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. 1980, p. 11–31.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUARIA – EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa do Solo. **Manual de métodos de análise de solo.** 2. ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA, CNPS, 1997. p. 212.

FAGERIA, N. K.; BALIGAR, V. C.; ZOBEL, R. W. Yield, nutrient uptake, and soil Chemical properties as influenced by liming and boron application in common bean

in no-tillage system. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**. v. 38, n. 11, p. 1637–1653, 2007.

FAGERIA, N. K.; STONE, L. F.; SANTOS, A. B.; CARVALHO, M. C. S. **Nutrição mineral do feijoeiro**, 1.ed. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2015, 394p.

FERNANDES, A. M.; SORATTO, R. P.; SANTOS, L. A. Nutrient extraction and exportation by common bean cultivars under different fertilization levels: II – Micronutrients. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 37, n. 4, p. 1043–1056, 2013.

FIDELIS, R. R.; TAVARES, T. C. O.; SOUSA, S. A.; TONELLO, L. P.; LOPES, M. B. S. Comportamento de cultivares de feijão comum cultivados em solos de cerrado. **Brazilian Journal of Applied Technology for Agricultural Science**, v. 10, n. 1, p. 75–82, 2017.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. **FAO. FAOSTAT – production: crops**. Disponível em: <<http://www.fao.org/faostat/en/#data>>. Acesso em 20 de dezembro de 2021.

GALRÃO, E. Z. Micronutrientes. In: SOUZA, D. M. G.; LOBATO, E. **Cerrado: correção do solo e adubação**. 2. ed. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2004. p. 185–226.

HAMDI, H.; HECHMI, S.; KHELIL, M. N.; ZOGHLAMI, I. R.; BENZARTI, S.; MONKNI-TLILI, S.; HASSEN, A.; JEDIDI, N. Repetitive land application of urban sewage sludge: Effect of amendment rates and soil texture on fertility and degradation parameters. **Catena**, v. 172, p. 11–20, 2019.

HARTMAN, W. H.; RICHARDSON, C. J. Differential Nutrient Limitation of Soil Microbial Biomass and Metabolic Quotients (qCO₂): Is There a Biological Stoichiometry of Soil Microbes? **PLOS ONE**, v. 8, n. 3, 0057127, 2013.

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

IVANOVÁ, L.; MACKULÁK, T.; GRABIC, R.; GOLOVKO, O.; KOBÁ, O.; STAŇOVÁ, A. V.; SZABOVÁ, P.; GREŇČÍKOVÁ, A.; BODÍK, I. Pharmaceuticals and illicit drugs – A new threat to the application of sewage sludge in agriculture. **Science of the Total Environment**. v. 634, p. 606–615, 2018.

JAKUBUS, M.; BAKINOWSK, E. Visualization of long-term quantitative changes of microelements in soils amended with sewage sludge compost evaluated with two extraction solutions. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 49, n. 11, p. 1355–1369, 2018.

JATAV, H. S.; SINGH, S. K.; SINGH, Y.; KUMAR, O. Biochar and sewage sludge application increases yield and micronutrient uptake in rice (*Oryza sativa* L.).

Communications in Soil Science and Plant Analysis, v. 49, n. 13, p. 1617–1628, 2018.

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

LANA, R. M. Q.; PEREIRA, R. P.; LANA, A. M. Q.; FARIA, M. V. Utilização de micronutrientes na cultura do feijoeiro cultivado no sistema plantio direto. **Journal of Biosciences**, v. 24, n. 4, p. 58–63, 2008.

LOMBARDI NETO, F.; DRUGOWICH, M. **Manual técnico de manejo e conservação de solo e água**. CATI, v. 2, 1994. 168p.

LOPES, P. A. P.; PEGORARO, R. F.; KONDO, M. K.; SANTOS, S. R.; FERNANDES, L. A. Grain Yield and Microbiological Quality of Cowpea Plants Grown Under Residual Effect of Sewage Sludge Fertilization. **Revista Caatinga**, v. 33, n. 1, p. 21–30, 2020.

MALAVOLTA, E. **Manual de nutrição mineral de plantas**. São Paulo: Agronômica Ceres, 2006. 638 p.

MALAVOLTA, E. **Micronutrientes na adubação**. Nutriplant, 1986. 70p.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S. A. **Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações**. 2. ed. POTAFOS, 1997. 319 p.

MARQUES JUNIOR, E.; ROSAS, J. T. F.; ROCHA, M. R.; ALTOÉ, M. S.; ALVES, K. S.; AMARAL, J. A. T. Efeito da omissão de micronutrientes no desenvolvimento do feijoeiro comum em solução nutritiva. In: **XXI ENCONTRO LATINO AMERICANO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, XVII ENCONTRO LATINO AMERICANO DE PÓS-GRADUAÇÃO E VII ENCONTRO DE INICIAÇÃO À DOCÊNCIA UNIVERSIDADE DO VALE DO PARAÍBA**. 2017. Disponível em: <http://www.inicepg.univap.br/cd/INIC_2017/anais/arquivos/RE_0947_0805_01.pdf>. Acesso em: 14 dez. 2021.

MARSCHNER, H. **Mineral nutrition of higher plants**. 2. ed. San Diego: Academic Press, 1995. 889p.

MATOS, A. **Potencialidades e limitações do uso de Lodo de Esgoto em solo-Aspectos Agronômicos, controle de atratividade de vetores e de impactos ambientais** Belo Horizonte: Visual, 2018. Disponível em: <<http://etes-sustentaveis.org/wpcontent/uploads/2018/05/Palestra-Matos-Workshop-Lodo-2.pdf>>. Acesso em: 11 fev. 2019.

MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO – MAPA. Instrução Normativa n. 61, de 8 de julho de 2020. **Diário Oficial da União**, Secretaria Executiva, Brasília, DF, 14 jul. 2020. Seção 1, p. 5.

MOMANYI, M. R.; NDUKO, J. M.; OMWAMBA, M. Effect of hermetic Purdue Improved Crop Storage (PICS) bag on chemical and anti-nutritional properties of common Bean (*Phaseolus vulgaris* L.) varieties during storage. **Current Research in Food Science**, v. 5, p. 107–116, 2022.

MORETTI, S. M. L.; BERTONCINI, E. I.; ABREU-JUNIOR, C. H. Composting sewage sludge green waste from tree pruning. **Scientia Agricola**, v. 72, n. 5, p. 432–439, 2015.

MORSINK-GEORGALI, P.; KYLILI, A.; FOKAIDES, P. A.; PAPADOPOULOS, A. M. Compost versus biogas treatment of sewage sludge dilemma assessment using life cycle analysis. **Journal of Cleaner Production**, v. 350, 131490, 2022.

NASCIMENTO, A. L.; SOUZA, A. J.; OLIVEIRA, F. C.; COSCIONE, A. R.; VIANA, D. G.; REGITANO, J. B. Chemical attributes of sewage sludges: Relationships to sources and treatments, and implications for sludge usage in agriculture. **Journal of Cleaner Production**, v. 258, 120746, 2020.

NGUYEN, T.; SHIMA, K. Composting of sewage sludge with a simple aeration method and its utilization as a soil fertilizer. **Environmental Management**, New York, v. 63, n. 4, p. 455–465, 2019.

NOGUEIRA, T. A. R.; SAMPAIO, R. A.; FONSECA, I. M.; FERREIRA, C. S.; SANTOS, S. E.; FERREIRA, L. C.; GOMES, E.; FERNANDES, L. A. Metais pesados e patógenos em milho e feijão caupi consorciados, adubados com lodo de esgoto. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 11, n. 3, p. 331–338, 2007.

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

NOGUEIRA, T.A.R.; MELO, W. J.; FONSECA, I. M.; MARQUES, M. O.; HE, Z. Barium uptake by maize plants as affected by sewage sludge in a long-term field study. **Journal of Hazardous Materials**, Amsterdam, v. 181, n. 1-3, p. 1148–1157, 2010.

OSAKI, M. **CEPEA - Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada**. Piracicaba: Esalq/USP, 2022. Disponível em: <<https://www.cepea.esalq.usp.br/br/opinioao-cepea/gasto-medio-com-fertilizantes-para-producao-de-graos-dobra-em-um-ano.aspx>>. Acesso em 26 de maio de 2022.

PEDROSA, M. V. B.; LIMA, W. L.; AMARAL, A. A.; CARVALHO, A. H. O. Biossólido de lodo de esgoto na agricultura: desafios e perspectivas. **Revista Agrogeoambiental**, v. 9, n. 4, 2017.

PEREZ, A. A. G.; SORATTO, R. P.; MANZATTO, N. P.; SOUZA, E. F. C. Extração e exportação de nutrientes pelo feijoeiro adubado com nitrogênio, em diferentes tempos de implantação do sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 37, n. 5, p.1276–1287, 2013.

PETRY, N.; BOY, E.; WIRTH, J. P.; HUNRRELL, R. F. Review: The Potential of the Common Bean (*Phaseolus vulgaris*) as a Vehicle for Iron Biofortification. **Nutrients**, v. 7, n. 2, p. 1144–1173, 11 fev. 2015.

PILNÁČEKA, V.; INNEMANOVÁ, P.; ŠEREŠ, M.; MICHALÍKOVÁ, K.; STRÁNSKÁ, Š.; WIMMEROVÁ, L.; CAJTHAML, T. Micropollutant biodegradation and the hygienization potential of biodrying as a pretreatment method prior to the application of sewage sludge in agriculture. **Ecological Engineering**, v. 127, p. 212–219, 2019.

PRATES, A. R.; COSCIONE, A. R.; TEIXEIRA FILHO, M. C. M.; MIRANDA, B. G.; ARF, O.; ABREU-JUNIOR, C. H.; OLIVEIRA, F. C.; MOREIRA, A.; GALINDO, F. S.; SARTORI, M. M. P.; HE, Z.; JANI, A. D.; CAPRA, G. F.; GANGA, A.; NOGUEIRA, T. A. R. Composted Sewage Sludge Enhances Soybean Production and Agronomic Performance in Naturally Infertile Soils (Cerrado Region, Brazil). **Agronomy**, v. 10, n. 11, p. 1677–1696, 2020.

PRATES, A. R.; KAWAKAMI, K.C.; COSCIONE, A. R.; TEIXEIRA FILHO, M. C. M.; ARF, O.; ABREU-JUNIOR, C. H.; OLIVEIRA, F. C.; MOREIRA, A.; GALINDO, F. S.; HE, Z.; JANI, A. D.; CAPRA, G. F.; GANGA, A.; NOGUEIRA, T. A. R. Composted sewage sludge sustains high maize productivity on a infertile Oxisol in the Brazilian Cerrado. **Land**, v. 11, n. 8, 1246, 2022.

RAIJ, B. van; ANDRANDE, J. C.; CANTARELLA, H.; GUAGGIO, J. A. **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. 1.ed. Instituto Agrônomo de Campinas, 2001. 285 p.

RAIJ, B. van; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A.; FURLANI, A. M. C. **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. 2.ed. Instituto Agrônomo de Campinas, 1997. 285p.

RASTETTER, N.; GERHARDT, A. Toxic potential of different types of sewage sludge as fertiliser in agriculture: ecotoxicological effects on aquatic, sediment and soil indicator species. **Journal of Soils and Sediments**, v. 17, p. 106–121, 2017.

RICHETTI, A.; ITO, M. A. **Viabilidade Econômica da Cultura do Feijão-Comum, Safra da Seca de 2016, em Mato Grosso do Sul**. Embrapa Agropecuária Oeste, 2015. 12 p. (Comunicado Técnico 2018).

ROSOLEM, C. A., MARUBAYASHI, O. M. **Seja o doutor do seu feijoeiro**. Piracicaba: POTAFOS, 1994. p.1-4.

SABUNDJIAN, M. T.; ARF, O.; MEIRELLES, F. C.; NASCIMENTO, V.; KANEKO, F. H.; TARUMOTO, M. B. Fertilização nitrogenada no desempenho agrônomo do feijoeiro de inverno em sucessão a gramíneas de verão. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 59, n. 2, p. 152–161, 2016.

SANDRINI, F. O. T.; LEAL, F. T.; COELHO, A. P.; LEMOS, L. B.; ROSALEN, D. L. Índices de vegetação na estimativa da produtividade do feijoeiro cultivado sob doses de nitrogênio. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 14, n. 4, 2019.

SANTOS, H. G.; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C.; OLIVEIRA, V. A.; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A.; CUNHA, T. J. F.; OLIVEIRA, J. B. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 5. ed. rev. e ampl. Brasília: Embrapa, 2018.

SHIVAY, Y. S.; POONIYA, V.; MADAN, P.; GHASIL, P. C.; BANA, R. S.; JAT, S. L. Coated urea materials for improving yields, profitability and nutrient use efficiencies of aromatic rice. **Global Chall.** v. 3, p. 1 – 9, 2019.

SHUMAN, L. M. Chemical forms of micronutrients in soils. In: MORTVEDT, J. J.; COX, F. R.; SHUMAN, L. M.; WELCH, R. M., eds. *Micronutrients in agriculture*. 2 ed. Madison, **Soil Science Society of America**, 1991. p. 113 – 144.

SIEBIELEC, G.; SIEBIELEC, S.; LIPSKI, D. Longterm impact of sewage sludge, digestate and mineral fertilizers on plant yield and soil biological activity. **Journal of Cleaner Production**, v. 187, p. 372–379, 2018.

SILVA, O. F.; WANDER, A. E. Caracterização e avaliação econômica do sistema de cultivo de feijão-comum irrigado no Cerrado o caso da cultivar BRS Estilo. In: TÔSTO, S. G.; BELARMINO, L. C.; CASTRO, G. S. A.; MANGABEIRA, J. A. de C.; SILVA, O. F. **Caracterização e avaliação econômica de sistemas de produção e cultivo de grãos em biomas brasileiros**. Brasília. Embrapa, 2018. p.47–68.

SILVA, R. S.; JALAL, A.; NASCIMENTO, R. E. N.; ELIAS, N. C.; KAWAKAMI, K. C.; ABREU-JUNIOR, C. H.; OLIVEIRA, F. C.; JANI, A. D.; HE, Z.; ZHAO, F.; TEIXEIRA FILHO, M. C. M.; ROSETTO, R.; CAPRA, G. F.; NOGUEIRA, T. A. R. Composted Sewage Sludge Application Reduces Mineral Fertilization Requirements and Improves Soil Fertility in Sugarcane Seedling Nurseries. **Sustainability**, v. 14, n. 8, 4684, 2022.

SORATTO, R. P.; SOUZA-SCHLICK, G. D.; FERNANDES, A. M.; OLIVEIRA, L. F.F. A. Crescimento e produtividade de duas cultivares de feijão em função de doses de ácido 2,3,5-triodobenzoico. **Ciência Rural**, v. 45, n. 12, p. 2181–2186, 2015.

SOUZA JUNIOR, J. P.; FLORES, R. A.; CAMPOS, C. N. S.; CORREIA, M. A. R.; FRAZÃO, J. J.; PRADO, R. M.; TEIXEIRA, W. G.; BRASIL, E. P. F.; OLIVEIRA JÚNIOR, J. P.; MARCHÃO, R. L. A sustentabilidade agrícola na região do Cerrado. In: FLORES, R. A.; CUNHA, P. P.; MARCHÃO, R. L.; MORAES, M. F. **Nutrição e adubação: de grandes culturas na região do Cerrado**. 1. Ed. Goiânia: Gráfica UFG, 2019. p. 17 – 36.

SOUZA, A. M.; PEREIRA, R. A.; YOKOO, E. M.; LEVY, R. B.; SICHIERI, R. Alimentos mais consumidos no Brasil: Inquérito Nacional de Alimentação 2008-2009. **Revista Saúde Pública**, v. 47, n. 1, p. 190S – 199S, 2013.

SOUZA, H. A.; HERNANDES, A.; ROMUALDO, L. M.; ROZANE, D. E.; NATALE, W.; BARBOSA, J. C. Folha diagnóstica para avaliação do estado nutricional do feijoeiro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 15, n. 12, p. 1243–1250, 2011.

SULINO, W. C.; BUSO, W. H. D. Adubação foliar (S, Mn e Zn) em diferentes estádios fenológicos do feijoeiro comum irrigado. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 10, 2021.

TEIXEIRA, I. R.; BOTÉM, A.; ARAUJO, G. A. D. A.; FONTES, R. I. F. Manganese and zinc leaf application on common bean grown on a “Cerrado” soil. **Scientia Agrícola**, v. 61, n. 1, p. 77-81, 2004.

TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W.G. **Manual de métodos de análise de solo**. 3 ed. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2017. 573 p.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY – USEPA. **Method 3051A**: microwave assisted acid digestion of sediments, sludges, and soils. [S. l.: s. n.], 2007. 30 p. Disponível em: <http://www.epa.gov/wastes/hazard/testmethods/sw846/pdfs/3051a.pdf>. Acesso em: 14 jan. 2022.

VIEYRA, F. E. M.; PALAZZI, V. I.; PINTO, M. I. S. D.; BORSARELLI, C. D. Combined UV–Vis absorbance and fluorescence properties of extracted humic substances-like for characterization of composting evolution of domestic solid wastes. **Geoderma**, v. 151, n. 3–4, p. 61–67, 2009.

WANDER, A. E. Produção e consumo de feijão no Brasil, 1975-2005. **Informações Econômicas**, v. 37, n. 2, p. 7-21, 2007.

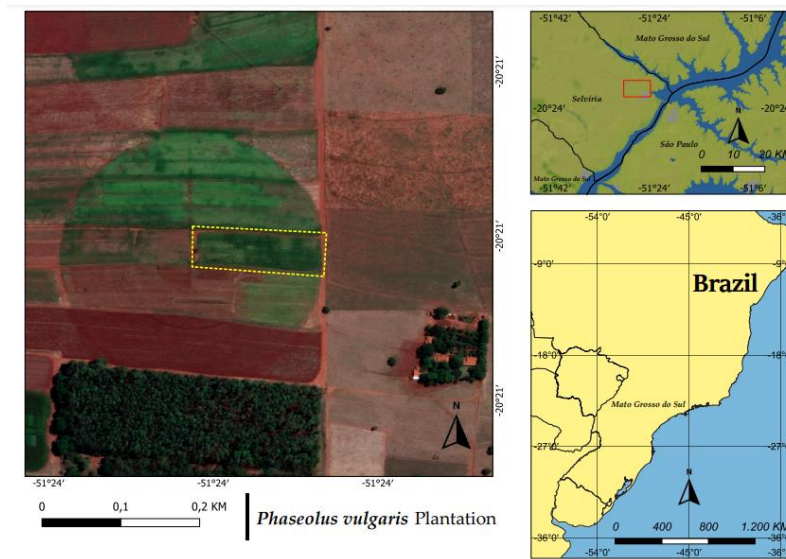
WANG, F.; WANG, H.; LI, S.; DIAO, X. Effects of earthworms and effective microorganisms on the composting of sewage sludge with cassava dregs in the tropics. **Journal of the Air & Waste Management Association**. v. 69, n. 6, p. 710–716, 2019.

WHO. Global strategy on diet, physical activity and health. **World Health Organization Report – 2014**. WHO, Geneva, Switzerland, 2014. p. 14 – 18.

WRB (WORLD REFERENCE BASE FOR SOIL RESOURCES). **A framework for international classification, correlation and communication**. Rome, Italy: FAO, 2006. (World Soil Resources Reports No. 103).

YU, Z.; LIU, X.; ZHAO, M.; ZHAO, W.; LIU, J.; TANG, J.; LIAO, H.; CHEN, Z.; ZHOU, S. Hyperthermophilic composting accelerates the humification process of sewage sludge: Molecular characterization of dissolved organic matter using EEM–PARAFAC and two-dimensional correlation spectroscopy. **Bioresource Technology**, v. 274, p. 198–206, 2019.

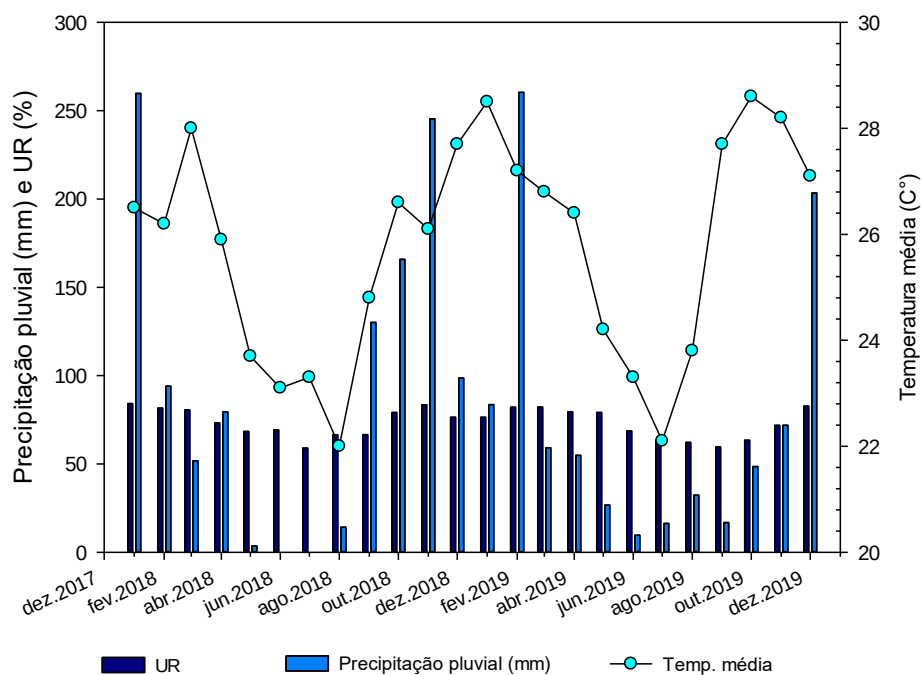
ANEXOS



Anexo 1. Área experimental da Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – FEPE, localizada em Selvíria-MS.

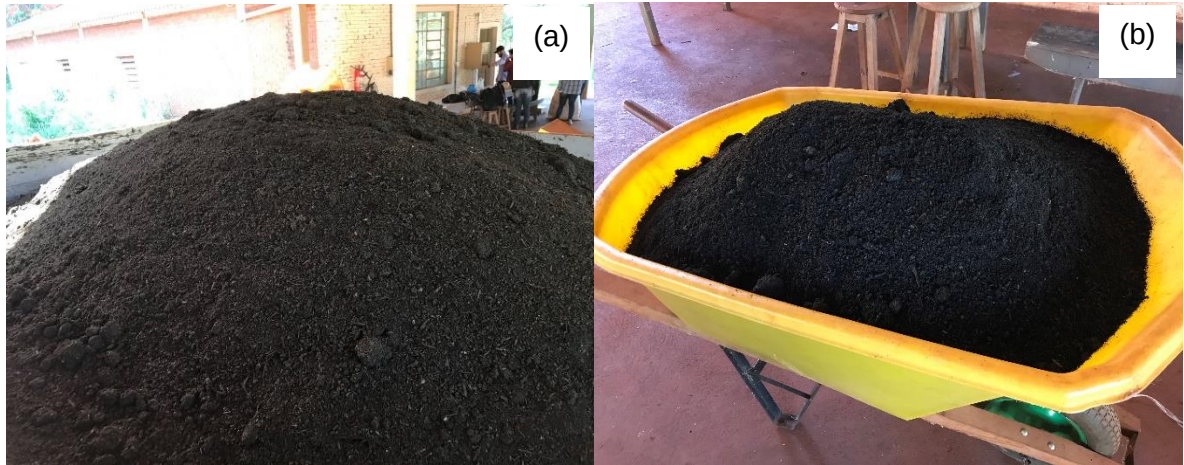
Fonte: Elaboração do próprio autor.

Dados climáticos dos anos 2018 e 2019



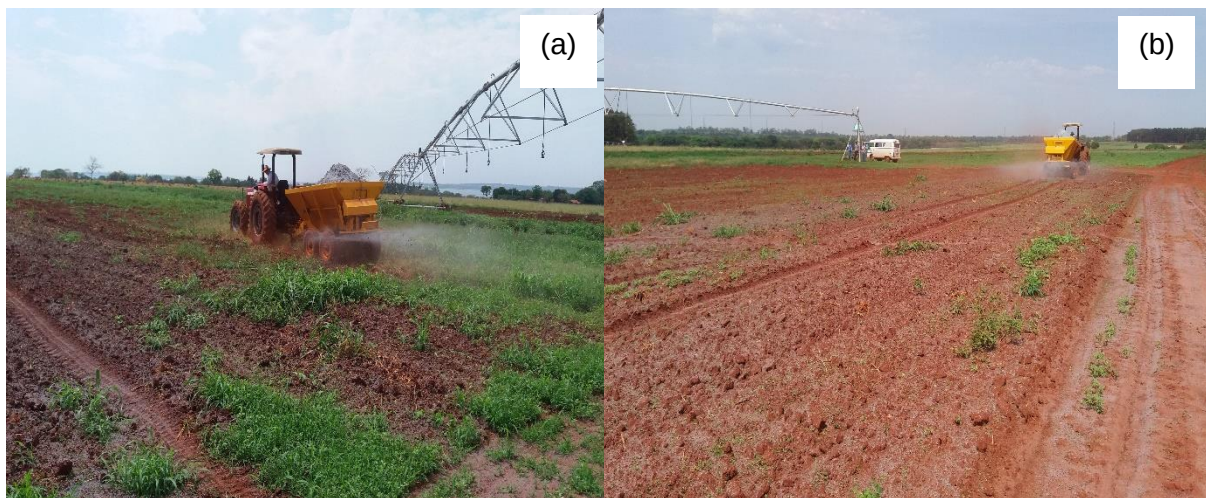
Anexo 2. Precipitação pluvial, umidade relativa do ar e temperaturas médias obtidas durante o cultivo da cultura do feijão nos anos agrícolas 2017/18 e 2018/19. UR = descrever. Temp. = Temperatura.

Fonte: Elaboração do próprio autor.



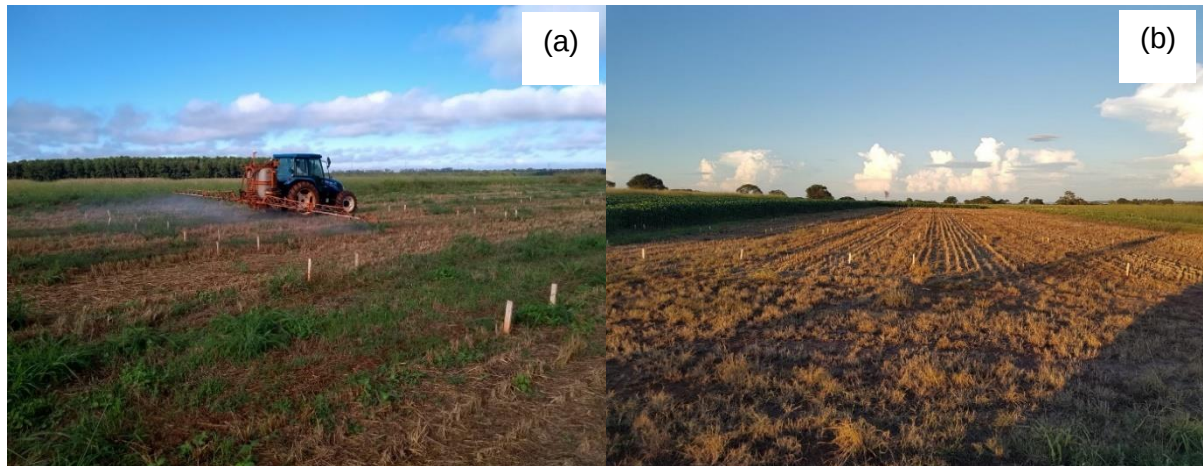
Anexo 3. (a) e (b) composto de lodo de esgoto (CLE) obtido junto à empresa Tera Ambiental Ltda, localizada em Jundiaí, SP.

Fonte: GENAFERT (2017).



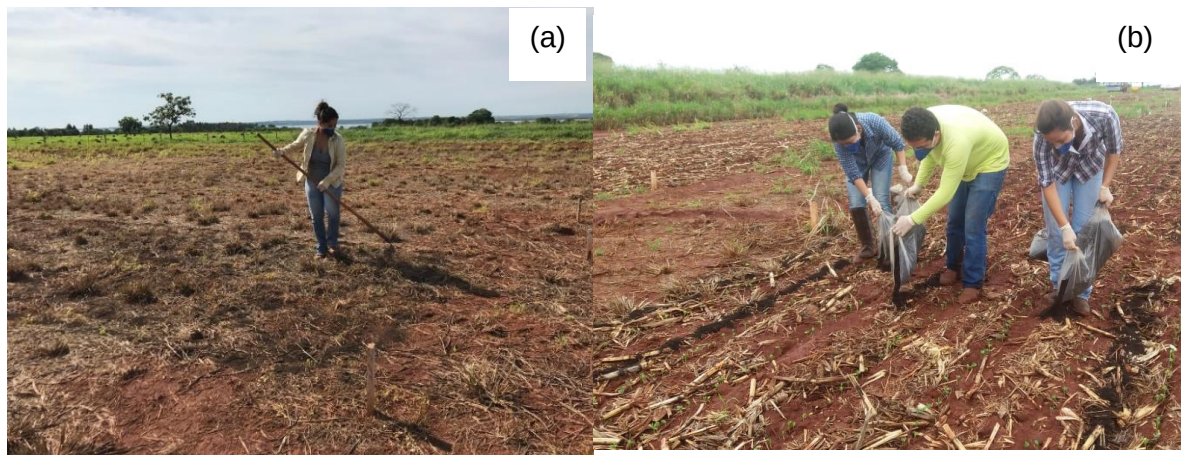
Anexo 4. (a) e (b) neutralização da acidez do solo da área experimental por meio da aplicação de calcário agrícola.

Fonte: GENAFERT (2017).



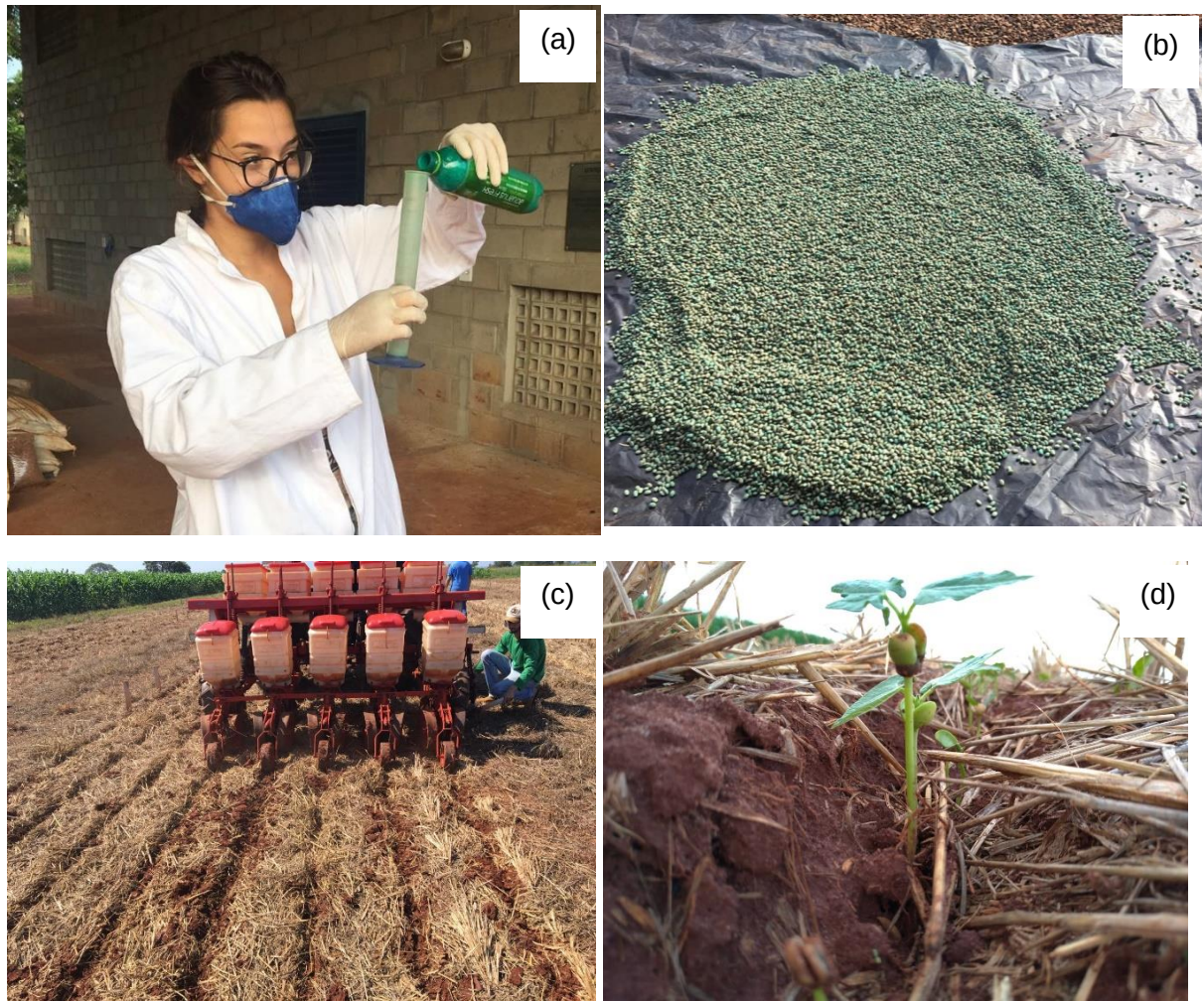
Anexo 5. (a) e (b) dessecação da área antes da semeadura da cultura do feijão.

Fonte: GENAFERT (2017).



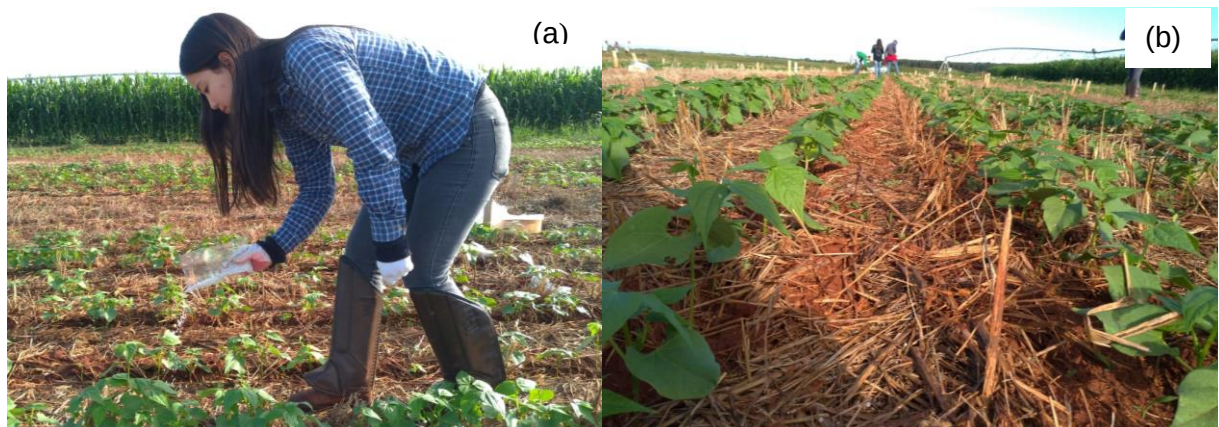
Anexo 6. (a) e (b) aplicação de CLE na cultura do arroz.

Fonte: GENAFERT (2017).



Anexo 7. (a) e (b) tratamento e inoculação das sementes com *Rhizobium tropici*, (c) semeadura mecanizada do feijão e (d) germinação da cultura.

Fonte: Elaboração do próprio autor.



Anexo 8. (a) e (b) realização da adubação de cobertura com ureia apenas nos tratamentos que receberam adubação mineral.

Fonte: Elaboração do próprio autor.



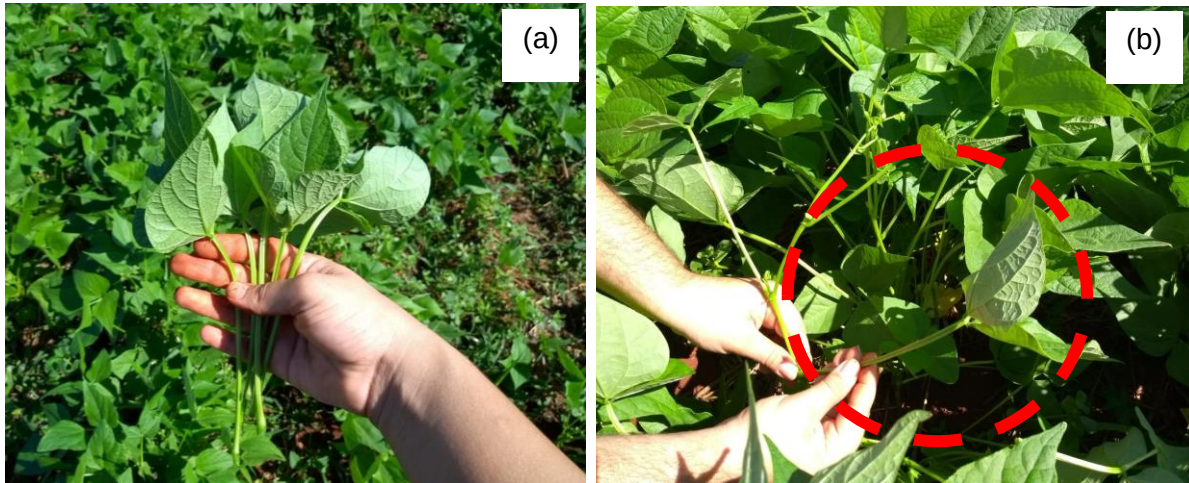
Anexo 9. Feijoeiro em diferentes fases (a) V3: 1ª folha trifoliolada aberta, (b) V4: 3ª folha trifoliolada aberta, (c) R5: início do florescimento e (d) R9: maturação fisiológica.

Fonte: Elaboração do próprio autor.



Anexo 10. (a) e (b) amostragem de solo no final do ciclo do feijão de inverno.

Fonte: Elaboração do próprio autor.



Anexo 11. (a) e (b) cultura do feijão no estágio reprodutivo R6, coleta das folhas diagnose.

Fonte: Elaboração do próprio autor.



Anexo 12. (a) colheita, identificação (b), (c) e (d) trilhagem manual dos grãos de feijão.

Fonte: Elaboração do próprio autor.