

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM PRODUÇÃO VEGETAL

Maria Clara Oliveira Durães

Produção de mamoneira adubada com lodo de esgoto estabilizado por diferentes processos

MONTES CLAROS

2020

Maria Clara Oliveira Durães

Produção de mamoneira adubada com lodo de esgoto estabilizado por diferentes processos

Tese apresentado à banca do Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal, do Instituto de Ciências Agrárias da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial para obtenção do grau de Doutora em Produção Vegetal.

Orientador: Dr. Reginaldo Arruda Sampaio

Coorientadora: Dra. Altina Lacerda Nascimento

MONTES CLAROS

14 de outubro de 2020

Durães, Maria Clara Oliveira.

D947p 2021 Produção de mamoneira adubada com lodo de esgoto estabilizado por diferentes processos/ Durães, Maria Clara Oliveira. Montes Claros, 2020.
52 f.

Tese (doutorado) - Área de concentração em Produção Vegetal. Universidade Federal de Minas Gerais / Instituto de Ciências Agrárias.

Orientador: Regynaldo Arruda Sampaio.

Banca examinadora: Cândido Alves da Costa, Luiz Arnaldo Fernandes, Fabiano Barbosa de Souza Prates, Marcelo Moreira Freire, Regynaldo Arruda Sampaio.

Inclui referências: f. 21-24; 37-39; 49-51.

1. Plantas oleaginosas. 2. Adubação verde. 3. Plantas – nutrição. 4. Metais pesados. I. Sampaio, Regynaldo Arruda. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Instituto de Ciências Agrárias. III. Título.

CDU: 631.8

Maria Clara Oliveira Durães

Produção de mamoneira adubada com lodo de esgoto estabilizado por diferentes processos

Aprovado pela banca examinadora constituída pelos professores:

Dr. Cândido Alves da Costa
UFMG

Dr. Luiz Arnaldo Fernandes
UFMG

Dr. Fabiano Barbosa de Souza Prates
IFAL

Dr. Marcelo Moreira Freire
IFNMG

Dr. Regynaldo Arruda Sampaio
UFMG

Montes Claros 14 de outubro de 2020



Universidade Federal de Minas Gerais
Instituto de Ciências Agrárias
Mestrado em Produção Vegetal

ATA DE DEFESA DE TESE

Aos 14 dias do mês de outubro de 2020, às 14:00 horas, sob a Presidência do Professor Regynaldo Arruda Sampaio, D. Sc. (Orientador - ICA/UFMG) e com a participação da Pós-doutoranda Altina Lacerda Nascimento, D. Sc. (Coorientadora - Instituto Agrônômico/SP) e dos Professores Cândido Alves da Costa, D. Sc. (ICA/UFMG), Luiz Amaldo Fernandes, D. Sc. (ICA/UFMG), Fabiano Barbosa de Souza Prates, D. SC. (IFAL) e Marcelo Moreira Freire, D. Sc. (IFNMG), reuniu-se, por videoconferência, a Banca de tese de Maria Clara Oliveira Durães, aluna do Curso de Doutorado em Produção Vegetal. O resultado da defesa de tese intitulada: "Produção de mamoneira adubada com lodo de esgoto estabilizado por diferentes processos", sendo a aluna considerada APROVADA. E, para constar, eu, Professor Regynaldo Arruda Sampaio, Presidente da Banca, lavrei a presente ata que depois de lida e aprovada, será assinada por mim e pelos demais membros da Banca examinadora.

OBS.: A aluna somente receberá o título após cumprir as exigências do ARTIGO 68 do regulamento do Curso de Doutorado em Produção Vegetal, conforme apresentado a seguir:

Art. 68 Para dar andamento ao processo de efetivação do grau obtido, o candidato deverá, após a aprovação de sua Dissertação ou Tese e da realização das modificações propostas pela banca examinadora, se houver, encaminhar à secretaria do Colegiado do Programa, com a anuência do orientador, no mínimo 3 (três) exemplares impressos e 1 (um) exemplar eletrônico da dissertação ou, 4 (quatro) exemplares impressos e 1 (um) exemplar eletrônico da tese, no prazo de 60 (sessenta) dias.

Montes Claros, 14 de outubro de 2020.

Regynaldo Arruda Sampaio
Orientador

Cândido Alves da Costa
Membro

Fabiano Barbosa de Souza Prates
Membro

Altina Lacerda Nascimento
Coorientadora

Luiz Amaldo Fernandes
Membro

Marcelo Moreira Freire
Membro

*Dedico aos meus filhos:
Emanuel, Emília e João. Gratidão por me tornarem mãe!*

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, pela graça da vida, pelas realizações, superações e conquista deste título;

Ao professor e orientador Regynaldo Arruda Sampaio pela imensa colaboração e compreensão o que tornou possível a finalização deste curso;

Agradeço aos Professores, Fabiano Prates, Cândido Costa e minha coorientadora Altina Lacerda, pela colaboração valiosa em diversas etapas deste trabalho;

Agradeço à FAPEMIG, ao CNPq e a CAPES, pelo apoio financeiro que possibilitou a realização desta pesquisa;

A todos os professores do Programa de Pós Graduação, em especial ao professor Luiz Arnaldo Fernandes pelo exemplo de motivação e dedicação profissional;

Agradeço ao IFNMG pelo apoio para minha qualificação profissional, em especial à servidora e amiga Neiva Dias pelo incentivo em todas as etapas.

Agradeço aos familiares e amigos que colaboraram para a concretização deste sonho.

"Não existem problemas ambientais, existem apenas sintomas ambientais de problemas humanos." Robert Gilman

Produção de mamoneira adubada com lodo de esgoto estabilizado por diferentes processos

Resumo

O lodo de esgoto apresenta enorme potencial para uso agrícola. O objetivo deste estudo foi avaliar a produção da mamoneira e avaliar os teores de metais pesados no solo e na planta, em resposta a adubação com lodo de esgoto (LE) submetido a diferentes processos de estabilização. O experimento foi desenvolvido no norte de Minas Gerais, em Cambissolo Háplico, utilizando a mamona cultivar BRS Energia. Foi utilizado o delineamento em blocos casualizados, em parcelas subdivididas, com 4 repetições e 6 tratamentos principais: tratamento sem adubação e adubações com LE solarizado, compostado, vermicompostado, caleado e mineral. O tratamento secundário foi a profundidade do solo ou a parte da planta. Foram avaliados os atributos do solo e da planta e os teores de metais pesados no solo e planta, comparando-se os tratamentos pelo teste de Scott-Knott ($P > 0,05$). A adubação com LE caleado promoveu maior aumento dos atributos relacionados à fertilidade do solo, quando comparado aos demais fertilizantes. As adubações aumentaram os teores de P, K, Ca, Mg e S, o pH, a soma de bases, a capacidade de troca catiônica e a percentagem de bases trocáveis na camada superior do solo em relação a camada inferior, todavia, de modo geral, não houve influência sobre os teores de nutrientes na planta. Independente da forma de estabilização, a adubação com lodo de esgoto gerou produtividades de sementes de mamona de 2,56 a 3,02 t ha⁻¹, semelhantes à adubação mineral e superior a do solo não adubado. No solo, as adubações com LE solarizado, compostado e caleado promoveram os maiores incrementos dos teores de Zn, principalmente na camada superficial. No tecido foliar, os teores de Zn e Cu foram mais elevados na testemunha e no LE solarizado, enquanto o Ni foi mais elevado nos LE solarizado, compostado, vermicompostado e na adubação mineral. De modo geral, os maiores teores de Zn e Cu ocorreram no limbo foliar em comparação ao pecíolo, enquanto os teores de Ni, Pb e Cr foram mais elevados no pecíolo do que no limbo foliar. De todo modo, não foram constatados sintomas de toxidez nas plantas e nenhum risco de contaminação do solo com os diferentes tipos de adubações realizados.

Palavras-chave: *Ricinus communis* L., Biossólido, Oleaginosas, Adubação orgânica, Nutrição de plantas, Metais pesados.

Production and nutrition of castor bean fertilized with sewage sludge stabilized by different processes

Abstract

The sewage sludge may become an economically valued product. But it can be contaminated with heavy metals. The objective of this study was to evaluate soil and plant attributes, the levels of heavy metals in soil and castor bean plant and yield in response to sewage sludge fertilization submitted to different stabilization processes. The experiment was carried out in Cambisol, using the castor bean cultivar BRS Energia, in a randomized complete block design with six treatments and four replications. The treatments were: without fertilization (control), fertilization with solarized sewage sludge, composted sewage sludge, vermicomposted sewage sludge, limed sewage sludge and chemical fertilization recommended for the crop. The data obtained in this study were submitted to the analysis of variance and the means of the treatments compared up to 5% of probability through the test of Scott-Knott. The fertilization with limed sewage sludge promoted increases in the contents of Ca and S in the soil, pH, cation exchange capacity and base saturation, as well as the reduction in the Mg content and potential acidity. Leaf N content was generally higher in sewage sludge and chemical fertilizer treatments than in the non-fertilized treatment. Regardless of the form of stabilization, sewage sludge fertilization generated a castor bean seed yield equivalent to chemical fertilization and higher than that of non-fertilized soil. There was a greater increase in soil Zn levels after fertilization with solarized, composted, and limed sewage sludge compared to fertilization with vermicomposted sewage sludge, chemical, and control. In castor bean leaf, the control and solarized sewage sludge increased the Zn and Cu levels more than composted, vermicomposted, limed sewage sludge, and chemical fertilization. Fertilization with vermicomposted sewage sludge and chemical fertilization led to similar levels of Zn, Cu, Cd, Pb, Ni, and Cr, both in soil and plant.

Keywords: *Ricinus communis* L., Biosolid, Oilseeds, Organic fertilization, Plant nutrition, Heavy metals.

LISTA DE FIGURAS

5.1 Artigo 1- Produtividade e nutrição da mamoneira adubada com lodo de esgoto estabilizado por diferentes processos	25
Figura 1 - Valores de precipitação total (mm), umidade relativa do ar média (%), temperatura máxima, temperatura mínima e temperatura média no período de agosto a novembro de 2010.	29
Figura 2 - Produtividade da mamoneira em resposta a aplicação de fertilizante mineral e lodo de esgoto tratado de diferentes formas. TE – Testemunha; LES – Lodo de esgoto solarizado; LCO – Lodo de esgoto compostado; LV – Lodo de esgoto vermicompostado; LCA – Lodo de esgoto caleado	30
5.2 Artigo 2 - Metais pesados no solo e em mamoneira adubada com lodo de esgoto submetido a diferentes processos de estabilização.....	40
Figura 1- Valores de precipitação total (mm), umidade relativa do ar média (%), temperatura máxima (°C, temperatura mínima e temperatura média no período de agosto a novembro de 2010	43

LISTA DE TABELAS

5.1 Artigo 1- Produtividade e nutrição da mamoneira adubada com lodo de esgoto estabilizado por diferentes processos	25
Tabela 1 - Atributos químicos e físicos do CAMBISSOLO HÁPLICO utilizado na pesquisa.....	28
Tabela 2- Características químicas dos lodos de esgotos estabilizados por diferentes processos.....	29
Tabela 3 - Atributos químicos do solo em resposta à aplicação de fertilizante mineral e lodo de esgoto tratado de diferentes formas.	31
Tabela 4 - Teores de nutrientes no limbo foliar (LF) e no pecíolo (PE) de mamoneira em resposta à aplicação de fertilizante mineral e lodo de esgoto tratado de diferentes formas.....	33
5.2 Artigo 2 - Metais pesados no solo e em mamoneira adubada com lodo de esgoto submetido a diferentes processos de estabilização.....	40
Tabela 1. Atributos químicos do cambissolo háplico.....	42
Tabela 2. Características químicas do lodo de esgoto solarizado (LS), compostado (LCO), vermicompostado (LV) e caleado (LCA), e do fertilizante mineral.....	45
Tabela 3. Teores de metais no solo em resposta à aplicação de fertilizante mineral e lodo de esgoto estabilizado de diferentes formas.....	45
Tabela 4. Teores de metais pesados no limbo foliar (LF) e no pecíolo (PE) da mamoneira em resposta à aplicação de fertilizante mineral e lodo de esgoto estabilizado de diferentes formas	47

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
2 OBJETIVOS	15
2.1- Objetivo Geral	15
2.2- Objetivos Específicos	15
3 REVISÃO DE LITERATURA	16
3.1 – Descrição morfológica da mamoneira (<i>Ricinus communis</i> L.)	16
3.2 – Produção da mamona no Brasil e no mundo	17
3.3 – Uso agrícola do lodo de esgoto	18
3.4 -Formas de estabilização do lodo de esgoto	18
3.4.1 - Compostagem	18
3.4.2 - Vermicompostagem	19
3.4.3 - Estabilização Química (Caleação)	20
3.4.4 - Solarização	20
REFERÊNCIAS	21
4 ARTIGOS	25
4.1 ARTIGO 1- Produtividade e nutrição da mamoneira adubada com lodo de esgoto estabilizado por diferentes processos	25
RESUMO	26
INTRODUÇÃO	27
MATERIAL E MÉTODOS	28
RESULTADOS	30
DISCUSSÃO	33
CONCLUSÕES	36
REFERÊNCIAS	37
4.2 ARTIGO 2 - Metais pesados no solo e em mamoneira adubada com lodo de esgoto submetido a diferentes processos de estabilização	40
RESUMO	41
INTRODUÇÃO	41
MATERIAL E MÉTODOS	42
RESULTADOS E DISCUSSÃO	44
CONCLUSÕES	48
REFERÊNCIAS	49
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	52

1 INTRODUÇÃO

A sociedade atual e a comunidade científica têm fomentado o avanço de discussões com respeito às garantias para as gerações futuras de um ambiente saudável. A expansão dos centros urbanos gera graves problemas ambientais, sendo que, um dos mais sérios da atualidade, é a destinação adequada para os milhões de toneladas de resíduos gerados, diariamente, em todo o mundo.

Mundialmente, as práticas de minimização da produção de resíduos têm sido estimuladas, intensificado os esforços em desenvolver tecnologias e estratégias de reuso, priorizando a reciclagem como opção de destino final. A estabilização promove a biodegradação de parte da matéria orgânica e redução do nível de microrganismos patogênicos e xenobióticos. À medida que o lodo passa por processos de biotransformação, vai adquirindo características mais favoráveis para o seu aproveitamento agrícola, sendo que, o grau de estabilização e sua eficiência como potencial fertilizante agrícola variam conforme os diferentes processos utilizados. O uso do lodo de esgoto estabilizado na agricultura vem se tornando uma alternativa de grande interesse e pode ser considerado atualmente como a alternativa mais promissora de disposição final desse resíduo.

A resolução nº 498/2020 do Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA) define critérios e procedimentos para a produção e aplicação de lodo de esgoto em solos, após passar por processos de tratamento e beneficiamento. Entretanto, apesar da legislação extensa tratando sobre a gestão do esgoto, existe ainda uma defasagem no que se refere à sua coleta e tratamento, a qual não ocorre ainda em todos os municípios brasileiros. Todavia, naqueles em que ocorrem, o lodo de esgoto poderá à luz da legislação receber tratamento final adequado e destinação segura, principalmente em relação ao seu uso como fertilizante e condicionador de solos agrícolas.

As pesquisas brasileiras com reuso de efluentes buscam o desenvolvimento de tecnologias compatíveis com as condições e perspectivas nacionais. Assim, os estudos têm focado na utilização de lodo de esgoto como fertilizante em culturas menos restritivas, tais como a mamoneira, que produz frutos encapsulados e não entram em contato direto com o lodo, constituindo uma cultura oleaginosa com finalidade agroenergética, inserida na cadeia de produção de biocombustíveis como fonte alternativa de energia.

O efeito positivo de fertilizações com composto estabilizado de lodo de esgoto no cultivo de oleaginosas tem sido demonstrado em diversos trabalhos. Embora sejam encontrados vários estudos utilizando este resíduo agrícola estabilizado no cultivo de mamoneira, não há na literatura estudo comparativo de lodo de esgoto estabilizado de diferentes formas que promova maior eficiência agrônômica no cultivo desta oleaginosa.

Devido aos elevados custos para compra de adubos minerais para garantir a produção da cultura, o aproveitamento de lodo de esgoto no cultivo desta espécie pode se constituir numa importante fonte de fertilizante orgânico, proporcionando uma destinação adequada para este resíduo. A utilização do lodo de esgoto na cultura da mamoneira poderá reduzir em muito os custos de produção desta oleaginosa para a fabricação do biodiesel, tornando-a viável economicamente e favorecendo o desenvolvimento socioeconômico da região Norte de Minas Gerais.

2 OBJETIVOS

2.1- Objetivo Geral

Estabelecer e divulgar técnicas alternativas de adubação da mamoneira (*Ricinus communis L.*) e avaliar o impacto ambiental do aproveitamento agrícola do lodo de esgoto no Norte de Minas Gerais.

2.2- Objetivos Específicos

- Avaliar a produtividade da mamoneira adubada com lodo de esgoto submetido a diferentes processos de estabilização;
- Avaliar os teores de macronutrientes no solo e no tecido foliar da mamoneira adubada com lodo de esgoto estabilizado por diferentes processos;
- Avaliar os teores de metais pesados no solo e na mamoneira adubada com lodo de esgoto estabilizado por diferentes processos.

3 REVISÃO DE LITERATURA

3.1 – Descrição morfológica da mamoneira (*Ricinus communis* L.)

A mamoneira é uma planta da família *Euphorbiaceae*, do gênero *Ricinus*, espécie *Ricinus communis* L., e possui diversos nomes populares, podendo ser conhecida como mamona, mamoneira carrapateira e rícino. É uma planta de origem tropical, tolerante às condições climáticas adversas (SEVERINO; AULD, 2014). Possui fácil cultivo, resistência à seca e boa adaptação a diferentes condições edafoclimáticas (ALVES *et al.*, 2015).

A planta apresenta grande variabilidade morfológica, podendo-se encontrar plantas com porte baixo ou arbóreo, com altura média de 2,5 metros, e com alguns indivíduos atingindo até 12 metros (COSTA *et al.*, 2014). Suas folhas são grandes, podendo variar a tonalidade, são simples e alternas, possuem margens denticuladas com quantidade de lobos variando entre 7 e 11 e o pecíolo é inserido no centro do limbo (RANA *et al.*, 2012).

O sistema reprodutivo da cultura é do tipo misto, ocorrendo tanto a autofecundação como a fecundação cruzada. A planta emite inflorescência no ápice do ramo principal e nos ramos laterais, sendo composta de uma haste, onde são distribuídas as flores. Dispõe na mesma inflorescência, sendo que são mais comuns flores masculinas localizadas na porção inferior da inflorescência e, flores femininas situadas na porção superior (FRIEDMAN *et al.*, 2010). Os frutos são cápsulas que podem ser diferentes quanto à presença, ausência e quantidade de espinhos, além da coloração diferenciada na medida que amadurece. Cada cápsula contém três sementes tóxicas, lisas, pretas e com manchas. As sementes variam quanto à coloração e tamanho, possuem carúncula, formato ovóide (RANA *et al.*, 2012) e diferentes teores de óleo (COSTA *et al.*, 2014). Além disso, a planta possui ciclo anual ou semiperene, com diversas colorações de caule, limbo foliar e racemos (cachos) e presença ou ausência de cera no caule (FONSECA; BLANCO, 2014).

A raiz principal da mamoneira é do tipo pivotante, cujo desenvolvimento varia com o porte da cultivar, com as raízes secundárias bem desenvolvidas. O sistema radicular da planta tem a capacidade de explorar as camadas mais profundas do solo, chegando a alcançar, nos tipos comerciais, até seis metros de profundidade. Nas plantas jovens o caule é oco, formado por nós e entrenós, findando com a inflorescência do tipo racemo. A haste principal, ou primária, cresce verticalmente sem nenhuma ramificação, até o aparecimento da primeira inflorescência, denominada cacho principal. Geralmente, os ramos laterais se desenvolvem da axila da última limbo foliar, logo abaixo da inflorescência (COSTA *et al.*, 2014).

O desenvolvimento de ramos secundários e terciários costuma variar em função do material genético, do nível de competição entre plantas devido à densidade de plantio, do arranjo de plantas no ambiente de cultivo, dentre outros fatores. A duração de cada estágio depende da cultivar e do ambiente, em especial da disponibilidade de nutrientes e da disponibilidade hídrica. Não há determinação nem do período vegetativo nem do período reprodutivo (SORATTO *et al.*, 2011).

3.2 – Produção da mamona no Brasil e no mundo

A mamoneira é uma das culturas negligenciadas e de alto valor econômico em todo o mundo. A safra vem demonstrando o seu potencial econômico, contribuindo com notáveis créditos cambiais para a economia de diversos países, incluindo Índia, Brasil e China (SALIHU *et al.*, 2014). A mamoneira é cultivada em países da zona tropical e subtropical. A Índia lidera o ranking da produção mundial, ocupando o primeiro lugar globalmente com a produção de 84% da semente de mamona, enquanto o segundo, terceiros e quarto maiores produtores, Moçambique, China e Brasil, produziram 6%, 4% e 1%, respectivamente (FAOSTAT, 2019).

A cultura da mamoneira vem se destacando no cenário mundial pelas diversas aplicações na indústria, principalmente como opção promissora na produção de biodiesel. O cultivo da mamona no Brasil visa atender as necessidades do Programa Nacional de Produção de Biodiesel, o que faz com que essa oleaginosa permaneça no cenário nacional como cultura de interesse na matriz energética, por ser uma alternativa à utilização dos derivados de petróleo (CONAB, 2018). Além dos benefícios ambientais com a produção do biodiesel, a mamona é uma oleaginosa que não é destinada para alimentação humana ou animal, não envolvendo questões éticas de destinação da matéria prima para uso energético.

O Brasil possui grande diversidade de climas e aptidão agrícola que favorecem a produção dessa oleaginosa (DANTAS *et al.*, 2017). Dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE apontam para uma produção de mamona no ano de 2019 de 28.360 toneladas, com uma área plantada de 47.051 mil ha, ganhando destaque a região nordeste com produção de 27.569 toneladas. O Estado da Bahia lidera a produção nacional, com 27 mil toneladas e uma participação nacional de aproximadamente 98,6% (IBGE, 2019). O Estado de Minas Gerais teve participação de 0,01% na produção nacional, sendo que, na região norte do Estado, o município de Chapada Gaúcha se destacou com a produção de cinco toneladas e produtividade de 1.000 kg ha⁻¹ no ano de 2018 (MAPA, 2019).

Embora as regiões nordeste e norte de Minas Gerais apresentem períodos de seca rigorosos, a mamona se adapta bem devido à sua tolerância à escassez de água (IBGE, 2019). A espécie possui fácil cultivo, com sistema radicular profundo e ramificado e capacidade de explorar água e nutrientes nas camadas mais profundas do solo (ALVES *et al.*, 2015). Isso torna esta oleaginosa uma cultura alternativa de destaque, pelo potencial de exploração em regiões em processo de desenvolvimento econômico, por meio da geração de emprego e obtenção de matéria-prima para a agroindústria (BERMAN *et al.*, 2011).

Entretanto, apesar da tolerância e boa adaptação, a mamoneira apresenta rendimentos médios ainda baixos em algumas áreas de produção do país, o que pode ser devido ao baixo nível tecnológico empregado, principalmente pela não fertilização dos solos explorados com esta cultura em pequenas propriedades rurais. Tal fato pode ser decorrente da falsa ideia de que essa espécie é pouco exigente em adubação ou, mesmo, por falta de recursos financeiros dos produtores para a compra de fertilizantes (DINIZ *et al.*, 2011).

Trata-se de uma cultura que produz de forma satisfatória em solos férteis, e os descuidos em sua correção e adubação podem comprometer a sua produtividade, sendo que, em condições experimentais, têm-se obtido produtividade de até 1.500 kg ha⁻¹ (EMBRAPA, 2019).

3.3 – Uso agrícola do lodo de esgoto

O lodo de esgoto constitui o resíduo de maior volume gerado durante os processos de tratamento de efluentes e acumulado nos pátios das Estações de Tratamento Esgotos (ETEs), podendo constituir um material de grande potencial de uso na agricultura (ANDRADE, 2014; CASTRO *et al.*, 2015). Esse material é rico em matéria orgânica e nutrientes, principalmente nitrogênio, fósforo e alguns micronutrientes como o zinco, atuando também como bom condicionador de solo (CHERNICHARO *et al.*, 2018). Em função da composição química e dos benefícios que sua aplicação proporciona às plantas, o lodo de esgoto constitui-se como uma importante alternativa de adubação e de disposição final deste resíduo (BERTANI *et al.*, 2014).

Diversos estudos têm demonstrado que a adição de lodo de esgoto pode proporcionar melhorias significativas nas propriedades dos solos e aumento de sua fertilidade, com adição de nutrientes às plantas e potencial de utilização para diversas culturas, produzindo incrementos importantes de produtividade (GARCIA; PEREIRA, 2017; MOREIRA *et al.*, 2019; GONÇALVES *et al.*, 2019).

O lodo processado, também denominado biossólido, quando devidamente higienizado, possibilita um manuseio seguro na agricultura, com ótimo potencial agrônômico. Faz-se necessário, no entanto considerar os riscos de contaminação ambiental pelos poluentes constituintes, além dos riscos sanitários (ANDRADE, 2014).

O uso do lodo tratado é regulamentado no Brasil por meio da Resolução nº 498/2020 do CONAMA, que define critérios e procedimentos para o uso agrícola de lodos de esgoto gerados em estações de tratamento de esgoto sanitário e seus produtos derivados, e dá outras providências (BRASIL, 2020). Esta resolução determina as concentrações limite de metais, as cargas cumulativas máximas permitidas para a aplicação em solos agrícolas, presença de patógenos e as espécies para as quais o seu uso é recomendado. Em função dessa regulamentação o lodo de esgoto precisa passar por processos de estabilização, tornando-se um produto com características desejáveis para o setor agrícola (GOMES *et al.*, 2012; NOGUEIRA *et al.*, 2013).

3.4 -Formas de estabilização do lodo de esgoto

Para se promover a destinação sanitária adequada e a utilização do lodo de esgoto, é necessário que ele passe por um processo complementar de estabilização, denominado higienização. Este processo visa eliminar ou reduzir significativamente a densidade de microrganismos, tornando o produto final biologicamente seguro para as diferentes aplicações desejadas. Por isso, vale ressaltar a importância da higienização do lodo para que o mesmo possa ser reciclado na agricultura sem causar danos à população e ao ambiente (MOREIRA *et al.*, 2019), além de eliminar os maus odores (MIKI *et al.*, 2006).

3.4.1 - Compostagem

A compostagem é um processo biológico no qual microrganismos, geralmente em mistura com resíduos orgânicos, em processos exotérmicos de degradação do material orgânico, geram calor e

mantém a temperatura entre 55 e 65°C, por alguns dias. A compostagem pode também ser definida como uma biooxidação aeróbia exotérmica de um substrato orgânico heterogêneo, no estado sólido, caracterizado pela produção de CO₂, água, liberação de substâncias minerais e formação de material orgânico estável (FERNANDES; SOUZA, 2001). Neste processo, os resíduos de origem vegetal e/ou animal com alta relação C/N são transformados em produtos com menor relação C/N, pela ação de microrganismos (LIMA, 1995).

Devido às suas propriedades de higienização, os componentes orgânicos biodegradáveis passam por etapas sucessivas de transformação, sob a ação de diversos grupos de microrganismos. Como se trata de um processo biológico, os fatores mais importantes que influenciam na degradação da matéria orgânica são a aeração e os nutrientes. A temperatura também é um fator importante, principalmente no que diz respeito ao processo de biodegradação e à eliminação de patógenos. A variação de temperatura é resultado da atividade biológica (FERNANDES, 2000).

No início da compostagem predominam produtos de fácil decomposição microbiológica. Após o consumo do carbono prontamente disponível, inicia-se a degradação de substâncias mais complexas, como celulose e hemicelulose, tarefa realizada principalmente por fungos, resultando em queda dos valores de CO₂ produzidos, matéria orgânica e relação C/N (JAHNEL *et al.*, 1999).

A compostagem pode ser realizada com tecnologias de baixo custo, exigindo apenas uma mistura adequada de material carbonáceo e material rico em nitrogênio, obtendo o máximo aproveitamento dos resíduos. É necessário realizar reviradas sistemáticas para oxigenação e manutenção de umidade adequada, apresentando ao final um produto de alta qualidade agrônômica (ANDREOLI *et al.*, 2006).

3.4.2 - Vermicompostagem

A vermicompostagem é o processo de transformação de matéria orgânica em composto estabilizado via ação das minhocas em conjunto com a flora que vive em seu trato digestivo. As minhocas promovem um processo mecânico e biológico, onde a matéria orgânica é triturada ao passar pelo seu trato digestivo (SILVA *et al.*, 2011). Esta técnica facilita a estabilização da matéria orgânica em curto espaço de tempo. A estabilização dos resíduos é resultado da ação física/mecânica e bioquímica desses organismos. O processo físico ou mecânico inclui a aeração, a redução do tamanho das partículas do substrato e a mistura dessas partículas. O processo bioquímico consiste na decomposição do substrato no intestino das minhocas (LANDGRAF *et al.*, 2005).

O vermicomposto tem sido visto como uma alternativa de grande sustentabilidade, pois é um material rico em nutrientes para as plantas, podendo ser usado como fertilizante e condicionador das propriedades físicas, químicas e biológicas do solo, desde que se enquadre dentro dos limites de uso seguro (RODRÍGUEZ-CANCHÉ *et al.*, 2010).

A vermicompostagem mostra-se eficiente para ser utilizada como técnica de estabilização do lodo de esgoto e possui um alto potencial para ser utilizado na agricultura como fertilizante orgânico, fornecendo, desta maneira, uma destinação ambientalmente adequada para este resíduo (SILVA *et al.*, 2011).

3.4.3 - Estabilização Química (Caleação)

É um método de estabilização e desinfecção que consiste na mistura da cal virgem (CaO) ao lodo em proporções que variam de 30% a 50%, em função do peso seco do lodo. Com isto, tem-se a inativação ou destruição da maior parte dos patógenos e, principalmente, a redução considerável do odor do lodo (FERNANDES; SOUZA, 2001).

Em função do baixo custo, simplicidade do processo, e eficiência na eliminação de patógenos, a cal é um dos produtos químicos mais utilizados nessa técnica. Ela é usada para elevar o pH, condicionar o lodo e estabilizar quimicamente. O fundamento do processo consiste em adicionar a cal ao lodo até atingir pH 12, ou superior, cujo efeito é a destruição de microrganismos patogênicos, diminuição do odor gerado pelo lodo e fixação de metais pesados (FERNANDES, 2000).

Martins *et al.* (2003) constataram que a caleação tem mostrado ser muito eficiente no controle de patógenos, além de promover a redução da absorção de metais pesados pelas plantas. O tratamento com a cal é eficaz, de baixo custo e pode ser implantado com tecnologia simples.

3.4.4 - Solarização

A secagem de lodo de esgoto em ambientes de alta insolação e temperatura, protegidos com cobertura plástica, é conhecido como solarização. Este processo pode diminuir em mais de 80% o volume original deste resíduo, levando a uma redução proporcional dos custos de manuseio, transporte e disposição, além de ter o potencial de proporcionar a desinfecção do lodo, conforme verificado pela drástica redução do conteúdo de coliformes totais e fecais (MATHIOUDAKIS *et al.*, 2013).

O leito de secagem é uma das alternativas utilizadas para desidratação do lodo de esgoto. Dentre os métodos de secagem naturais mais comuns estão os leitos de secagem, devido ao custo de implantação reduzido, bem como à simplicidade da operação e manutenção de seu processo (SANTOS *et al.*, 2017).

Neste processo os raios ultravioletas atuam na superfície, criando alterações nas condições químicas, físicas e biológicas do meio. Desse modo, com a diminuição da umidade e o efeito estufa o processo de higienização é acelerado e promove a redução na concentração de microrganismos patogênicos (MATHIOUDAKIS *et al.*, 2013).

A técnica de solarização é considerada uma solução simples, de fácil aplicação, além de não requerer alto investimento financeiro, com a vantagem de não gerar outros resíduos no processo (BENNAMOUN, 2012).

REFERÊNCIAS

ALVES, G. S.; TARTAGLIA, F. L. N. E. M.; SAMPAIO, L. R.; FREIRE, M. A. O. Densidade populacional e seu efeito na produtividade da mamoneira BRS Energia sob cultivo irrigado. **Revista Ciência Agronômica**, v. 46, n. 3, p. 546-554, 2015.

ANDRADE, M. C.; LIMA, A. S. T.; MELO, W. J.; SANTOS, E. J.; HERRMANN, A. B. Elementos-traço em dois latossolos após aplicações anuais de lodo de esgoto por treze anos. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 35, n. 1, p. 135-148, 2014.

ANDREOLI, C. V.; TAMANINI, C. R.; HOLSBACH, B.; PEGORINI, E. S.; NEVES, P. S. “Uso de lodo de Esgoto na Produção de Substrato Vegetal”. In: Andreoli, C. V (ed). **Alternativas de Uso de resíduos do Saneamento**– Projeto PROSAB, Rio de Janeiro, ABES. (2006).

BENAMOUN, L. “Solar drying of wastewater sludge: A review”. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 16, n. 1, p. 1061-1073, 2012.

BERMAN, P.; NIZRI, S.; WIESMAN, Z. Castor oil biodiesel and its *blends* as alternative fuel. **Biomass and Bioenergy**. Oxford, Inglaterra. v. 35, n. 7, p. 2861-2866, 2011.

BERTANI, R. M. A.; FERNANDES, D. M.; VIDAL, A. A. Uso de compostos de lodo de esgoto na cultura da mamona. **Pesquisa & Tecnologia**, v. 11, n. 1, 2014.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA. **Resolução N° 498, de 19 de ago. 2020**. Define critérios e procedimentos para produção e aplicação de biossólido em solos, e dá outras providências. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 19 de ago. 2020. Edição: 160. Seção 1. p.91, 2020.

CASTRO, A. L. F. G; SILVA, O. R; SCALIZE, P. S. Cenário da disposição do lodo de esgoto: uma revisão das publicações ocorridas no Brasil de 2004 a 2014. **Multi-Science Journal**, v.2, p. 66-73, 2015.

CHERNICHARO, C. A. L.; RIBEIRO, T. B.; GARCIA, G. B.; LERMONTOV, A.; PLATZER, C. J.; POSSETTI, G. R. C.; ROSSETO, M. A. L. L. R. Panorama do tratamento de esgoto sanitário nas regiões Sul, Sudeste e Centro-Oeste do Brasil: tecnologias mais empregadas. **Revista DAE**, V. 66, n. 213, p. 5-19, 2018.

CONAB. **Acompanhamento da Safra Brasileira de Grãos**. Safra 2018/19, n.3 v.6. 2018 . Disponível em: <http://www.conab.gov.br/> acesso em: 7 jun. 2019.

COSTA, A. G. F; SOARES, D. J.; ALBURQUE, F. A.; ANDRADE, F. P.; FERREIRA, G. B.; FREITAS, J. G.; ZONTA, J. H.; SEVERINO, L. S.; MITANI, M.; SILVA, O. R. R. F.; GONDIM, T. M. S; SOFIATTI, V.;

CARTARO, W. V. Cultivo da mamoneira. Campina Grande, EMBRAPA. 2014. 24p. (Circular Técnica, 136).

DANTAS, A. A.; MENDES, R. G.; ARAÚJO, P. B. F.; VITOR, A. M. M.; MENEZES, D. P.; FERREIRA, P. H. F. D.; BONETTI, L. L. S. Efeito do ácido giberélico na germinação de sementes de *Ricinus communis* L. em diferentes substratos. *In: Anais do Simpósio de Ciências Agrárias e Ambientais*, I, 2017, Monte Carmelo. Anais... Monte Carmelo: UFU. p. 192-199.

DINIZ, L. L.; VALADARES FILHO, S. C.; OLIVEIRA, A. S.; PINA, D. S.; SILVA, L. D.; BENEDETI, P. B.; BAIÃO, G. F.; CAMPOS, J. M. S.; VALADARES, R. F. D. Castor bean meal for cattle finishing: Nutritional parameters. *Livestock Science*, v. 135, n. 2-3, p. 153-167, 2011.

EMBRAPA. EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Correção de solo, nutrição mineral e adubação da mamoneira. Disponível em: [http:// agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/mamona](http://agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/mamona) acesso em: 3 jun. 2019.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION (FAO). FAOSTAT. Disponível em: <<http://faostat.fao.org>>. Acesso em: 29 de outubro de 2019.

FONSECA, N. B.; BLANCO, B. S. Toxicity of ricin present in castor bean seeds. *Semina: Ciências Agrárias, Londrina*, v. 35, n. 3, p. 1415-1424, 2014.

FERNANDES, F. Estabilização e higienização de biossólidos. *In: BETTIOL, W., CAMARGO, O. A., eds. Impacto ambiental do uso agrícola do lodo de esgoto*. Jaguariúna, EMBRAPA Meio Ambiente, 2000. p. 45-68.

FERNANDES, F.; SOUZA, S. G. Estabilização de lodo de esgoto. *In: ANDREOLI, C.V. Resíduos sólidos do saneamento: processamento, reciclagem e disposição final*. Rio de Janeiro: Rima, ABES, 2001, p. 29-55.

FREITAS, R. X. A.; MELO, G. A. Avaliação do uso de biocomposto de lodo de esgoto como substrato para produção de mudas. *Revista Monografias Ambientais*, Santa Maria – RS, v. 12, n. 12, p. 2665 – 2673, 2013.

FRIEDMAN, M. H.; ANDREU, M. G.; QUINTANA, H. V.; MCKENZIE, M. *Ricinus communis*, castor bean. *Institute of Food and Agricultural Sciences*, Gainesville, n. 244, p. 1-3, 2010.

GARCIA, M. L.; PERERA, A. C. A. Efeitos da disposição de lodo de estações de tratamento de efluentes (ETE) de indústria alimentícia no solo: estudo de caso. *Revista Eng Sanit Ambient*, v. 22 n. 3, p. 531-538, 2017.

GONÇALVES, A. A.; MOREIRA, C. R.; SOUZA, G. B. P., PERES, D. M.; CANZI, G. M. Adubação com lodo de esgoto na cultura do milho. **Revista Técnico-Científica do CREA-PR**, p. 1-13, 2019.

GOMES, F. C. S. P.; AQUINO, S. F.; COLTURATO, L. F. D. B. Biometanização seca de resíduos sólidos urbanos: estado da arte e análise crítica das principais tecnologias. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 17, n. 3, p. 295-304, 2012.

IBGE- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Diretoria de Pesquisas, Coordenação de Agropecuária. **Indicadores –IBGE**, 2019 – Levantamento sistemático da produção agrícola de dezembro de 2019.

JAHNEL, M. C.; MELLONI, R.; CARDOSO, E. J. B. N. Maturidade de composto de lixo urbano. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v. 56, p. 301-304, 1999.

LANDGRAF, M. D. MESSIAS, R. A. REZENDE, M. O. O. **A Importância ambiental da vermicompostagem: vantagem e aplicação**. 1. ed. São Carlos: Rima, 2005. 105p.

LIMA, L. M. Q. **LIXO: tratamento e biorremediação**. 3. ed. São Paulo: Hemus, 1995. 265p.

MAPA – MINISTÉRIO DE AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO DE MINAS GERAIS. Subsecretaria de Política e Economia Agrícola. **Mamona**. Belo Horizonte, Minas Gerais, 2019. Disponível em: http://www.reformaagraria.mg.gov.br/images/documentos/perfil_mamona.pdf

MARTINS, A. L. C.; BATAGLIA, O. C.; CAMARGO, O. A.; CANTARELLA, H. Produção de grãos e absorção de Cu, Fe, Mn e Zn pelo milho em solo adubado com lodo de esgoto, com e sem calcário. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 27, p. 563-574, 2003.

MATHIOUDAKIS, V. L.; KAPAGIANNIDIS, A. G.; ATHANASOULIA, E.; PALTZOGLU, A. D.; MELIDIS, P.; AIVASIDIS, A. Sewage Sludge Solar Drying: Experiences from the First Pilot-Scale Application in Greece. **Drying Technology: An International Journal**, v. 31, n. 5, p. 519-526, 2013.

MIKI, M. K.; ALEM SOBRINHO, P.; VAN HAANDEL, A. C. Tratamento da fase sólida em estações de tratamento de esgotos – condicionamento, desaguamento mecanizado e secagem térmica do lodo. In: **Biossólidos: Alternativas de Uso de Resíduos do Saneamento**. Rio de Janeiro: ABES, 2006.

MOREIRA, S. F.; SANTOS, S. D. O.; SARDINHA, A. S.; PEREIRA JR. A. O lodo de ETE como alternativa para a recuperação do solo em áreas degradadas. **Brazilian Applied Science Review**, v. 3, n. 3, p. 1564-1585, 2019.

NOGUEIRA, T. A. R.; FRANCO, A.; HE, Z.; BRAGA, V. S.; FIRME, L. P.; ABREU-JUNIOR, C. H. Short-term usage of sewage sludge as organic fertilizer to sugarcane in a tropical soil bears little threat of heavy metal contamination. **Journal of Environmental Management**, v. 114, n. 15, p. 168-177, 2013.

RANA, M.; DHAMIJA, H.; PRASHAR, B.; SHARMA, S. *Ricinus communis* L. **International Journal of PharmTech Research**, v. 4, n. 4, p. 1706-1711, 2012.

RODRÍGUEZ-CANCHÉ, L. G.; VIGUEROS L. C.; MALDONADO-MONTIEL, T.; MARTÍNEZ-SANMIGUEL, M. Pathogen reduction in septic tank sludge through vermicomposting using *Eisenia fetida*. **Bioresource Technology**, v. 101 p. 3548–3553, 2010.

SALIHU, B. Z.; GANA, A. K.; GBADEYAN, T.; ALABI, M. B. Castor oil plant (*Ricinus communis* L.): a potential oil crop for agribusiness in Africa. **International Journal of Applied Research and Technology**, v. 3, n. 8, p. 29-35, 2014.

SANTOS, D. S.; TESHIMA, E.; DIAS, S.M.F.; ARAÚJO, R.A.; SILVA, C.M.R. Efeito da secagem em leito nas características físico-químicas e microbiológicas de lodo de reator anaeróbio de fluxo ascendente usado no tratamento de esgoto sanitário. **Revista Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 22, n. 21. p. 341-349, 2017.

SEVERINO, L. S.; AULD, D. L. Study on the effect of air temperature on seed development and determination of the base temperature for seed growth in castor (*Ricinus communis* L.). **Australian Journal of Crop Science**, v. 8, n. 2, p. 290-295, 2014.

SILVA, P. R.; LANGRAF, M. D.; REZENDE, M. O. O. Avaliação do potencial agrônomo de vermicomposto produzido a partir de lodo de esgoto doméstico. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 6, n. 4, p. 565-571, 2011.

SORATTO, R. P.; SOUZA-SCHLICK, G. D.; GIACOMO, M. S.; ZANOTTO, M. D.; FERNANDES, A. M. Espaçamento e população de plantas de mamoneira de porte baixo para colheita mecanizada. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 46, n. 3, p. 245-253, 2011.

4 ARTIGOS

4.1 Artigo 1- PRODUTIVIDADE E NUTRIÇÃO DA MAMONEIRA ADUBADA COM LODO DE ESGOTO ESTABILIZADO POR DIFERENTES PROCESSOS

Este artigo foi elaborado conforme normas da Bioscience Journal.

YIELD AND NUTRITION OF CASTOR BEAN FERTILIZED WITH SEWAGE SLUDGE STABILIZED BY DIFFERENT PROCESSES

Resumo

O objetivo deste estudo foi avaliar a produção da mamoneira, em resposta a adubação com lodo de esgoto (LE) submetido a diferentes processos de estabilização. O experimento foi realizado em Cambissolo, no delineamento em blocos casualizados, em parcelas subdivididas, com 4 repetições e 6 tratamentos principais: tratamento sem adubação e adubações com LE solarizado, compostado, vermicompostado, caleado e mineral. O tratamento secundário foi a profundidade do solo ou a parte da planta. Foram avaliados os atributos do solo e da planta, comparando-se os tratamentos pelo teste de Scott-Knott ($P > 0,05$). A adubação com LE caleado promoveu maior aumento dos atributos relacionados à fertilidade do solo, quando comparado aos demais fertilizantes. As adubações aumentaram os teores de P, K, Ca, Mg e S, o pH, a soma de bases, a capacidade de troca catiônica e a percentagem de bases trocáveis na camada superior do solo em relação a camada inferior, todavia, de modo geral, não houve influência sobre os teores de nutrientes na planta. Independente da forma de estabilização, a adubação com lodo de esgoto gerou produtividades de sementes de mamona de 2,56 a 3,02 t ha⁻¹, semelhantes à adubação mineral e superior a do solo não adubado.

Palavras-chave: *Ricinus communis* L., oleaginosas, biossólido, adubação orgânica, nutrição de plantas.

YIELD AND NUTRITION OF CASTOR BEAN FERTILIZED WITH SEWAGE SLUDGE STABILIZED BY DIFFERENT PROCESSES

Abstract

The objective of this study was to evaluate the yield of castor bean, in response to fertilization with sewage sludge (LE) submitted to different stabilization processes. The experiment was carried out in Cambissol, in a randomized block design, in subdivided plots, with 4 repetitions and 6 main treatments: treatment without fertilization and fertilization with solarized LE, composted, vermicomposted, cured and mineral. The secondary treatment was the depth of the soil or the part of the plant. Soil and plant attributes were evaluated by comparing treatments using the Scott-Knott test ($P > 0.05$). Fertilization with LE chilled promoted a greater increase in attributes related to soil fertility, when compared to other fertilizers. The fertilization increased the levels of P, K, Ca, Mg and S, the pH, the sum of bases, the cation exchange capacity and the percentage of exchangeable bases in the upper layer of the soil in relation to the lower layer, however, so in general, there was no influence on the nutrient content in the plant. Regardless of the form of stabilization, fertilization with sewage sludge yielded castor seed yields from 2.56 to 3.02 t ha⁻¹, similar to chemical fertilization and higher than that of unfertilized soil.

Keywords: *Ricinus communis* L., oleaginous, biosolid, organic fertilization, plant nutrition.

1. Introdução

Atualmente, com o impacto da crescente urbanização, muitos problemas ambientais estão sendo observados em diversos países, incluindo o Brasil, relacionados à má disposição e acúmulo de resíduos advindos das unidades de tratamentos de esgotos (Fávaris et al., 2016). Devido à grande produção de lodos de esgotos, faz-se necessário o desenvolvimento de estratégias para a sua reciclagem e uma destas possibilidades é o aproveitamento destes resíduos na agricultura (Eid et al., 2018).

O emprego do lodo de esgoto como adubo orgânico é a alternativa mais segura para a disposição final desse resíduo, com vantagens de reduzir a emissão de CO₂ causada pela sua incineração e de reduzir a adição de fertilizantes minerais nas áreas cultivadas (Pilnáček et al., 2019). Este resíduo vem se destacando como fertilizante por ser rico em matéria orgânica, e nutrientes, promovendo melhoria nas propriedades físicas, químicas e biológicas do solo, e atuando como fonte nutricional em cultivos (Sharma et al., 2017; Eid et al., 2018).

A utilização do lodo de esgoto na agricultura é a forma mais ecológica de sua destinação, pois promove a sua reciclagem, sendo fundamental seguir as normas estabelecidas por cada país ou região (Eid et al., 2017; Gonçalves et al., 2019). Além disso, devido às suas características químicas específicas, é necessário identificar os efeitos de sua aplicação na qualidade do solo e na produtividade de culturas em diversas situações edafoclimáticas (Barbosa et al., 2018).

Pesquisas têm sido desenvolvidas com o intuito de viabilizar a utilização do lodo de esgoto na agricultura, amenizando os impactos negativos causados pelo seu acúmulo, e, em virtude do potencial deste resíduo, como fonte alternativa de adubação, suprimindo total ou parcialmente as necessidades nutricionais de espécies vegetais de interesse econômico e social (Freitas et al., 2015; Fávaris et al., 2016). Trabalhos envolvendo adubação com lodo de esgoto foram realizados no Brasil e os resultados foram favoráveis para diversas culturas em resposta à aplicação deste resíduo (Nascimento et al., 2015; Santos et al., 2019; Gonçalves et al., 2019).

O cultivo da mamona (*Ricinus communis* L.) no Brasil tem finalidade principalmente energética, o que faz com que esta oleaginosa permaneça no cenário nacional como cultura de grande interesse econômico. Entretanto, a mamoneira apresenta baixas produtividades em algumas áreas de produção do país, o que pode ser devido ao baixo nível tecnológico empregado, principalmente pela não fertilização dos solos. Tal fato pode ser atribuído à falsa ideia de que essa espécie é pouco exigente em adubação ou a falta de recursos financeiros dos produtores para a compra de fertilizantes químicos (Diniz Neto et al., 2012; Simões et al., 2013).

De acordo com a Resolução CONAMA nº 498 (BRASIL, 2020), a mamoneira apresenta-se como cultura adequada ao uso do lodo de esgoto, pois o seu produto final não é destinado à alimentação humana. Sendo assim, o uso do lodo de esgoto como adubo orgânico na produção da mamoneira pode se constituir numa alternativa viável sob o ponto de vista econômico e ambiental.

Neste sentido, o objetivo deste trabalho foi avaliar os atributos químicos do solo e a nutrição e produtividade da mamoneira adubada com lodo de esgoto submetido a diferentes processos de estabilização.

2. Material e Métodos

O experimento foi desenvolvido no período de abril de 2010 a dezembro de 2010, no Instituto de Ciências Agrárias (ICA) da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), localizado em Montes Claros – MG, latitude 16°40'57,6"S, longitude 43°50'19,6"W e altitude de 630 m, em cambissolo háplico, com os atributos químicos e físicos apresentados na tabela 1.

Tabela 1. Atributos químicos e físicos do Cambissolo Háplico utilizado na pesquisa.

Pr (cm)	pH-H ₂ O	MO	P-mehlich	K	Ca	Mg
		dag kg ⁻¹	mg dm ⁻³		cmol _c dm ⁻³	
0-20	5,8	3,39	3,50	229,00	3,60	1,50
20-40	5,5	2,50	1,90	117,00	2,80	0,80
Pr (cm)	Al	H+Al	SB	T	T	V
			cmol _c dm ⁻³			%
0-20	0,20	3,62	5,69	5,89	9,31	61,12
20-40	0,76	3,62	3,90	4,66	7,52	51,86
Pr (cm)	Areia	Silte	Argila			
		dag kg ⁻¹				
0-20	20,0	38,0	42,0			
20-40	26,0	36,0	38,0			

Pr = Profundidade; MO = Matéria orgânica; t = Capacidade de troca catiônica efetiva; T = Capacidade de troca catiônica total; SB = Soma de bases; V = Percentagem de saturação de bases; Metodologias da Embrapa (Teixeira et al., 2017).

O delineamento experimental foi em blocos casualizados, com quatro repetições, em esquema de parcelas subdivididas, sendo as adubações o fator primário e as profundidades (no caso do solo), e as partes das folhas (no caso das plantas), o fator secundário. Foram utilizados seis tratamentos, que consistiram em: tratamento químico (40 kg ha⁻¹ de N, 45 dias após emergência; 90 kg ha⁻¹ P₂O₅ e 30 kg ha⁻¹ K₂O no plantio) de acordo com as Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais (CFSEMG, 1999), utilizando-se como fonte de N, P e K, respectivamente, ureia, superfosfato simples e cloreto de potássio; quatro tratamentos com lodo de esgoto estabilizado de diferentes formas, aplicados com base nos teores de N disponível, calculados de acordo como descrito na Resolução CONAMA nº 498 (BRASIL, 2020), assim definidos: solarizado (4,09 t ha⁻¹), compostado (24,84 t ha⁻¹), vermicompostado (12,78 t ha⁻¹) e caleado (33,61 t ha⁻¹) e um tratamento sem adubação (testemunha).

A cultivar de mamoneira (*Ricinus communis* L.) utilizada foi a BRS Energia, a qual apresenta porte em torno de 1,40 m, ciclo entre 120 e 150 dias, caule verde com cera, cachos cônicos com tamanho médio de 60 cm, frutos verdes com cera e indeiscentes, sementes contendo em média 48% de óleo e colheita única. A área de cultivo deve ter altitude superior a 300 m em relação ao nível do mar e temperatura média anual entre 20 e 30 °C, com ótimo em torno de 23 °C. A precipitação pluvial anual deve ser de pelo menos 500 mm, com ótimo entre 650 a 800 mm (Gonçalves et al., 2005).

A área de cultivo possui altitude de 647 m em relação ao nível do mar e apresentou, no período de cultivo, temperaturas máximas médias variando de 28,85 a 33,16 °C, temperaturas mínimas médias variando de 13,21 a 20,51 °C e precipitação pluviométrica total de 390,8 mm (Figura 1).

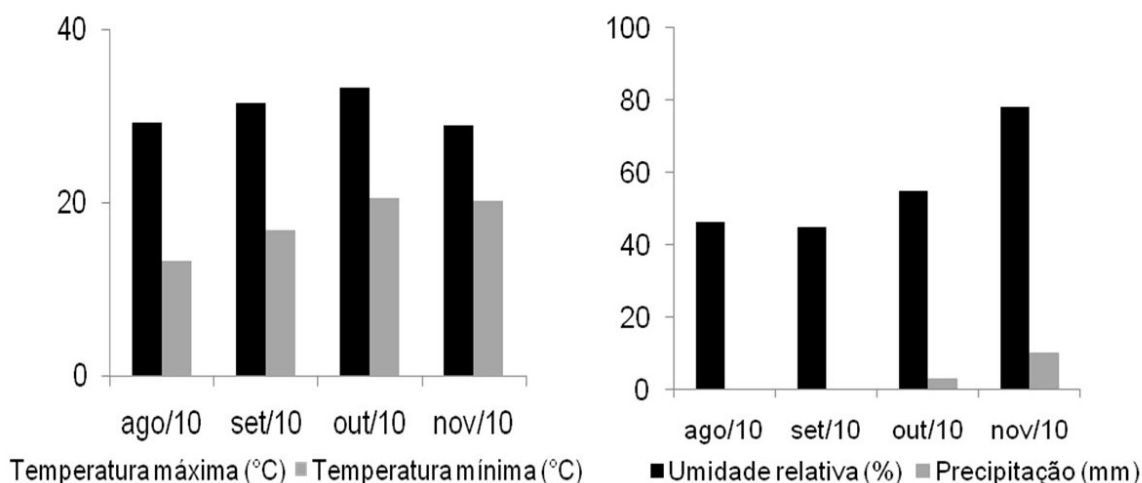


Figura 1. Valores de precipitação total (mm), umidade relativa do ar média (%), temperatura máxima, temperatura mínima e temperatura média no período de agosto a novembro de 2010.

O lodo de esgoto solarizado foi coletado na Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) do município de Juramento – MG. A ETE possui linha de tratamento composta de tratamento preliminar, reator anaeróbio UASB interligado em série a uma lagoa de pós tratamento do tipo facultativa e tratamento de esgoto por meio do processo de solarização em leito de secagem por período de três meses. Para a compostagem misturou-se o lodo de esgoto solarizado à poda de grama batatais (*Paspalum notatum*) de forma a se obter uma relação C:N de 30:1. Foram monitoradas a temperatura e a umidade e, efetuaram-se revolvimentos sistemáticos das pilhas do composto.

Para a obtenção do vermicomposto fez-se um pré-composto de lodo de esgoto misturado com poda de grama, utilizado após a fase termofílica, aproximadamente um mês do início do processo de decomposição, como substrato para a vermicompostagem com minhocas da espécie Vermelha da Califórnia (*Eisenia foetida*). O lodo de esgoto caleado foi obtido pela adição de cal virgem em quantidade correspondente a 50% da massa seca de lodo. Após a mistura, a umidade foi elevada a 70%. As características químicas dos materiais contendo lodo de esgoto são apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2. Características químicas dos lodos de esgotos estabilizados por diferentes processos.

Formas de estabilização	N_{disp}	P_2O_5	K_2O	Ca	Mg	S
	kg t ⁻¹	dag kg ⁻¹				
Solarização	9,78	0,32 (13,09)	0,28 (11,45)	0,65 (26,59)	0,20 (8,18)	1,61 (65,84)
Compostagem	1,61	0,28 (69,55)	0,28 (69,55)	0,71 (176,36)	0,15 (37,26)	1,28 (317,95)
Vermicompostagem	3,13	0,30 (38,34)	0,40 (51,12)	0,49 (62,62)	0,15 (19,17)	0,92 (117,57)
Caleação	1,19	0,29 (97,47)	0,44 (147,88)	10,93 (3.673,57)	0,23 (77,30)	1,24 (416,76)

Metodologias de Tedesco et al. (1995). Os valores entre parênteses correspondem às quantidades aplicadas em kg ha⁻¹. Para o N as quantidades aplicadas foram baseadas nos teores de N disponível (N_{disp}) (BRASIL, 2020).

As adubações referentes aos tratamentos com lodo de esgoto foram realizadas uma única vez, no sulco de plantio, a mistura foi realizada na profundidade de 0-20 cm. As parcelas experimentais foram

constituídas por 4 linhas de 3 m de comprimento, espaçadas em 1 m, sendo a parcela útil as duas linhas centrais, desprezando-se 0,5 m de cada extremidade. O plantio foi realizado em sulcos, colocando-se três sementes em cada local de semeio, a uma distância de 0,5 m entre plantas. Quinze dias após a emergência, fez-se o desbaste, deixando-se apenas uma planta. Realizou-se capina manual e irrigação por aspersão.

No início do florescimento da cultura, 45 dias após emergência, coletou-se a 4ª folha a partir do ápice da planta, para análise dos teores de N, P, K, Ca, Mg e S (Tedesco et al., 1995; Malavolta et al., 1997). A produtividade de sementes foi calculada com a umidade corrigida para 7%. Após a colheita, 150 dias após a emergência, coletou-se entre plantas, na linha, nas profundidades de 0-20 e 20-40 cm, 8 subamostras de solo por parcela, para formarem amostras compostas para a determinação dos teores de P, K, Ca, Mg e S e análise de matéria orgânica, pH, soma de bases (SB), CTC efetiva (t), CTC potencial (T), saturação por bases (V%) e H+Al (TEIXEIRA et al., 2017).

Os dados obtidos foram submetidos à análise de variância e as médias dos tratamentos comparados até 5% de probabilidade pelo teste de Scott-Knott.

3. Resultados

A aplicação de lodo de esgoto no solo resultou em produtividade de mamoneira equivalente à observada com a aplicação da adubação química e superior à produtividade obtida nas parcelas sem adubação, independente da forma de estabilização do lodo (Figura 2).

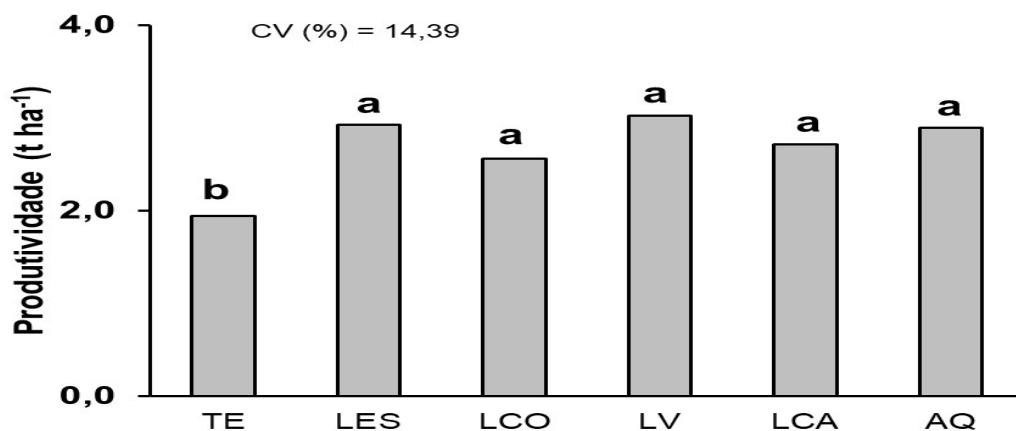


Figura 2. Produtividade da mamoneira em resposta a aplicação de fertilizante mineral e lodo de esgoto tratado de diferentes formas. TE – Testemunha; LES – Lodo de esgoto solarizado; LCO – Lodo de esgoto compostado; LV – Lodo de esgoto vermicompostado; LCA – Lodo de esgoto caleado.

Vale ressaltar que as produtividades médias observadas nos tratamentos com lodo de esgoto variaram de 2,56 a 3,02 t ha⁻¹, superando a produtividade média do estado de Minas Gerais no mesmo período, que foi de 1,05 t ha⁻¹ (EMBRAPA, 2019).

Com base na tabela 2, observou-se que, para o lodo de esgoto caleado, as quantidades de P₂O₅ e K₂O, aplicadas excederam as quantidades recomendadas para a cultura, que são de 90 kg ha⁻¹ de P₂O₅ e 30 kg ha⁻¹ de K₂O, além do fornecimento considerável de Ca, Mg e S. Para o tratamento lodo de esgoto compostado e vermicompostado, as quantidades de K₂O aplicadas também excederam as quantidades recomendadas para a cultura. Todavia, mesmo não havendo a aplicação dos nutrientes em

quantidades totais requeridos pela cultura em tratamentos com lodo de esgoto (exceto lodo de esgoto calcado), conforme já mencionado, esses proporcionaram produtividades iguais entre si e em relação à adubação mineral, e superaram a produtividade da testemunha (Figura 2).

Em relação aos teores de P no solo (Tabela 3), observou-se o maior teor no tratamento com lodo de esgoto calcado, quando comparado aos demais tratamentos. Além disso, independente dos tratamentos, os maiores teores ocorreram na camada superficial de 0-20 cm.

Tabela 3. Atributos químicos do solo em resposta à aplicação de fertilizante mineral e lodo de esgoto tratado de diferentes formas.

Atributos	Pr (cm)	TE	LES	LV	LCO	LCA	AQ	Média
P (mg dm ⁻³)	0-20	3,17	4,56	6,27	7,20	12,31	7,11	6,77 A
	20-40	2,70	3,80	4,33	3,05	4,97	2,57	3,57 B
	Média	2,94 b	4,18 b	5,30 b	5,13 b	8,64 a	4,84 b	-
K (mg dm ⁻³)	0-20	267,67	310,00	355,00	307,50	313,25	366,00	319,90 A
	20-40	183,67	242,50	347,25	280,50	334,75	265,00	275,61 B
	Média	225,67 a	276,25 a	351,13 a	294,00 a	324,00 a	315,50 a	-
Ca (cmol _c dm ⁻³)	0-20	2,57 Ab	3,35 Ab	4,10 Ab	3,13 Ab	9,93 Aa	3,20 Ab	-
	20-40	1,37 Ab	1,60 Bb	1,90 Bb	1,35 Bb	5,04 Ba	1,48 Bb	-
	Média	-	-	-	-	-	-	-
Mg (cmol _c dm ⁻³)	0-20	0,80 Aa	0,95 Aa	1,08 Aa	0,93 Aa	0,55 Ab	0,93 Aa	-
	20-40	0,43 Ba	0,63 Ba	0,73 Ba	0,50 Ba	0,55 Aa	0,55 Ba	-
	Média	-	-	-	-	-	-	-
S (mg dm ⁻³)	0-20	19,20	26,50	25,23	22,20	77,23	25,68	32,67 A
	20-40	13,83	22,53	23,38	22,58	48,60	21,40	25,39 B
	Média	16,52 b	24,52 b	24,31 b	22,39 b	62,92 a	23,54 b	-
MO (dag kg ⁻¹)	0-20	2,97	3,15	3,40	3,15	3,15	3,00	3,14 A
	20-40	2,07	2,03	2,07	2,05	2,18	2,03	2,07 B
	Média	2,52 a	2,59 a	2,74 a	2,60 a	2,67 a	2,52 a	-
pH-H ₂ O	0-20	5,90	5,65	6,00	5,83	7,53	5,78	6,11 A
	20-40	5,43	5,48	5,73	5,58	6,38	5,40	5,66 B
	Média	5,67 b	5,57 b	5,87 b	5,71 b	6,96 a	5,59 b	-
SB (cmol _c dm ⁻³)	0-20	4,05	5,10	6,08	4,84	11,28	5,07	6,07 A
	20-40	2,27	2,85	3,51	2,57	6,43	2,70	3,39 B
	Média	3,16 b	3,98 b	4,80 b	3,71 b	8,86 a	3,89 b	-
T (cmol _c dm ⁻³)	0-20	4,72 Ab	5,50 Ab	6,36 Ab	5,06 Ab	11,28 Aa	5,52 Ab	-
	20-40	3,70 Ab	4,12 Ab	4,64 Bb	3,82 Ab	6,93 Ba	4,13 Ab	-
	Média	-	-	-	-	-	-	-
T (cmol _c dm ⁻³)	0-20	8,29	9,55	9,55	9,21	11,40	9,11	9,52 A
	20-40	7,28	7,92	7,80	7,52	8,74	7,73	7,83 B
	Média	7,79 b	8,74 b	8,68 b	8,37 b	10,07 a	8,42 b	-
V%	0-20	48,67	52,00	61,50	52,00	98,75	54,00	61,15 A
	20-40	31,00	34,50	43,50	33,50	69,50	34,75	41,13 B
	Média	39,84 b	43,25 b	52,50 b	42,75 b	84,13 a	44,38 b	-
H+Al (cmol _c dm ⁻³)	0-20	4,24	4,46	3,47	4,37	0,13	4,04	3,45 B
	20-40	5,01	5,08	4,29	4,95	2,31	5,03	4,45 A
	Média	4,62 a	4,77 a	3,88 a	4,66 a	1,22 b	4,54 a	-

Metodologias da Embrapa (TEIXEIRA *et al.*, 2017). Pr = Profundidade; TE = Testemunha; LES = Lodo de esgoto solarizado; LCO = Lodo de esgoto compostado; LV = Lodo de esgoto vermicompostado; LCA = Lodo de esgoto calcado; AQ = Adubação química; MO = Matéria orgânica; SB = Soma de bases; t = Capacidade de troca catiônica efetiva; T = Capacidade de troca catiônica total; V% = Percentagem de saturação por bases. Para cada variável, médias seguidas de mesma letra minúscula na linha e maiúscula na coluna, não diferem estatisticamente entre si, a 5% de probabilidade, pelo teste de Scott-Knott.

Nesta camada, a classificação do teor de P no solo variou de “muito baixo”, no tratamento sem adubação, para “bom” ou “muito bom” nos tratamentos com fertilizantes (ALVAREZ V. *et al.*, 1999). Observa-se ainda, aumentos nos teores de P no solo nos tratamentos adubados com lodo de esgoto e

com adubação mineral em relação aos teores iniciais no solo (Tabela 1), corroborando os resultados obtidos por Bremm *et al.* (2012).

Os teores de K no solo não variaram em função dos tratamentos aplicados, sendo os maiores valores encontrados na camada superior do solo (Tabela 3). Nos tratamentos estudados, incluindo a testemunha, os teores desse elemento foram classificados como “muito bom” (ALVAREZ V. *et al.*, 1999),

A aplicação de lodo de esgoto caleado promoveu aumento nos teores de Ca no solo, nas duas profundidades avaliadas, quando comparado aos demais tratamentos (Tabela 3). Além disso, os teores de Ca foram mais elevados na camada superficial para todos os tratamentos, exceto a testemunha.

Apesar da maior quantidade de Mg ter sido aplicada com o lodo de esgoto caleado, esse foi o tratamento que apresentou os menores teores do elemento no solo, na camada de 0-20 cm de profundidade, sendo os valores inferiores inclusive ao tratamento testemunha. Na camada de 20-40 cm não foram constatadas diferenças entre os tratamentos para o Mg. Todavia, os teores deste elemento concentraram-se mais na camada superior (0-20 cm) do que na camada inferior (20-40 cm), com exceção do tratamento com lodo de esgoto caleado, em que os teores deste elemento não apresentaram diferenças entre as camadas.

Os teores de S no solo foram maiores com a aplicação de lodo de esgoto caleado, quando comparado aos demais tratamentos (Tabela 3). Tal fato ocorreu em razão do aporte mais elevado desse elemento com o tratamento mencionado (Tabela 2). Os teores de matéria orgânica não variaram entre os tratamentos, porém, foram mais elevados na camada superficial (Tabela 3).

A aplicação de lodo de esgoto caleado resultou em aumento no pH do solo em comparação aos demais tratamentos (Tabela 3), atingindo valores classificados agronomicamente como “muito altos” (ALVAREZ V. *et al.*, 1999). Além disso, os maiores valores de pH foram encontrados na camada superficial do solo em comparação a subcamada.

A composição química dos materiais contendo lodo de esgoto (Tabela 2) e as respectivas doses aplicadas demonstram que foram adicionados ao solo maior quantidade de K_2O ($97,47 \text{ kg ha}^{-1}$), Ca ($3.673,57 \text{ kg ha}^{-1}$) e Mg ($77,30 \text{ kg ha}^{-1}$) no tratamento de lodo de esgoto caleado em relação aos demais. Tendo em vista que a soma de bases (SB) e a percentagem de saturação de bases (V%) são diretamente relacionadas à presença desses elementos no solo, observa-se que a maior adição de Ca, Mg e K no tratamento com lodo de esgoto caleado resultou em maiores valores de SB e V%. E o aumento significativo destes atributos ocorreu na camada superficial, de 0-20 cm (Tabela 3). Nos demais tratamentos não foram observados diferenças estatísticas.

Além da SB e da V%, observa-se que a aplicação de lodo de esgoto caleado promoveu aumentos na capacidade de troca catiônica efetiva (t) e na capacidade de troca catiônica total (T) quando comparado aos demais tratamentos (Tabela 3). Além disso, os aumentos dessas variáveis foram mais elevados na camada superficial do solo. Por outro lado, os tratamentos com lodo de esgoto solarizado, compostado e vermicompostado, assim como o tratamento com adubo mineral, apresentaram SB, V%, CTC(t) e CTC(T) equivalentes estatisticamente às observadas no tratamento sem adubação.

A acidez potencial foi reduzida nos solos do tratamento com lodo de esgoto caleado, que se diferenciou em relação aos demais tratamentos (Tabela 3). Houve uma maior redução da acidez potencial na camada 20-40 cm em comparação à camada de 0-20 cm.

Os menores teores de N na mamoneira foram observados com a aplicação de lodo de esgoto vermicompostado, em comparação aos demais tratamentos (Tabela 4). Por outro lado, independente dos tratamentos, os maiores teores deste nutriente foram observados no limbo foliar, quando comparados ao pecíolo.

Tabela 4. Teores de nutrientes no limbo foliar (LF) e no pecíolo (PE) de mamoneira em resposta à aplicação de fertilizante mineral e lodo de esgoto tratado de diferentes formas

Nutriente	Parte da folha	TE	LS	LCO	LV	LCA	AQ	Média	NA
		----- dag kg ⁻¹ -----							
N	LF	4,48	4,7	4,72	4,19	4,8	4,68	4,59 A	4,00-5,00
	PE	1,58	1,54	1,52	1,3	1,8	1,46	1,53 B	-
	Média	3,03 a	3,12 a	3,12 a	2,75 b	3,30 a	3,07 a	-	-
P	LF	0,23	0,25	0,27	0,27	0,27	0,28	0,26 A	0,30-0,40
	PE	0,14	0,12	0,16	0,18	0,17	0,17	0,15 B	-
	Média	0,19 a	0,19 a	0,22 a	0,23 a	0,22 a	0,23 a	-	-
K	LF	1,56	1,69	1,62	1,77	1,73	1,65	1,67 B	3,00-4,00
	PE	3,63	3,26	3,27	3,18	3,56	3,39	3,38 A	-
	Média	2,59 a	2,48 a	2,45 a	2,48 a	2,65 a	2,52 a	-	-
Ca	LF	0,87	0,69	0,73	0,75	0,84	0,75	0,77 B	1,50-2,50
	PE	1,45	1,31	1,23	1,4	1,62	1,43	1,40 A	-
	Média	1,16 a	1,00 a	0,98 a	1,08 a	1,23 a	1,09 a	-	-
Mg	LF	0,17	0,13	0,14	0,14	0,14	0,13	0,14 B	0,25-0,35
	PE	0,44	0,35	0,35	0,36	0,38	0,37	0,37 A	-
	Média	0,30 a	0,24 a	0,24 a	0,25 a	0,26 a	0,25 a	-	-
S	LF	0,24	0,2	0,22	0,3	0,26	0,26	0,25 A	0,30-0,40
	PE	0,18	0,19	0,19	0,19	0,23	0,19	0,20 B	-
	Média	0,21 a	0,19 a	0,20 a	0,25 a	0,24 a	0,23 a	-	-

TE - Testemunha; LS – Lodo de esgoto solarizado; LCO – Lodo de esgoto compostado; LV – Lodo de esgoto vermicompostado; LCA – Lodo de esgoto caleado; AQ – Adubação Química; NA – Nível adequado, segundo Malavolta et al. (1997). Para cada variável, médias seguidas de mesma letra minúscula na linha e maiúscula na coluna, não diferem estatisticamente entre si, a 5% de probabilidade, pelo teste de Scott-Knott.

Em relação aos teores de P, K, Ca, Mg e S, não houve diferenças entre os tratamentos (Tabela 4). No entanto, os teores de K, Ca e Mg foram maiores no pecíolo em comparação ao limbo foliar, enquanto os teores de P e S foram maiores no limbo foliar em comparação ao pecíolo.

Os teores de P, K, Mg, S e Ca no limbo foliar ficaram abaixo dos níveis considerados adequados para o estado nutricional da mamoneira relatados por Malavolta *et al.* (1997), muito embora, nos tratamentos com lodo de esgoto, os teores destes elementos no solo tenham sido classificados na faixa de “bom” a “muito bom” (ALVAREZ V. *et al.*, 1999).

4. Discussão

As produtividades obtidas também foram superiores às observadas por Alves *et al.* (2015) e Barretos e Medeiros (2012), que obtiveram valores da mesma cultivar variando de 0,92 a 1,31 t ha⁻¹ e 1,39 t ha⁻¹, respectivamente, em regiões com condições edafoclimáticas semelhantes.

Alguns estudos demonstram que a adição de lodo de esgoto ao solo promove aumentos na produtividade das culturas da mamoneira, com maior rendimento de matéria seca e óleo das sementes (CAPUANI *et al.*, 2015; MACIEL-TORRES *et al.*, 2017). Cavalcanti *et al.* (2015) relatam que a produtividade de mamoneira adubada com lodo de esgoto e sulfato duplo de potássio e magnésio foi semelhante a encontrada com a fertilização com NPK, indicando o potencial deste resíduo em substituição à adubação química.

A influência positiva do lodo de esgoto sobre o teor de P nos solos é destacada em pesquisas (COSTA *et al.*, 2014; BONINI *et al.*, 2015). Valores de pH mais próximos de 7, como observado no tratamento com lodo de esgoto caledo, proporcionam maiores disponibilidades de P (H_2PO_4^-) para a solução do solo. Melo *et al.* (2018), em estudos de dez anos de aplicação de lodo de esgoto em solo tropical, afirmam que a contínua aplicação de lodo de esgoto proporciona incremento na concentração de P nos solos, sendo eficiente na substituição completa da fertilização fosfatada. De acordo com Martins *et al.* (2015) grande parte do P do lodo de esgoto se encontra na forma orgânica e o aumento do P disponível ocorre a partir da mineralização do P após um ano da aplicação.

Os teores de K no solo pode estar associado a presença de muscovita no material de origem, que são metargilitos/metassilitos pertencentes a formação geológica Serra de Santa Helena, sendo que, tal fato pode explicar os teores variando de médio a alto de potássio nos solos dessa formação. Capuani *et al.* (2015), ao pesquisarem a aplicação de lodo de esgoto no cultivo de mamoneira, observaram aumentos na disponibilidade de K no solo. Contudo, convém destacar que o lodo de esgoto tende a ser mais pobre em K em razão da alta solubilidade desse elemento, o que faz com que permaneça na água residuária durante o tratamento de esgotos.

O aumento nos teores de Ca em solos adubados com lodo de esgoto caledo foi também observado por Nascimento *et al.* (2013) como resultado da adição de Ca durante o processo de estabilização do lodo com a Cal (CaO). O comportamento do Mg no solo foi o inverso do observado para o Ca. A grande quantidade de cálcio existente no lodo caledo desloca o magnésio do complexo de troca do solo, facilitando a sua lixiviação. Esse comportamento pode ter ocorrido por haver uma competição entre estes dois elementos pelos sítios de adsorção no solo (MALAVOLTA, 2006). A mesma relação inversa entre estes nutrientes no solo também ocorreu em estudo de Capuani *et al.* (2015), com aplicação do lodo de esgoto com diferentes combinações de calcário, sobre as características da mamona e propriedades químicas do solo. De acordo com estes autores, as combinações de Ca e Mg devem ser levadas em consideração, resultando em um equilíbrio mais adequado destes elementos no solo.

Independente do tratamento, os teores de S foram mais elevados na camada superficial do solo. Em estudos de Lobo *et al.* (2012) a aplicação do lodo de esgoto incrementou os teores de S do solo na camada superficial (0-10 cm de profundidade), entretanto não influenciou os teores deste elemento na camada subsuperficial (20-40 cm de profundidade).

Embora um dos benefícios do lodo de esgoto seja o aumento do teor de matéria orgânica dos solos, em regiões tropicais como o Brasil, a degradação da matéria orgânica acontece de forma muito rápida (ALBURQUERQUE *et al.*, 2015; CAVALCANTI *et al.*, 2015; ZUBA JUNIO *et al.*, 2015). Assim, sua permanência no solo é temporária e, por este motivo, em alguns trabalhos não foram verificados

aumentos dos seus teores em razão da aplicação de lodo de esgoto (MAIO *et al.*, 2011; RIBEIRINHO *et al.*, 2012; NASCIMENTO *et al.*, 2014; MARTINS *et al.*, 2015).

A temperatura e a umidade mais elevadas predominantes nestas regiões aceleram o processo de mineralização da matéria orgânica e pouco resíduo recalcitrante permanece no solo, e somente influenciará os atributos do solo com aplicações sistemáticas e em prazos mais longos (BAYER; MIELNICZUK, 2008; MAIO *et al.*, 2011). Na presente pesquisa, o período compreendido entre a adição do lodo de esgoto no solo e a sua amostragem para realização das análises foi tempo suficiente para a degradação da matéria orgânica, permanecendo pouco resíduo no solo.

O aumento do pH em razão da aplicação de lodo de esgoto alcalinizado ocorre como resultado da adição de cal virgem (CaO) e cal hidratada Ca(OH)_2 durante o processo de estabilização. De acordo com Matos e Matos (2012) o lodo de esgoto caleado promove aumento no pH dos solos e por esta razão pode ser recomendado como corretivo da acidez do solo.

O aumento da SB, da V% e do pH com a aplicação de lodo de esgoto caleado foi também observada por Nascimento *et al.* (2014) durante o processo de caleação. A adição de CaO no processo de estabilização do lodo de esgoto resulta em um material com elevado poder de correção da acidez, promovendo aumentos do pH do solo, precipitação do Al_3^+ e neutralização dos íons H^+ , resultando em maior exposição das cargas negativas do solo. Corroborando com esses resultados, Nascimento *et al.* (2014), ao aplicarem lodo de esgoto tratado de diferentes formas em Cambissolo Háplico, constataram que os tratamentos que receberam lodo de esgoto caleado apresentaram maiores V%, CTC(t) e CTC(T) do solo.

Estudos de Poggere *et al.* (2012) utilizando lodo de esgoto alcalizado demonstraram que os atributos dos solos que apresentaram as melhores correlações com o lodo de esgoto caleado foram a CTC(T), a acidez potencial (H+Al) e o pH do solo. A capacidade de troca catiônica total CTC(T) é de grande importância no que diz respeito a fertilidade do solo, uma vez que indica a capacidade total de retenção de cátions, os quais, em geral, irão tornar-se disponíveis às plantas (XAVIER *et al.*, 2014).

A redução da acidez potencial no tratamento com lodo de esgoto caleado é atribuído ao incremento dos valores de pH associado ao aumento nos teores de cátions trocáveis do solo, refletindo na elevação da saturação por bases. Estes resultados evidenciam o poder de correção da acidez do solo pelo lodo de esgoto caleado. Concordando com os resultados desse trabalho, Barbosa *et al.* (2017) concluíram que a aplicação de lodo de esgoto alcalinizado ao solo resultou na diminuição da acidez potencial (H+Al) e aumento da saturação por bases e capacidade efetiva de troca catiônica, dentre outros.

De modo geral, os efeitos da aplicação do lodo de esgoto sobre os solos têm sido percebidos já há algum tempo, principalmente após aplicações sucessivas, sendo a intensidade variável, conforme a origem dos resíduos, manejo e doses utilizadas (BUENO *et al.*, 2011). Os benefícios sobre as propriedades químicas e físicas dos solos são muito evidentes e contribuem para aumentos consideráveis na produtividade das culturas agrícolas (ALBURQUERQUE *et al.*, 2015; CAPUANI *et al.*, 2015; CAVALCANTI *et al.*, 2015; ÁFAZ *et al.* 2017; MACIEL-TORRES *et al.*, 2017; EID *et al.* 2018).

De forma geral, não houve diferenças entre os teores de nutrientes encontrados nos solos adubados com lodo de esgoto e adubação mineral. Apesar do maior aporte de nutrientes ao solo com a

adição dos resíduos orgânicos e com a adubação mineral, os teores de P, K, Ca, Mg e S no tecido foliar ficaram abaixo dos níveis considerados adequados para a cultura, de acordo com Malavolta *et al.* (1997).

Somente os teores de N no limbo foliar estiveram em níveis adequados para a cultura da mamoneira em todos os tratamentos. No caso da testemunha, convém ponderar que, a menor produtividade das plantas desse tratamento, pode ter promovido maior concentração do N nos tecidos, proporcionando teores similares aos dos tratamentos com adubação.

Pelo exposto, ficou evidente que o lodo de esgoto é uma boa fonte de N para as plantas e que pode substituir com eficiência o N da adubação mineral sem prejuízos ao estado nutricional da cultura. Tal fato corrobora os resultados de Ribeirinho *et al.* (2012) e Albuquerque *et al.* (2015), que observaram aumento no teor de N no limbo foliar de cultivos adubados com lodo de esgoto. Por outro lado, os demais nutrientes do lodo de esgoto foram insuficientes para suprir a demanda da planta, necessitando de complementação.

A aplicação de lodo no solo deve ser contínua, para manter os níveis de matéria orgânica, pois a decomposição do C orgânico adicionado com o lodo é rápida, apresentando um tempo de residência no solo muito curto (MARTINS *et al.*, 2015). Os compostos orgânicos como o lodo de esgoto podem disponibilizar nutrientes como N, P e K para as plantas, melhorando os atributos químicos, além de proporcionar maior reciclagem de nutrientes no solo pelas culturas, em relação ao uso da adubação mineral (MELO *et al.*, 2011; KRAY *et al.*, 2011; KROB *et al.*, 2011).

Estudos vêm demonstrando que a utilização do lodo de esgoto traz diversos benefícios à agricultura, como a incorporação de nutrientes em culturas diversas, resultando na melhoria do desenvolvimento das plantas (PEDROSA *et al.*, 2017; MARTINS *et al.*, 2018). Além disso, o lodo de esgoto pode ser utilizado como fertilizante orgânico complementar, reduzindo assim o uso de fertilizantes químicos e, conseqüentemente, o custo da adubação (GONÇALVES Jr. *et al.*, 2012).

No entanto, o uso de lodo de esgoto como fonte de matéria orgânica e nutrientes requer alguns cuidados, principalmente quanto ao teor de metais pesados, substâncias orgânicas tóxicas e patógenos, que tendem a se concentrar no solo após sucessivas aplicações desse resíduo.

5. Conclusões

A adubação com lodo de esgoto caleado promove aumentos dos teores no solo de Ca, P e S, do pH, da soma de bases, da capacidade de troca catiônica e da percentagem de saturação de bases, bem como, a redução da disponibilidade de Mg e da acidez potencial (H+Al), quando comparada a testemunha, adubação química e demais formas de lodo de esgoto.

As adubações químicas e com lodo de esgoto promovem maior elevação na camada superior do solo dos teores de P, K, Ca, Mg e S, bem como, do pH, da soma de bases, da capacidade de troca catiônica e da percentagem de bases trocáveis, em comparação a camada inferior do solo. Por outro lado, a acidez potencial (H+Al) é maior na camada inferior do que na camada superior do solo.

A adubação com de lodo vermicompostado proporciona teores mais baixos de N na planta, enquanto às adubações químicas e com lodo de esgoto, e a testemunha, propiciam os mesmos teores na planta. Todavia, os teores são adequados para todos os tratamentos.

Os teores de P, K, Ca, Mg e S no tecido foliar não diferem entre tratamentos e encontram-se abaixo dos níveis considerados adequados para a cultura. Os teores de N, P e S concentram-se mais no limbo foliar, enquanto os teores de K, Ca e Mg concentram-se mais no pecíolo da mamoneira.

Independente da forma de estabilização, a adubação com lodo de esgoto gera produtividade de sementes de mamona de 2,56 a 3,02 t ha⁻¹, equivalente à adubação química e superior a do solo não adubado.

Agradecimentos: Os autores expressam seus maiores agradecimentos à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG), ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio financeiro que possibilitou a realização deste trabalho.

Referências

- AFÁZ, D. C. de S.; BERTOLAZI, K. B.; VIANI, R. A. G.; SOUZA, C. F. Composto de lodo de esgoto para o cultivo inicial de eucalipto. **Revista Ambiente & Água - An Interdisciplinary Journal of Applied Science**, v.12, n.1, p.112-123, 2017. <https://doi.org/10.4136/ambi-agua.1965>
- ALBUQUERQUE, H. C. de; JUNIO, G. R. Z; 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. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v19n6p553-559>
- ALVAREZ V., V. H.; NOVAIS, R. F.; BARROS, N. F.; CANTARUTTI, R. B.; LOPES, A. S. Interpretação dos resultados das análises de solos. In RIBEIRO, A. C.; GUIMARAES, P. T. G.; ALVAREZ V., V. H. (Ed.). **Recomendação para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais: 5. Aproximação**. Viçosa: Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais, 1999. p.25-32.
- ALVES, G. da S.; TARTAGLIA, F. de L; BELTRÃO, N. E. de M.; SAMPAIO, L. R.; FREIRE, M. A. de O. Densidade populacional e seu efeito na produtividade da mamoneira BRS Energia sob cultivo irrigado. **Revista Ciência Agronômica**, v. 46, n. 3, p. 546-554, 2015. <https://doi.org/10.5935/1806-6690.20150037>
- BARBOSA, E. A. A.; MATSURA, E. E.; SANTOS, L. N. S.; NAZÁRIO, A. A.; GONÇALVES, I. Z.; FEITOSA, D. R. C. Soil attributes and quality under treated domestic sewage irrigation in sugarcane. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 22, p.137-142, 2018. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v22n2p137-142>
- BARBOSA, J. Z.; POGGERE, G. C.; DALPISOL, M.; SERRAT, B. M.; BITTENCOURT, S.; MOTTA, A. C. V. A aplicação de lodo de esgoto alcalinizado melhora a fertilidade de solos ácidos. **Ciência e Agrotecnologia**, v.41, n.5, p. 483-493, 2017. <https://doi.org/10.1590/1413-70542017415006717>
- BARRETO, H. B. F.; MEDEIROS, J. F. Crescimento e produtividade de acessos de mamona cultivada sob irrigação no semiárido. **ACSA – Agropecuária Científica no Semi-Árido**, v.8, n.3, p56-61, 2012. <http://dx.doi.org/10.30969/acsa.v8i3.154>
- BAYER, C.; MIELNICZUK, J. Dinâmica e função da matéria orgânica. In: SANTOS, G. de A.; SILVA, L. S. da; CANELLAS, L. P.; CAMARGO, F. A. de O. (Ed.). **Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais e subtropicais**. 2.ed. Porto Alegre: Metrópole, p.7-18. 2008.
- BONINI, C. S. B; ALVES, M. C.; MONTANARI, R. Lodo de esgoto e adubação mineral na recuperação de atributos químicos de solo degradado. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.19, n.4, p.388-393, 2015. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v19n4p388-393>
- BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA. **Resolução N° 498, de 19 de ago. 2020**. Define critérios e procedimentos para produção e aplicação de biossólido em solos, e dá outras providências. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 19 de ago. 2020. Edição: 160. Seção 1. p.91, 2020.
- BREMM, R. R. R.; DAMASCENO, S. G.; SECCO, D.; VILAS-BOAS, M. A.; TORRES, D. G. B.; MEES, J. B. R.; KUMMER, L. Potencial de uso de lodo de esgoto na cultura do milho em latossolo argiloso no oeste do Paraná. **Revista Brasileira de Ciências Ambientais**, n.23, p.17-24, 2012. Available from: <http://rbciamb.com.br/index.php/Publicacoes/RBCIAMB/article/view/328>
- BUENO, J. R. P.; BERTON, R. S.; SILVEIRA, A. P. D.; CHIBA, M. K.; ANDRADE, C. A.; MARIA, I. C. Chemical and microbiological attributes of na oxisol treated with successive applications of sewage sludge. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.35, p.1461-1470, 2011. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832011000400040>
- CAPUANI, S.; FERNANDES, D. M.; RIGON, J. P. G.; RIBEIRO, L. C. Combination between acidity amendments and sewage sludge with phosphorus on soil chemical characteristics and on development of castor bean. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v.46, n.22, p.2901-2912, 2015. <https://doi.org/10.1080/00103624.2015.1104337>

- CAVALCANTI, T. F. M.; ZUBA JUNIO, G. R.; SAMPAIO, R. A.; CARNEIRO, J. P.; OLIVEIRA, E.S.A. de; RODRIGUES, M. N. Produção de mamoneira adubada com lodo de esgoto e sulfato duplo de potássio e magnésio. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.19, n.8, p.773-779, 2015. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v19n8p773-779>
- CFSEMG – Comissão de fertilidade do solo do estado de Minas Gerais: **5ª aproximação**. Viçosa, 1999. 359p.
- COSTA, V. L.; MARIA, I. C.; CAMARGO, A. O.; GREGO, C. R.; MELO, L. C. Distribuição espacial de fósforo em Latossolo tratado com lodo de esgoto e adubação mineral. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.18, p.287-293, 2014. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662014000300007>
- DINIZ NETO, M. A.; SILVA, I. de F. da; DINIZ, B. L. M. T.; PEREIRA, A. de A.; PEREIRA, A. R. Componentes de produção de mamona em função de níveis de adubação nitrogenada e desfolha. **Revista Ciência Agronômica**, v. 43, n. 3, p. 546-553, 2012. Available from: <http://www.ccarevista.ufc.br/seer/index.php/ccarevista/article/view/1474>
- EID, E. M.; ALRUMMAN, S. A.; EL-BEBANY, A. F.; HESHAM, A.; TAHER, M. A.; FAWY, K. F. The effects of different sewage sludge amendment rates on the heavy metal bioaccumulation, growth and biomass of cucumbers (*Cucumis sativus* L.). **Environmental Science and Pollution Research**, v.24, 2017. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-9289-6>
- EID, E. M.; ALRUMMAN, S. A.; EL-BEBANY, A. F.; FAWY, K. F.; TAHER, M. A.; HESHAM, A. E.; EL-SHABOURY, G. A.; AHMED, M. T. The evaluation of sewage sludge application as a fertilizer for broadbean (*Faba sativa* Bernh.) crops. **Food Energy Security**, v.7, n.3, p. 1-13, 2018. <https://doi.org/10.1002/fes3.142>
- EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Árvore do conhecimento mamona. Estatísticas. Agência Embrapa de Informação Tecnológica. Média de produtividade (kg/ha) por estado produtor e no Brasil, no período de 2002 a 2011. Available from: <https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/mamona/arvore/acesso:10/jul 2019>.
- FÁVARIS, N. A. B.; LOPES, J. C.; FREITAS, A. R.; ZANOTTI, R. F.; MONTEIRO, C. B. Qualidade fisiológica de genótipos de tomate fertilizados com lodo de esgoto. **Revista Nucleus**, v.13, n.2, p.231-240, 2016. <https://doi.org/10.3738/1982.2278.1653>
- FREITAS, A. R.; LOPES, J. C.; ALEXANDRE, R. S.; VENANIO, R. F. Z. Emergência e crescimento de mudas de maracujá doce em função de lodo de esgoto e luz. **Comunicata Scientiae**, v.6, n.2, p.234-240, 2015. Available from: <http://comunicatascientiae.com.br/comunicata/article/viewFile/745/322>
- GONÇALVES Jr., A. C.; SCHWANTES, D.; COELHO, G. F.; NACKE, H.; STREY, L.; MONTOVANI, P. A. B. Efeito da aplicação de biossólido na disponibilidade de nutrientes e metais pesados no milho. **Revista de estudos ambientais**, v.14, n.3, p.77-87, 2012. Available from: <https://bu.furb.br/ojs/index.php/rea/article/viewFile/3074/2100>
- GONÇALVES, N. P.; FARIA, M. A. V. de R.; SATURNINO, H. M.; PACHECO, D. D. Cultura da mamoneira. **Informe Agropecuário**, v.26, n.229, p.28-32, 2005.
- GONÇALVES; A. A.; MOREIRA, C. R.; SOUZA, G. B. de P.; PERES, D. M.; CANZI, G. M. Adubação com lodo de esgoto na cultura do milho. **Revista Técnico-Científica do CREA-PR**, p.1-13, 2019. Available from: <http://creaprw16.crea-pr.org.br/revista/Sistema/index.php/revista/article/view/535/319>
- KRAY, C. H.; TEDESCO, M. J.; BISSANI, C. A.; BORTOLON, L.; ANDREAZZA, R.; GIANELLO, C. Avaliação da aplicação de composto de lixo urbano e lodo de esgoto em dois solos diferentes. **Pesquisa Agropecuária Gaúcha**, v.17, n.2, p.119-125, 2011. Available from: <http://www.fepagro.rs.gov.br/lista/122/PAG>
- KROB, A. D.; MORAES, S. P.; SELBACH, P. A.; BENTO, F. M.; CAMARGO, F. A. de O. Propriedades químicas de um Argissolo tratado sucessivamente com composto de lixo urbano. **Ciência Rural**, v.41, n.3, p.433-439, 2011. <https://doi.org/10.1590/S0103-84782011005000017>
- LOBO, T. F.; GRASSI FILHO, H.; BÜLL, L.T.; SOUZA, F. L. P. de. Efeito do nitrogênio e do lodo de esgoto na nutrição do feijoeiro. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, v. 10, n.2, p. 33-41, 2012. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-27912007000300002>
- MACIEL-TORRES, S. P.; FIGUEROA-VIRAMONTES, U.; JACOBO-SALCEDO, M. D. R.; PEDROZA-SANDOVAL, A.; TREJO-CALZADA, R.; ENCERRADO-ALVA, R. C. Micronutrients in castor-oil plants (*Ricinus communis*L.) growing in soil fertilized with biosolids. **Revista Chapingo Serie Zonas Áridas**, v.16, p.13-22, 2017. [doi: 10.5154/r.rchza.2017.10.007](https://doi.org/10.5154/r.rchza.2017.10.007)
- MAIO, M. M.; SAMPAIO, R. A.; NASCIMENTO, A. L.; PRATES, F. B. de S.; RODRIGUES, M. N.; SILVA, H. P. da; DIAS, A. N.; FREITAS, C. E. S. Atributos físicos do solo, adubado com lodo de esgoto e silicato de cálcio e magnésio. **Revista Ceres**, v.58, n.6, p.823-830, 2011. <http://dx.doi.org/10.1590/S0034-737X2011000600021>
- MALAVOLTA, E. **Manual de nutrição mineral de plantas**. São Paulo, Agronômica Ceres, 2006. 638p.
- MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S. A. **Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações**. 2. ed., Piracicaba: POTAFOS, 1997. 319p.
- MARTINS, C., dos SANTOS, F., PORTZ, A.; dos SANTOS, A. Desenvolvimento inicial do milho (*Zea mays* L.) em substrato contendo lodo de esgoto compostado. **Brazilian Journal of Environmental Sciences**, v.48, p.69-79, 2018. <https://doi.org/10.5327/Z2176-947820180305>
- MARTINS, D. R.; CAMARGO, O. A. DE; MELO, L. C. A.; RIBEIRINHO, V. S.; ANDRADE, C. A. de. Estado nutricional de cafeeiros comerciais após aplicações de lodo de esgoto como condicionador do solo. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 58, n. 3, p. 248-256, 2015. Available from: <http://ajaes.ufra.edu.br/index.php/ajaes/article/view/2019>
- MATOS, M. P.; MATOS, A. T. Dose de cal hidratada e características químicas de um lodo de esgoto doméstico submetido à caleação. **Engenharia na Agricultura**, v.20 n.4, p. 357-363, 2012. <http://dx.doi.org/10.13083/1414-3984.v20n04a08>

- MELO, A. V.; GALVÃO, C.C. J.; BRAUN, H.; SANTOS, M. M. dos; COIMBRA, R. R.; SILVA, R. R. da.; REIS, W. F. dos. Extração de nutrientes e produção de biomassa de aveia-preta cultivada em solo submetido a dezoito anos de adubação orgânica e mineral. **Semina: Ciências Agrárias**, v.32, n.2, p.411-420, 2011. DOI: 10.5433/1679-0359.2011v32n2p411
- MELO, G.; MACEDO, F. Ten years of application of sewage sludge on tropical soil. A balance sheet on agricultural crops and environmental quality. **Science of the Total Environment**, v. 64, p.1493–1501, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.06.254>
- NASCIMENTO, A. L.; SAMPAIO, R. A.; ZUBA JUNIO, G. R.; FERNANDES, L. A.; CRUZ, S. F. da; CARNEIRO, J. P.; BARBOSA, C. F.; LIMA, N. N. de. Atributos químicos do solo adubado com lodo de esgoto estabilizado por diferentes processos e cultivado com girassol. **Bioscience Journal**, v.30, p.146-153, 2014. Available from: <http://www.seer.ufu.br/index.php/biosciencejournal/article/view/15142>
- NASCIMENTO, A. L.; SAMPAIO, R. A.; FERNANDES, L. A.; JUNIO, G. R. Z.; CARNEIRO, J. P.; RODRIGUES, M. N.; ALBURQUERQUE, H. C. Produtividade e nutrição de girassol adubado com lodo de esgoto estabilizado por diferentes processos. **Revista Ceres**, vol.60, n.5, pp.683-689, 2013. <https://doi.org/10.1590/S0034-737X2013000500012>
- NASCIMENTO, A. L.; ZUBA JUNIO, G. R.; SAMPAIO, R. A.; FERNANDES, L. A.; CARNEIRO, J. P.; BARBOSA, C. F.; Metais pesados no solo e mamoneira adubada com biossólido e silicato de cálcio e magnésio. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.19, n.5, p.505-511, 2015. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v19n5p505-511>
- PEDROSA, M. V.; LIMA, W. L. de; AMARAL, A. A. do; CARVALHO, A. H. O. Biossólido de lodo de esgoto na agricultura: desafios e perspectivas. **Revista Agrogeoambiental**, v. 9, n. 4, p.125-142, 2017. <http://dx.doi.org/10.18406/2316-1817v9n42017999>
- PILNÁČEK, 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**, p.127, 212–219, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2018.11.025>
- POGGERE, B. M. S.; MOTTA, A. C. V.; BITTENCOURT, S.; DALPISOL, M.; ANDREOLI, C. V. Lodos de esgoto alcalinizados em solos do estado do Paraná: taxa de aplicação máxima anual e comparação entre métodos para recomendação agrícola. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v.17, n.4, p. 429-438, 2012. <https://doi.org/10.1590/S1413-41522012000400010>
- RIBEIRINHO, V. S.; MELO, W. J. DE; SILVA, D. H. DA; FIGUEIREDO, L. A.; MELO, G. M. P. de. Fertilidade do solo, estado nutricional e produtividade de girassol, em função da aplicação de lodo de esgoto. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v.42, p.166-173, 2012. <https://doi.org/10.1590/S1983-40632012000200002>
- SANTOS, A. C. dos; BOECHAT, C. L.; SARAIVA, P. C.; ARAUCO, A. M. S.; ROCHA, F. A.; PEIXOTO, M. F. S. P. Application of treated domestic sewage effluent on the quality indicators of an oxisol cultivated with castor bean. **Revista Ceres**, v.66, n.2, p.77-84, 2019. <http://dx.doi.org/10.1590/0034-737x201966020001>
- SHARMA, B.; SARKAR, A.; SINGH, P.; SINGH, R.P. Agricultural utilization of biosolids: a review on potential effects on soil and plant grown. **Waste Manage**, v.64, p.117–132, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.03.002>
- SIMÕES, K. S.; PEIXOTO, M. F. S. P.; ALMEIDA, A. T.; LEDO, C. A. S.; PEIXOTO, C. P.; PEREIRA, F. A. C. Água residuária de esgoto doméstico tratado na atividade microbiana do solo e crescimento da mamoneira. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 17, n.5, p.518-523, 2013. <http://dx.doi.org/10.1590/S1415-43662013000500008>
- TEDESCO, M. J.; GIANELLO, C.; BISSANI, C. A.; BOHNEN, H.; VOLKWEISS, S. J. **Análise de solo, plantas e outros materiais**. 2ª Edição. Porto Alegre: Departamento de Solos. UFRGS. 174p. 1995. (Boletim Técnico, 5).
- TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. (Eds.). **Manual de métodos de análise de solos**. 3ª edição, EMBRAPA: Brasília-DF, 2017. 574p.
- XAVIER, J. de F.; AZEVEDO, C. A. V. de; BELTRÃO, N. E. de M.; FERNANDES, J. D.; LIMA, V. L. A. de. Cultivo da mamoneira sob diferentes tipos de águas residuárias e de abastecimento e níveis de água no solo. **Revista Caatinga**, v.27, n. 3, p.11-21, 2014. Available from: <https://periodicos.ufersa.edu.br/index.php/caatinga/article/view/2795>
- ZUBA JUNIO, G. R.; SAMPAIO, R. A.; NASCIMENTO, A. L.; FERNANDES, L. A.; LIMA, N. N.; CARNEIRO, J. P. Attributes of the soil fertilized with sewage sludge and calcium and magnesium silicate. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.19, n.11, p.1107–1113, 2015. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v19n11p1107-1113>

4.2 Artigo 2 - Metais pesados no solo e em mamoneira adubada com lodo de esgoto submetido a diferentes processos de estabilização

Este artigo foi elaborado conforme normas da Ciência Rural.

Heavy metals in the soil and castor bean fertilized with sewage sludge submitted to different stabilization processes

ABSTRACT: *The objective of this work was to evaluate the levels of heavy metals in the soil and in the castor bean plant in response to fertilization with sewage sludge (SS) submitted to different stabilization processes. The experiment was developed in Cambisol with the treatments: control, fertilization with solarized SS, composted SS, vermicomposted SS, limed SS and mineral fertilization. The experimental design was in a split plot scheme, with fertilizers being the primary factor and soil layers or leaf parts the secondary factor. The data obtained were submitted to analysis of variance and Scott-Knott test at 5% probability. In the soil, fertilizations with solarized, composted and limed SS promoted the largest increments of Zn contents, mainly in the superficial layer. In the leaf tissue, the contents of Zn and Cu were higher in the control and in the solarized SS, while the Ni, was higher in the solarized, composted and vermicomposted SS, and mineral fertilizers. In general, the highest levels of Zn and Cu occurred in the leaf tissue compared to the petiole, while the levels of Ni, Pb and Cr were higher in the petiole than in the leaf tissue. In any case, there were no symptoms of toxicity in the plants and no risk of contamination of the soil with the different types of fertilization carried out.*

Key words: *Ricinus communis L., Oilseeds, Biosolids, Heavy metals.*

Metais pesados no solo e em mamoneira adubada com lodo de esgoto submetido a diferentes processos de estabilização

RESUMO: *O objetivo deste trabalho foi avaliar os teores de metais pesados no solo e na planta de mamoneira em resposta à adubação com lodo de esgoto (LE) submetido a diferentes processos de estabilização. O experimento foi desenvolvido em Cambissolo Háplico com os tratamentos: testemunha, adubação com LE solarizado, LE compostado, LE vermicompostado, LE calcado e adubação química. O delineamento experimental foi em esquema de parcelas subdivididas, sendo as adubações o fator primário e as camadas do solo ou as partes da folha o fator secundário. Os dados obtidos foram submetidos à análise de variância e teste de Scott-Knott à 5% de probabilidade. No solo, as adubações com LE solarizado, compostado e calcado promoveram os maiores incrementos dos teores de Zn, principalmente na camada superficial. No tecido foliar, os teores de Zn e Cu foram mais elevados na testemunha e no LE solarizado, enquanto o Ni, foi mais elevado nos LE solarizado, compostado, vermicompostado e na adubação química. De modo geral, os maiores teores de Zn e Cu ocorreram no limbo foliar em comparação ao pecíolo, enquanto os teores de Ni, Pb e Cr foram mais elevados no pecíolo do que no limbo foliar. De todo modo, não foram constatados sintomas de toxidez nas plantas e nenhum risco de contaminação do solo com os diferentes tipos de adubações realizados.*

Palavras Chave: *Ricinus communis L., Oleaginosas, Biossólido, Metais pesados.*

INTRODUÇÃO

O aumento progressivo da população mundial e o crescente processo de urbanização têm gerado uma produção cada vez maior de lodo de esgoto, bem como o aumento dos problemas relacionados à sua disposição (FEIZI et al., 2019). Embora existam várias alternativas para a sua disposição, o uso agrícola do lodo de esgoto tem se mostrado uma prática bastante vantajosa tanto do ponto de vista econômico quanto ecológico (LU et al., 2012). Isso ocorre em razão deste resíduo conter nutrientes e matéria orgânica, o que pode melhorar a produtividade dos solos agrícolas (PREDA et al., 2017).

Apesar dos benefícios de sua utilização agrícola, conforme já mencionado, os metais pesados em concentrações mais altas do que os limites permitidos podem levar à contaminação da cadeia alimentar

e trazer consequências graves as plantas e animais (SHARMA et al., 2017). Os riscos associados ao aumento de metais pesados no ambiente com a aplicação de lodo de esgoto ocorrem em razão das concentrações desses elementos no resíduo serem bem maiores do que as naturalmente encontradas em solos, razão pela qual há necessidade de avaliação dos seus teores (NASCIMENTO et al., 2004; MELO et al., 2018).

Neste contexto, estudos vêm demonstrando que a aplicação de lodo de esgoto aumenta os teores de alguns metais pesados no solo e em plantas, com destaque para o Cu e Zn (BRAMRYD, 2013; LATARE et al., 2014; NASCIMENTO et al., 2015; MOTA et al., 2018; FEIZI et al., 2019), sendo necessário o uso de processos de estabilização, para fins de tornar o seu uso agrícola mais seguro, uma vez que diminui a presença de contaminantes biológicos, poluentes orgânicos persistentes e reduz a solubilização de metais pesados (NASCIMENTO et al., 2014; ZUBA JUNIO et al., 2019).

A mamoneira (*Ricinus communis* L.) é uma cultura com boa produção de biomassa e com potencial para a fitorremediação de metais pesados em solos contaminados (AZIERA; MAJID, 2015; BAUDDH et al., 2015; YASHIM et al., 2016; SU et al., 2018). A espécie possui múltiplos propósitos, como: agrícola, energético, ambiental e industrial (KIRAN; PRASAD, 2017), sendo que, pelas suas características fitotécnicas, a legislação brasileira permite que possa receber adubação com lodo de esgoto (CONAMA, 2020).

Alguns estudos relatam os efeitos da adubação com lodo de esgoto sobre os teores de metais pesados no solo e em mamoneira, porém, somente relacionados às doses aplicadas deste resíduo (CHIARADIA et al., 2009; CAVALCANTI et al., 2015; NASCIMENTO et al., 2015). Entretanto, há necessidade de estudos relacionados aos processos de estabilização do lodo de esgoto e de sua influência na disponibilidade de metais pesados no solo e na mamoneira.

Diante do exposto, objetivou-se com este trabalho avaliar os teores de metais pesados no solo e em mamoneira adubada com lodo de esgoto estabilizado por diferentes processos.

MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi realizado no período de abril a dezembro de 2010, no Instituto de Ciências Agrárias (ICA) da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), localizado em Montes Claros – MG, latitude 16°40'57,6"S, longitude 43°50'19,6"W e altitude de 630 m, em cambissolo háplico, com os atributos químicos e físicos apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - Atributos químicos do Cambissolo Háplico.

Profundidade	Zn	Cu	Ni	Cd	Pb	Cr
--- cm ---	----- mg kg ⁻¹ -----					
0-20	22,90	6,10	nq	nq	10,10	nq
20-40	2,20	1,30	nq	nq	11,80	nq

Método da solução extratora de Mehlich modificado (TEDESCO et al., 1995); nq = Não quantificados.

O delineamento experimental foi em blocos casualizados, com quatro repetições, em esquema de parcelas subdivididas, sendo as adubações o fator primário e, as profundidades ou as partes das folhas, o fator secundário. Para a produtividade e o teor de Cr na planta, o qual foi detectado apenas no

pecíolo, os tratamentos foram apenas as adubações. Foram utilizados seis tratamentos principais, que consistiram em: adubação química (40 kg ha⁻¹ de N, 45 dias após emergência; 90 kg ha⁻¹ P₂O₅ e 30 kg ha⁻¹ K₂O no plantio), cujas doses seguiram as recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais (RIBEIRO; GUIMARÃES; ALVAREZ, 1999), utilizando-se como fonte de N, P e K, respectivamente, ureia, superfosfato simples e cloreto de potássio; quatro tratamentos com lodo de esgoto estabilizado de diferentes formas, aplicados com base nos teores de N disponível (Tabela 2), calculados conforme descrito na Resolução CONAMA 498 (BRASIL, 2020), assim definidos: solarizado (4,09 t ha⁻¹), compostado (24,84 t ha⁻¹), vermicompostado (12,78 t ha⁻¹) e caleado (33,61 t ha⁻¹); e um tratamento sem adubação (testemunha).

A cultivar de mamoneira (*Ricinus communis* L.) utilizada foi a BRS Energia, a qual apresenta porte em torno de 1,40 m, ciclo entre 120 e 150 dias, caule verde com cera, cachos cônicos com tamanho médio de 60 cm, frutos verdes com cera e indeiscentes, sementes contendo em média 48% de óleo e colheita única. O ambiente de cultivo deve ter altitude superior a 300 m em relação ao nível do mar e temperatura média anual entre 20 e 30 °C, com ótimo em torno de 23 °C. A precipitação pluvial anual deve ser de pelo menos 500 mm, com ótimo entre 650 a 800 mm (GONÇALVES et al., 2005).

A área utilizada possui altitude de 647 m em relação ao nível do mar e apresentou, no período de cultivo, temperaturas máximas médias variando de 28,85 a 33,16 °C, temperaturas mínimas médias variando de 13,21 a 20,51 °C e precipitação pluviométrica total de 390,8 mm (Figura 1).

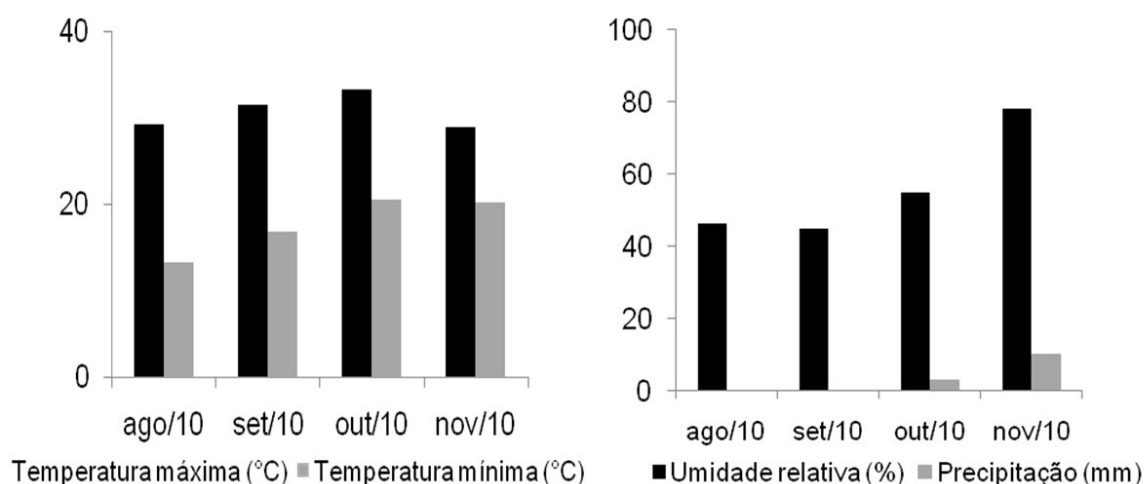


Figura 1 - Valores de precipitação total (mm), umidade relativa do ar média (%), temperatura máxima, temperatura mínima e temperatura média no período de agosto a novembro de 2010.

O lodo de esgoto solarizado foi coletado na Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) do município de Juramento – MG. A ETE possui linha de tratamento composta de tratamento preliminar, reator anaeróbico UASB interligado em série a uma lagoa de pós tratamento do tipo facultativa e tratamento de esgoto por meio do processo de solarização em leito de secagem por período de três meses. Para a compostagem misturou-se o lodo de esgoto solarizado à poda de grama batatais (*Paspalum notatum*) para se obter uma relação C:N de 30:1. Foram monitoradas a temperatura e a umidade e, efetuaram-se revolvimentos sistemáticos das pilhas do composto.

Para a obtenção do vermicomposto fez-se um pré-composto de lodo de esgoto misturado com poda de grama, utilizado após a fase termofílica, aproximadamente um mês do início do processo de

decomposição, como substrato para a vermicompostagem com minhocas da espécie Vermelha da Califórnia (*Eisenia foetida*). O lodo de esgoto caledo foi obtido pela adição de cal virgem em quantidade correspondente a 50% da massa seca de lodo. Após a mistura, a umidade foi elevada a 70%.

As adubações referentes aos tratamentos com lodo de esgoto foram realizadas uma única vez, no sulco de plantio, com incorporação no solo até 20 cm de profundidade. As parcelas experimentais foram constituídas por 4 linhas de 3 m de comprimento, espaçadas em 1 m, sendo a parcela útil as duas linhas centrais, desprezando-se 0,5 m de cada extremidade. O plantio foi realizado em sulcos, colocando-se três sementes em cada local de semeio, a uma distância de 0,5 m entre plantas. Quinze dias após a emergência, fez-se o desbaste, deixando-se apenas uma planta. Realizou-se capina manual e irrigação por aspersão.

No início do florescimento da cultura, aproximadamente 45 dias após a emergência das plântulas, coletou-se a 4ª folha a partir do ápice da planta, para análise dos teores de Zn, Cu, Pb, Cr, Cd e Ni (TEDESCO et al., 1995; MALAVOLTA et al., 1997). Após a colheita, aos 150 dias do plantio, coletou-se entre plantas, na linha, nas profundidades de 0-20 e 20-40 cm, oito subamostras de solo por parcela, para formarem amostras compostas para análises dos teores disponíveis de Zn, Cu, Pb, Cr, Cd e Ni, utilizando-se o extrator Mehlich-1 ($\text{HCl } 0,05 \text{ mol L}^{-1} + \text{H}_2\text{SO}_4 \text{ } 0,0125 \text{ mol L}^{-1}$) (TEDESCO et al., 1995). Para identificação e quantificação dos metais utilizou-se espectrofotômetro de absorção atômica da marca Varian, com os seguintes limites de quantificação: Zn = $0,075 \text{ mg L}^{-1}$, Cu = $0,1 \text{ mg L}^{-1}$, Pb = $0,5 \text{ mg L}^{-1}$, Cr = $0,625 \text{ mg L}^{-1}$, Cd = $0,3 \text{ mg L}^{-1}$ e Ni = $0,5 \text{ mg L}^{-1}$.

Os dados dos teores de metais pesados no solo e na planta foram submetidos à análise de variância e as médias dos tratamentos comparadas até 5% de probabilidade pelo teste Scott-Knott.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os metais Cd, Cr e Ni foram detectados no lodo de esgoto e nos adubos químicos (Tabela 2), entretanto, os seus teores no solo ficaram abaixo dos níveis de quantificação pelo método analítico utilizado (Tabela 3). Por outro lado, os teores de Zn e Cu atingiram valores menores do que os existentes no solo antes da adubação (Tabela 1), enquanto os teores de Pb permaneceram praticamente inalterados. Para o Zn e o Cu podem ter ocorrido maiores perdas por lixiviação e absorção pelas plantas, bem como, mudanças para formas não disponíveis.

O aumento pouco acentuado dos metais pesados no solo com a aplicação de lodo de esgoto (Tabela 3) se deu em função dos baixos teores desses elementos no resíduo (Tabela 2), encontrando-se todos em níveis abaixo da concentração máxima permitida (CMP) no lodo de esgoto Classe 1 ou produto derivado estabelecido pela Resolução CONAMA nº 498 (BRASIL, 2020).

Tabela 2 - Características químicas do lodo de esgoto solarizado (LS), compostado (LCO), vermicompostado (LV) e caleado (LCA), e do fertilizante mineral.

Fertilizante	N _{disp}	Zn	Cu	Ni	Cd	Pb	Cr
	Concentração						
	kg t ⁻¹	----- mg kg ⁻¹ -----					
LS	9,78	526,00	80,00	46,49	1,21	92,68	700,00
LCO	1,61	403,00	63,00	46,49	1,40	117,07	900,00
LV	3,13	374,00	71,00	43,00	1,21	119,51	850,00
LCA	1,19	454,00	71,00	31,27	2,51	285,37	825,00
SS	nd	142,00	16,20	62,00	6,20	116,00	333,00
Ureia	450	2,50	1,62	Nd	0,70	8,00	Nd
KCl	Nd	2,50	4,62	15,00	2,40	83,00	Nd
CMP	-	2.800	1.500	420	39	300	1.000

Fertilizante	Quantidade aplicada						
	t ha ⁻¹	----- g ha ⁻¹ -----					
	LS	4,09	2.151,34	327,2	190,144	4,95	379,06
LCO	24,84	10.010,50	1.564,92	1.154,81	34,78	2.908,02	22.356,00
LV	12,78	4.779,72	907,38	549.540	15,46	1.527,34	10.863,00
LCA	33,61	15.258,94	2.386,31	1.050,99	84,36	9.591,29	27.728,25
SS	0,09	12,78	1,46	5,60	0,56	10,44	29,97
Ureia	0,04	0,1	0,065	0,00	0,028	0,32	0,00
KCl	0,03	0,075	0,139	0,45	0,072	2,49	0,00

N_{disp} = Nitrogênio disponível de acordo com a resolução CONAMA nº 498 de 2020 (BRASIL, 2020); Nd = Não detectado; SS = Superfosfato simples; CMP = Concentração máxima permitida no lodo de esgoto Classe 1 ou produto derivado em mg kg⁻¹ (BRASIL, 2020). As análises dos metais pesados no lodo de esgoto foram realizadas conforme metodologias de Tedesco *et al.* (1995), enquanto nos fertilizantes mineral foram de acordo com as metodologias de Alcarde (2009).

Tabela 3 - Teores de metais no solo em resposta à aplicação de fertilizante mineral e lodo de esgoto estabilizado de diferentes formas.

Metal	Pr	TE	LES	LCO	LV	LCA	AQ	Média
	-- cm --	----- mg dm ⁻³ -----						
Zn	0-20	1,50	7,62	8,95	4,92	10,55	4,45	6,33 A
	20-40	0,63	1,42	2,30	0,95	2,58	1,05	1,49 B
	Média	1,07 b	4,52 a	5,63 a	2,94 b	6,56 a	2,75 b	-
Cu	0-20	1,00	1,50	1,60	1,30	2,00	1,20	1,43 A
	20-40	0,60	0,83	0,95	0,60	0,98	0,63	0,77 B
	Média	0,80 a	1,17 a	1,28 a	0,95 a	1,49 a	0,92 a	-
Pb	0-20	10,37	9,23	10,70	12,45	11,83	11,57	11,02 A
	20-40	8,93	12,88	12,00	11,60	12,45	9,65	11,25 A
	Média	9,65 a	11,06 a	11,35 a	12,03 a	12,14 a	10,61 a	-

Pr = Profundidade; TE = Testemunha; LES = Lodo de esgoto solarizado; LCO = Lodo de esgoto compostado; LV = Lodo de esgoto vermicompostado; LCA = Lodo de esgoto caleado; AQ = Adubação química; Para cada variável, médias seguidas de mesma letra minúscula na linha e maiúscula na coluna, não diferem estatisticamente entre si, a 5% de probabilidade, pelo teste de Scott-Knott.

A aplicação de lodo de esgoto influenciou os teores de Zn no solo principalmente na camada superficial, de 0-20 cm (Tabela 3), sendo que os tratamentos com lodo de esgoto solarizado, compostado e caleado apresentaram teores mais elevados de Zn do que os observados nos demais

tratamentos. Com base na tabela 2, observa-se que o lodo de esgoto compostado e o lodo de esgoto caleado foram os adubos que promoveram os maiores aportes de Zn ao solo, o que pode justificar os teores disponíveis mais elevados nos solos desses tratamentos. Todavia, no caso do lodo de esgoto caleado, com pH do solo de 7,6, a disponibilidade de Zn pode estar superestimada, uma vez que o extrator utilizado foi de natureza ácida e pode ter solubilizado as formas ligadas a hidróxidos e carbonatos (NACHTIGALL et al., 2009; OLIVEIRA et al., 2018). Para os demais tratamentos, os valores de pH do solo variaram de 5,8 a 6,0, ou seja, numa faixa muito estreita e de maior disponibilidade desse elemento para as plantas, podendo-se atribuir as diferenças as quantidades aportadas e aos efeitos de complexação do metal pela matéria orgânica.

Em relação ao lodo de esgoto solarizado, o aporte de Zn foi baixo quando comparado aos outros tratamentos com lodo de esgoto (Tabela 2), estando a maior disponibilidade possivelmente associada a uma taxa de mineralização mais alta. Para lodos de esgotos digeridos anaerobiamente e incorporados ao solo em condições de campo, com umidade e temperatura favoráveis (Figura 1), pesquisas apontam para taxas de mineralização superiores a 90% (MATOS et al., 2017; SILVA et al., 2019).

Apesar do lodo de esgoto e dos adubos minerais conterem Cu e Pb em sua composição (Tabela 2), os teores desses elementos no solo não foram influenciados pelos tratamentos (Tabela 3). Entretanto, os teores de Cu foram elevados na camada superficial, 0-20 cm, e os teores de Pb estiveram distribuídos igualmente entre as duas camadas avaliadas.

Diversos estudos ressaltam os riscos de contaminação com metais pesados provenientes da utilização agrícola de lodo de esgoto (NASCIMENTO et al., 2015; SHARMA et al., 2017; EID et al., 2018; MOTA et al., 2018; FEIZI et al., 2019; ZUBA JUNIO et al., 2019). Contudo, o grau de contaminação depende da composição do lodo de esgoto, da taxa de aplicação deste resíduo, das características do solo onde será aplicado, das espécies de culturas implantadas e da forma de manejo utilizado (LATARE et al., 2014). Neste estudo, portanto, ficou evidente que a adição de lodo de esgoto no solo promoveu baixo incremento de metais pesados disponíveis no solo, semelhante ao observado na adubação mineral. Este fato evidencia o baixo impacto ambiental do uso do lodo estabilizado como fertilizante orgânico na cultura da mamoneira, gerando economia no uso de fertilizantes mineral.

Em relação aos teores de metais pesados na planta, observou-se efeito dos tratamentos apenas para o Zn, Cu e Ni no tecido foliar (Tabela 4). Neste caso, os teores de Zn e Cu foram mais elevados na testemunha e no LE solarizado, enquanto o Ni foi via de regra mais elevado nas adubações (Tabela 4). De modo geral, os maiores teores de Zn e Cu ocorreram no limbo foliar em comparação ao pecíolo, enquanto os teores de Ni, Pb e Cr foram mais elevados no pecíolo do que no limbo foliar.

Constatou-se que, mesmo havendo um aporte razoável de metais pesados com a aplicação de lodo de esgoto, não houve aumento suficiente dos seus teores disponíveis a ponto de causar elevados teores na planta. Os menores teores de Zn e Cu observados no limbo foliar com a realização das adubações com lodo de esgoto e adubação mineral podem estar relacionados às maiores produtividades da planta nesses tratamentos, que foram de $1,94 \text{ t ha}^{-1}$ na testemunha e de $2,82 \text{ t ha}^{-1}$ na média das adubações, promovendo o efeito diluição desses elementos. A única exceção foi para o lodo de esgoto solarizado, o qual apresentou produção semelhante à dos outros tratamentos com adubação, porém, com teores mais elevados desses elementos no limbo foliar. Assim, apesar do efeito diluição, as disponibilidades desses elementos foram mais elevadas nesse tipo de lodo, em razão da matéria

orgânica ser pouco humificada e estar sujeita a uma taxa de mineralização mais elevada, apresentando os elementos em formas mais solúveis, como a ligada aos ácidos fúlvicos (KANG et al., 2011; INGELMO et al., 2012).

Tabela 4 - Teores de metais pesados no limbo foliar (LF) e no pecíolo (PE) da mamoneira em resposta à aplicação de fertilizante mineral e lodo de esgoto estabilizado de diferentes formas.

Metal	Parte da planta	TE	LS	LCO	LV	LCA	AQ	Média
		mg kg ⁻¹						
Zn	LF	54,80 Aa	50,55 Aa	40,80 Ab	38,05 Ab	31,30 Ab	31,80 Ab	-
	PE	47,80 Aa	41,30 Ba	33,55 Ba	26,80 Ba	37,05 Aa	26,05 Aa	-
	Média	-	-	-	-	-	-	-
Cu	LF	5	5,5	4,25	4,5	4,75	4,75	4,79 A
	PE	4	3,5	3	3,25	3,25	2,75	3,29 B
	Média	4,50 a	4,50 a	3,63 b	3,88 b	4,00 b	3,75 b	-
Pb	LF	25,19	23,69	21,34	22,01	18,22	15,88	21,06 B
	PE	28,15	26,93	29,98	33,02	32,41	31,8	30,38 A
	Média	26,67 a	25,31 a	25,66 a	27,51 a	25,32 a	23,84 a	-
Ni	LF	6,03	5,95	6,43	6,19	6,19	7,62	6,40 B
	PE	147,68	168,9	168,09	168,09	157,02	160,27	121,68 A
	Média	76,86 b	87,02 a	87,26 a	87,14 a	81,61 b	83,95 a	-
Cd	LF	0,65	0,46	0,83	0,63	0,89	0,8	0,71 A
	PE	0,65	0,37	0,6	0,53	0,6	0,53	0,55 A
	Média	0,65 a	0,42 a	0,72 a	0,58 a	0,75 a	0,67 a	-
Cr	PE	66,70 a	75,00 a	68,80 a	62,50 a	62,50 a	62,50 a	-

TE – Testemunha; LS – Lodo de esgoto solarizado; LCO – Lodo de esgoto compostado; LV – Lodo de esgoto vermicompostado; LCA – Lodo de esgoto caçado; AQ – Adubação Mineral. Para cada variável, médias seguidas de mesma letra minúscula na linha e maiúscula na coluna, não diferem estatisticamente entre si, a 5% de probabilidade, pelo teste Scott-Knott.

Do ponto de vista nutricional, os teores de Cu e de Zn presentes no limbo foliar estiveram em geral dentro ou próximo dos intervalos considerados adequados, de 4 a 10 mg kg⁻¹ e de 15 a 40 mg kg⁻¹, respectivamente, conforme recomendações de Oliveira (2004). Neste caso, as extrapolações dos limites máximos verificadas para o Zn ocorreram até mesmo no tratamento sem adubação. Marques et al. (2014) ressaltam a tolerância da mamoneira a toxicidade de Cu e Zn sem decréscimo na produtividade da planta. Além disso, a mamoneira foi classificada como uma planta tolerante à doses elevadas desses elementos e como planta acumuladora de Zn, podendo ser uma alternativa importante para a fitoestabilização de áreas contaminadas e com adicional vantagem para a produção de bionergia.

O Ni não foi detectado no solo pelo método de análise empregado, no entanto, constatou-se a presença desse elemento no tecido foliar de mamoneira (Tabela 4). Os teores de Ni foram mais elevados nos tratamentos com lodos solarizado, compostado, vermicompostado e adubação química. Além disso, foi muito mais concentrado no pecíolo do que no limbo foliar. Neste caso, os valores no limbo foliar situaram-se dentro do intervalo de 0,01 e 10 mg kg⁻¹ de matéria seca da planta, o qual é considerado como o adequado do ponto de vista nutricional para as plantas. Por outro lado, os teores no pecíolo variaram de 147 a 168 mg kg⁻¹, o que indica que essa espécie possui mecanismos químicos eficientes

nesta parte da planta, impedindo a movimentação e a concentração excessiva do nutriente no limbo foliar (BROADLEY et al., 2012).

Os teores de Cd e Cr também não foram detectados no solo pelos métodos de análises empregados. No entanto, constatou-se distribuição igual dos teores de Cd entre o pecíolo e limbo foliar, e concentração de Cr apenas no pecíolo da mamoneira (Tabela 4). Por outro lado, o Pb foi quantificado tanto no solo quanto no pecíolo e no limbo foliar de mamoneira. Todavia, os teores deste elemento foram mais elevados no pecíolo da mamoneira.

Convém destacar que os teores de Cd no pecíolo e no limbo foliar da mamoneira ficaram abaixo do nível crítico de toxidez, que é de 5 mg kg^{-1} de matéria seca, enquanto os teores de Pb ficaram acima de 16 mg kg^{-1} , que é o limite a partir do qual os teores são considerados excessivos em plantas. No caso do Cr, os teores ficaram muito acima de 1 mg kg^{-1} , considerado o limite de fitotoxicidade para diferentes espécies vegetais (ZEITOUNI et al., 2007; KABATIA-PENDIAS, 2011).

Apesar dos teores em níveis fitotóxicos do Ni, Pb e Cr, independente da parte anatômica da planta, nenhum sintoma de toxidez foi observado, o que corrobora fortemente a classificação da mamoneira como espécie tolerante e acumuladora de metais pesados, podendo ser cultivada em áreas contaminadas para fins de fitorremediação desses elementos, com a vantagem de que as suas sementes podem ser aproveitadas para a produção de biocombustível (AZIERA; MAJID, 2015; IRSHAD et al., 2015; ALVES et al., 2016; SU et al., 2018).

Convém destacar que o teor médio de Pb foi cerca de 2 vezes mais concentrado no pecíolo do que no limbo foliar, enquanto o teor médio de Ni foi cerca de 19 vezes mais concentrado no pecíolo. No caso do Cr, sequer houve detecção no limbo foliar, ficando esse elemento, concentrado apenas no pecíolo. Estes fatos podem ser atribuídos à ação da transpiração ativa, promovendo a mobilização desses elementos via xilema até a parte aérea, havendo ao longo do transporte, a troca iônica e adsorção, com distribuição cromatográfica de metais em direção ao limbo foliar e ao topo das plantas. Todavia, pode ser considerada também a possibilidade de formação de complexos estáveis desses elementos por ácidos orgânicos no pecíolo (ADHIKARI; KUMAR, 2012; BROADLEY et al., 2012).

Em relação aos elementos com maior concentração no limbo foliar em relação ao pecíolo, essa maior mobilidade pode ser atribuída à formação de ligações com compostos orgânicos de baixo peso molecular presentes no fluido xilemático (BROADLEY et al., 2012; BURSZTYN F. et al., 2018).

Pelo exposto, o lodo de esgoto constitui um resíduo orgânico que pode ser utilizado como fertilizante de menor custo e de baixo impacto ambiental. No presente estudo não foram encontrados metais pesados disponíveis em níveis elevados ou acima do limite permitido que ofereça risco à produção sustentável do cultivo da mamoneira.

CONCLUSÕES

As adubações com lodos de esgotos solarizado, compostado e caleado promovem aumentos dos teores disponíveis de Zn no solo superiores as adubações com lodo de esgoto vermicompostado, adubação química e testemunha.

Independente das adubações ou da testemunha, os teores de Zn e Cu disponíveis no solo são mais elevados na camada superficial (0-20 cm) do que na camada subsuperficial (20-40 cm).

Os teores de Pb disponíveis no solo não são influenciados pela testemunha e adubações, e pela profundidade do solo.

A adubação com lodo de esgoto solarizado e a testemunha promovem aumentos dos teores de Zn e Cu no tecido foliar superiores as adubações com lodos de esgotos compostado, vermicompostado, calcado e adubação química.

As adubações com lodos de esgotos solarizado, compostado, vermicompostado e mineral promovem aumentos dos teores de Ni no tecido foliar superiores a adubação com lodo de esgoto calcado e testemunha.

De modo geral, os maiores teores de Zn e Cu ocorrem no limbo foliar em comparação ao pecíolo, enquanto os teores de Ni, Pb e Cr são mais elevados no pecíolo do que no limbo foliar, e o Cd apresenta a mesma concentração nas duas partes anatômicas da planta.

A mamoneira demonstra ser uma espécie tolerante e acumuladora dos metais Ni, Cr e Pb no pecíolo, sem apresentar sintomas de toxidez.

A adubação com lodo de esgoto estabilizado de diferentes formas não oferece risco de contaminação do solo e da mamoneira com metais pesados.

REFERÊNCIAS

- ADHIKARI, T.; KUMAR, A. Phytoaccumulation and tolerance of *Ricinus communis* L. to nickel. **International Journal of Phytoremediation**, v.14, n.5, p.481-492, 2012. Available from: <<https://doi.org/10.1080/15226514.2011.604688>> Accessed: Mar. 18, 2020 doi: 10.1080/15226514.2011.604688
- ADRIANO, D. C. **Trace elements in the terrestrial environment**. New York: Springer-Verlag, 1986.
- ALCARDE, J. C. **Manual de análise de fertilizantes**. 3ª ed. Piracicaba: FEALQ. 2009.
- ALVES, J. C. et al. Potential of sunflower, castor bean, common buckwheat and vetiver as lead phytoaccumulators. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e ambiental**, v.20, n.3, p.243-249, 2016. Available from < <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v20n3p243-249>> Accessed: Mai. 23, 2020. doi:10.1590/1807-1929/agriambi.v20n3p243-249
- AZIERA, Z. N.; MAJID N. M. Uptake and translocation of zinc and cadmium by *Ricinus communis* planted in sewage sludge contaminated soil. UKM J, Publisher Penerbit Univeriti Kebangsaan, Malaysia. **Malaysian Applied Biology**, v.44, n.1, p.51-56, 2015. Available from < http://www.mabjournal.com/index.php?option=com_content&view=article&id=505&catid=59:current-view&Itemid=56> Accessed: Mai 23, 2020.
- BAUDDH K.; SINGH R. P. Assessment of metal uptake capacity of castor bean and mustard for phytoremediation of nickel from contaminated soil. **Bioremediation Journal**, v.19, n.2, p.124-138, 2015. Available from < <https://doi.org/10.1080/10889868.2014.979277>> Accessed: Mai 23, 2020. doi:10.1080/10889868.2014.979277
- BRAMRYD, T. Long-term effects of sewage sludge application on the heavy metal concentrations in acid pine (*Pinus sylvestris* L.) forests in a climatic gradient in Sweden. **Forest Ecology and Management**, v. 289, n.1, p.434-444, 2013. Available from < <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2012.08.045>> Accessed: Mai 25, 2020. doi:10.1016/j.foreco.2012.08.045
- BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA. **Resolução N° 498, de 19 de ago. 2020**. Define critérios e procedimentos para produção e aplicação de biossólido em solos, e dá outras providências. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 19 de ago. 2020. Edição: 160. Seção 1. p.91, 2020. Available from < <https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/resolucao-n-498-de-19-de-agosto-de-2020-273467970>> Accessed: Mar. 14, 2020.
- BROADLEY, M. et al. Function of nutrients: micronutrients. In: Marschner, H. (Ed.), **Mineral nutrition of higher plants**. London: Elsevier, pp.191-243, 2012.
- BURSZTYN F. et al. Phytoextraction of heavy metals from a multiply contaminated dredged sediment by chicory (*Cichorium intybus* L.) and castor bean (*Ricinus communis* L.) enhanced with EDTA, NTA, and citric acid application. **International Journal of Phytoremediation**, v.20, n.13, p.1354-1361, 2018. Available from <<https://doi.org/10.1080/15226514.2018.1524826>> Accessed: Mai. 19, 2020. doi:10.1080/15226514.2018.1524826
- CAVALCANTI, T. F. M. et al. Produção de mamoneira adubada com lodo de esgoto e sulfato duplo de potássio e magnésio. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.19, n.8, p.773-779, 2015. Available from < <http://dx.doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v19n8p773-779>> Accessed: Feb. 16, 2020. doi: 10.1590/1807-1929/agriambi.v19n8p773-779

CHAVES, L. H. G. et al. Acúmulo e distribuição de cobre e zinco em mamoneira cultivar BRS Paraguaçu e crescimento da planta. **Engenharia Ambiental**, v.7, n.3, p.263-277, 2010. Available from < <http://ferramentas.unipinhal.edu.br/engenhariaambiental/viewissue.php?id=16>> Accessed: Feb. 16, 2020.

CHIARADIA, J. J. et al. Produtividade e nutrição de mamona cultivada em área de reforma de canal tratado com lodo de esgoto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.33, n.3, p.701-709, 2009. Available from < <https://doi.org/10.1590/S0100-0683200900300022>> Accessed: Feb. 17, 2020. doi:10.1590/S0100-0683200900300022

EID, E. M. et al. Evaluation of the potential of sewage sludge as a valuable fertilizer for wheat (*Triticum aestivum* L.) crops. **Environmental Science and Pollution Research**, v.26, p.392-401, 2018. Available from < <https://doi.org/10.1007/s11356-018-3617-3>> Accessed: Mar. 14, 2020. doi:10.1007/s11356-018-3617-3

FEIZI, M. et al. Assessment of nutrient and heavy metal content and speciation in sewage sludge from different locations in Iran. **Natural Hazards**, v.95, n.3, p.657-675, 2019. Available from < <https://doi.org/10.1007/s11069-018-3513-7>> Accessed: Mar. 14, 2020. doi:10.1007/s11069-018-3513-7

GONÇALVES, N. P. et al. Cultura da mamona. **Informe Agropecuário**, v.26, n.229, p.28-32, 2005.

INGELMO, F. et al. Influence of organic matter transformations on the bioavailability of heavy metals in a sludge based compost. **Journal of Environmental Management**, v.95, p.104-109, 2012. Available from < <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2011.04.015>> Accessed: Mar. 14, 2020. doi: 10.1016/j.jenvman.2011.04.015

IRSHAD, M. et al. Phytoaccumulation of heavy metals in natural plants thriving on wastewater effluente at Hattar industrial estate, Pakistan. **International Journal of Phytoremediation**, v.17, p.154-158, 2015. Available from < <https://doi.org/10.1080/15226514.2013.862208>> Accessed: Mar. 14, 2020. doi: 10.1080/15226514.2013.862208

KANG, J. et al. Influence of humic substances on bioavailability of Cu and Zn during sewage sludge composting. **Bioresource Technology**, v.102, n.17, p.8022-8026, 2011. Available from < <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.06.060>> Accessed: Mai. 19, 2020. doi:10.1016/j.biortech.2011.06.060

KABATA-PENDIAS, A. **Trace elements in soils and plants**. 4.ed. Boca Raton: CRC Press/Taylor & Francis Group, 2011.

KIRAN B. R.; PRASAD M. N. V. *Ricinus communis* L. (Castor bean), a potential multi-purpose environmental crop for improved and integrated phytoremediation. **The EuroBiotech Journal**, v.1, n.2, p.1-16, 2017. Available from <https://www.researchgate.net/publication/317059098_Ricinus_communis_L_Castor_bean_a_potential_multi-purpose_environmental_crop_for_improved_and_integrated_phytoremediation> Accessed: Mai. 19, 2020. doi: 10.24190/ISSN2564-615X/2017/02.01

LATARE, A. M. et al. Direct and residual effect of sewage sludge on yield, heavy metals content and soil fertility under rice–wheat system. **Ecological Engineering**, v.69, p.17-24, 2014. Available from <<https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2014.03.066>> Accessed: Mai. 19, 2020. doi:10.1016/j.ecoleng.2014.03.066

LU, Q. et al. Land application of biosolids in the USA: a review. **Applied and Environmental Soil Science**, 2012. Available from < <https://doi.org/10.1155/2012/201462>> Accessed: Feb. 19, 2020. doi:10.1155/2012/201462

MALAVOLTA, E. et al. **Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações**. 2. ed., Piracicaba: POTAFOS, 1997.

MARQUES, M. C.; NASCIMENTO, C. W. A. Tolerância de mamona a zinco avaliada por fluorescência de clorofila e nutrição das plantas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.38, n.3, p.850-857, 2014. Available from < <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832014000300016>> Accessed: Feb. 19, 2020. doi:10.1590/S0100-06832014000300016

MATOS, A. T. et al. Degradation rate of anaerobically digested sewage sludge in soil. **Journal of Water, Sanitation and Hygiene for Development**, v.8, n.1, p.17-26, 2017. Available from < <https://doi.org/10.2166/washdev.2017.138>> Accessed: Mar. 19, 2020. doi:10.2166/washdev.2017.138

MELO, W. et al. Ten years of application of sewage sludge on tropical soil. A balance sheet on agricultural crops and environmental quality. **Science of the Total Environment**, v.64, p.1493-1501, 2018. Available from < <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.06.254>> Accessed: Mar. 06, 2020. doi:10.1016/j.scitotenv.2018.06.254

MOTA, M. F. C. et al. Contamination of soil and pineapple fruits under fertilization with sewage sludge. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.22, n.5, p.320-325, 2018.

NACHTIGALL, G. R. et al. Extração sequencial de Mn e Zn em solos em função do pH e adição de cama-de-frango. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.13, n.3, p.240-249, 2009. Available from < <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v22n5p320-325>> Accessed: Mar. 06, 2020. doi:10.1590/1807-1929/agriambi.v22n5p320-325

NASCIMENTO, C. W. A. et al. Alterações químicas em solos e crescimento de milho e feijoeiro após aplicação de lodo de esgoto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.28, 2004. Available from < <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832004000200017>> Accessed: Jun. 06, 2020. doi:10.1590/S0100-06832004000200017

NASCIMENTO, A. L. et al. Atributos químicos do solo adubado com lodo de esgoto estabilizado por diferentes processos e cultivado com girassol. **Bioscience Journal**, v.30, p.146-153, 2014. Available from < <http://www.seer.ufu.br/index.php/biosciencejournal/article/view/15142>> Accessed: Mar. 06, 2020.

- NASCIMENTO, A. L. et al. Metais pesados no solo e mamoneira adubada com bio sólido e silicato de cálcio e magnésio. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.19, n.5, p.505-511, 2015. Available from < <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v19n5p505-511>> Accessed: Jun. 26, 2020. doi:10.1590/1807-1929/agriambi.v19n5p505-511
- OLIVEIRA, E. S. A. de et al. Copper and zinc fractionation in biosolid cultivated with *Pennisetum purpureum* in different periods. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.22, n.1, p.3-9, 2018. Available from < <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v22n1p3-9>> Accessed: Jun. 26, 2020. doi:10.1590/1807-1929/agriambi.v22n1p3-9
- OLIVEIRA, S. A. de. **Análise foliar**. In: SOUSA, D. M. G. de; LOBATO, E. (Eds). Cerrado: Correção do solo e adubação. 2.ed. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, pp.245-256, 2004.
- PREDA, M. et al. Levels of persistent organochlorine compounds in sewage sludge from wastewater treatment plants. **AgroLife Scientific Journal**, v.6, n.2, p.161-166, 2017. Available from < http://agrolifejournal.usamv.ro/pdf/vol.VI_2/Art23.pdf> Accessed: Jun. 26, 2020.
- RIBEIRO, A. C. et al. **Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais: 5ª Aproximação**. Viçosa: Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais. 1999.
- SHARMA, B. et al. Agricultural utilization of biosolids: a review on potential effects on soil and plant grown. **Waste Management**, v.64, p.117-132, 2017. Available from < <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.03.002>> Accessed: Jun. 26, 2020. doi:10.1016/j.wasman.2017.03.002
- SILVA, D. A. P. da et al. Mineralization of organic matter and productivity of tifton 85 grass (*Cynodon* spp.) in soil incorporated with stabilized sludge from a vertical flow constructed wetland. **Journal of Water, Sanitation and Hygiene for Development**, v.9, n.2, p.309-318, 2019. Available from <<https://doi.org/10.2166/washdev.2019.133>> Accessed: Mar. 26, 2020. doi:10.2166/washdev.2019.133
- SUN, Y. et al. Determination of the phytoremediation efficiency of *Ricinus communis* L. and methane uptake from cadmium and nickel-contaminated soil using spent mushroom substrate. **Environmental Science and Pollution Research**, v.25, n.32, p.32603-32616, 2018. Available from <<https://doi.org/10.1007/s11356-018-3128-2>> Accessed: Jul. 12, 2020. doi:10.1007/s11356-018-3128-2
- TEDESCO, M. J. et al. **Análise de solo, plantas e outros materiais**. 2.ed. Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1995. 147p. Boletim Técnico, 5
- YASHIM, Z. I. et al. Phytoremediation potential of *Ricinus communis* L. (Castor oil plant) in Northern Nigeria. **International Journal of Plant & Soil Science**, v.10, n.5, p.1-8, 2016. Available from <<https://doi.org/10.9734/IJPSS/2016/21680>> Accessed: Jul. 12, 2020. doi: 10.9734/IJPSS/2016/21680
- ZEITOUNI, C. F. et al. Fitoextração de cádmio e zinco de um latossolo vermelho-amarelo contaminado com metais pesados. **Bragantia**, v.66, p.649-657, 2007. Available from < <https://doi.org/10.1590/S0006-87052007000400015>> Accessed: Jul. 12, 2020. doi:10.1590/S0006-87052007000400015
- ZUBA JUNIO, G. R. et al. Attributes of the soil fertilized with sewage sludge and calcium and magnesium silicate. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.19, n.11, p.1107-1113, 2015. Available from < <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v19n11p1107-1113>> Accessed: Jul. 18, 2020. doi:10.1590/1807-1929/agriambi.v19n11p1107-1113
- ZUBA JUNIO, G. R. et al. Content of heavy metals in soil and in pineapple fertilized with sewage sludge. **Journal of Agricultural Science**, v.11, n.9, p.281-292, 2019. Available from < <http://www.ccsenet.org/journal/index.php/jas/article/view/0/39766>> Accessed: Jun. 15, 2020. doi: 10.5539/jas.v11n9p281

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O efeito positivo do uso do lodo de esgoto na agricultura tem sido demonstrado em diversos estudos. No entanto, pesquisas com oleaginosas e fertilizações com composto estabilizado de lodo de esgoto ainda demandam maiores informações, em especial referente ao conhecimento das doses de adubação orgânica do resíduo estabilizado que promova maior eficiência agronômica.

Os estudos demonstraram que os diferentes tipos de lodos de esgoto estabilizados não apresentaram metais pesados em níveis elevados ou acima do limite permitido que ofereça risco à produção sustentável no cultivo da mamoneira. Além disso, a adubação com lodo de esgoto estabilizado se mostrou eficiente tanto quanto a adubação química e superior ao solo não adubado. Diante do exposto, infere-se que o uso deste resíduo como adubo orgânico na produção da mamoneira é uma boa alternativa sob o ponto de vista econômico e ambiental.

Os fertilizantes químicos possuem alto custo, devido à alta demanda de energia para sua produção, o que torna pouco viável a sua aplicação na mamoneira. O uso do lodo de esgoto como adubo orgânico pode reduzir custos na produção de mamona e, ao mesmo tempo, eliminar o contrassenso de utilizar fertilizantes produzidos a partir de energia não renovável para produzir bioenergia.