

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

MARIANA BOCCHI DA SILVA

**EFEITO RESIDUAL DO COMPOSTO DE LODO DE ESGOTO NA CICLAGEM E
NO METABOLISMO DE NITROGÊNIO NA ROTAÇÃO FEIJÃO-*Urochloa*
brizantha-SOJA EM SISTEMA PLANTIO DIRETO NO CERRADO**

Ilha Solteira
2022

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA

(Sistemas de Produção)

MARIANA BOCCHI DA SILVA

**EFEITO RESIDUAL DO COMPOSTO DE LODO DE ESGOTO NA
CICLAGEM E NO METABOLISMO DE NITROGÊNIO NA ROTAÇÃO
FEIJÃO-*Urochloa brizantha*-SOJA EM SISTEMA PLANTIO DIRETO
NO CERRADO**

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – Unesp como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Agronomia. Especialidade: Sistemas de Produção.

Prof. Dr. Thiago Assis Rodrigues Nogueira
Orientador

Profa. Dra. Liliane Santos de Camargos
Coorientadora

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

S586e Silva, Mariana Bocchi da.
Efeito residual do composto de lodo de esgoto na ciclagem e no metabolismo de nitrogênio na rotação feijão-*Urochloa brizantha*-soja em sistema plantio direto no Cerrado / Mariana Bocchi da Silva. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2022
63 f.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Sistemas de Produção, 2022

Orientador: Thiago Assis Rodrigues Nogueira

Coorientadora: Liliane Santos de Camargos

Inclui bibliografia

1. *Glycine max* L. 2. *Phaseolus vulgaris* L. 3. *Urochloa brizantha* cv. Marandu. 4. Fertilizante orgânico. 5. Planta de cobertura. 6. Resíduo urbano.


Raiane da Silva Santos

Supervisora Técnica de Seção
Seção Técnica de Referência, Atendimento ao usuário e Documentação
Divisão Técnica de Biblioteca e Documentação
CRB/9 - 9999



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Ilha Solteira

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: Efeito residual do composto de lodo de esgoto na ciclagem e no metabolismo de nitrogênio na rotação feijão-Urochloa brizantha-soja em sistema plantio direto no Cerrado

AUTORA: MARIANA BOCCHI DA SILVA

ORIENTADOR: THIAGO ASSIS RODRIGUES NOGUEIRA

COORIENTADORA: LILIANE SANTOS DE CAMARGOS

Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de Mestra em Agronomia, área: Sistemas de Produção pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. THIAGO ASSIS RODRIGUES NOGUEIRA (Participação Virtual)
Faculdade de Engenharia/UNESP / Ilha Solteira/SP

Prof. Dr. LUCAS ANJOS DE SOUZA (Participação Virtual)
Campus Rio Verde / Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano - IF Goiano

Prof. Dr. JOSÉ LAVRES JÚNIOR (Participação Virtual)
Laboratório de Isótopos Estáveis / Centro de Energia Nuclear na Agricultura - CENA/USP

Ilha Solteira, 27 de outubro de 2022

DEDICO

Ao meu amado filho João Guilherme, por me proporcionar o verdadeiro amor e me ensinar a ser resiliente para continuar em busca dos meus sonhos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus e à Nossa Senhora Aparecida por estarem sempre guiando os meus passos e me enchendo de bênçãos.

Ao meu orientador, Prof. Thiago Nogueira, por ter aceitado me “desorientar”, por confiar este trabalho a mim, pelos ensinamentos que me fizeram não desistir e sempre buscar o meu melhor, em sonhar alto e fazer pesquisa de qualidade.

A minha coorientadora, Profa. Liliane Camargos, que é um exemplo de mulher, cientista e mãe. Por me fazer admirá-la, por toda atenção oferecida e conhecimento compartilhado. Obrigada por estar comigo desde a graduação e ser fundamental em mais esta etapa da minha formação.

Aos meus pais, aos meus avós e ao meu padrasto que mesmo nunca tendo estudado, sempre me ensinaram o valor da educação e do estudo, que não mediram esforços para realizar meus sonhos, que me ensinaram a ser dedicada, a lutar pelo que almejo e a importância dos meus próprios valores. Obrigada por todo amor, compreensão e confiança em mim depositada. Ao meu irmão por todo companheirismo e cumplicidade. A toda minha família pelo apoio e incentivo.

Ao meu namorado e noivo, Guilherme, que foi meu braço direito durante todo o mestrado e desenvolvimento do experimento, companheiro do GENAFERT, que está sempre ao meu lado apoiando as minhas decisões, sonhando comigo novos rumos e buscando o melhor sempre. Obrigada por todo amor, amizade e ajuda durante todos estes anos. Lhe amo.

Aos meus amigos da vida acadêmica, Natália, Maycon e Patrícia, por tornar o mestrado mais leve e divertido, pelos estudos e conhecimentos compartilhados. Que possamos ir longe.

Aos meus melhores amigos, Caroline e Victor, por sempre estarem ao meu lado, pelos conselhos e ajuda durante esta etapa.

A todos(as) os(as) colegas do GENAFERT, em especial, Karen, Gabriela, Aline, Mariana, Isabella e Nelson, por me ajudarem nas atividades de campo e laboratório, por me ensinarem o que eu não sabia, por fazerem as idas à Fazenda de Ensino, Pesquisa e Extensão (FEPE) serem mais divertidas, por aguentarem todo calor e dificuldades.

Aos meus amigos do LFMV, Jailson e Nayane, por sempre estarem disponíveis a me ajudar e compartilhar seus conhecimentos em Fisiologia Vegetal.

Aos funcionários da FEPE da FEIS/Unesp, por todo suporte e ajuda para a adequada condução do experimento.

Aos professores e funcionários da FEIS/Unesp, pelo apoio concedido, sendo fundamentais para a conclusão do mestrado.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pelo auxílio financeiro – Chamada CNPq/MCTI/FNDCT No 18/2021 - Faixa A - Grupos Emergentes (Processo nº 404815/2021-9) e pela bolsa de Produtividade em Pesquisa – PQ 2 (Processo nº 308374/2021-5) concedida ao Prof. Thiago Nogueira que possibilitaram a realização dessa pesquisa.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES 88887.463840/2019-00), pela bolsa de mestrado concedida.

Epígrafe

“Um cientista no seu laboratório não é apenas um técnico: é, também, uma criança colocada à frente de fenômenos naturais que impressionam como se fossem um conto de fadas.”

Marie Curie

RESUMO

A segurança alimentar é um dos maiores desafios da humanidade. O papel dos solos neste contexto consiste em suprir a crescente demanda mundial por alimentos e manter os serviços agroecossistêmicos. Por outro lado, a grande quantidade de resíduos gerados pelas populações urbanas e sua inadequada disposição pode ocasionar a poluição dos solos provocando danos à saúde humana. Todavia, quando esses produtos são utilizados como fertilizantes orgânicos, podem promover melhorias da qualidade do solo e ganhos de produtividade das culturas. Há muito tempo já se conhece os benefícios do aproveitamento do lodo de esgoto na agricultura. O lodo possui elevadas quantidades de nitrogênio (N) e seu efeito residual pode proporcionar a liberação gradual desse nutriente para as culturas, além de contribuir para a redução do uso de fertilizantes minerais. O N é o nutriente mais exigido pela maioria das espécies vegetais. Por sua vez, sabe-se que plantas leguminosas, como o feijão e a soja, fazem associação radicular por meio da simbiose entre planta-rizóbio promovendo a fixação biológica de N_2 (FBN), desempenhando papel importante no manejo da adubação nitrogenada. A ciclagem de N por meio de plantas de cobertura cultivadas em sistemas conservacionistas, também possuem mecanismos de manutenção do N no solo. Contudo, pesquisas acerca do impacto causado por sucessivas aplicações de composto de lodo de esgoto (CLE), visando incrementar a ciclagem do N e interferência na eficiência da FBN ainda são incipientes. Nesse cenário, em que faltam resultados experimentais sobre os efeitos causados pelo fornecimento do CLE no desenvolvimento e produtividade dessas culturas, objetivou-se por meio deste estudo: (i) avaliar o efeito residual de sucessivas aplicações de doses de CLE como fonte de N na rotação feijão-*Urochloa brizantha*-soja sob plantio direto no Cerrado e (ii) monitorar a ciclagem de N por meio das alterações no metabolismo de N (com ênfase na eficiência do processo de FBN e suas implicações na nutrição, no desenvolvimento e na produtividade das culturas). O experimento foi instalado em condições de campo, em um delineamento em blocos casualizados, com quatro repetições. Os tratamentos foram compostos por quatro doses de CLE (10, 15, 20 e 25 t ha⁻¹, base úmida) acumuladas de duas aplicações e um tratamento controle (sem adição de fertilizante mineral ou orgânico). Com base nos resultados das análises nutricionais, bioquímicas, fisiológicas e no desempenho agrônomo do feijão e da soja, observamos que o efeito residual do CLE manteve os teores de N adequados para ambas as culturas e aumentou a produtividade das mesmas. Além disso, manteve uma N-fixação eficiente, devido à estabilidade do metabolismo de ureídeos nas plantas e aumento do conteúdo de proteínas. O CLE aumentou o conteúdo de nitrato e, conseqüentemente, a atividade da nitrato redutase na soja. A atividade da urease e o conteúdo de amônia foram afetadas pelo efeito residual do CLE, devido às alterações no metabolismo de ureia na planta. Notou-se aumento no acúmulo de N na parte aérea do capim-marandu. Nossos resultados indicaram que o CLE pode ser utilizado como uma fonte alternativa para suprir a necessidade de N pelas culturas, promovendo ganhos de produtividade, ciclagem de N por meio da forrageira e melhoria no metabolismo deste nutriente. Ademais, trata-se de destino sustentável para a disposição final do lodo de esgoto.

Palavras-chave: *Glycine max* L.; *Phaseolus vulgaris* L.; *Urochloa brizantha* cv. Marandu; fertilizante orgânico; planta de cobertura; resíduo urbano.

ABSTRACT

Food security is one of humanity's greatest challenges. The role of soils in this context is to meet growing global food demand while continuing to provide agroecosystem services. Conversely, the substantial amount of waste generated by urban populations often is not disposed of adequately and pollutes soil, which causes damage to human health. However, when urban waste products are used as organic fertilizers, they can lead to several improvements in soil quality and crop productivity. The benefits of sewage sludge in agriculture have long been known. Sewage sludge contains large amounts of nitrogen (N), which can be used by crops and substitute for a portion of synthetic fertilizers. Nitrogen is required by most plant species in larger amounts than other nutrients. Roots of leguminous species, such as common bean and soybean, form an association with rhizobia resulting in biological N₂ fixation (BNF), which contributes to soil N pools. Nitrogen cycled using cover crops facilitates maintenance of N in the soil. However, there is a lack of research exploring the impact of successive composted sewage sludge (CSS) applications on N cycling and changes in BNF efficiency. Given the importance of having such information from a soil N perspective, it was intended through this project to: (i) evaluate the residual effect of past CSS applications on plant available N supply to a bean-*Urochloa brizantha*-soybean rotation under no-tillage in the Cerrado, (ii) monitor N cycling including changes in N metabolism (e.g., BNF efficiency and photosynthetic response) and its impact on crop nutrition, development, and yield. The experiment was carried out under field conditions, in a randomized complete block design with four replications. The proposed treatments were four rates of CSS (10, 15, 20, and 25 Mg ha⁻¹, wet basis) and a control (no CSS or mineral fertilizer application). Based on the results of nutritional, biochemical, physiological analyzes, and on the agronomic performance of beans and soybeans, we observed that the residual effect of CSS kept the levels of N adequate for both crops and increased their productivity. Furthermore, it maintained an efficient N-fixation, due to the stability of ureide metabolism in the pans and increased protein content. The CSS application rates increased nitrate content and, consequently, the reductase nitrate activity in soybean. Urease activity and ammonia content were affected by the residual effect of CSS rates, due to changes in urea metabolism in the plant. Use of CSS increased shoot N accumulation in marandu grass. Our results indicate that CSS can be used as an alternative source for N fertilization, optimizing yield gains, N cycling through forage and improvement in N metabolism. In addition, it is a sustainable destination for the final disposal of sewage sludge.

Keywords: *Glycine max* L.; *Phaseolus vulgaris* L.; *Urochloa brizantha* cv. Marandu.; organic fertilizer; cover plant; urban waste.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
2	REVISÃO DE LITERATURA	14
2.1	LODO DE ESGOTO NA AGRICULTURA	14
2.2	CERRADO E SISTEMA PLANTIO DIRETO	16
2.3	NITROGÊNIO E PLANTAS LEGUMINOSAS	17
3	MATERIAL E MÉTODOS	21
3.1	ÁREA EXPERIMENTAL	21
3.2	DELINEAMENTO EXPERIMENTAL E TRATAMENTOS	23
3.3	OBTENÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DO CLE	23
3.4	HISTÓRICO E DESENVOLVIMENTO DO EXPERIMENTO	25
3.5	PARÂMETROS AVALIADOS NO EXPERIMENTO	26
3.5.1	Cultura do feijão comum e da soja	26
3.5.1.1	Teor de N	26
3.5.1.2	Índice de Clorofila Falker (ICF)	27
3.5.1.3	Matéria seca e nodulação	27
3.5.1.4	Acúmulo de N	27
3.5.1.5	Componentes de produção	28
3.5.1.6	Análises enzimáticas	28
3.5.1.7	Análises bioquímicas	29
3.5.2	Capim-marandu	31
3.5.2.1	Produção de fitomassa	31
3.5.2.2	Acúmulo de N	31
3.6	ANÁLISES ESTATÍSTICAS	31
4	RESULTADOS	32
4.1	ICF, N FOLIAR, MATÉRIA SECA E ACÚMULO DE N	32
4.2	NODULAÇÃO, ENZIMAS, NITRATO E AMÔNIO	34
4.3	UREÍDEOS, AMINOÁCIDOS E PROTEÍNA	37
4.4	COMPONENTES DE PRODUÇÃO E PRODUTIVIDADE	38
4.5	PRODUÇÃO DE FITOMASSA E ACÚMULO DE N DO CAPIM-MARANDU	41
5	DISCUSSÃO	43
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	48
	REFERÊNCIAS	49

1 INTRODUÇÃO

O uso do lodo de esgoto (LE) na agricultura destaca-se por apresentar baixo custo operacional de disposição para estações de tratamento de esgoto (ETE), sendo utilizado como fertilizante orgânico e/ou condicionador de solos (BRASIL, 2020a), sendo tal prática considerada ambientalmente sustentável e economicamente viável em comparação com a sua disposição em aterros sanitários (KACPRZAK *et al.*, 2017). Além disso, fornece matéria orgânica e nutrientes, como nitrogênio, fósforo e micronutrientes (NASCIMENTO *et al.*, 2020), melhorando a fertilidade do solo (FERRAZ *et al.*, 2016) e, conseqüentemente, a produtividade de culturas agrícolas e florestais (NOGUEIRA *et al.*, 2013; ZUBA JUNIO *et al.*, 2019; ABREU-JUNIOR *et al.*, 2020; ELSALAM *et al.*, 2021).

O LE pode conter elementos potencialmente tóxicos (NASCIMENTO *et al.*, 2020), compostos orgânicos (ALVARENGA *et al.*, 2017) e organismos patogênicos (MURRAY *et al.*, 2019). No Brasil, o Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) regulamentou a Resolução nº 498, dispõe de critérios e procedimentos para o uso de LE e métodos de tratamento para reduzir os contaminantes desse subproduto (BRASIL, 2020a).

A compostagem tem sido uma saída encontrada pelas Estações de Tratamento de Esgoto (ETEs) para estabilizar a matéria orgânica e reduzir os riscos de metais pesados e patógenos, visando, principalmente, a continuidade da reciclagem do lodo na agricultura (HARGREAVES; ADL; WARMAN, 2008; WANG *et al.*, 2017). O composto de lodo de esgoto (CLE) como fertilizante orgânico pode melhorar as propriedades químicas, físicas e biológicas do solo, além de prevenir a contaminação e a degradação dos recursos hídricos (JAKUBUS; GRACZYK, 2020; PRATES *et al.*, 2020; PRATES *et al.*, 2022; SILVA *et al.*, 2022a,b).

Visando a nutrição nitrogenada das culturas, as quantidades de lodo a serem aplicadas devem satisfazer as necessidades de nitrogênio (N) das plantas e evitar a geração de nitrato em quantidades excessivas que venham a lixiviar no perfil do solo, colocando em risco a qualidade das águas subsuperficiais (GANGBAZO *et al.*, 1995), além de favorecer a ciclagem de outros nutrientes (BOEIRA *et al.*, 2002). A fixação biológica de N₂ (FBN) desempenha papel importante no cultivo das plantas e no manejo da adubação mineral, pois é o processo de aquisição de N mais produtivo e econômico, além de ambientalmente viável (BISWAS; GRESSHOFF, 2014).

O fornecimento do CLE como fertilizante orgânico talvez possa substituir, pelo menos parcialmente, as quantidades de nutrientes aplicados via adubo mineral; pois a liberação lenta e gradual dos nutrientes contidos no composto poderá resultar em melhor aproveitamento desses pelas plantas. O aumento da matéria orgânica por meio da aplicação do CLE também poderá ser altamente favorável na manutenção e na melhoria da qualidade do solo (p.e. estoque de C, aumento da biota, maior retenção de umidade etc). Ademais, ainda são inexistentes pesquisas relacionadas ao efeito residual do CLE na disponibilidade de N no solo e no metabolismo de N por meio de alterações na nodulação, na FBN, na fisiologia e no desenvolvimento da cultura da soja e na cultura do feijão comum, cultivados sob sistema plantio direto (SPD) em região de Cerrado. É fundamental avaliar estes aspectos para que seja compreendido os efeitos causados pelo fornecimento de N via CLE e para a redução do uso de fertilizantes nitrogenados. Tais aspectos irão refletir em um menor custo de produção para os agricultores, além da diminuição dos impactos ambientais que são causados na produção destes insumos e do excedente dos adubos minerais que podem ser transferidos para os corpos d'água e atmosfera.

Nesse cenário, em que faltam resultados experimentais sobre os efeitos causados pelo fornecimento do CLE no desenvolvimento e produtividade dessas culturas, foram testadas as seguintes hipóteses: (i) o efeito residual das aplicações de CLE em solo de Cerrado pode suprir a demanda de N do feijoeiro, da forrageira e da cultura da soja em rotação sob SPD; (ii) a *Urochloa brizantha* cv. Marandu usada como planta de cobertura promove maior ciclagem de N e aumento na produtividade de grãos; e, (iii) o CLE irá fornecer N no sistema diminuindo a relação C/N do capim-marandu, favorecendo o processo de mineralização do N, conferindo maior disponibilidade do N no solo, que irá interferir na eficiência do processo de FBN e, consequentemente, no metabolismo de N no feijoeiro e na soja.

Desse modo, objetivou-se com esta pesquisa, avaliar o efeito residual de sucessivas aplicações de CLE como fonte de N na rotação feijão-*Urochloa brizantha*-soja sob plantio direto no Cerrado, monitorando a ciclagem de N por meio das alterações no metabolismo de N (com ênfase na eficiência do processo de FBN e resposta fotossintética) e suas implicações na nutrição, no desenvolvimento e na produtividade das culturas.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 LODO DE ESGOTO NA AGRICULTURA

O lodo de esgoto (LE) é um resíduo semissólido resultante do tratamento dos esgotos ou das águas servidas cuja composição, predominantemente orgânica, varia em função da sua origem e do sistema de tratamento do esgoto (BERTON; NOGUEIRA, 2010). Por ser um resíduo gerado em larga escala, é uma fonte constante de preocupação referente à sua disposição final (BELHAJ *et al.*, 2016). As práticas de gestão agrícola sustentável incluem a reciclagem de nutrientes nas plantas de volta à produção futura (ELSALAM *et al.*, 2021). O uso agrícola do lodo de esgoto é o método mais simples e barato de seu manejo, dando a possibilidade de reciclar não apenas nutrientes desejáveis, mas também matéria orgânica para as plantas (BERTANZA *et al.*, 2016; ELMI *et al.*, 2020; LAURA *et al.*, 2020).

O LE apresenta em sua composição matéria orgânica e elementos essenciais fundamentais para o desenvolvimento dos vegetais, podendo ser utilizado na produção agrícola e, substituir, ainda que parcialmente, os fertilizantes minerais, promovendo a manutenção da fertilidade do solo, além de prevenir a contaminação e a degradação dos recursos hídricos (NOGUEIRA *et al.*, 2008; BITTENCOURT *et al.*, 2014; ALBUQUERQUE *et al.*, 2015). Além do nitrogênio (N) em grande quantidade, o LE contém fósforo (P) e micronutrientes, como ferro (Fe), cobre (Cu), manganês (Mn) e zinco (Zn). Já a concentração de potássio (K) é baixa para suprir as necessidades das culturas agrícolas. Quando aplicado em taxas agronômicas, o LE pode reduzir em muito o custo de produção, pela menor utilização de fertilizantes minerais (LAMBAIS; SOUZA, 2000; RIGO *et al.*, 2014; PEDROSA *et al.*, 2017).

Cerca de 50–90% do conteúdo total de N presente no LE está na forma orgânica (SOMMERS, 1977; PIRES; ANDRADE, 2014; RIGBY *et al.*, 2016), como aminoácidos, proteínas, amidos e associado a polímeros que podem estar disponível após o processo de mineralização (ANDREOLI *et al.*, 2007). A aplicação de composto enriquecido com nitrogênio no solo pode reduzir e, em alguns casos, eliminar nossa dependência de fertilizantes químicos nitrogenados para a produção agrícola (HARINDINTWALI *et al.*, 2020; WU *et al.*, 2020).

A aplicação de LE no solo visando o fornecimento de N é uma prática que altera a dinâmica no solo, contribuindo para o aumento da produtividade agrícola e para a

nutrição das plantas. Todavia, o seu uso também pode provocar danos ambientais. Para compreender todos estes aspectos, deve-se considerar o conteúdo total de N e as taxas de mineralização do N- orgânico em N- inorgânico. O acúmulo de N- orgânico forma uma reserva deste nutriente no solo que, dependendo das condições climáticas e da atividade de microrganismos, pode ser mineralizada e liberar N- inorgânico. Altas taxas de nitrato (NO_3^-) no solo podem ocasionar problemas ao ambiente devido à grande mobilidade desta forma no solo, permitindo que o mesmo atinja corpos d'água e cause eutrofização destes mananciais (EPSTEIN, 2003).

Aplicação do LE como fertilizante, já foi estudada em diversas culturas, como: cana-de-açúcar, eucalipto, feijão, soja, sorgo, milho, feijão, girassol e trigo (NOGUEIRA *et al.*, 2008). Em muitos casos, essa fonte alternativa de adubação, tem proporcionado a essas culturas, produtividades equivalentes ou superiores aos tratamentos que receberam apenas a adubação mineral e também absorção significativa de nutrientes, como: N, P, Ca e Mg (BERTON; NOGUEIRA, 2010; LOBO *et al.*, 2012).

Embora a utilização do LE possa trazer benefícios diretamente aos solos e, conseqüentemente, para as culturas agrícolas, esse resíduo pode conter contaminantes como os metais pesados, compostos orgânicos e agentes patogênicos (IVANOVÁ *et al.*, 2018; NASCIMENTO *et al.*, 2018). Existem muitas controvérsias que limita de modo mais amplo o uso de lodo no solo, sendo geradas principalmente pela falta de informações sobre os benefícios e os possíveis danos ambientais, como os impactos em várias funções do solo, sendo estes, a biodiversidade do solo, ciclos microbianos de matéria orgânica e nutrientes (SIEBIELEC; SIEBIELEC; LIPSKI, 2018). A utilização do LE na agricultura tem sido alvo de constantes críticas em relação a contaminação do solo e do ambiente. Contudo, a recém-publicada Resolução nº 498 de 19 de agosto de 2020, sobre produção e aplicação de biossólidos em solos, define métodos de tratamento do LE que reduzem seus potenciais riscos nocivos, resguardando a saúde humana e o ambiente (BRASIL, 2020a). Quando a aplicação do LE é realizada como base nos critérios técnicos estabelecidos pela legislação – quantidade de N disponível no lodo e a dose de N requerida pela cultura (BRASIL, 2020b) –, nota-se baixa disponibilidade de metais pesados no solo, sendo pouco significativo as quantidades transferidas desses elementos para a parte aérea das culturas (BERTON; NOGUEIRA, 2010).

A compostagem tem sido uma saída encontrada pelas empresas que gerenciam o lodo de algumas ETEs, visando, principalmente, a continuidade da reciclagem do lodo na agricultura (HARGREAVES; ADL; WARMAN, 2008). Essa técnica contribui para evitar a contaminação dos solos agrícolas, uma vez que o processo de compostagem altera a mobilidade dos metais pesados, limitando a sua solubilidade e o seu potencial biodisponível no solo, além de reduzir a carga patogênica presente no lodo (NOGUEIRA *et al.*, 2007; HE; TIAN; LIANG, 2009; KHALIL *et al.*, 2011). Os métodos de compostagem se mostram promissores devido à redução de volume, eficiência na recuperação de nutrientes, mineralização da matéria orgânica, entre outros (RAVINDRAN *et al.*, 2021).

2.2 CERRADO E SISTEMA PLANTIO DIRETO

O Cerrado brasileiro está localizado na vasta região central do país (apresenta 23% do território nacional), é caracterizado por dois milhões de quilômetros quadrado (LOPES; GUILHERME, 2016), em que representa uma grande importância na produção agrícola do país, concentrado aproximadamente 45% da produção nacional (BOLFE *et al.*, 2020). Esta região agrícola do Brasil é caracterizada como produtora de grãos e fibras, onde vem sendo notado aumento nas áreas cultivadas nos últimos 30 a 40 anos (RODRIGUES *et al.*, 2016). Com o decorrer do tempo estes solos foram utilizados para uma agricultura convencional, na qual, desgasta e empobrece ainda mais esses solos, que por sua origem são naturalmente inférteis (BONETTI *et al.*, 2018). Para contornar este problema, muitos agricultores vêm utilizando o sistema plantio direto (SPD) como uma alternativa a produção agrícola que não interfira drasticamente na qualidade do solo (AMARAL *et al.*, 2016).

Os solos do Cerrado brasileiro são caracterizados como solos muito intemperizados e, conseqüentemente, possuem baixa fertilidade e baixos teores de matéria orgânica, sendo necessária a correção da acidez e reposição de alguns nutrientes (p.e. N) no solo, visando a obtenção de altos rendimentos (MORAES; ABREU-JUNIOR; LAVRES JUNIOR, 2010). Contudo, a elevação do consumo e do custo dos fertilizantes minerais tem preocupado o setor agrícola mundial, incentivando a busca pelo uso de fontes alternativas de nutrientes, a fim de reduzir a demanda por fertilizantes inorgânicos. A utilização do CLE como fertilizante orgânico em cultivos sob SPD pode se tornar uma prática vantajosa proporcionando benefícios, como:

elevação dos valores de pH do solo, do teor de C orgânico e da CTC, aumento na disponibilidade de nutrientes, melhorias nas propriedades físicas do solo, como aumento da estabilidade dos agregados e da macroporosidade e diminuição da resistência à penetração, podendo, incrementar também, a atividade e a abundância de bactérias (BERTON; NOGUEIRA, 2010; SIEBLIELEC; SIEBLIELEC; LIPSKI, 2018). Além desse fertilizante orgânico promover melhorias na qualidade dos solos e ser uma fonte alternativa na adubação das plantas, pode representar benefício de ordem social, uma vez que a disposição final do LE se dará de modo seguro, evitando possíveis impactos negativos ao ambiente (CAMPOS *et al.*, 2011; NASCIMENTO *et al.*, 2014), além de proporcionar maior retorno econômico ao produtor pelo aumento da produtividade das culturas (PEDROSA *et al.*, 2017; PRATES *et al.*, 2020).

Plantas de cobertura, utilizadas no sistema plantio direto (SPD) – caracterizado como um sistema agrícola conservacionista amplamente difundido no Brasil, resulta em uma das estratégias mais eficazes para melhorar a sustentabilidade e ganhos de produtividades das lavouras (CAIRES *et al.*, 2015; TANAKA *et al.*, 2019). Gramíneas do gênero *Urochloa* são adequadas como plantas de cobertura para a região tropical com invernos secos e baixa fertilidade, pois as mesmas têm raízes vigorosas e profundas e alta tolerância ao estresse por déficit hídrico, além de alto potencial de produção de biomassa. Por isso, seu uso é amplo no Brasil, especialmente, no bioma Cerrado (GICHANGI *et al.*, 2017). O acúmulo de fitomassa protege o solo e por ser decomposto mais lentamente devido a maior relação C/N (ROSSI *et al.*, 2013), pode amenizar as perdas de N do sistema mediante a ciclagem e a imobilização desse nutriente (LARA CABEZAS *et al.*, 2004). As *Urochloas* têm a capacidade de suprir sua necessidade de N em sistemas de produção de baixa disponibilidade de N. Algumas espécies deste gênero possuem mecanismos de manutenção do N no solo, como a capacidade de reduzir a nitrificação e consequentemente indisponibilizar N para possíveis perdas por lixiviação de NO_3^- e desnitrificação (SUBBARAO *et al.*, 2007; FERNANDES *et al.*, 2011).

2.3 NITROGÊNIO E PLANTAS LEGUMINOSAS

O N é o nutriente exigido em maior quantidade pela maioria das espécies vegetais e faz parte de várias estruturas nas plantas superiores. Aproximadamente 95% do N-total do solo apresenta-se na forma orgânica junto à matéria orgânica do

solo (KEENEY; NELSON, 1982; SILVA; MENDONÇA, 2007). Apesar de ser indisponível as plantas, o N-orgânico é importante fonte de N desde que ocorra sua mineralização. Cerca de 5% de N que compõe a fração mineral do nutriente no solo (KEENEY; NELSON, 1982), estão na forma de NO_3^- e NH_4^+ que são absorvidas pelas plantas. Estas devem estar em quantidade suficiente na solução do solo para que a cultura tenha capacidade de absorvê-las e expressar o seu máximo potencial produtivo (ROS *et al.*, 2003). Grandes modificações na disponibilidade e na necessidade desse nutriente para a planta estão ligadas a variabilidade das condições edafoclimáticas e aos processos que interferem na dinâmica do N no sistema solo-planta (ESPINDULA *et al.*, 2010).

A FBN é o processo pelo qual o N_2 (molécula estável e abundante na atmosfera, porém que não pode ser utilizada pelas plantas) é transformado em NH_3 e, a partir daí, em formas reativas orgânicas e inorgânicas vitais em sistemas biológicos (MOREIRA; SIQUEIRA, 2006). Estima-se que a contribuição da FBN para o total de N introduzido em sistemas agrícolas é de 65%, o que a faz essencial à sustentabilidade dos sistemas (REIS *et al.*, 2006). A FBN em todos os sistemas conhecidos é um processo mediado por um complexo enzimático denominado Nitrogenase (Nase) e com a participação direta de diversos nutrientes minerais como o ferro (Fe), molibdênio (Mo), magnésio (Mg), cobalto (Co) e fósforo (P). O N_2 é fixado por meio do sistema simbiótico constituído pela associação radicular entre bactérias conhecidas como rizóbio e plantas da família das leguminosas (Fabaceae), que desenvolvem nódulos radiculares característicos (MALAVOLTA, 2006; VIEIRA, 2017).

O feijão comum (*Phaseolus vulgaris* L.) é um dos principais alimentos consumidos diariamente pela população brasileira. É fonte de proteína e outras excelentes propriedades nutricionais, apresentando na maioria dos cultivares valor proteico que varia de 23 a 26% (FIDELIS *et al.*, 2017). No Brasil, no ano agrícola 2020/2021, a produtividade estimada da cultura do feijão considerando as três safras, totalizou 3,3 milhões de toneladas (CONAB, 2021). Trata-se de uma cultura que requer quantidades altas de N, sendo que esse nutriente também pode ser fornecido pela FBN por meio da simbiose com bactérias do gênero *Rhizobium* (SIQUEIRA NETO *et al.*, 2010). Porém, o feijoeiro não dispensa a aplicação de fertilizantes nitrogenados, pois o N biologicamente fixado parece incapaz de complementar o N total exigido pela cultura (FRANZINI *et al.*, 2013). Estudos anteriores afirmaram que os biorresíduos aplicados à terra melhoram as propriedades estruturais, estimulam

comunidades microbianas benéficas e, finalmente, aumentam a disponibilidade de nutrientes para culturas cultivadas, aumentando assim a qualidade e o rendimento das plantas (SHAHZAD *et al.*, 2014; TURP *et al.*, 2021).

A soja (*Glycine max* L.) representa uma das leguminosas mais estudadas em relação a FBN, devido a sua grande importância econômica, considerada uma das principais do mundo, com maior área cultivada, sendo empregada em diversas finalidades, como: fonte de alimento para a produção animal, extração de óleo e proteína para a alimentação humana (PINTO *et al.*, 2016; LI *et al.*, 2020). A produção estimada no ano agrícola 2020/2021 é de 136 milhões toneladas, recorde histórico no país (CONAB, 2021). O N é o nutriente requerido em maior quantidade pela cultura da soja, para produzir 1000 kg de grãos são necessários 80 kg de N. Essas quantidades de N requerida pela cultura podem ser supridas pelo processo de FBN, que ocorre por simbiose com o gênero bacteriano *Bradyrhizobium*, fornecendo 70–200 kg ha⁻¹ de N (HERRIDGE *et al.*, 2008), promovendo altos rendimentos sem suprimento de fertilizantes nitrogenados (MENDES *et al.*, 2004; HUNGRIA; MENDES, 2015). A menor aplicação de fertilizantes nitrogenados, consequência do fornecimento de N às plantas pela FBN, não só diminui o custo da produção agrícola, mas também tem contribuições ambientais diretas na redução da emissão de gases do efeito e poluição dos mananciais (GRAHAM, VANCE, 2000). Pesquisadores já ressaltaram que o cultivo da soja nacionalmente se tornou viável economicamente devido à FBN (HUNGRIA *et al.*, 2006). Além disso, o uso de resíduos urbanos como fonte de nutrientes, por exemplo lodo de esgoto, tem se mostrado bastante eficientes na promoção dos teores adequados de nutrientes para a cultura da soja (MIGGIOLARO *et al.*, 2014). Dessa forma, como a FBN desempenha importante papel na sustentabilidade agrícola e na segurança alimentar é essencial desenvolver estudos para maximizar sua eficiência.

A diversidade de culturas em um sistema e o sistema de preparo do solo adotado afetam a disponibilidade de nitrogênio do solo, principal nutriente limitante para as culturas (ROCHA *et al.*, 2020; SILVA *et al.*, 2020). Nesse contexto, leguminosas como a soja, contribuem para o aumento dos níveis de N no solo via fixação biológica de nitrogênio (FBN) (CHU *et al.*, 2017; WU *et al.*, 2017). Além disso, gramíneas com alta biomassa acima e abaixo do solo aumentam a incorporação de carbono ao solo e o conteúdo de matéria orgânica do solo, melhorando os estoques de N do solo (RAPHAEL *et al.*, 2016).

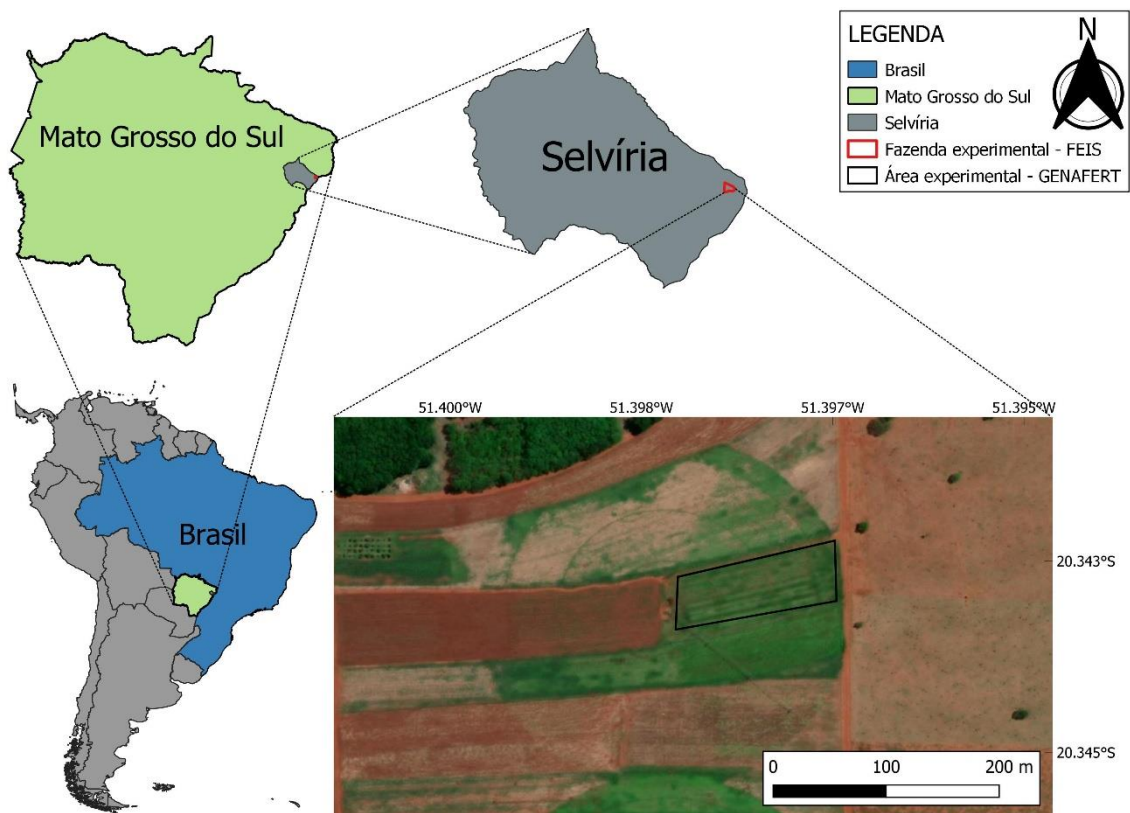
Com base no exposto, visando a máxima eficiência na adubação nitrogenada, é crucial que as quantidades de N a serem aplicadas via fertilizantes minerais ou orgânicos devam satisfazer as necessidades nutricionais das plantas, favorecendo a ciclagem de outros nutrientes, além de evitar perdas colocando em risco a qualidade do ambiente ou diminuindo o rendimento das culturas. Todavia, embora haja avanços nas pesquisas com uso de fertilizantes orgânicos na nutrição das plantas e na fertilidade do solo, ainda são escassos estudos relacionados ao uso agrícola do CLE e seus efeitos no metabolismo de N por meio de alterações na nodulação, na FBN, na fisiologia e no desenvolvimento de espécies vegetais cultivadas sob SPD na região de Cerrado.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 ÁREA EXPERIMENTAL

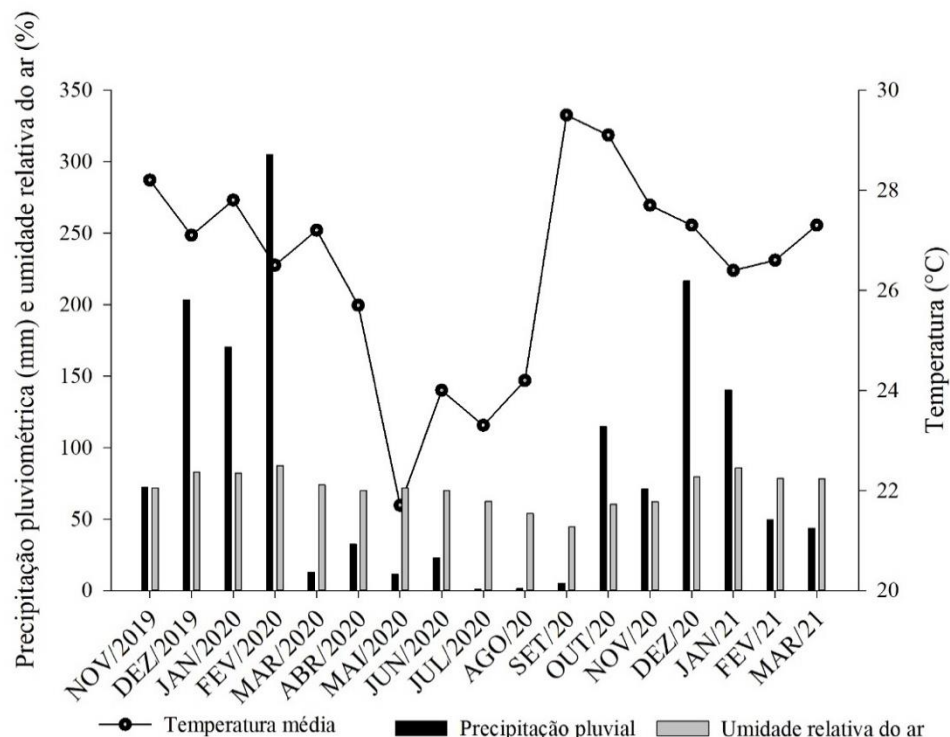
O estudo foi realizado em condições de campo no município de Selvíria, MS (20°20'35" S e 51°24'04" W, com altitude de 358 m, Figura 1). A região apresenta médias anuais de: precipitação pluvial de 1.370 mm, temperatura de 24,5 °C e umidade relativa do ar de 75%. O tipo climático da região é o Aw segundo classificação de Köppen, caracterizado por verões chuvosos e invernos secos (LOMBARDI NETO e DRUGOWICH, 1994). Durante toda a realização do experimento foram coletados os dados diários referentes à temperatura, umidade relativa do ar e precipitação pluvial (Figura 2).

Figura 1 - Local de estudo: município de Selvíria, Mato Grosso do Sul, Brasil



Fonte: próprio autor.

Figura 2 - Temperatura média, precipitação pluvial e umidade relativa do ar durante o desenvolvimento do experimento. Dados coletados da estação metereológica da Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, São Paulo, Brasil



Fonte:próprio autor.

Mediante levantamento detalhado e utilizando-se o Sistema Brasileiro de Classificação dos Solos (SANTOS *et al.*, 2018), o solo da área experimental foi classificado como LATOSSOLO VERMELHO Distrófico típico argilo arenoso. Antes da implantação do experimento, foram coletadas amostras na camada de 0–0,2 m de profundidade para fins de avaliação dos atributos físicos (TEIXEIRA *et al.*, 2017) e químicos (RAIJ *et al.*, 2001) obtendo os seguintes valores: pH (CaCl₂) = 4,5±0,1; matéria orgânica (MO) = 19,0±1,2 g dm⁻³; fósforo (P) (resina) = 16±0,6 mg dm⁻³; potássio (K) = 1,7±0,2 mmol_c dm⁻³; cálcio (Ca) = 13±0,6 mmol_c dm⁻³; magnésio (Mg) = 12±1,0 mmol_c dm⁻³; acidez potencial [hidrogênio (H) + alumínio (Al)] = 37±2,3 mmol_c dm⁻³; soma de bases (SB) = 27,0±1,7 mmol_c dm⁻³; capacidade de troca de cátions (CTC) a pH 7,0 = 63,7±0,9 mmol_c dm⁻³; saturação por bases (V) = 42±3,0%; boro (B) = 0,22±0,04 mg dm⁻³; cobre (Cu) = 1,8±0,1 mg dm⁻³; ferro (Fe) = 15±0,6 mg dm⁻³; manganês (Mn) = 18,8±0,6 mg dm⁻³; zinco (Zn) = 0,6±0,1 mg dm⁻³; alumínio

(Al) = $4,0 \pm 0,0$ mg dm⁻³; argila = 370 ± 19 g kg⁻¹, silte = 80 ± 3 g kg⁻¹ e areia = 550 ± 13 g kg⁻¹.

3.2 DELINEAMENTO EXPERIMENTAL E TRATAMENTOS

Adotou-se o delineamento em blocos casualizados, com cinco tratamentos e quatro blocos, totalizando 20 unidades experimentais. Os tratamentos foram compostos por: quatro doses de composto de lodo de esgoto – CLE (10, 15, 20 e 25 t ha⁻¹, base úmida), acumuladas de duas aplicações consecutivas realizadas nas safras 2017/18 e 2018/19 e um tratamento controle (sem aplicação do CLE e de fertilizantes minerais). Visando avaliar o efeito residual das duas aplicações do CLE como fonte de N, não foi realizado qualquer tipo adubação (mineral ou orgânica), mantendo-se somente o que já havia sido aplicado na área experimental.

3.3 OBTENÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DO CLE

O CLE foi obtido na empresa Tera Ambiental Ltda, localizada em Jundiaí, SP. Trata-se de um fertilizante orgânico composto Classe B (BRASIL, 2022B), produzido a partir da compostagem termofílica de resíduos orgânicos urbanos diversos. A principal matéria prima que compõe o produto é o lodo de esgoto sanitário, cerca de 70% em massa, advindo do tratamento de esgotos sanitários em Jundiaí e Municípios vizinhos. Além do lodo de esgoto, também entra no processo de compostagem, lodos de Sistemas de Tratamento de Águas Residuárias geradas em Agroindústrias, tais como cervejarias e indústrias de alimentos diversos, restos de frutas, legumes e verduras, pré e pós consumo, segregados na fonte e coletados de forma diferenciada, restos de produtos alimentícios industrializados e inservíveis entre outros.

O CLE foi caracterizado do ponto de vista químico (pH, CTC, MO, C-orgânico, umidade, As, Ba, B, Cd, Ca, Cr, Cu, Fe, Hg, Mg, Mn, Mo, N, Na, Ni, P, Pb, S, Se e Zn) e microbiológico (coliformes termotolerantes, salmonella e ovos viáveis de helmintos), seguindo as recomendações preconizadas na Resolução nº 498 do Conama (BRASIL, 2020a), sendo considerado apropriado para uso neste estudo (Tabela 1).

Tabela 1. Composição química e microbiológica de amostras do composto de lodo de esgoto. NMP = Número mais provável. CTC: Capacidade de troca catiônica. (Média $\pm$ desvio-padrão; $n = 3$).

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

⁽¹⁾ Instrução normativa N° 7 MAPA (2016). ⁽²⁾ Não determinado. Fonte: elaboração do próprio autor.

De acordo com o N total presente no CLE e as doses utilizadas no experimento, foram calculadas as quantidades totais de N que foram adicionadas ao solo após as duas aplicações do CLE, sendo: $10 \text{ t ha}^{-1} = 146 \text{ kg de N}$; $15 \text{ t ha}^{-1} = 219 \text{ kg de N}$; $20 \text{ t ha}^{-1} = 292 \text{ kg de N}$; e, $25 \text{ t ha}^{-1} = 365 \text{ kg de N}$.

3.4 HISTÓRICO E DESENVOLVIMENTO DO EXPERIMENTO

O preparo inicial da área experimental foi realizado em setembro de 2017, época em que foi realizada uma escarificação a 0,3 m de profundidade. Com base nos resultados da avaliação da fertilidade do solo, foi realizada a calagem ($2,2 \text{ t ha}^{-1}$) – aplicação superficial seguida de aração e gradagem – objetivando elevar a saturação por bases a 70% e, em seguida, aplicação superficial de $1,8 \text{ t ha}^{-1}$ de gesso agrícola (RAIJ *et al.*, 1997).

O CLE foi aplicado uma semana antes da semeadura da cultura da soja nas safras de 2017/18 e 2018/19. As doses do composto foram distribuídas manualmente em área total dentro de cada parcela, sem incorporação ao solo, levando-se em consideração a umidade do material (Tabela 1). Para avaliar o efeito residual das aplicações do CLE sobre o desenvolvimento do feijão (2019/20) e da soja (2020/21), nenhum outro fertilizante foi utilizado nos cultivos das mesmas.

Como plantas-teste, nos anos agrícolas 2017/18 e 2018/19, foram cultivadas em sucessão, as culturas de soja (*Glycine max* L.) na primeira safra e de milho (*Zea mays* L.) na segunda safra. No ano agrícola 2019/20, foi implementado o sistema de plantio direto com o cultivo do capim-marandu (*Urochloa brizantha*) (como planta de cobertura). Logo em seguida, foi realizado o cultivo do feijão comum (*Phaseolus vulgaris* L. cv. BRS Estilo), e, no ano agrícola 2020/21, o capim-marandu foi novamente utilizado como planta de cobertura, seguido do cultivo da cultura da soja (*Glycine max* L. cv TMG 7063 Ipro).

Cada unidade experimental foi constituída por dez linhas para o capim-marandu (espaçadas entre si de 0,34 m) e por sete linhas, tanto para o feijão quanto para a soja, (espaçadas entre si de 0,45 m), com 10 metros de comprimento, totalizando 35 m^2 por parcela e 700 m^2 de área total. A área útil da parcela para as avaliações foi constituída pelas três linhas centrais, sendo eliminados como bordadura 2,5 m de cada extremidade.

A semeadura do capim-marandu foi realizada em novembro de 2019, permanecendo por 140 dias de cultivo e depois em agosto de 2020, com mais 60 dias de cultivo. Anteriormente ao cultivo de cada cultura principal, foi realizada a dessecação do capim-marandu previamente definida mediante a aplicação de herbicida glifosato (1.800 g ha^{-1} do i.a.) e 2,4-D (670 g ha^{-1} do i.a.). As sementes de feijão e soja foram tratadas com fungicidas tiofanato metílico + piraclostrobina ($45 \text{ g} + 5 \text{ g}$ do i.a. por 100 kg de semente) e do inseticida fipronil (50 g do i.a. por 100 kg de semente), e , também, com CoMo (200 mL ha^{-1}). As sementes de feijão foram inoculadas com *Rhizobium tropici* (Semia 4080, 100 g para 25 kg de sementes) e as sementes de soja foram inoculadas com *Bradyrhizobium elkani* (CEPA SEMIA 5019) e *Bradyrhizobium japonicum* (CEPA SEMIA 5079), seguindo as recomendações do fabricante (100 mL para 50 kg de sementes- Inoculante Masterfix L. Stoller).

A semeadura do feijão foi realizada em abril de 2020 e a da soja em novembro de 2020. O manejo fitossanitário para todas as culturas avaliadas foi realizado de acordo com as recomendações técnicas para o desenvolvimento de ambas culturas na região. Também, sempre que necessário, foram aplicadas lâminas de água variando de 10–14 mm via irrigação por aspersão fornecida por pivô central.

3.5 PARÂMETROS AVALIADOS NO EXPERIMENTO

3.5.1 Cultura do feijão comum e da soja

3.5.1.1 Teor de N

Conforme recomendações descritas por Ambrosano *et al.* (1997), no período de florescimento pleno do feijão (estádio R6; $\sim 40 \text{ DAE}$), coletou-se, aleatoriamente, a terceira folha com pecíolo, tomadas no terço médio de 10 plantas por parcela. Para a soja, também em florescimento pleno (estádio R2; $\sim 35 \text{ DAE}$), foram coletadas, aleatoriamente, a terceira folha com pecíolo, completamente desenvolvidas, a partir do ápice para a base, de 30 plantas por parcela. As amostras foram secas em estufa de circulação forçada de ar, à temperatura de $65 \text{ }^{\circ}\text{C}$ por 72 h, trituradas em moinho tipo Willey e armazenadas até o momento das análises. O teor de N nas folhas diagnose foi quantificado conforme metodologia descrita por Malavolta *et al.* (1997).

3.5.1.2 Índice de Clorofila Falker (ICF)

No estágio R6 do feijão, avaliou-se o teor relativo de clorofila em 10 folhas por parcela, com leituras realizadas ao lado da nervura central das folhas totalmente expandidas (BARBIERE JUNIOR *et al.*, 2012). Na soja, no estágio R2, as leituras foram feitas no terceiro trifólio completamente desenvolvido, a partir do ápice da planta, com uma média de 10 leituras por folíolo, em cinco plantas por parcela. Utilizou-se o equipamento portátil ClorofiLOG, modelo CFL 1030 da marca Falker.

3.5.1.3 Matéria seca e nodulação

No estágio R5 do feijoeiro e no estágio R2 da cultura da soja, foram coletadas seis plantas dentro de cada parcela experimental com auxílio de pá de corte. As plantas foram separadas em parte aérea e raiz. Todo o excesso de solo das raízes foi retirado com auxílio de água e peneira para não haver perdas. Os nódulos foram retirados das raízes, contados e depois passados em peneira de 2 mm, e os maiores que 2 mm foram cortados ao meio para observar a viabilidade dos mesmos (nódulo de aparência normal com a presença da leghemoglobina, conferida pela coloração avermelhada). Após esta última etapa, os nódulos foram acondicionados em sacos de papel, assim como a raiz e a parte aérea, e colocados em estufa de circulação forçada de ar a 65°C por 72 h. Em seguida, avaliou-se: a matéria seca das raízes e da parte aérea, o número de nódulos totais, o número de nódulos viáveis e a matéria seca de nódulos (MATOSO; KUSDRA, 2014).

3.5.1.4 Acúmulo de N

Após secas e pesadas, as raízes e a parte aérea da etapa anterior foram moídas em moinho tipo Willey com peneira de 40 mesh, submetidas à digestão sulfúrica e destilação a vapor para a determinação dos teores de N (MALAVOLTA *et al.*, 1997). Com base nos teores de N e na produção de matéria seca, foram calculadas as quantidades acumuladas de N.

3.5.1.5 Componentes de produção

Após a maturidade fisiológica do feijão (R9; ~ 80 DAE), e da soja (R8; 100 DAE), foram coletadas 10 plantas aleatórias da área útil de cada parcela e analisados os componentes de produção. Para o feijoeiro foram analisados: massa de 100 grãos; número de grãos por planta; número de grãos por vagem; número de vagem por planta e comprimento de vagem. Para a soja, foram analisados: massa de 100 grãos; número de vagens por planta; número de grãos por vagem; altura de plantas e altura de inserção da primeira vagem.

Ao final do ciclo de cada cultura, todas as plantas da área útil foram colhidas e trilhadas manualmente para não haver perdas, pesadas e, após estes procedimentos, realizou-se os cálculos com extrapolação para kg ha⁻¹ e corrigidos para o teor de 13% de umidade (base úmida) para estimar a produtividade das culturas (SABUNDJIAN *et al.*, 2016).

3.5.1.6 Análises enzimáticas

No estágio R6 do feijão e no estágio R2 da soja, foram coletadas cinco folhas de cada parcela, seguindo as recomendações para a análise de teores nutricionais (AMBROSANO *et al.*, 1997), para a realização das análises enzimáticas. As folhas foram acondicionadas no gelo em caixa térmica para preservar a atividade enzimática até o momento da análise.

- Atividade da urease: as amostras *in vivo* foram preparadas por meio da adaptação da metodologia descrita por Hogan *et al.* (1983). O tecido foliar (200 mg de folhas verdes, cortadas em “tiras” com largura de 1 mm) foi colocado em um meio de 8 mL de tampão NaH₂PO₄ com ureia (12,61 g L⁻¹) pH 7,4 e incubado por 3 h a 30° C, mantido sob agitação constante. Em um tubo de ensaio contendo 0,5 mL do extrato obtido após a incubação, 2,5 mL do reagente I (1,25 mL de fenol cristal, 12,5 mg de nitroprussiato de sódio e 250 mL de água destilada) e 2,5 mL do reagente II (1,25 g de NaOH, 13,4 g de Na₂HPO₄.12H₂O, 2,5 mL de NaOCl e 250 mL de água destilada) foram adicionados. Os tubos foram incubados em banho-maria a 37° C por 35 min. Após esse intervalo, a reação foi medida por colorimetria em espectrofotômetro a 625 nm. A atividade da urease foi mensurada por meio da produção de N-NH₄, segundo metodologia de McCullough (1967).

- Atividade da nitrato redutase: as amostras foliares foram coletadas no período da manhã e 0,5 g de tecido foliar fresco foram cortados em tiras finas, colocados em um meio de 5 mL de tampão NaH_2PO_4 pH 7,5 com KNO_3 e incubados em banho-maria a 30° C por 60 min. no escuro. Em um tubo de ensaio, foi adicionado 1 mL da solução de extração, 0,5 mL de sulfanilamida 1% e 0,5 mL de naftiletilenodiamina 0,02%. Após esta etapa, a reação foi medida por colorimetria em espectrofotômetro a 540 nm. A realização do ensaio e a determinação da atividade da NR seguiram as recomendações descritas em Radin (1974).

3.5.1.7 Análises bioquímicas

Foram coletadas cinco folhas de cada parcela, no estágio R6 do feijão e R2 da soja, de acordo com as recomendações para a análise de teores nutricionais (AMBROSANO *et al.*, 1997), para a realização das análises bioquímicas. Inicialmente foi realizada a extração de compostos solúveis (BIELESKI; TUNER, 1966), no qual 0,5 g de material vegetal foi macerado em 5 mL de MCW (600 mL de metanol, 250 mL de clorofórmio e 150 mL de água destilada) e colocado para homogeneizar em centrífuga a 8500 rpm por 15 min. Após a centrifugação, o sobrenadante foi adicionado em outro tubo e o precipitado usado para o ensaio de proteína. Para cada 4 mL de sobrenadante, foram adicionados 1 mL de clorofórmio e 1,5 mL de água destilada e deixado em repouso por 24 h na geladeira. Passado este período, a fase lipossolúvel foi descartada e a fase hidrossolúvel teve seu volume anotado e foi armazenada até o momento das análises. Após a extração, foram realizadas as seguintes análises fisiológicas:

- Quantificação de *proteínas*: no precipitado resultante da extração de compostos solúveis foi adicionado 5 mL de NaOH 0,1M (4 g de NaOH em 1 L de água destilada) e colocado para centrifugar a 8500 rpm por 15 min. Após este período, em 100 μL de sobrenadante foi adicionado 5 mL de Bradford (produzido no laboratório), esperou-se 3 min. e mediu-se a reação por colorimetria em espectrofotômetro a 595 nm (BRADFORD, 1976).

- Quantificação de *aminoácidos*: a amostra da reação foi composta por 25 μL da fase hidrossolúvel + 975 μL de água destilada, adicionou-se 500 μL de tampão citrato pH 5,0, 200 μL de ninhidrina 5% de metilglicol e 1 mL de KCN 0,0002 mol L⁻¹ e foi colocada para incubar em banho-maria a 100° C por 20 min. Após este período,

esperou-se 10 min. em temperatura ambiente e depois adicionou-se 1 mL de etanol 60%. A reação foi medida por colorimetria em espectrofotômetro a 570 nm (YEMM; COCKING, 1955).

- Quantificação de *nitrato*: seguindo a metodologia descrita por Cataldo et al. (1975), utilizamos 50 µL da fase hidrossolúvel juntamente com 200 µL de ácido salicílico 5% em H₂SO₄, esperamos 20 min. em temperatura ambiente e adicionou-se mais 4,75 mL de NaOH 2N e resfriamos em temperatura ambiente até a reação estabilizar. Após, o ensaio foi medido por colorimetria em espectrofotômetro a 410 nm.

- Quantificação de *amônio*: para o ensaio de amônio, utilizou-se 100 µL da fase hidrossolúvel e adicionou-se 500 µL do reagente I (1,25 mL de fenol cristal, 12,5 mg de nitroprussiato de sódio e 250 mL de água destilada) e 500 µL do reagente II (1,25 g de NaOH, 13,4 g de Na₂HPO₄.12H₂O, 2,5 mL de NaOCl e 250 mL de água destilada), colocamos em banho-maria a 37° C por 1 h. Após este período, prosseguiu com a leitura por colorimetria em espectrofotômetro a 630 nm (McCULLOUGH, 1967).

- Quantificação de *ureídeos*, *ácido alantoico* e *alantoína*: segundo o método proposto por Vogels e Van Der Drift (1970), o ensaio consiste em quatro etapas. Etapa I: diluir 250 µL da fase hidrossolúvel em 500 µL de água destilada, adicionar 250 µL de NaOH 0,5N e 1 gota de fenilhidrazina 0,33%, aquecer em banho-maria a 100° C por 8 min. e resfriar em temperatura ambiente. Etapa II: adicionar 250 µL de HCl 0,65N, aquecer em banho-maria a 100° C por 4 min. e resfriar em temperatura ambiente. Etapa III: adicionar 250 µL de tampão fosfato pH 7,0 e 250 µL de fenilhidrazina, deixar 5 min. em temperatura ambiente e após resfriar no gelo por 5 min. Etapa IV: ainda no gelo, adicionar 1,25 mL de HCl 37% (deve ficar no congelador para a análise), fora do gelo, adicionar 250 µL de K₃Fe(CN)₆ e agitar os tubos, esperar 15 min. em temperatura ambiente e ler por colorimetria em espectrofotômetro a 535 nm. Para quantificar ureídeos totais, seguimos os quatro passos descritos. Para quantificar ácido alantoico, diluímos 250 µL da fase hidrossolúvel em 500 µL de água destilada e seguimos o ensaio a partir do passo II. Para quantificar alantoína, subtraímos o valor obtido para ureídeos totais do valor obtido para ácido alantoico.

3.5.2 Capim-marandu

3.5.2.1 Produção de fitomassa

Para avaliar a produção de fitomassa pelo capim-marandu, na safra de 2019/20, foram realizados dois cortes, aos 70 e 140 dias após a emergência (DAE) e, na safra de 2020/21, foi realizado um corte aos 60 DAE. Os cortes foram realizados em quatro pontos por parcela, aleatoriamente, o mais rente possível do solo e com o auxílio de um quadrado de 0,25 m². Após o primeiro corte (safra 2019/20), foi passado o triton para uniformizar a área e as plantas rebrotarem novamente para formar uma nova palhada sobre o solo. No segundo corte (2019/20) e no único corte da safra 2020/21, depois de realizado, foi feita a dessecação da gramínea com herbicida glifosato (1.800 g ha⁻¹ do i.a.) e 2,4-D (670 g ha⁻¹ do i.a.), para a instalação das culturas em sucessão (feijão e soja, respectivamente). As amostras coletadas foram secas em estufa de circulação forçada a 65°C, por 72 h e o material vegetal foi pesado, para a obtenção da quantidade total de palha formada (kg ha⁻¹) em cada safra avaliada.

3.5.2.2 Acúmulo de N

As amostras da parte aérea do capim-marandu, de cada safra, depois de pesadas, foram moídas em moinho tipo Willey, com peneira de 40 mesh e homogeneizadas para obtenção do teor N por meio de digestão sulfúrica e destilação a vapor (MALAVOLTA *et al.*, 1997). Com base nos teores de N e na produção de matéria seca, calculou-se as quantidades acumuladas do N e extrapolou-se para kg ha⁻¹.

3.6 ANÁLISES ESTATÍSTICAS

Os resultados foram submetidos ao teste de normalidade de Shapiro Wilk e ao teste de homogeneidade de variâncias de Oneillmathews a 5%. Após atender às hipóteses de normalidade, os resultados foram submetidos à análise de variância e as médias comparadas pelo teste Tukey ($P < 0,05$), nos casos em que o teste F foi significativo. A análise estatística foi realizada por meio do software R (CORE TEAM, 2019) e do software AgroEstat (BARBOSA; MALDONADO, 2015).

4 RESULTADOS

4.1 ICF, N FOLIAR, MATÉRIA SECA E ACÚMULO DE N

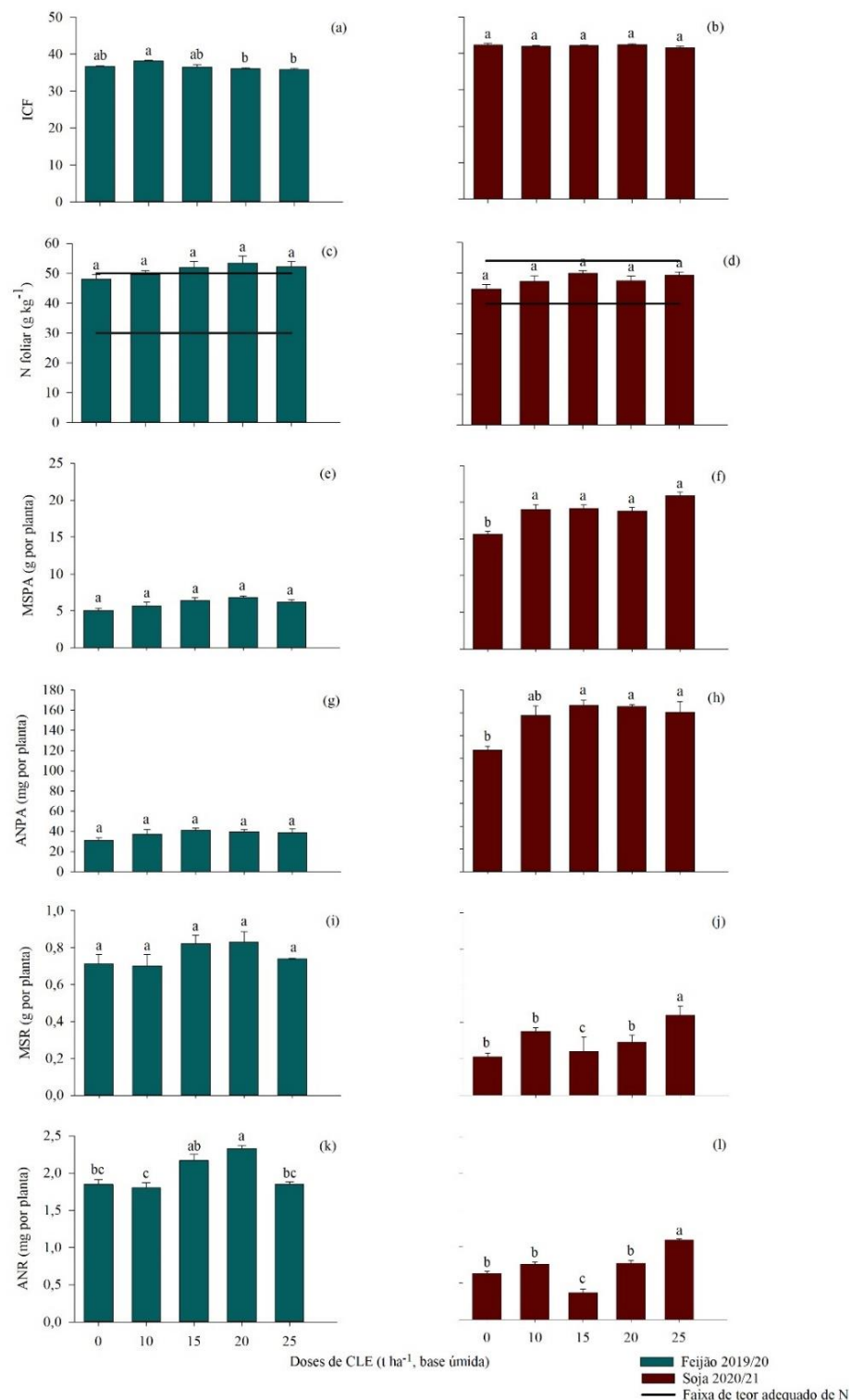
O efeito residual do CLE influenciou o índice de clorofila Falker (ICF) do feijoeiro, sendo notado diferença entre as doses estudadas, no qual o maior valor de ICF foi obtido na dose de 10 t ha⁻¹ de CLE (Figura 3a). Para a soja, não foi observado efeito residual das doses de CLE sob o ICF (Figura 3b).

Não houve efeito das aplicações do CLE sobre os teores de N nas folhas do feijoeiro e da soja (Figura 3c e 3d, respectivamente). Para o feijão, no tratamento controle e para as parcelas que receberam 10 t ha⁻¹ de CLE, notou-se que o teor de N foliar no feijoeiro manteve-se dentro da faixa de suficiência (30–50 g kg⁻¹) estabelecido por Ambrosano *et al.* (1997). Porém, onde foram aplicadas as maiores doses de CLE, os teores de N nas folhas estavam acima do nível máximo de N (Figura 3c). Na soja, o teor de N foliar manteve-se dentro da faixa de teor de N adequado (40–54 g kg⁻¹) (AMBROSANO *et al.*, 1997) (Figura 3d). Este comportamento evidencia que ambas culturas conseguiriam suprir suas necessidades por meio do efeito residual das sucessivas aplicações do CLE e pela fixação simbiótica eficiente realizada por elas.

A matéria seca da parte aérea (MSPA), o acúmulo de N na parte aérea e a matéria seca de raiz (MSR) do feijoeiro não foram alterados pelo efeito residual das sucessivas aplicações de CLE (Figuras 3e, 3g e 3i). Por outro lado, pôde-se notar que houve maior acúmulo de N nas raízes (ANR) das plantas de feijão cultivadas nas parcelas que receberam 10 e 15 t ha⁻¹ de CLE, sendo obtido, respectivamente, as seguintes quantidades acumuladas 1,8 e 2,3 mg por planta (Figura 3k).

Na soja, observou-se que houve influência do efeito residual das sucessivas aplicações de CLE na MSPA, no ANPA, na MSR e no ANR (Figura 3f, 3h, 3j e 3l). A dose de 25 t ha⁻¹ de CLE foi a que propiciou maior incremento de MSPA, MSR e ANR, com 19,95 g, 0,43 g e 1,09 mg, respectivamente. Para o ANPA, a dose de 15 t ha⁻¹ foi a que promoveu o maior incremento de N, sendo encontrado 146,72 mg por planta.

Figura 3 - Índice de clorofila Falker (ICF) (a,b), teor de N foliar (c,d), matéria seca da parte aérea (MSPA) (e,f), acúmulo de N na parte aérea (ANPA) (g,h), matéria seca da raiz (MSR) (i,j) e acúmulo de N na raiz (ANR) (k,l) em plantas de feijão e de soja cultivadas sob o efeito residual da aplicação de doses de composto de lodo de esgoto (CLE). Médias $\pm$ erro padrão seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. Nível de suficiência máximo e mínimo de N estabelecido por Ambrosano *et al.* (1997)



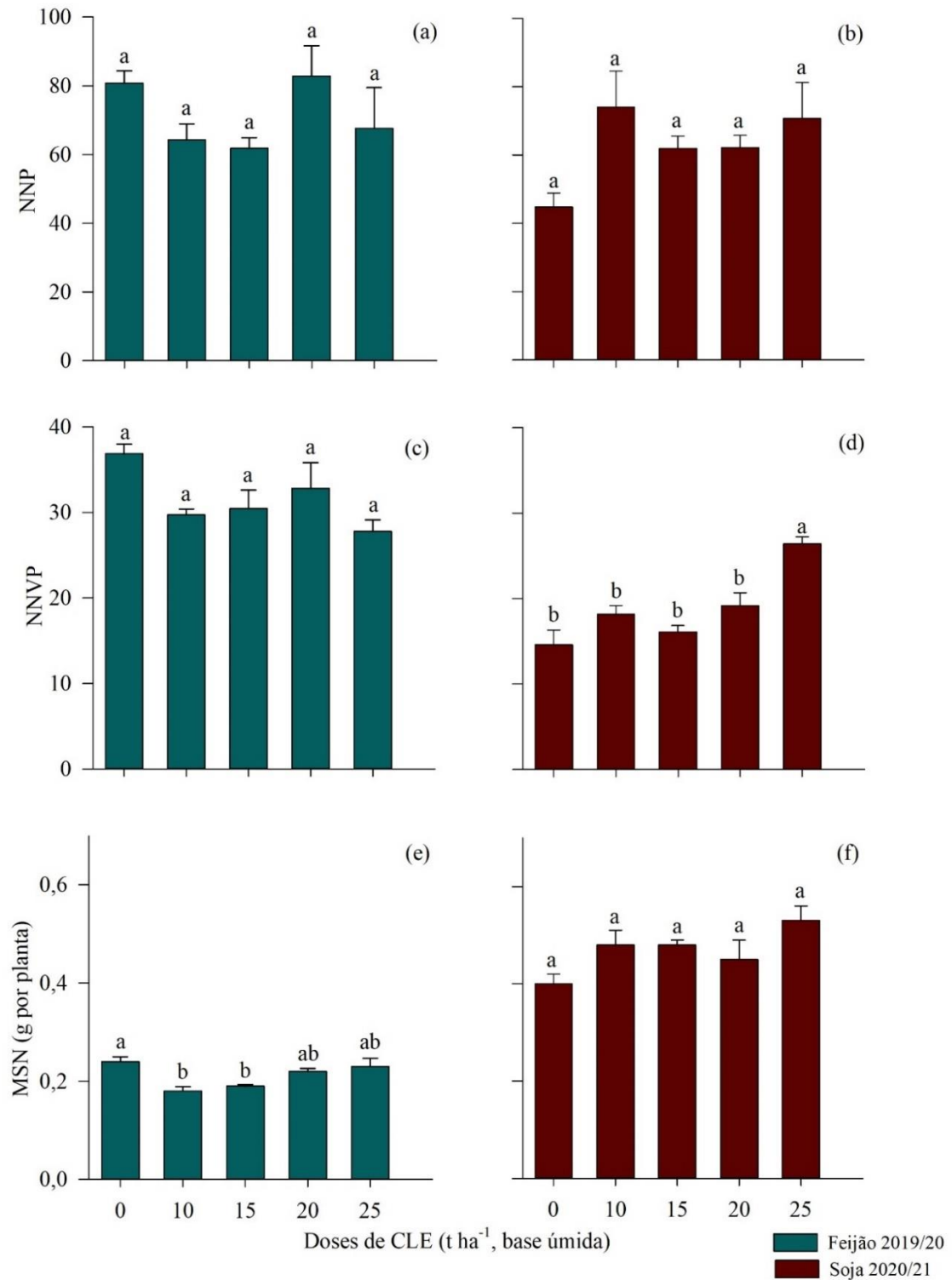
4.2 NODULAÇÃO, ENZIMAS, NITRATO E AMÔNIO

Para avaliar a eficiência da nodulação nas plantas de feijão e de soja, foram analisados em R5 e R2 (35 DAE), respectivamente, o número de nódulos por planta (NNP), o número de nódulos viáveis por planta (NNVP) e a matéria seca dos nódulos (MSN) (Figura 4). Assim, observou-se que o NNP e o NNVP no feijão (Figura 4a e 4c), bem como o NNP e a MSN na soja (Figura 4b e 4f) não diferiram entre os tratamentos em função do efeito residual das doses de CLE avaliadas. Todavia, os valores de MSN no feijão diferiram entre as doses avaliadas, no qual o tratamento controle e as doses de 20 e 25 t ha⁻¹ de CLE apresentaram os maiores valores, sendo de 0,24, 0,22 e 0,23 g por planta, respectivamente (Figura 4e). Na cultura da soja, os valores do NNVP diferiram entre as doses avaliadas, no qual, o residual da maior dose de CLE (25 t ha⁻¹ de CLE) foi a que propiciou o maior número de nódulos viáveis, sendo obtida uma média de 26 nódulos por planta (Figura 4d).

Foi possível verificar que o efeito residual das aplicações de CLE afetaram a atividade da nitrato redutase (NR) e o conteúdo de nitrato (NT) em soja (Figuras 5b e 5d) e, também, a atividade da urease (UR) e o conteúdo de amônio (AM) no feijão e na soja (Figuras 5e, 5g, 5f e 5h), respectivamente. Assim, no feijoeiro, os maiores valores da atividade da UR foram verificados nos tratamentos que receberam as doses de 15 e 20 t ha⁻¹ de CLE (variação de 0,02 a 0,03 $\mu\text{mol N-NH}_4^+ \text{ g}^{-1} \text{ MF h}^{-1}$) (Figura 5e). Já para a AM, ficou evidente que a aplicação consecutiva da maior dose (25 t ha⁻¹) do CLE promoveu os maiores ganhos dessa variável (0,19 $\mu\text{mol gMF}^{-1}$) (Figura 5g). Não houve diferença entre os tratamentos testados em relação a atividade da enzima NR e ao conteúdo de NT no feijão (Figuras 5a e 5c.)

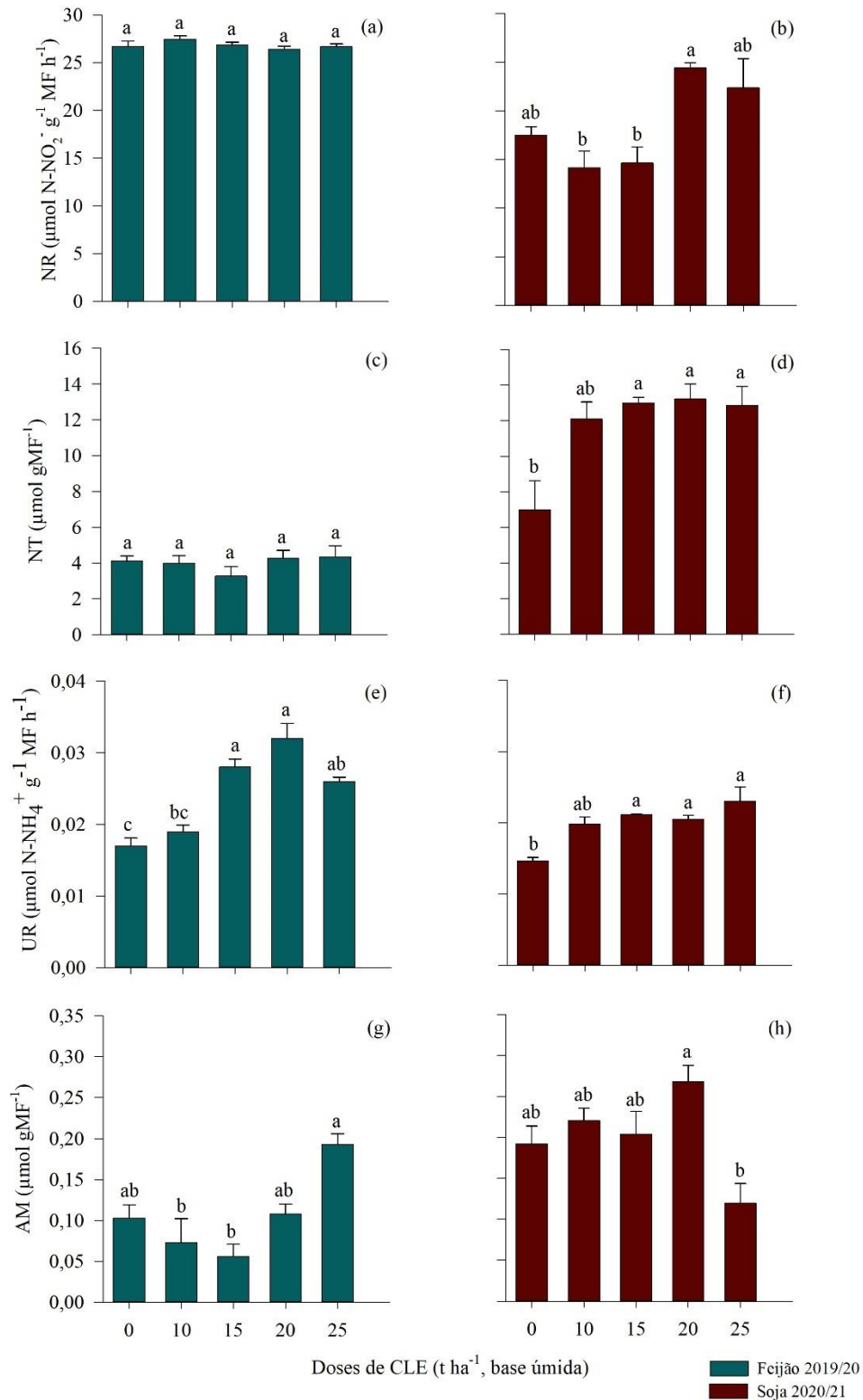
Na soja, as doses de 20 e 25 t ha⁻¹ de CLE aumentaram a atividade da NR, com valores entre 24,39 e 22,36 $\mu\text{mol N-NO}_2^- \text{ g}^{-1} \text{ MF h}^{-1}$, respectivamente (Figura 5b). O conteúdo de NT na soja aumentou à medida que se aumentou a dose de CLE aplicada em relação ao tratamento controle, encontrando o maior valor na dose de 20 t ha⁻¹ (13,23 $\mu\text{mol gMF}^{-1}$) (Figura 5d). Ainda na soja, a atividade da UR também sofreu influência do CLE, com aumento em sua atividade na presença das doses de CLE (Figura 5f). O conteúdo de AM também foi influenciado pelo efeito residual do CLE, no qual o maior valor foi encontrado na dose de 20 t ha⁻¹ de CLE (0,20 $\mu\text{mol gMF}^{-1}$) e o menor na dose de 25 t ha⁻¹ de CLE (0,09 $\mu\text{mol gMF}^{-1}$) (Figura 5h).

Figura 4 - Número de nódulos por planta (NNP) (a,b), número de nódulos viáveis por planta (NNVP) (c,d) e matéria seca dos nódulos (MSN) (e,f) em plantas de feijão e de soja cultivadas sob o efeito residual da aplicação de doses de composto de lodo de esgoto (CLE). Médias $\pm$ erro padrão seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.



Fonte: próprio autor.

Figura 5 – Nitrato redutase (NR) (a,b), nitrato (NT) (c,d), urease (UR) (e,f) e amônio (AM) (g,h) em plantas de feijão e de soja cultivadas sob o efeito residual da aplicação de doses de composto de lodo de esgoto (CLE). Médias $\pm$ erro padrão seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

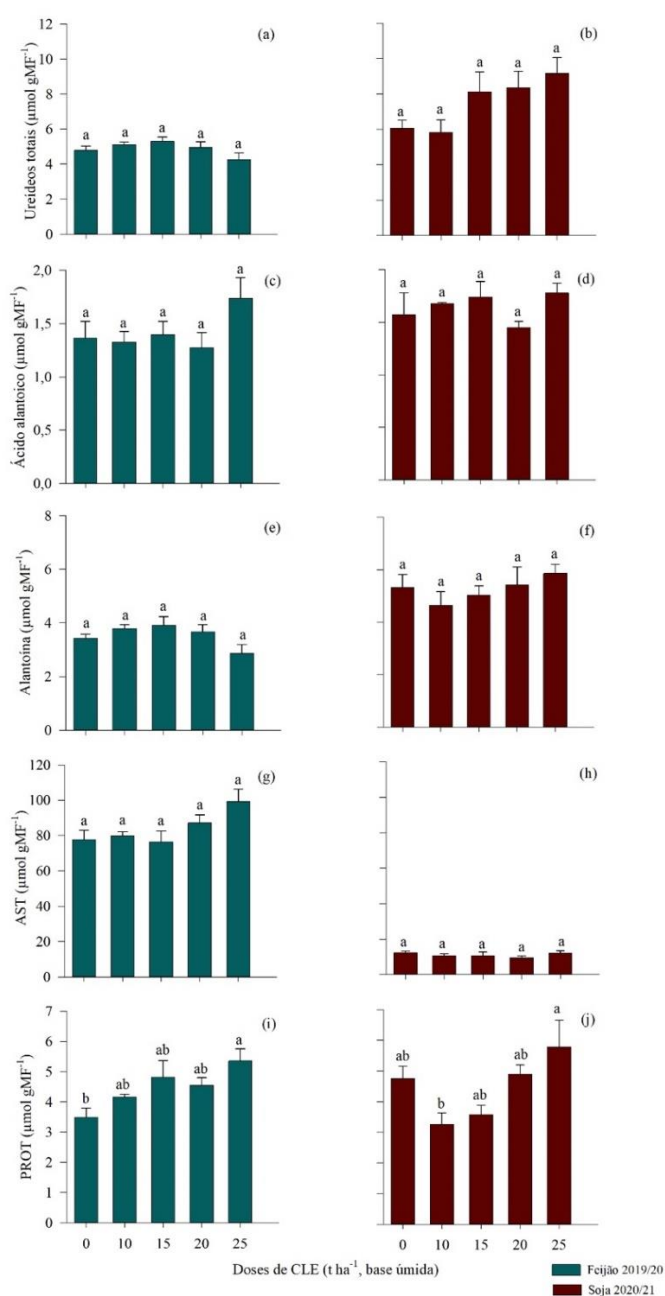


Fonte: próprio autor.

4.3 UREÍDEOS, AMINOÁCIDOS E PROTEÍNA

Não houve diferença entre as médias obtidas para o conteúdo de ureídeos totais, ácido alantóico e alantoína no feijão e na soja (Figuras 6a, 6b, 6c, 6d, 6e e 6f).

Figura 6 – Ureídeos totais (a,b), ácido alantóico (c,d), alantoína (e,f), aminoácidos solúveis totais (AST) (g,h) e proteína (PROT) (i,j) em plantas de feijão e de soja cultivadas sob o efeito residual da aplicação de doses de composto de lodo de esgoto (CLE). Médias $\pm$ erro padrão seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.



Fonte: próprio autor.

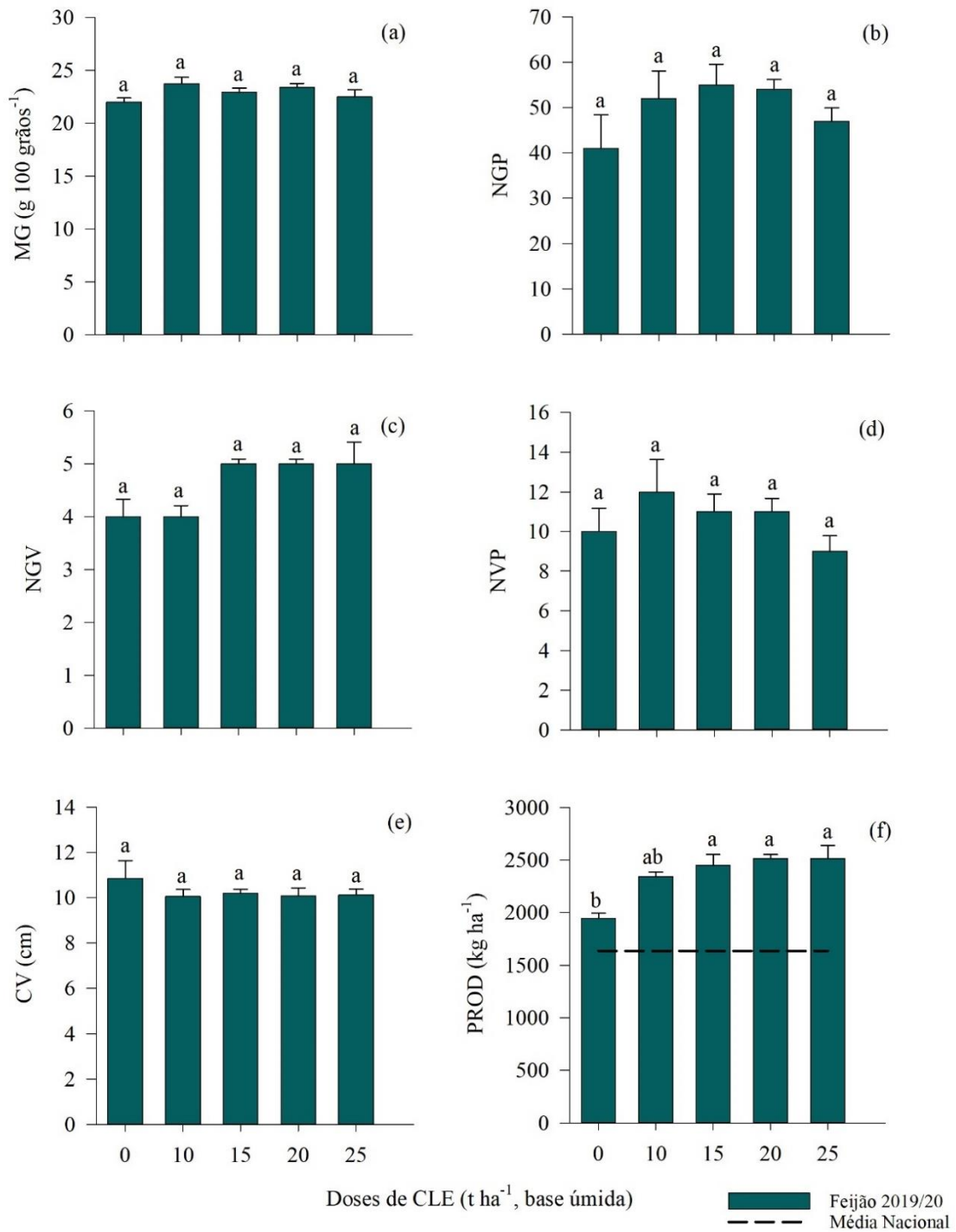
Também não houve diferença entre os tratamentos testados em relação ao conteúdo de aminoácidos solúveis totais (AST) nas duas culturas (Figuras 6g e 6h). Notou-se haver diferença quanto às proteínas nas duas culturas. No feijoeiro, foi verificado maior valor ($5,35 \mu\text{mol gMF}^{-1}$) dessa variável na parcela que recebeu a maior quantidade de CLE (25 t ha^{-1}) (Figura 6i). Na cultura da soja, observa-se o mesmo comportamento do feijão, que o maior conteúdo de PROT foi encontrado na dose de 25 t ha^{-1} de CLE, com $5,78 \mu\text{mol gMF}^{-1}$, sendo diferente somente do tratamento com a dose de 10 t ha^{-1} de CLE (Figura 6j).

4.4 COMPONENTES DE PRODUÇÃO E PRODUTIVIDADE

Para os componentes de produção do feijão foram analisados a massa de 100 grãos (MG), o número de grãos por planta (NGP), o número de grãos por vagem (NGV), o número de vagens por planta (NVP), o comprimento de vagem (CV) e a produtividade (PROD). Não houve influência do efeito residual das aplicações de CLE para MG, NGP, NGV, NVP e CV (Figuras 7a, 7b, 7c, 7d e 7e). Em relação a produtividade, pôde-se verificar diferença entre os tratamentos estudados no qual houve uma variação de 1945,27 a 2515,72 kg ha^{-1} , sendo que os maiores valores foram encontrados à partir da dose de 15 t ha^{-1} de CLE (Figura 7f).

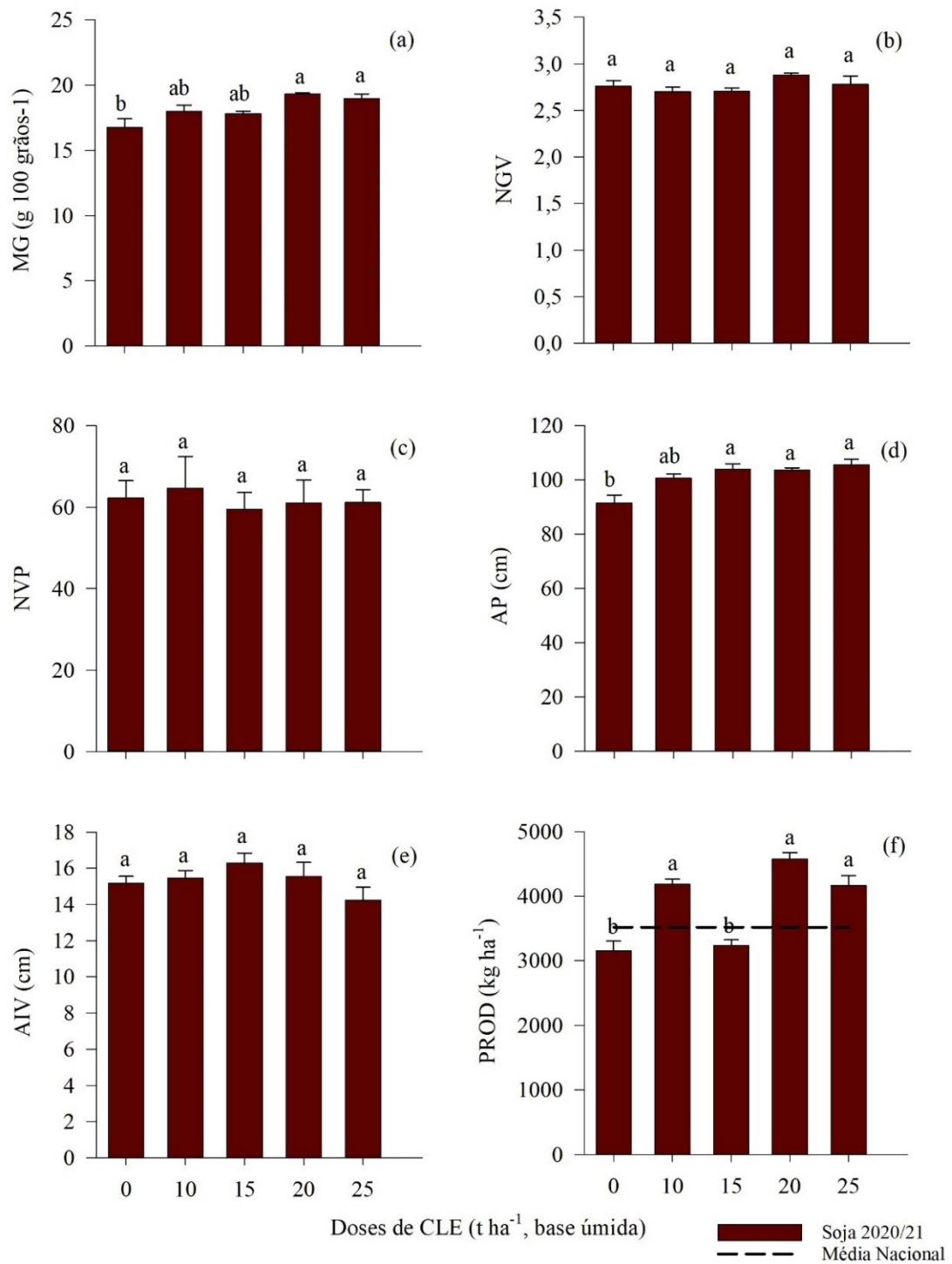
Na soja, os componentes de produção avaliados foram a massa de 100 grãos (MG), o número de grãos por vagem (NGV), o número de vagens por planta (NVP), altura de planta (AP), altura de inserção da primeira vagem (AIV) e produtividade (PROD). Nota-se que o NGV, NVP e AIV não foram influenciados pelo efeito residual da aplicação de doses de CLE (Figuras 8b, 8c e 8e). Já MG, AP e PROD obtiveram influência do efeito residual das aplicações de CLE (Figura 8a, 8d e 8f). Para a MG, as duas maiores doses (20 e 25 t ha^{-1} de CLE) apresentaram 19,32 g e 18,97 g (Figura 8a), o que implica que estes grãos tiveram maior acúmulo de fotoassimilados. Para AP, as três maiores doses (15 , 20 e 25 t ha^{-1} de CLE) apresentaram os maiores valores, sendo 103,93, 103,51 e 105,52 cm de altura, respectivamente (Figura 8d). Na produtividade, pode-se notar que a dose de 20 t ha^{-1} de CLE foi a que apresentou maior ganho de produtividade, com um valor de 4574,51 kg ha^{-1} , seguida da dose 10 t ha^{-1} (4184,43 kg ha^{-1}) e da dose de 25 t ha^{-1} (4162,63 kg ha^{-1}) (Figura 8f).

Figura 7 - Massa de 100 grãos (MG) (a), número de grãos por planta (NGP) (b), número de grãos por vagem (NGV) (c), número de vagens por planta (NVP) (d), comprimento de vagem (CV) (e) e produtividade (PROD) (f) de plantas de feijão cultivadas sob o efeito residual da aplicação de doses de composto de lodo de esgoto (CLE). Médias $\pm$ erro padrão seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. Produtividade média no Brasil (CONAB, 2020).



Fonte: próprio autor.

Figura 8 - Massa de 100 grãos (MG) (a), número de grãos por vagem (NGV) (b), número de vagens por planta (NVP) (c), altura de planta (AP) (d), altura de inserção da primeira vagem (AIV) (e) e produtividade (PROD) (f) de plantas de soja cultivadas sob o efeito residual da aplicação de doses de composto de lodo de esgoto (CLE). Médias $\pm$ erro padrão seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. Produtividade média no Brasil (CONAB, 2021).



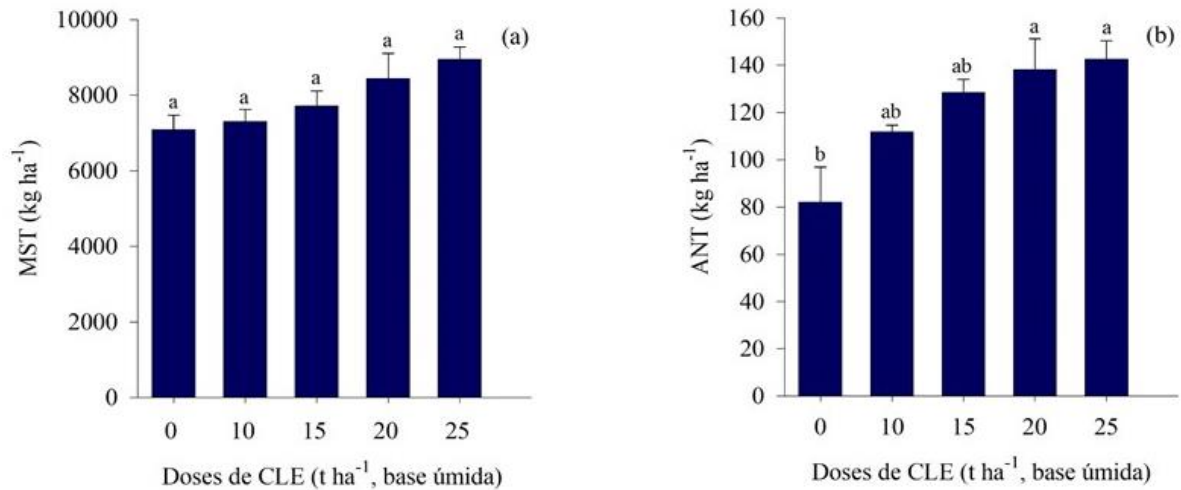
Fonte: próprio autor.

4.5 PRODUÇÃO DE FITOMASSA E ACÚMULO DE N DO CAPIM-MARANDU

Na figura 9 estão apresentados a matéria seca total (MST) e o acúmulo de N total (ANT) no capim-marandu após dois cortes (70 e 140 DAE) na safra 2019/20. O efeito residual do CLE não alterou a MST do capim-marandu (Figura 9a), sendo que os valores encontrados variaram de 7090 a 8947 kg ha⁻¹, apresentando um ganho de 26% de MST. Por outro lado, pôde-se notar que o ANT foi influenciado pelo efeito residual das sucessivas aplicações do CLE, no qual o tratamento controle diferiu dos tratamentos que receberam as maiores doses do CLE (Figura 9b). Notou-se, também, que as doses de CLE propiciaram incremento no acúmulo de N no capim-marandu.

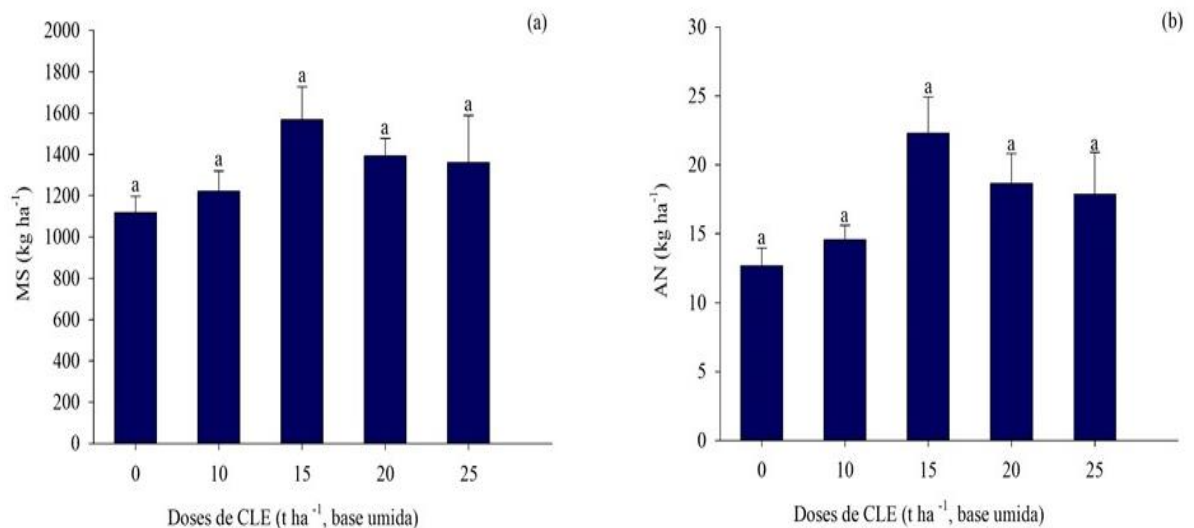
Não houve efeito do residual das aplicações de CLE na matéria seca (MS) e no acúmulo de nitrogênio (AN) no capim-marandu aos 60 DAE no ano agrícola 2020/21 (Figura 10a e 10b). Os valores encontrados para MS variaram de 1118 a 1567 kg ha⁻¹, que representa um ganho de 40% de MS. (Figura 10a). As quantidades acumuladas de N variaram de 13 a 22 kg ha⁻¹ de N por planta (Figura 10b).

Figura 9 - Matéria seca total (MST) (a) e acúmulo de nitrogênio total (ANT) (b) em dois cortes do capim-marandu na safra 2019/20, cultivado sob o efeito residual da aplicação de doses de composto de lodo de esgoto (CLE). Médias $\pm$ erro padrão seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.



Fonte: próprio autor.

Figura 10 - Matéria seca (MS) (a) e acúmulo de nitrogênio (AN) (b) do capim-marandu no ano agrícola 2020/21 cultivado sob o efeito residual da aplicação de doses de composto de lodo de esgoto (CLE). Médias $\pm$ erro padrão seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.



Fonte: próprio autor.

5 DISCUSSÃO

O índice de clorofila Falker (ICF) é um importante parâmetro para se avaliar de forma indireta o teor de clorofila, correlacionando-se com os teores de N na planta, visto que este nutriente faz parte da estrutura molecular da clorofila (FILLA *et al.*, 2020). No feijoeiro, notou-se influência do efeito residual das doses de CLE, com o maior valor (38,18) encontrado para a dose de 10 t ha⁻¹ de CLE. Tais resultados divergem dos encontrados por Nakao (2015), que não encontrou influência da adubação com composto orgânico no ICF do feijoeiro, onde os valores variaram entre 38,17 e 41,17. Na soja, observou-se que não houve influência do efeito residual da aplicação de CLE, de modo contrário ao estudo de Ragagnin *et al.* (2013), que testando doses (1,0; 2,0; 4,0 e 8,0 t ha⁻¹) por meio do material orgânico da cama de frango, verificaram maiores teores de clorofila comparados ao tratamento controle.

O efeito residual das sucessivas aplicações de CLE não aumentaram o teor de N foliar no feijão e na soja. Porém, esses teores se mantiveram dentro da faixa adequada para ambas as culturas, (30–50 g kg⁻¹ no feijão e 40–54 g kg⁻¹ na soja). Este fato deve estar relacionado ao maior teor de N potencialmente mineralizável no solo permitindo uma liberação e aproveitamento pelas culturas ao longo do seu ciclo de desenvolvimento, como ocorre com o feijoeiro (BETTIOL e GHINI, 2011). Boeira & Maximiliano (2009) relataram que há efeito das aplicações de lodo anteriores sobre o potencial de mineralização de N e que doses mais altas levam ao acúmulo de NO₃⁻ no solo. Sabe-se que o nitrato no solo pode ser facilmente perdido por lixiviação. Por isso, deve-se sempre optar pela aplicação de doses adequadas de CLE visando manter a nutrição das culturas e evitando possíveis riscos ao ambiente (MORETTI *et al.*, 2015; RIGBY *et al.*, 2016). Ademais, é fundamental que ocorra a rotação das culturas e uso de plantas de cobertura para que parte desse N seja recuperado por meio da ciclagem (ESPINDULA *et al.*, 2010; BORGES *et al.*, 2014).

A MSPA, a MSR, o ANPA e o ANR da soja aumentaram com o residual da aplicação de doses de CLE. Tais resultados estão de acordo com outros estudos, em que foi relatado que o efeito residual de aplicações de LE proporcionou a liberação lenta de nutrientes, no qual o sucesso desta matéria-prima dependerá das condições do processo de obtenção, das doses utilizadas, do tipo de solo e da cultura cultivada (BREULMANN *et al.*, 2014; MELO *et al.*, 2018). Yuruk e Bozkurt (2006) relataram que os tratamentos com LE aumentaram o rendimento de grãos e biomassa de feijão

comum e grão de bico (*Cicer arietinum* L.), e não causaram qualquer desequilíbrio na nutrição dessas plantas.

Alguns estudos já evidenciaram que o LE pode favorecer a nodulação em plantas leguminosas, como em soja e feijão fava (REBAH *et al.*, 2007; EID *et al.*, 2018). Além disso, Rebah *et al.* (2007) indicaram que vários componentes do LE são essenciais para aumentar a atividade das bactérias fixadoras de N, sendo notável o favorecimento da nodulação com a utilização destes compostos orgânicos. Em nosso estudo, o CLE alterou a matéria seca dos nódulos de feijão e aumentou o número de nódulos viáveis na soja, com o aumento das doses de CLE. Diversos estudos apresentam que as análises realizadas com número de nódulos totais e matéria seca do nódulo (FERREIRA, CASTRO, 1995; MARTINS *et al.*, 2022) são eficientes para estimar a FBN. Desta forma, em estudo realizado para avaliar a FBN com o uso de LE compostado foi constatado aumento número de nódulos até uma dose de 19 t ha⁻¹ de LE e aumento na matéria seca em doses de 30 e 40 t ha⁻¹, quando associado a inoculação de sementes (LOBO *et al.*, 2012).

Vale ressaltar que o aumento dos nódulos viáveis da soja em nosso estudo indica uma FBN eficiente na cultura da soja e que não foi afetada negativamente pelo CLE, como já concluíram Souza *et al.* (2009), que uma aplicação de LE em doses de até 6 t ha⁻¹ não interfere negativamente na nodulação na soja no período de dois anos. Currie *et al.* (2003) demonstraram, em experimento realizado em condições de campo, que a aplicação de LE pode incrementar as taxas de FBN na cultura da soja.

A concentração de nitrato celular é o principal fator que controla a expressão de NR, pois é esta enzima que irá reduzir o nitrato no ambiente celular. Se a concentração de NO₃⁻ diminui, consequentemente, a atividade de NR diminuirá ou também, com a adição de N-NO₃⁻, espera-se que haja maior teor de nitrato e atividade de NR (HIREL; KRAPP, 2020). Neste estudo, para o feijão, esta relação se manteve estável e não teve influência das aplicações do CLE. Para a soja, esta relação apresentou-se verdadeira, pois as doses de CLE influenciaram o conteúdo de nitrato e, consequentemente, na atividade da NR das folhas de soja, no qual as maiores doses de CLE apresentaram maiores médias para estes dois parâmetros avaliados.

Foi observado que o CLE alterou a atividade enzimática da urease e, consequentemente, o conteúdo de amônio em folhas do feijoeiro e de soja. Porém, na soja, a maior dose de CLE (25 t ha⁻¹) apresentou a menor média de teor de amônio. A atividade da urease é muito influenciada pelo tipo de adubação nitrogenada

adotada, visto que a planta pode absorver o N na forma de ureia devido a transportadores específicos (WITTE, 2011). Além disso, a ureia também é gerada dentro da planta por meio do catabolismo da arginina (RENNENBERG *et al.*, 2010; WITTE, 2011). Sendo assim, a ureia no citosol da planta é hidrolisada pela urease e libera amônia/amônio que será utilizada para a formação de aminoácidos (CARTER *et al.*, 2009; WITTE, 2011).

Os materiais envolvidos na compostagem do lodo podem apresentar influência nesta característica da urease e do amônio, pois substâncias peptídicas como proteínas e aminoácidos e também ácidos nucléicos presentes no lodo, podem liberar N na forma de ureia e amônio no solo (SHARMA *et al.*, 2017; RAHEEM *et al.*, 2018). O processo de decomposição das proteínas é realizado em várias etapas e libera diversos aminoácidos. Estes aminoácidos sofrem um processo de desaminação liberando o grupo amina na forma de amônia, que, no solo, reagirá rapidamente com a água para formar amônio para ser absorvido pelas plantas (VIEIRA, 2017). Sendo assim, todos estes processos de catabolismo e metabolismo envolvidos com a urease e o amônio parecem ter sofrido influência do CLE, porém os estudos para comprovar estes efeitos ainda são escassos.

O efeito residual das aplicações de CLE influenciou positivamente no teor de proteínas do feijão e da soja. O aumento no teor de proteínas pode ser a compensação encontrada neste estudo para a manutenção da N-fixação, já que não tivemos alterações no metabolismo de ureídeos, pois estas moléculas são as principais formas de transporte de N dos nódulos para os outros tecidos das plantas de feijão e de soja que serão utilizadas na biossíntese de proteínas (DÍAS-LEAL *et al.*, 2012; HIREL; KRAPP, 2020).

As aplicações consecutivas de CLE incrementaram a altura das plantas e a massa de 100 grãos da soja, com os maiores valores encontrados nas maiores doses aplicadas (20 e 25 t ha⁻¹ de CLE). O mesmo foi observado em um estudo que se testou adubação orgânica por meio da cama de frango, com as doses de 3, 6 e 9 t ha⁻¹ em um CAMBISSOLO. Foi verificado que para o desenvolvimento e os componentes de produção da cultura da soja, houve aumento na altura de planta e na massa de 1.000 grãos, além da altura de inserção da primeira vagem, no número de vagens por planta e o no rendimento de grãos de soja (CARVALHO *et al.*, 2011).

Os fertilizantes à base de biossólidos melhoram a produtividade das culturas e aumentam a disponibilidade de amônio (NH₄⁺) e nitrato (NO₃⁻) no solo devido à

mineralização do N-orgânico (PRICE *et al.*, 2015; WANG *et al.*, 2017; WIJESEKARA *et al.*, 2017). A utilização do CLE neste estudo influenciou a produtividade do feijoeiro e da soja e manteve os teores de N dentro do recomendado para as culturas. Para o feijoeiro, as plantas que receberam doses de CLE apresentaram uma maior produtividade quando comparada às plantas cultivadas no tratamento controle, sendo observado uma produção de 2515 kg ha⁻¹ na maior dose do composto. Somente a dose de 10 t ha⁻¹ de CLE foi semelhante ao controle, porém todos os tratamentos estudados obtiveram uma produtividade acima da média nacional (1636 kg ha⁻¹) para a safra 2019/20 do feijão de 3ª safra, segundo o levantamento da CONAB (2020). Para a cultura da soja, as médias obtidas nas doses de 10, 20 e 25 t ha⁻¹ de CLE se mantiveram acima da média nacional (3527 kg ha⁻¹) para a safra 2020/21, conforme o levantamento da CONAB (2021).

Tais respostas já foram evidenciadas por Santos *et al.* (2011), que observaram o aumento na produtividade do feijoeiro usando LE compostado derivado do tratamento de efluentes de uma indústria de bebidas e papel. Pesquisa realizada com o objetivo de avaliar as mudanças nos conteúdos de matéria orgânica e formas de N em solos corrigidos com lodo, bem como o crescimento de plantas de milho (*Zea mays* L.) e feijão fava (*Vicia faba* L.), também já demonstrou que o efeito residual do CLE promoveu maior resposta na produtividade de grãos de feijão fava (ELSALAM *et al.*, 2021). Além disso, nossos valores de produtividade da soja são semelhantes aos encontrados (3222 kg ha⁻¹) em estudo no qual foi realizado adubação com N-mineral na soja aplicando-se uma dose de 300 kg ha⁻¹ de N na forma de ureia (KUBAR *et al.*, 2021). Na presente pesquisa, com as doses aplicadas de CLE, obtivemos uma produtividade variando de 3240 a 4574 kg ha⁻¹.

Observou-se, na primeira safra (2019/20) de avaliação do capim-marandu, que as doses de CLE propiciaram incremento de N, principalmente nas maiores doses (138,19 e 142,6 kg ha⁻¹). Já na segunda safra de avaliação (2020/21), não houve incremento de matéria seca e de N no capim-marandu. A aplicação de CLE a longo prazo pode promover o incremento dos teores disponíveis de N no solo aumentando as quantidades absorvidas pelo capim-marandu, uma vez que há um maior acúmulo deste nutriente, principalmente, nas maiores doses de CLE fornecidas. A maior disponibilidade de N está associada também ao efeito residual do CLE no solo, que age como fonte de matéria orgânica melhorando a fertilidade e fornecendo N ao sistema, fato este já comprovado para a forrageira festuca (*Festuca*

arundinacea Schreb.), em estudo conduzido por 19 anos por meio da aplicação de bio sólidos (COGGER *et al.*, 2013).

Também já foi evidenciado em estudo de Vendruscolo *et al.* (2016), que o residual da aplicação de LE na recuperação de uma área degradada e o manejo com braquiária (*Urochloa decumbes*) influenciaram nos atributos químicos, principalmente nos teores de P e K, do solo ao longo de nove anos de avaliação.

Além disso, os sistemas de cultivo com forrageiras antecedendo a cultura principal, mostraram efeitos positivos sobre as características físico-químicas do solo, culminando no aumento da produtividade do feijoeiro sobre a palhada de *U. ruziziensis* (SABUNDJIAN *et al.*, 2013; AMARAL *et al.*, 2016) e no alto rendimento de grãos de soja e maior ciclagem de nutrientes sobre a palhada de *Urochloa brizantha* (MORAES *et al.*, 2014; TANAKA *et al.*, 2019). Outro efeito importante destas gramíneas é a elevada liberação e ciclagem de nutrientes, em especial de N (BORGES *et al.*, 2014), P e K (PACHECO *et al.*, 2011).

Acredita-se que na segunda safra de avaliação, a não influência do residual do CLE encontrada sobre o capim-marandu pode ter ocorrido devido ao menor tempo de cultivo deste no solo em comparação com a safra anterior e também com a relação de imobilização-mineralização de N no solo. O tipo de palha na superfície do solo, como aquelas de alta relação C/N, promove aumento na taxa de imobilização do N pelos microrganismos do solo, além de influenciar o manejo das culturas, especialmente, o da adubação nitrogenada (CARMEIS FILHO *et al.*, 2014; AMARAL *et al.*, 2016). No início do SPD, como é o caso deste estudo, a imobilização de nutrientes e matéria orgânica no solo tende a ser maior que a mineralização, o que, no entanto, é alterado com o tempo, que aumenta a taxa de mineralização (SIQUEIRA NETO *et al.*, 2010). Contudo, a consolidação do SPD conduz ao equilíbrio entre os processos de mineralização e imobilização (TORRES *et al.*, 2008; TEIXEIRA *et al.*, 2011), além de amenizar as perdas de N do sistema mediante a ciclagem e imobilização em sua fitomassa (LARA CABEZAS *et al.*, 2004).

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O efeito residual de sucessivas aplicações de doses de CLE como fonte de N na rotação feijão-*Urochloa brizantha*-soja sob plantio direto no Cerrado pode suprir as necessidades deste nutriente pelas culturas estudadas, principalmente, nas maiores doses aplicadas (20 e 25 t ha⁻¹ de CLE, base úmida).

Por meio das duas aplicações de doses de CLE em solo tropical altamente intemperizado, foi possível notar efeito residual desse fertilizante em função do aumento na produtividade de grãos do feijoeiro e de soja e do adequado teor de N foliar nas culturas. Houve alteração da nodulação em ambas as culturas, com o aumento de matéria seca de nódulos no feijão e o aumento de nódulos viáveis na soja.

Foi possível notar que o conteúdo de proteínas aumentou com o efeito residual do CLE. A mineralização do N presente no CLE influenciou no conteúdo de nitrato e na atividade das enzimas nitrato redutase e urease na soja. A atividade da urease e o conteúdo de amônio nas culturas foram influenciadas pelo efeito residual do composto, que pode ter ocorrido devido ao metabolismo de ureia na planta.

O efeito residual das aplicações de CLE em solo de Cerrado pode suprir a demanda nutricional de N para o capim-marandu a longo prazo sob PD e promover maior ciclagem de N para as culturas seguintes, levando ao equilíbrio entre as taxas de imobilização e mineralização de N.

Recomenda-se que mais estudos sejam realizados com CLE advindos de diferentes origens visando ampliar o conhecimento sobre os efeitos no metabolismo de N e também sobre as taxas de imobilização/mineralização desse nutriente no sistema microrganismos-plantas-composto em área cultivadas sob sistema plantio direto.

O aproveitamento do LE na forma de fertilizante orgânico (CLE) pode contribuir para mitigar os problemas ocasionados (i.e., insegurança alimentar) pela carência de fertilizantes minerais disponíveis para comercialização na agricultura brasileira, além de diminuir as dificuldades impostas para o uso desse resíduo, em especial, no Estado de São Paulo. Ainda, trata-se de adequado destino final para o LE que continua sendo produzido em larga escala no Brasil.

REFERÊNCIAS

- ABREU-JUNIOR, C. H.; OLIVEIRA, M. G.; CARDOSO, P. H. S.; MANDU, T. S.; FLORENTINO, A. L.; OIVEIRA, F. C.; REIS, J. V.; ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; NOGUEIRA, T. A. R.; CAPRA, G. F.; HE, Z. Sewage sludge application in *Eucalyptus urograndis* plantation: availability of phosphorus in soil and wood production. **Frontiers in Environmental Science**, Piracicaba, v. 8, n. 116, p. 1–14, 2020.
- AFÁZ, D. C. S.; BERTOLAZI, K. B.; VIANI, R. A. G.; SOUZA, C. F. Composto de lodo de esgoto para o cultivo de eucalipto. **Revista Ambiente e Água**, [s. l.], v. 12, n. 1, p. 112–123, 2017.
- ALBUQUERQUE, H. C.; ZUBA JUNIO, G. R.; SAMPAIO, R. A.; FERNANDES, L. A.; ZONTA, E.; BARBOSA, C. F. Yield and nutrition of sunflower fertilized with sewage sludge. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 19, n. 6, p. 553–559, 2015.
- ALVARENGA, A. C.; SAMPAIO, R. A.; PINHO, G. P.; CARDOSO, P. H.; SOUSA, I. P.; BARBOSA, M. H. Phytoremediation of chlorobenzenes in sewage sludge cultivated with *Pennisetum purpureum* at different times. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 21, n. 8, p. 573–578, 2017.
- AMARAL, C. A.; PINTO, C. C.; FLÔRES, J. A.; MINGOTTE, F. L. C.; LEMOS, L. B.; FILHO, D. F. Produtividade e qualidade do feijoeiro cultivado sobre palhadas de gramíneas e adubado com nitrogênio em plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 51, n. 9, p.1602–1609, 2016.
- AMBROSANO, E. J.; TANAKA, R. T.; MASCARENHAS, H. A. A.; RAIJ van, B.; QUAGGIO, J. A.; CANTARELLA, H. Leguminosas e oleaginosas. In: RAIJ, B. van; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A.; FURLANI, A.M.C. **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. 2. ed. Campinas: Instituto Agrônômico de Campinas, 1997b. p. 189–191.
- ANDREOLI, C. V.; PEGORINI, E. S.; FERNANDES, F.; SANTOS, H. F. Land application of sewage sludge. **Sludge treatment and disposal**, p. 162–206, 2007.
- AWALE, R.; CHATTERJEE, A.; FRANZEN, D. Tillage and N-fertilizer influences on selected organic carbon fractions in a North Dakota silty clay soil. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 134, p. 213–222, 2013.
- BARBIERE JUNIOR, E.; ROSSIELLO, R. O. P.; SILVA, R. V. M. M.; RIBEIRO, R. C.; MORENZ, M. J. F. Um novo clorofilômetro para estimar teores de clorofila em folhas de capim Tifton 85. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 42, p. 2242–2245, 2012.
- BARBOSA, J. C.; MALDONADO JUNIOR, W. **AgroEstat- Sistema para Análises Estatísticas de Ensaios Agronômicos**. Jaboticabal: FCAV- UNESP, 2015.

BELHAJ, D.; ELLOUMI, N.; JERBI, B.; ZOUARI, M.; ABDALLAH, F. B.; AYADI, H.; KALLEL, M. Effects of sewage sludge fertilizer on heavy metal accumulation and consequent responses of sunflower (*Helianthus annuus*). **Environmental Science and Pollution Research**, Heidelberg, v. 23, p. 20168–20177, 2016.

BERTANZA, G.; BARONI, P.; CANATO, M. Ranking sewage sludge management strategies by means of Decision Support Systems: A case study. **Resources, Conservation and Recycling**, Amsterdam, v. 110, p. 1–15, 2016.

BERTON, R. S.; NOGUEIRA, T. A. R. Uso de lodo de esgoto na agricultura. In: COSCIONE, A. R.; NOGUEIRA, T. A. R.; PIRES, A. M. M. **Uso agrícola de lodo de esgoto: avaliação após a resolução no 375 do Conama**. FEPAF: Botucatu, 2010. p. 31–50.

BETTIOL, W.; GHINI, R. Impacts of Sewage Sludge in Tropical Soil: A Case Study in Brazil. **Applied and Environmental Soil Science**, London, v. 2011, p. 1–11, 2011.

BHATIA, S. K.; JOO, H. S.; YANG, Y. H. Biowaste-to-bioenergy using biological methods – A mini-review. **Energy Conversion and Management**, London, v. 177, p. 640–660, 2018.

BIELESKI, R. L.; TURNER, N. A. Separation and estimation of amino acids in crude plant extracts by thin-layer electrophoresis and chromatography. **Analytical Biochemistry**, Philadelphia, v. 17, p. 278–293, 1996.

BISWAS, B.; GRESSHOFF, P. The role of symbiotic nitrogen fixation in sustainable production of biofuels. **International journal of Molecular Sciences**, Basel, v. 15, n. 5, p. 7380–7397, 2014.

BITTENCOURT, S.; SERRAT, B. M.; AISSE, M. M.; GOMES, D. Sewage sludge usage in agriculture: a case study of its destination in the Curitiba metropolitan region, Parana, Brazil. **Water, Air and Soil Pollution**, Curitiba, v. 225, n. 9, p. 2074, 2014.

BOEIRA, R. C.; MAXIMILIANO, V. C. B. Mineralização de compostos nitrogenados de lodos de esgoto na quinta aplicação em Latossolo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 33, p. 711–722, 2009.

BOEIRA, R. C.; LIGO, M. A. V.; DYNIA, J. F. Mineralização de nitrogênio em solo tropical tratado com lodos de esgoto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 37, n. 11, p. 1639–1647, 2002.

BOLFE, E. L.; SANO, E. E.; CAMPOS, S. K. **Dinâmica agrícola no cerrado: análises e projeções**. Brasília, DF. Embrapa, 2020. 308 p.

BONETTI, J. A.; PAULINO, H. B.; SOUZA, E. D.; CARNEIRO, M. A. C.; CAETANO, J. O. Soil physical and biological properties in an integrated crop-livestock system in the Brazilian Cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 53, n. 11, p. 1239–1247, 2018.

BORGES, W. L. B.; FREITAS, R. S.; MATEUS, G. P.; SÁ, M. E.; ALVES, M. C. Absorção de nutrientes e alterações químicas em Latossolos cultivados com plantas de cobertura em rotação com soja e milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 38, p. 252–261, 2014.

BRADFORD, M. M. A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding. **Analytical Biochemistry**, Philadelphia, v. 72, p. 248–254, 1976.

BRASIL. **Resolução nº 498, de 19 de agosto de 2020**. Define critérios e procedimentos para produção e aplicação de biossólido em solos, e dá outras providências. Diário Oficial da União, Brasília, DF, ed.161, p. 265, 21 ago. 2020a. Seção 1.

BRASIL. **Instrução normativa nº 61, de 8 de julho de 2020**. Estabelece as regras sobre definições, exigências, especificações, garantias, tolerâncias, registro, embalagem e rotulagem dos fertilizantes orgânicos e dos biofertilizantes, destinados à agricultura. Diário Oficial da União, Brasília, DF, ed.134, p. 5, 15 jul. 2020b. Seção 1.

BREULMANN, M.; SCHULZ, E.; AFFERDEN, M.; FÜHNER, C. Effects of pyrolysis and HTC chars produced from sewage sludge in the plant-soil system. First results from a two years field experiment. Poster. **20th World Congress of Soil Science, Soil Embrace Life and Universe**. South Korea, 2014.

BUTENSCHOEN, O.; SCHEU, S.; EISENHAUER, N. Interactive effects of warming, soil humidity and plant diversity on litter decomposition and microbial activity. **Soil Biology and Biochemistry**, v.43, p.1902–1907, 2011.

CAIRES, E. F.; HALISKI, A.; BINI, A. R.; SCHARR, D. A. Surface liming and nitrogen fertilization for crop grain production under no-till management in Brazil. **European Journal of Agronomy**, Philadelphia, v. 66, p. 41–53, 2015.

CAMPOS, F. S.; ALVES, M. C.; SOUZA, Z. M.; PEREIRA, G. T. Atributos físico-hídricos de um Latossolo após a aplicação de lodo de esgoto em área degradada do Cerrado. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 41, p. 796–803, 2011.

CARMEIS FILHO, A. C. A.; CUNHA, T. P. L.; MINGOTTE, F. L. C.; AMARAL, C. B.; LEMOS, L. B.; FORNASIERI FILHO, D. Adubação nitrogenada no feijoeiro após palhada de milho e braquiaria no plantio direto. **Revista Caatinga**, Mossoró, v. 27, n. 2, p. 66–75, 2014.

CARTER, E. L.; FLUGGA, N.; BOER, J. L.; MULROONEY, S. B.; HAUSINGER, R. P. Interplay of metal ions and urease. **Metallomics**, Cambridge, v. 1, p. 207–221, 2009.

CARVALHO, E. R.; REZENDE, P. M.; ANDRADE, M. J. B.; PASSOS, A. M. A.; OLIVEIRA, J. A Fertilizante mineral e resíduo orgânico sobre características agrônômicas da soja e nutrientes no solo. **Revista Ciência Agronômica**, [s. l.], v. 42, p. 930–939, 2011.

CATALDO, D. A.; HAROON, M.; SCHRADER, L. E.; YOUNGS, V. L. Rapid Colorimetric Determination of Nitrate in Plant-Tissue by Nitration of Salicylic-Acid. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 6, p. 71–80, 1975.

CHU, M.; JAGADAMMA, S.; WALKER, F. R.; EASH, N. S.; BUSCHERMOHLE, M. J.; DUNCAN, L. A. Effect of multispecies cover crop mixture on soil properties and crop yield. **Agricultural & Environmental Letters**, Hoboken, v. 2, n. 170030, 2017.

COGGER, C.G.; BARY, A.I.; MYHRE, E.A.; FORTUNA, A.M. Biosolids applications to tall fescue have long-term influence on soil nitrogen, carbon, and phosphorus. **Journal Environmental Quality**, Madison, v. 42, p. 516–522, 2013.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO – CONAB. **Acompanhamento da Safra Brasileira de Grãos**. Brasília, DF, v. 8, safra 2020/21, n. 12, décimo segundo levantamento, setembro. 2021. Disponível em: <http://conab.gov.br/>. Acesso em: 03 abr. 2021.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO – CONAB. **Observatório agrícola – Acompanhamento da safra brasileira: grãos**. v. 7, n. 10, 2020. Disponível em: <http://conab.gov.br/>. Acesso em: 03 ago. 2020.

COSTA, N.R.; ANDREOTTI, M.; GAMEIRO, R. de A.; PARIZ, C.M.; BUZETTI, S.; LOPES, K.S.M. Adubação nitrogenada no consórcio de milho com duas espécies de braquiária em sistema plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 47, p. 1038–1047, 2012.

CURRIE, V.C.; ANGLE, J.S.; HILL, R.L. Biosolids application to soybeans and effects on input and output of nitrogen. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, Amsterdam, v. 97, p. 345–351, 2003.

DÍAZ-LEAL, J. L.; GÁLVEZ-VALSIVIESO, G.; FERNÁNDEZ, J.; PINEDA, M.; ALAMILLO, J. M. Developmental effects on ureide levels are mediated by tissue-specific regulation of allantoinase in *Phaseolus vulgaris* L. **Journal of Experimental Botany**, London, v. 63, p. 4095–4106, 2012.

EID, E. M.; ALRUMMAN, S. A.; EL-BEBANY, A. F.; FAWY, K. F.; TAHER, M. A.; HESHAM, A. L.; SHABOURY, G. A.; AHMED, M. T. The evaluation of sewage sludge application as a fertilizer for broad bean (*Faba sativa* Bernh.) crops. **Food and Energy Security**, Oxford, v. 7, p. 1–13, 2018.

ELMI, A.; AL-KHALDY, A.; ALOLAYAN, M. Sewage sludge land application: Balancing act between agronomic benefits and environmental concerns. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdam, v. 250, n. 119512, p. 1–6, 2020.

ELSALAM, H. E. A.; EL-SHARNOUBY, M. E.; MOHAMED, A. E.; RAAFAT, B. M.; EL-GAMAL, E. H. Effect of sewage sludge compost usage on corn and faba bean growth, carbon and nitrogen forms in plants and soil. **Agronomy**, Basel, v. 11, p. 1–20, 2021.

EPSTEIN, E. **Land application of sewage sludge and biosolids**. Boca Raton: CRC, 2003. 201 p.

ESPINDULA, M. C.; ROCHA, V. S.; SOUZA, M. A. de; GROSSI, J. A. S.; SOUZA, L. T. de. Doses e formas de aplicação de nitrogênio no desenvolvimento e produção da cultura do trigo. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 34, n. 6, p. 1404–1411, 2010.

FERNANDES, A. M.; ANDRADE, G. J. M. de; SOUZA, E. de F. C. de; ROSOLEM, A. Brachiaria species affecting soil nitrification. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 35, n. 1, p. 1699–1706, 2011.

FERRAZ, A.; MOMENTEL, L. T.; POGGIANI, F. Soil fertility, growth and mineral nutrition in *Eucalyptus grandis* plantation fertilized with different kinds of sewage sludge. **New Forests**, Piracicaba, v. 47, p. 861–876, 2016.

FERREIRA, C. I. A.; CALISTO, V.; CUERDA-CORREA, E. M.; OTERO, M.; NADAIS, H.; ESTEVES, V. I. Comparative valorisation of agricultural and industrial biowastes by combustion and pyrolysis. **Bioresource Technology**, Amsterdam, v. 218, p. 918–925, 2016.

FERREIRA, E. M.; CASTRO, I. V. nodulation and growth of subterranean clover (*Trifolium subterraneum* L.) in soils previously treated with sewage sludge. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v. 27, n. 1, p. 1177–1183, 1995.

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

FILLA, V. A.; COELHO, A. P.; LEAL, F. T.; BETTIOL, J. V. T.; LEMOS, L. B. Portable chlorophyll meter in monitoring and management of nitrogen in common bean cultivars. **Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias**, Mendoza, v. 52, p. 64–77, 2020.

FIORENTIN, C.F.; LEMOS, L.B.; JARDIM, C.A.; FORNASIERI FILHO, D. Formação e manutenção de palhada de gramíneas concomitante a influência da adubação nitrogenada em cobertura no feijoeiro irrigado em sistema de semeadura direta. **Bragantia**, Campinas, v. 70, p. 917–924, 2011.

FRANZINI, V. I.; MENDES, F. L.; MURAOKA, T.; TREVISAM, A. R.; ADU-GYAMFI, J. J. **Biological nitrogen fixation efficiency in brazilian common bean genotypes as measured by 15N methodology**. Optimizing Productivity of Food Crop Genotypes. In: Low Nutrient Soils. FAO, IAEA, Vienna, 2013, p. 299–309.

GANGBAZO, G.; PESANT, A. R.; BARNETT, G. M.; CHARUEST, J. P.; CLUIS, D. Water contamination by ammonium nitrogen following the spreading of hog manure and mineral fertilizers. **Journal of Environmental Quality**, Madison, v. 24, n. 3, p. 420–425, 1995.

GICHANGI, E. M.; NJARUI, D. M. G. GATHERU, M. Plant shoots and roots biomass of brachiaria grasses and their effects on soil carbon in the semi-arid tropics of Kenya. **Tropical and Subtropical Agroecosystems**, Merida, v. 20, n. 1, p. 65–74, 2017.

GRAHAM, P. H.; VANCE, C. P. Nitrogen fixation in perspective: an overview of research and extension needs. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 65, n.2–3, p. 93–206, 2000.

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

HARINDINTWALI, J. D.; ZHOU, J.; YANG, W.; GU, Q.; YU, X. Biochar-bacteria-plant partnerships: Eco-solutions for tackling heavy metal pollution. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, Philadelphia, v. 204, n. 111020, p. 1–14, 2020.

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

HERRIDGE, D. F.; PEOPLES, M. P.; BODDEY, R. M. Global inputs of biological nitrogen fixation in agricultural systems. **Plant Soil**, Dordrecht, v. 311, p. 1–18, 2008.

HIREL, B.; KRAPP, A. Nitrogen Utilization in Plants I Biological and Agronomic Importance. **Encyclopedia of biochemistry**. 3rd ed. Paris: [s. n], 2020.

HOGAN, M. E.; SWIFT, I. E.; DONE, H. J. Urease assay and ammonia release from tissue. **Phytochemistry**, Oxford, v. 22, n. 1, p. 663–667, 1983.

HUNGRIA, M.; MENDES, I. C. Nitrogen fixation with soybean: the perfect symbiosis? In: BRUIJN, F. J. (ed.) **Biological nitrogen fixation**. Hoboken: John Wiley and Sons, Inc. pp. 1009–1024, 2015.

HUNGRIA, M.; FRANCHINI, J. C.; CAMPO, R. J.; CRISPINO, C. C.; MORAES, J. Z.; SIBALDELLI, R. N. R.; MENDES, I. C.; ARIHARA, J. Nitrogen nutrition of soybean in Brazil: contributions of biological N₂ fixation and N fertilizer to grain yield. **Canadian Journal of Plant Science**, New York, v. 86, p. 927–939, 2006.

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

JAKUBUS. M.; GRACZYK, M. Microelement variability in plants as an effect of sewage sludge compost application assessed by different statistical methods. **Agronomy**, Madison, v. 10, n. 5, p. 642, 2020.

JEMAI, I.; AISSA, N.B.; GUIRAT, S.B.; BEN-HAMMOUDA, M.; GALLALI, T. Impact of three and seven years of no-tillage on the soil water storage, in the plant root zone, under a dry subhumid Tunisian climate. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 126, p. 26–33, 2013.

KACPRZAK, M.; NECZAJ, E.; FIJAŁKOWSKI, K.; GROBELAK, A.; GROSSER, A.; WORWAG, M.; RORAT, A.; BRATTEBO, H.; ALMAS, A.; SINGH, B. R. Sewage sludge disposal strategies for sustainable development. **Environmental Research**, Maryland Heights, Czestochowa, v. 156, p. 39–46, 2017.

KEENEY, D. R.; NELSON, D. W. Nitrogen: inorganic forms. *In*: PAGE AL; MILLER RH; KEENEY DR. 2nd ed. **Methods of soil analysis**. Madison: American Society of Agronomy, p. 625–642, 1982.

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

KUBAR, M. S.; SHAR, A. H.; KUBAR, K A.; RIND, N. A.; ULLAH, H.; KALHORU, S. A.; WANG, C.; FENG, M.; GUJAR, A.; SUN, H.; YANG, W.; EL ENSHASY, H.; BRESTIC, M.; ZIVCAK, M.; ONDRISIK, P.; ALJUAID, B. S.; EL-SHEHAWI, A. M.; ANSARI, M. J. Optimizing nitrogen supply promotes biomass, physiological characteristics and yield components of soybean (*Glycine max* L. Merr.). **Saudi Journal of Biological Sciences**, Amsterdam, v. 28, p. 6209–6217, 2021.

LAMBAIS, M. R.; de SOUZA, A. G. Impacto de bio sólido nas comunidades microbianas dos solos. *In*: BETTIOL, W.; CAMAGO, O. A. (Ed.). **Impacto ambiental do uso agrícola do lodo de esgoto**. Jaguariuna: Embrapa Meio Ambiente, 2000. p. 269–279.

LARA CABEZAS, W. A. R.; ALVES, B. J. R.; URQUIAGA, S.; SANTANA, D. G. Influência da cultura antecessora e da adubação nitrogenada na produtividade de milho em sistema plantio direto e solo preparado. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 34, p. 1005–1013, 2004.

LAURA, F.; TAMARA, A.; MULLER, A.; HIROSHAN, H.; CHRISTINA, D.; SERENA, C. Selecting sustainable sewage sludge reuse options through a systematic assessment framework: Methodology and case study in Latin America. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdam, v. 242, n. 118389, p. 1–12, 2020.

LEE, J. K.; PATEL, S. K. S.; SUNG, B. H.; KALIA, V. C. Biomolecules from municipal and food industry wastes: An overview. **Bioresource Technology**, Amsterdam, v. 298, n. 122346, 2020.

LI, R.; CHEN, H.; YANG, Z.; YUAN, S.; ZHOU, X. Research status of soybean symbiosis nitrogen fixation. **Oil Crop Science**, Hoboken, v. 5, p. 6–10, 2020.

LOBO, T. F.; GRASSI FILHO, H.; CARDOSO, E. J. B. N.; ALMEIDA, L. S.; NOMIYAMA JUNIOR, N. Crescimento e fixação biológica de nitrogênio em soja cultivada com doses de lodo de esgoto compostado. **Semina: Ciências Agrárias**, Helsinki, v. 33, p. 1333–1342, 2012.

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

LOPES, A. S.; GUILHERME, L. R. G. A career perspective on soil management in the Cerrado Region of Brazil. **Advances in Agronomy**, Maryland Heights, v. 137, p. 1–72, 2016.

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

MALAVOLTA, E. A.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S. A. **Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações**. Piracicaba: Potafós, 1997. 201p.

MARTINS, J. T.; RASMUSSEN, J.; ERIKSEN, J.; ARF, O.; NOTARIS, C.; MORETTI, L. G. Biological N fixation activity in soybean can be estimated based on nodule dry weight and is increased by additional inoculation. **Rhizosphere**, Amsterdam, v. 24, n. 100589, p. 1–6, 2022.

MATOSO, S. C. G.; KUSDRA, J. F. Nodulação e crescimento do feijoeiro em resposta à aplicação de molibdênio e inoculante rizobiano. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 18, n. 6, p. 567–573, 2014.

McCULLOUGH, H. The determination of ammonia in whole blood by a direct colorimetric method. **Clinica Chimica Acta**, Amsterdam, v. 17, p. 297–304, 1967.

MELO, T. M.; BOTTLINGER, M.; SCHULZ, E.; LEANDRO, W. M.; AGUIAR FILHO, A. M.; WANG, H.; OK, Y. S.; RINKLEBE, J. Plant and soil responses to hydrothermally converted sewage sludge (sewchar). **Chemosphere**, Oxford, v. 206, p. 338–348, 2018.

MENDES, I. C.; HUNGRIA, M.; VARGAS, M. A. T. Establishment of *Bradyrhizobium japonicum* and *B. elkanii* strains in a Brazilian Cerrado oxisol. **Biology and Fertility of Soils**, Heidelberg, v. 40, p. 28–35, 2004.

MIGGIOLARO, A. E.; ANTONANGELO, J. A.; FERNANDES, D. M.; BULL, L. T.; FREITAG, E. E. Diagnose foliar da cultura da soja em função da aplicação superficial de lodos de esgoto e resíduos industriais sob diferentes doses em sistema plantio direto. **Journal of Agronomic Sciences**, Madison, v. 3, p. 258–273, 2014.

MORAES, A.; CARVALHO, P. C. F.; ANGHINONI, I.; LUSTOSA, S. B. C.; COSTA, S. E. V. G. A.; KUNRATH, T. R. Integrated crop–livestock systems in the Brazilian subtropics. **European Journal of Agronomy**, Amsterdam, v. 57, p. 4–9, 2014.

MORAES, M. F.; ABREU-JUNIOR, C. H.; LAVRES-JUNIOR, J. L. Micronutrientes. In: PROCHNOW, L. I.; CASARIN, V.; STIPP, S. R. **Boas práticas para uso eficiente de fertilizantes: nutrientes**. Piracicaba: IPNI – Brasil, 2010. p. 205–278. v. 2.

MOREIRA, F. M. S.; SIQUEIRA, J. O. **Microbiologia e bioquímica do solo**. 2. ed. Lavras: Editora UFLA, 2006. 729 p.

MORETTI, S. M. L.; BERTONCINI, E. I.; ABREU-JUNIOR, C. H. Decomposição de lodo de esgoto e composto de lodo de esgoto em nitossolo háplico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Vicosa, MG, v. 39, p. 1796–1805, 2015.

MURRAY, R.; TIEN, Y-C.; SCOTT, A.; TOPP, E. The impact of municipal sewage sludge stabilization processes on the abundance, field persistence, and transmission of antibiotic resistant bacteria and antibiotic resistance genes to vegetables at harvest. **Science of the Total Environment**, Ontario, v. 651, p. 1680–1687, 2019.

NAKAO, A. H. **Composto orgânico de agroindústrias na produção de feijão de inverno e milho no sistema plantio direto**. 63 f. 2015. Dissertação (mestrado): Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, 2015.

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

NASCIMENTO, A. L.; SOUZA, A. J.; ANDRADE, P. A. M.; ANDREOTE, F. D.; COSCIONE, A. R.; OLIVEIRA, F. C.; REGITANO, J. B. Sewage sludge microbial structures and relations to their sources, treatments, and chemical attributes. **Frontiers in Microbiology**, Lausanne, v. 9, p. 1–11, 2018.

NASCIMENTO, A. L.; SAMPAIO, R. A.; ZUBA JUNIOR, G. R.; FERNANDES, L. A.; CRUZ, S. F.; CARNEIRO, J. P.; BARBOSA, C. F. LIMA, N. N. Atributos químicos do solo adubado com lodo de esgoto estabilizado por diferentes processos e cultivado com girassol. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v. 30, p. 146–153, 2014.

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**, Piracicaba, v. 114, p. 168–177, 2013.

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

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

OZDEMIR, S.; OZDEMIR, S.; OZER, H.; YETILMEZSOY, K. A techno-sustainable bio-waste management strategy for closing chickpea yield gap. **Waste Management**, Oxford, v. 119, p. 356–364, 2021.

PACHECO, L.P.; BARBOSA, J.M.; LEANDRO, W.M.; MACHADO, P.L.O. de A.; ASSIS, R.L. de; MADARI, B.E.; PETTER, F.A. Produção e ciclagem de nutrientes por plantas de cobertura nas culturas de arroz de terras altas e de soja. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v.35, p.1787–1799, 2011.

PEDROSA, M. V. B.; LIMA, W. L.; AMARAL, A. A.; CARVALHO, A. H. O. Biossólido de lodo de esgoto na agricultura: desafios e perspectivas. **Revista Agrogeoambiental**, Pouso Alegre, v. 9, n. 4, p. 125–142, 2017.

PINTO, C. C.; OLIVEIRA, C. O.; AMÉRICO, G. H.; VAZQUEZ, G. H.; LAZARINI E. Efeito da dose e da época de aplicação do glifosato na produção e na qualidade da soja RR. **Revista de Ciências Agrárias**, Lisboa, v. 39, n. 2, p. 310–317, 2016.

PIRES, A. M. M.; ANDRADE, C. A. **Recomendação de dose de lodo de esgoto: a questão do nitrogênio**. Brasília, DF: Embrapa Jaguaripuna, SP, 2014. (Comunicado técnico)

PRATES, A. R.; KAWAKAMI, K. C.; COSCIONE, A. R.; FILHO, M. C. M. T.; ARF, O.; ABREU-JUNIOR, C. H.; OLIVEIRA, F. C.; MOREIRA, A.; GALINDO, F. S.; HE, Z.; JANI, A. D.; CAPRA, G. F.; GANGA, A.; NOGUEIRA, T. A. R. Composted Sewage Sludge Sustains High Maize Productivity on an Infertile Oxisol in the Brazilian Cerrado. **Land**, [s. l.], v.11, n. 1246, p. 1–13, 2022.

PRATES, A. R.; COSCIONE, A. R.; TEIXEIRA FILHO, M. C. M.; MIRANDA, B. G.; ARF, O.; ABREU-JUNIOR, C. H.; OLIVEIRA, F. C.; MOREIRA, A.; GALINDO, F. S.; SARTORI, M. M. P.; HE, Z.; JANI, A. D.; CAPRA, G. F.; GANGA, A.; NOGUEIRA, T. A. R. Composted sewage sludge enhances soybean production and agronomic performance in naturally infertile soils (Cerrado Region, Brazil). **Agronomy**, [s. l.], v. 10, n. 11, p.1677, 2020.

PRICE, G. W.; ASTATKIE, T.; GILLIS, J. D.; LIU, K. Long-term influences on nitrogen dynamics and pH in an acidic sandy soil after single and multi-year applications of alkaline treated biosolids. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, [s. l.], v. 208, p. 1–11, 2015.

RADIN, J. W. Distribution and development of nitrate reductase activity in germinating cotton seedlings. **Annual Review of Plant Physiology**, Palo Alto, v. 53, p. 458–463, 1974.

RAGAGNIN, V. A.; JÚNIOR, S.; DIAS, D. S.; BRAGA, W. F.; NOGUEIRA, P. D. M. Growth and nodulation of soybean plants fertilized with poultry litter. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 37, p. 17–24, 2013.

RAHEEM, A.; SIKARWAR, V. S.; HE, J.; DASTYAR, W.; DIONYSIOU, D. D.; WANG, W.; ZHAO, M. Opportunities and challenges in sustainable treatment and resource reuse of sewage sludge: A review. **Chemical Engineering Journal**, Lausanne, v. 337, p. 616–641, 2018.

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

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

RAPHAEL, J. P. A.; CALONEGO, J. C.; MILORI, D. M. B. P.; ROSOLEM, C. A. Soil organic matter in crop rotations under no-till. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 155, p. 45–53, 2016.

RAVINDRAN, B.; KARMEGAM, N.; YUVARAJ, A.; THANGARAJ, R.; CHANG, S. W.; ZHANG, Z.; AWASTHI, M. K. Cleaner production of agriculturally valuable benignant materials from industry generated bio-wastes: A review. **Bioresource Technology**, Essex, v. 320, n. 124281, 2021.

R CORE TEAM. **R: A language and environment for statistical computing**. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, 2019. URL <https://www.R-project.org/>.

REBAH, F. B.; PRÉVOST, D.; YEZZA, A.; TYAGI, R. D. Agroindustrial waste materials and wastewater sludge for rhizobial inoculant production: A review. **Bioresource Technology**, Essex, v. 98, p. 3535–3546, 2007.

REIS, V. M.; OLVEIRA, A. L. M.; BALDINI, V. L. D.; OLIVARES, F. L.; BALDINI, J. I. Fixação biológica de nitrogênio simbiótica e associativa. *In*: FERNANDES, M. S. (coord.). **Nutrição mineral de plantas**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2006. p. 153–174.

RENNENBERG, H.; WILDHAGEN, H.; EHLTING, B. Nitrogen nutrition of poplar trees. **Plant Biology**, Stuttgart, v. 12, p. 275–291, 2010.

RIGBY, H.; CLARKE, B. O.; PRITCHARD, D. L.; MEEHAN, B.; BESHAN, F.; SMITH, S. R.; PORTER, N. A. A critical review of nitrogen mineralization in biosolids-amended soil, the associated fertilizer value for crop production and potencial for emissions to the environment. **Science of The Total Environment**, Amsterdam, v. 541, p. 1310–1338, 2016.

RIGO, M. M.; RAMOS, R. R.; CERQUEIRA, A. A.; SOUZA, P. S. A.; MARQUES, M. R. C. Destinação e reúso na agricultura do lodo de esgoto derivado do tratamento de águas residuárias domésticas no Brasil. **Gaia Scientia**, [s. l.], v. 8, n. 1, p. 174–186, 2014.

ROCHA, K. F.; SOUZA, M.; ALMEIDA, D. S.; CHADWICK, D. R.; JONES, D. L.; MOONEY, S. J.; ROSOLEM, C. A. Cover crops affect the partial nitrogen balance in a maize-forage cropping system. **Geoderma**, Amsterdam, v. 360, n. 114000, 2020.

RODRIGUES, M.; PAVINATO, P. S.; WITHERS, P. J. A.; TELES, A. P. B.; HERRERA, W. F. B. Legacy phosphorus and no tillage agriculture in tropical oxisols of the Brazilian savanna. **Science of the Total Environment**, Amsterdam, v. 542, p. 1050–1061, 2016.

ROS, C. O. da; SALET, R. L.; PORN, R. L.; MACHADO, J. N. C. Disponibilidade de nitrogênio e produtividade de milho e trigo com diferentes métodos de adubação nitrogenada no sistema plantio direto. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 33, n. 5, p. 799–804. 2003.

ROSSI, C. Q.; PEREIRA, M.G.; GIÁCOMO, S. G.; BETTA, M.; POLIDORO, J. C. Decomposição e liberação de nutrientes da palhada de braquiária, sorgo e soja em áreas de plantio direto no cerrado goiano. **Semina**, Londrina, v. 34, p. 1523–1534, 2013.

RUSU, T. Energy efficiency and soil conservation in conventional, minimum tillage and no-tillage. **International Soil and Water Conservation Research**, [s. l.], v. 2, p. 42–49, 2014.

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

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

SANTOS, L. Z. H.; MYRNA, S. O.; WENNDY, L. W.; ANDREA, V. R.; MANUEL, G. P. J. Effects of compost made with sludge and organic residues on bean (*Phaseolus vulgaris* L.) crop and arbuscular mycorrhizal fungi density. **African Journal of Agricultural Research**, Sapele, v. 6, n. 6, p. 1580–1585, 2011.

SHAHZAD, S. M.; KHALID, A.; ARIF, M. S.; RIAZ, M.; ASHRAF, M.; IQBAL, Z.; YASMEEN, T. Co-inoculation integrated with P-enriched compost improved nodulation and growth of Chickpea (*Cicer arietinum* L.) under irrigated and rainfed farming systems. **Biology and Fertility of Soils**, Heidelberg, v. 50, p. 1–12, 2014.

SHARMA, B.; SARKAR, A.; SINGH, P.; SINGH, R. P. Agricultural utilization of biosolids: A review on potential effects on soil and plant grown. **Waste Management**, Oxford, v. 64, p. 117–132, 2017.

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

SILVA, I. R.; MENDONÇA, E. S. Matéria orgânica do solo. *In*: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ V., V. H.; BARROS, N. F.; FONTES, R. L. F.; CANTARUTTI, R. B.; NEVES, J. C. L. (ed.). **Fertilidade do solo**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. Cap. 6, p. 275–374.

SILVA, P. C. G.; TIRITAN, C. S.; ECHER, F. R.; CORDEIRO, C. F. S.; REBONATTI, M. D.; SANTOS, C. H. No-tillage and crop rotation increase crop yields and nitrogen stocks in sandy soils under agroclimatic risk. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 258, n. 107947, 2020.

SILVA, R. D. S.; JALAL, A.; NASCIMENTO, R. E. N.; ELIAS, N. C.; KAWAKAMI, K. C.; ABREU-JUNIOR, C. H.; OLIVEIRA, F. C.; JANI, A. D.; HE, Z.; ZHAO, F.; FILHO, M. C. M. T.; ROSSETTO, R.; CAPRA, G. F.; NOGUEIRA, T. A. R. Composted sewage sludge application reduces mineral fertilization requirements and improves soil fertility in sugarcane seedling nurseries. **Sustainability**, Basel, v. 14, n. 8, p. 4684, 2022a.

SILVA, R.D.S.; JALAL, A.; NASCIMENTO, R.E.N.D.; ELIAS, N.C.; KAWAKAMI, K.C.; ABREU-JUNIOR, C.H.; OLIVEIRA, F.C.; JANI, A.D.; HE, Z.; ZHAO, F.; TEIXEIRA FILHO, M.C.M.; ROSSETTO, R.; CAPRA, G.F.; NOGUEIRA, T.A.R. Composted sewage sludge application in a sugarcane seedling nursery: crop nutritional status, productivity, and technological quality implications. **Sustainability**, Basel, v. 14, n. 8, p. 4682, 2022b.

SIQUEIRA NETO, M.; PICCOLO, M. de C.; VENZKE FILHO, S. de P.; FEIGL, B.J.; CERRI, C.C. Mineralização e desnitrificação do nitrogênio no solo sob sistema plantio direto. **Bragantia**, Campinas, v. 69, p. 923–936, 2010.

SOMMERS, L. E. Chemical composition of sewage sludges and analysis of their potential use as fertilizers. **Journal of Environmental Quality**, v. 6, n. 2, p. 225–232, 1977.

SOUZA, C. A.; REIS JUNIOR, F. B.; MENDES I. C.; LEMAINSKI, J.; SILVA, J. E. Lodo de esgoto em atributos biológicos do solo e na nodulação e produção de soja. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 44, p. 1319–1327, 2009.

SUBBARAO, G. V. RONDON, M.; ITO, O.; ISHIKAWA, T.; RAO, I. M.; NAKAHARA, K.; LASCANO, C.; BERRY, W. L. Biological nitrification inhibition (BNI) – is it a widespread phenomenon? **Plant Soil**, Dordrecht, v. 294, p. 5–18, 2007.

TANAKA, K. S.; CRUSCIOL, C. A. C.; SORATTO, R. P.; MOMESSO, L.; COSTA, C. H. M.; FRANZLUEBBERS, A. J.; OLIVEIRA JUNIOR, A.; CALONEGO, J. C. Nutrients released by *Urochloa* cover crops prior to soybean. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, Dordrecht, v. 113, p. 267–281, 2019.

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

TEIXEIRA, M. B.; LOSS, A.; PEREIRA, M. G.; PIMENTEL, C. Decomposição e liberação de nutrientes da parte aérea de plantas de milho e sorgo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 35, n. 3, p. 867–876, 2011.

TURP, G. A.; TURP, S. M.; OZDENIR, S.; YETILMEZSOY, K. Vermicomposting of biomass ash with bio-waste for solubilizing nutrients and its effect on nitrogen fixation in common beans. **Environmental Technology & Innovation**, [s. l.], v. 23, n. 101691, p. 1–12, 2021.

VENDRUSCOLO, E. P.; LEAL, A. J. F.; SOUZA, E. J.; SOUTO FILHO, S. N. Atributos químicos de solo degradado em função da adoção de biochar, culturas de cobertura e residual da aplicação de lodo de esgoto. **Revista de Ciências Agrárias**, Lisboa, v. 59, n. 3, p. 235–242, 2016.

VIEIRA, R. F. **Ciclo do nitrogênio em sistemas agrícolas**. Brasília, DF: Embrapa, 2017. 163 p.

VILLAMIL, M.B.; NAFZIGER, E.D. Corn residue, tillage, and nitrogen rate effects on soil carbon and nutrient stocks in Illinois. **Geoderma**, Amsterdam, v. 253-254, p. 61–66, 2015.

VOGELS, G. D.; VAN DER DRIFT, C. Differential analysis of glyphosate derivatives. **Analytical Biochemistry**, New York, v. 33, p. 143–157, 1970.

WANG, M.; AWASTHI, M.; WANG, Q.; CHEM, H.; REN, X.; ZHAO, J.; LI, R.; ZHANG, Z. Comparison of additives amendment for mitigation of greenhouse gases and ammonia emission during sewage sludge co-composting based on correlation analysis. **Bioresource Technology**, Shaanxi Province, v. 243, p. 520–527, 2017.

WANG, Y.; LU, J.; REN, T.; HUSSAIN, S.; GUO, C.; WANG, S.; CONG, R.; LI, X. Effects of nitrogen and tiller type on grain yield and physiological responses in rice. **AoB PLANTS**, v. 9, p. 1–14, 2017.

WIJESEKARA, H.; BOLAN, N. S.; THANGAVEL, R.; SESHADRI, B.; SURAPANENI, A.; SAINT, C.; HETHERINGTON, C.; MATTHEWS, P.; VITHANAGE, M. The impact of biosolids application on organic carbon and carbon dioxide fluxes in soil. **Chemosphere**, Oxford, v. 189, p. 565–573, 2017.

WITTE, C. P. Urea metabolism in plants. **Plant Science**, [s. l.], v. 180, p. 431–438, 2011.

WU, D.; WEI, Z.; GAO, X.; WU, J.; CHEN, X.; ZHAO, Y.; JIA, L.; WEN, D. Reconstruction of core microbes based on producing lignocellulolytic enzymes causing by bacterial inoculation during rice straw composting. **Bioresource Technology**, Essex, v. 315, n. 123849, p. 1–10, 2020.

WU, G. L.; LIU, Y.; TIAN, F. P.; SHI, Z. H. Legumes functional group promotes soil organic carbon and nitrogen storage by increasing plant diversity. **Land Degradation & Development**, Chichester, v. 28, n. 4, p. 1336–1344, 2017.

YEMM, E. M.; COCKING, E. C. Estimation of amino acids by ninhydrin. **Analyst**, London, v. 80, p. 209–213, 1955.

YURUK, A.; BOZKURT, M. A. Heavy metal accumulation in different organs of plants grown under high sewage sludge doses. **Fresenius Environmental Bulletin**, Freising, v. 15, p. 107–112, 2006.

ZUBA JUNIO, G. R.; SAMPAIO, R. A.; FERNANDES, L. A.; PEGORARO, R. F.; MAIA, V. M.; CARDOSO, P. H. S.; SOUSA, I. P.; VIEIRA, I. T. R. Content of heavy metals in soil and in pineapple fertilized with sewage sludge. **Journal of Agricultural Science**, Montes Claros, v. 11, n. 9, p. 281–292, 2019.