

UFRRJ
INSTITUTO DE AGRONOMIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
AGRONOMIA CIÊNCIA DO SOLO

DISSERTAÇÃO

**Fertilizantes Organominerais à Base de Biossólidos:
Estratégia para o Aumento da Eficiência no Uso de
Nutrientes em Planossolos**

Julia Barra Netto-Ferreira

2020



**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE AGRONOMIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA
CIÊNCIA DO SOLO**

**FERTILIZANTES ORGANOMINERAIS À BASE DE BIOSSÓLIDOS:
ESTRATÉGIA PARA O AUMENTO DA EFICIÊNCIA NO USO DE
NUTRIENTES EM PLANOSSOLOS**

JULIA BARRA NETTO-FERREIRA

Sob a Orientação do Professor

Everaldo Zonta

e Co-orientação do Professor

Juliano Bahiense Stefanato

Dissertação submetida como requisito parcial para obtenção do grau de Mestra em Ciências, no Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Área de Concentração em Fertilidade do solo.

Seropédica, RJ

Fevereiro de 202

Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
Biblioteca Central / Central de Processamento Técnico

Ficha catalográfica elaborada
Com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

N472f Netto-Ferreira, Julia Barra, 1993-
Fertilizantes organominerais à base de biossólidos: estratégia para o aumento da eficiência no uso de nutrientes em planossolos / Julia Barra Netto-Ferreira. – Seropédica, RJ, 2020.
70 f.: il.

Orientador: Everaldo Zonta.
Dissertação (Mestrado). – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Pós-Graduação em Agronomia – Ciência do Solo, 2020.

1. Lodo estabilizado. 2. Fosfato natural reativo. 3. Sulfato de potássio. I. Zonta, Everaldo, 1970-, orient. II. Stafanato, Juliano Bahiense, 1981-, III. Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. Programa de Pós-Graduação em Ciências, Tecnologia e Inovação em Agropecuária. IV. Título.

É permitida a cópia parcial ou total desta Tese, desde que seja citada a fonte.

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

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE AGRONOMIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA – CIÊNCIA DO SOLO

JULIA BARRA NETTO-FERREIRA

Dissertação submetida como requisito parcial para a obtenção do grau de **Mestra** em Ciências, no Programa de Pós-Graduação em Agronomia – Ciência do Solo, área de Concentração em Fertilidade do Solo.

DISSERTAÇÃO APROVADA EM: **20/02/2020**

Everaldo Zonta. Dr. UFRRJ
(Orientador)

Nelson Moura do Amaral Sobrinho. Dr. UFRRJ

Alan Henrique Marques de Abreu. Dr. CEDAE

Se não vivermos dentro da agricultura, vamos acabar.

Não tem vida sem terra, sem agricultura

Ana Maria Primavesi

BIOGRAFIA

Julia Barra Netto-Ferreira nasceu na cidade do Rio de Janeiro – RJ, no dia 23 de setembro de 1993. Em 2011 concluiu o ensino médio no Colégio Técnico da UFRRJ. Em 2012 ingressou no curso de graduação em Agronomia da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, concluindo em 2017. Em 2018, iniciou o curso de Mestrado no Programa de Pós-Graduação em Agronomia – Ciência do Solo, na Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro.

AGRADECIMENTOS

- A Deus por me amar primeiro, por sempre aliviar a minha dor e me ajudar a colocar o meu dom a serviço da humanidade.
- À Santíssima Virgem, pelo amor de mãe e por me ensinar o exemplo de mulher que quero ser na minha vida acadêmica e pessoal.
- Aos meus pais, José Carlos e Cristina, por me amarem, me apoiarem e me incentivarem. Obrigada por me deixar sonhar, por construir a pessoa que sou e por sempre estarem ao meu lado, não importa as mil escolhas que eu queira fazer. Obrigada também por cada lida nas minhas centenas de “últimas versões”.
- Aos meus avós, Ernani (*in memoriam*) e Olga, por se amarem e me ensinarem que é extraordinário amar nas coisas comuns.
- À minha família que chora e ri comigo, que conhece o meu verdadeiro eu, que me ensina a importância de ter alguém a todo o tempo e que está sempre disponível para mim, vocês são o meu porto seguro.
- À CAPES e a FAPERJ, pelo apoio financeiro.
- À UFRRJ por ter sido o meu lar, por ter me ensinado tudo. Ao Departamento de Solos e ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia – Ciência do Solo, aos docentes, técnicos e colegas de curso que me deixaram não só conhecimento e apoio, mas também um pedaço de si.
- Ao meu orientador, Prof. Everaldo Zonta, pela paciência, bom humor, dedicação e amor à profissão. Obrigada por tanto, e por me fazer sentir capaz e confortável no ambiente de trabalho. Deixo-lhe um pedaço do meu coração e o levo em um capítulo lindo da minha história.
- Ao Prof. Juliano Stafanato, meu co-orientador, obrigada por sempre estar disponível.
- Ao LSP (Laboratório de Relações Solo-Planta) que me ensinou o significado de equipe na vida acadêmica. Obrigada pela paciência, pela ajuda, por cada explicação, cada café, cada churrasco e cada conversa, vocês foram essenciais para o cumprimento dessa etapa. Em especial à Ana, Amanda, Cyndi, Fernanda, Lucas, Talita e Ricardo por terem sido essenciais na construção desse trabalho.
- À Prof. Érica Abreu Souto Lima pela importante ajuda nas análises estatísticas.
- À CEDAE na pessoa do Dr. Alan Henrique Marques de Abreu pelo fornecimento do composto de Biossólido utilizado nos fertilizantes.
- Aos meus amigos que suportaram cada reclamação minha, entenderam todas as vezes em que eu não pude estar presente e estiveram presentes sempre que eu precisei. Em especial à Ana Leticia, Marcella e Victoria, que aguentaram meus altos e baixos motivacionais.
- À minha comunidade neocatecumenal, que me mostrou como Cristo me ama e que foi o meu suporte emocional.
- Ao meu pároco, padre Fábio, ao padre Wagner e à toda a comunidade da Paróquia Santa Teresinha, obrigada por serem minha comunidade e me mostrarem o que realmente importa e que, sem Deus, nada disso teria valor.

Muito obrigada!!

RESUMO GERAL

NETTO-FERREIRA, Julia Barra. **Fertilizantes organominerais à base de biossólidos: estratégia para o aumento da eficiência no uso de nutrientes em Planossolos.** 2020. 70f. Dissertação (Mestrado em Agronomia, Ciência do Solo). Instituto de Agronomia, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2020.

Solos arenosos ocorrem em todas as partes do mundo. Estes solos, embora tenham baixa produtividade, são destinados à produção agrícola, mesmo tendo a capacidade de troca catiônica (CTC) baixa com a disponibilidade de nutrientes relacionada quase que exclusivamente à presença de matéria orgânica. Este estudo tem a finalidade de fornecer uma base científica para a utilização na agricultura de resíduos orgânicos oriundos de estação de tratamento de esgoto, enriquecidos com fósforo e potássio como fertilizante organomineral (FOM), identificando a melhor proporção de nutrientes a ser adotada para o cultivo em sistemas orgânicos. As fontes de serem utilizadas para a produção de cada FOM, foram caracterizadas, assim como as suas formulações. A seguir, foi avaliada a dinâmica de liberação dos nutrientes considerando as particularidades desses adubos orgânicos, assim como o efeito da utilização dessas formulações propostas de FOM na perda de nutrientes por lixiviação. Por fim, foi realizado um teste de desempenho agrônomico dessas formulações de FOMs e o efeito da sua aplicação sobre a dinâmica de nutrientes no solo. Os fertilizantes organominerais a base de biossólido têm potencial para uso como adubo. Contudo, é importante conhecer o comportamento desses produtos através da avaliação do seu uso ao longo do tempo e sob condições de acúmulo de matéria orgânica. Essas fontes de adubo têm potencial produtivo para sistemas de plantio alternativos e servem de incentivo à discussão acerca da permissão de utilização na agricultura desse biossólido, isto é, o composto de lodo estabilizado.

Palavras-chave: Lodo estabilizado. Fosfato natural reativo. Sulfato de potássio.

GENERAL ABSTRACT

NETTO-FERREIRA, Julia Barra. **Organomineral compound fertilizers: strategy to increase efficiency in the use of nutrients in sandy soils**. 2020. 70p. Dissertation (Master in Agronomy, Soil Science). Instituto de Agronomia, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2020.

Sandy soils occur in all parts of the world. These soils, although low in productivity, are intended for agricultural production, even though the cation exchange capacity (CTC) is low with the availability of nutrients related almost exclusively to the presence of organic matter. This study aims to provide a scientific basis for the use in agriculture of organic waste from a sewage treatment plant, enriched with phosphorus and potassium as an organomineral fertilizer (FOM), identifying the best proportion of nutrients to be adopted for cultivation in organic systems. The sources to be used for the production of each FOM were characterized, as well as their formulations. Then, the dynamics of nutrient release was evaluated considering the particularities of these organic fertilizers, as well as the effect of using these proposed formulations of FOM on the loss of nutrients by leaching. Finally, an agronomic performance test was carried out on these FOMs formulations and the effect of their application on the dynamics of nutrients in the soil evaluated. Organomineral compound fertilizers using biosolids have the potential to be used as fertilizers. However, it is essential to know the behavior of organomineral fertilizers by evaluating their use over time and under conditions of accumulation of organic matter. These fertilizer sources have the productive potential for alternative planting systems and serve as an incentive to discuss the permission to use this biosolid in agriculture, which is the stabilized sludge compound.

Keywords: Stabilized sludge. Thermophosphate. Potassium sulfate.

LISTA DE ABREVIACÕES E SÍMBOLOS

- ACP – Análise de componentes principais
- ANDA - Agência Nacional de Águas
- ANVISA - Agência Nacional de Vigilância Sanitária
- APHA - *American Public Health Association*
- C_{org} - carbono orgânico
- CEDAE-RJ - Companhia Estadual de Águas e Esgotos do Rio de Janeiro
- CQFS - Comissão de química e fertilidade do solo
- CTA - Capacidade de Troca de Ânions
- CTC - Capacidade de Troca Catiônica
- EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
- ETE - Estação de Tratamento de Esgoto
- Etp - Evapotranspiração potencial
- EqST - Equivalente em Superfosfato Triplo
- FAO - Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura, do inglês *Food and Agriculture Organization*
- FOM - Fertilizante Organomineral
- IE - Índice de Eficiência
- IEA - Índice de Eficiência Agronômica
- IEN - Índice de Eficiência de N
- IEP - Índice de Eficiência de P
- K_{liq} - disponibilização líquida de K
- MAPA - Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento
- MPCCR - Método da dosagem de fósforo por comparação de curvas de resposta
- M.O. – Matéria Orgânica
- N_{liq} - mineralização líquida de N
- N_{min} - N mineral do solo
- P_i – Fósforo inorgânico
- P_{il} – Fósforo inorgânico lábil
- P_{iml} - Fósforo inorgânico moderadamente lábil
- P_{irec} - Fósforo inorgânico recalcitrante
- P_{liq} – Fósforo líquido disponível
- P_o – Fósforo orgânico

P_t – Fósforo Total

P_{tl} - Fósforo total lábil

P_{tml} - Fósforo total moderadamente lábil obtido

P_{trec} - Fósforo total recalcitrante

PTK - Poder Tampão de Potássio

PVP - Polivinilpirrolidona

SIPA - Sistema Integrado de Produção Agroecológica

ST - Superfosfato Triplo

WHO – Agência Mundial da Saúde, do inglês *World Health Organization*

WRB – Base Mundial de Referência para Solos, do inglês *World Reference Base for Soil*

SUMÁRIO

	Página
1 INTRODUÇÃO GERAL	1
2 REVISÃO DE LITERATURA.....	2
2.1 Fertilizantes Organominerais (FOM) e Resíduos Orgânicos.	2
2.2 Avaliação da Eficiência de Fertilizantes.....	4
2.2.1 Índice de eficiência agronômica	4
2.2.2 Índice de eficiência de fertilizantes.....	5
2.3 Os Solos de Textura Arenosa.....	5
2.4 Utilização de Resíduos de Tratamento de Esgoto	6
3 CAPÍTULO I: CARACTERIZAÇÃO E ÍNDICE DE EFICIÊNCIA DOS FERTILIZANTES ORGANOMINERAIS	8
3.1 RESUMO.....	9
3.2 ABSTRACT	10
3.3 INTRODUÇÃO	11
3.4 MATERIAL E MÉTODOS	12
3.4.1 Obtenção do biossólido oriundo da Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) – CEDAE.....	12
3.4.2 Caracterização química de cada componente utilizado na formulação do fertilizante organomineral.....	13
3.4.3 Formulação dos fertilizantes.....	18
3.4.4 Índice de eficiência do fertilizante (IE)	19
3.4.5 Ensaio em colunas de lixiviação.....	21
3.4.6 Análises estatísticas	22
3.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	23
3.5.1 Caracterização das fontes usadas na formulação e dos FOMs	23
3.5.2 Índice de eficiência do fertilizante.....	24
3.5.3 Ensaio de lixiviação	32
3.6 CONCLUSÃO.....	38
4 CAPÍTULO 2: EFICIÊNCIA AGRONÔMICA DOS FERTILIZANTES ORGANOMINERAIS EM CASA-DE-VEGETAÇÃO	40
4.1 RESUMO.....	41

4.2 ABSTRACT	42
4.3 INTRODUÇÃO	43
4.4 MATERIAL E MÉTODOS	44
4.4.1 Desenho experimental	44
4.4.2 Implantação e condução da cultura indicadora.....	44
4.4.3 Análises fisiológicas da plantas.....	44
4.4.4 Avaliação das características químicas do solo após o desenvolvimento da cultura indicadora	45
4.4.5 Extração sequencial de fósforo no solo	45
4.4.6 Análises estatísticas	45
4.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	46
4.5.1 Análises fisiológicas da planta	46
4.5.2 Avaliação das características químicas do solo após o desenvolvimento da cultura indicadora	51
4.5.3. Extração sequencial de fósforo no solo	53
4.6 CONCLUSÕES.....	58
5 CONCLUSÕES GERAIS	59
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	60
7 ANEXOS	67

1 INTRODUÇÃO GERAL

O termo *fragile soil* é usado para definir solos de textura arenosa, com teores baixos de matéria orgânica e baixa estabilidade dos agregados ou, ainda, solos de relevos declivosos e suscetíveis à erosão hídrica (GERARD, 1986). Solos arenosos ocorrem em todas as partes do mundo, possuindo mais de 70% de areia e menos de 15% de argila, sendo em geral classificados como **Arenosols**, de acordo com o *World Reference Base for Soil* (WRB, 2006), e como **Entisols** arenosos, de acordo com o *Soil Taxonomy* (FAO, 2001).

No Brasil, ocorrem vários solos com horizonte superficial arenoso, tais como os Latossolos Vermelhos de textura média; parcela dos Neossolos Flúvicos com horizonte A de textura arenosa, Neossolos Quartzarênicos, Argissolos Arênicos, Espessarênicos e Planossolos, sendo estes pouco profundos, com horizonte superficial de cores claras e textura arenosa, seguido de um horizonte B plânico, de textura média, argilosa ou muito argilosa, adensado, pouco permeável, com cores de redução, decorrente de drenagem imperfeita, e responsável pela formação de lençol suspenso temporário.

No estado do Rio de Janeiro, e em especial na Baixada Fluminense, solos, tal como os Planossolos, com horizontes superficiais com textura arenosa apresentam-se com expressão significativa. Estes solos, embora tenham baixa produtividade, são destinados à produção agrícola (DONAGEMMA et al., 2016), sendo a sua capacidade de troca catiônica (CTC) e, conseqüentemente a disponibilidade de nutrientes, relacionada quase que exclusivamente à presença de matéria orgânica. As taxas de perda de matéria orgânica são maiores em solos mais arenosos; portanto, no que se refere à produção agrícola, é fundamental que se tenha estratégias conservacionistas que consigam promover um aumento no estoque de carbono no solo e diminuir o fluxo de gases-estufa para a atmosfera (SILVA & MACHADO, 2000; DE CASTRO & HERNANI, 2015).

Deste modo, este estudo tem a finalidade de fornecer uma base científica para a utilização na agricultura de resíduos orgânicos estabilizados (biossólidos) oriundos de estação de tratamento de esgoto, enriquecidos com fósforo e potássio como fertilizante organomineral (FOM), identificando a melhor proporção de nutrientes a ser adotada para o cultivo em sistemas orgânicos.

Para tanto, os objetivos específicos constaram da elaboração dos FOMs contendo em sua composição P e K; teste em condições de laboratório para esses FOMs, em contraste com o uso dos adubos constituintes de forma isolada, quanto à dinâmica de liberação e perdas por lixiviação de N, P e K desses FOMs; avaliação em casa de vegetação da resposta do milho, como planta teste, quanto à aplicação dos FOMs selecionados em laboratório; avaliação do efeito residual da aplicação dos FOMs no solo, após o cultivo. Para a organização das ideias, este trabalho foi dividido em dois capítulos.

No capítulo 1, intitulado Caracterização e índice de eficiência dos fertilizantes organominerais, foram caracterizadas as fontes utilizadas para a produção de cada FOM, assim como as formulações de cada FOM. A seguir, foi avaliada a dinâmica de liberação dos nutrientes considerando as particularidades desses adubos orgânicos, assim como o efeito da utilização dessas formulações propostas de FOM na perda de nutrientes por lixiviação.

No Capítulo 2, intitulado Eficiência agrônômica dos fertilizantes organominerais em casa-de-vegetação, é apresentado o teste de desempenho agrônômico dessas formulações de FOMs e o efeito da sua aplicação no solo.

2 REVISÃO DE LITERATURA

A fertilidade de um solo é a capacidade deste solo em fornecer a proporção adequada de nutrientes para o desenvolvimento e produtividade das plantas, na ausência de elementos tóxicos. Esta capacidade depende da interação entre diferentes fatores, tais como temperatura, água, luz e microrganismos, além do sistema de manejo adotado. Os solos brasileiros são intemperizados e em sua maioria, ácidos, de baixa fertilidade natural, e, em certos casos, com alta saturação por alumínio (SANTOS et al., 2018). Outra característica importante são os baixos teores de carbono orgânico, que reduzem a capacidade de troca catiônica desses solos e, conseqüentemente, propiciam um aumento da lixiviação dos elementos neles contidos, indicando assim que esses solos têm baixa sustentabilidade.

A determinação de carbono orgânico (C_{org}) é o indicador mais utilizado para avaliar a forma de manejo a que um solo está sendo submetido e, como nos solos intemperizados os teores são baixos, também existe a dificuldade de se estabelecer o manejo para aumentar os teores de C_{org} . Como é necessária a aplicação de técnicas de manejo que contribuam para o aumento de C_{org} nesses solos, a proposta deste projeto é estudar como utilizar fertilizantes organominerais para aumentar o C_{org} , uma vez que esses fertilizantes, por apresentarem solubilização lenta, podem contribuir para o aumento da matéria orgânica, e como são menos suscetíveis a perdas por lixiviação, podem promover um melhor aproveitamento dos nutrientes pelas diversas culturas.

2.1 Fertilizantes Organominerais (FOM) e Resíduos Orgânicos.

A maior parte dos fertilizantes utilizados a nível mundial é de origem mineral solúvel e de fontes não renováveis. Os benefícios obtidos com o seu uso são a pronta disponibilidade do nutriente fornecida pelo fertilizante, permitindo assim a incorporação de áreas antes deficientes em nutrientes. Porém, a obtenção desses fertilizantes se dá com gasto energético elevado e com possíveis problemas ambientais associados à sua pronta disponibilidade como, por exemplo, a sua mobilidade, que possibilita perdas e contaminações, tanto por metais pesados como a eutrofização dos recursos hídricos. No Brasil, o cenário não é diferente, podendo-se adicionar também a grande dependência externa de fertilizantes, já que se importa 88% do N, 63% do P_2O_5 e 97% do K_2O utilizados na agricultura (ANDA, 2018).

Fravet e colaboradores (2010) mostraram que uma alternativa viável na redução dessa dependência externa de fertilizantes minerais é a utilização de fertilizantes orgânicos e organominerais, uso esse que tem aumentado, consideravelmente, no Brasil. Esses fertilizantes orgânicos e organominerais, além de possibilitar um maior equilíbrio ecológico ao sistema, por promover um aumento da fertilidade do solo, também melhoram os seus atributos físicos, químicos e biológicos. O uso de organominerais produzidos a partir de resíduos orgânicos pode incorporar estes nutrientes ao processo produtivo, favorecendo a ciclagem de nutrientes, além de promover também a melhoria nas características físicas do solo. Isso pode levar a uma diminuição da dependência externa desses fertilizantes e, assim, minimizar o impacto ambiental (ZONTA et al., 2016).

A legislação brasileira define fertilizantes organominerais como o produto resultante da mistura entre fertilizantes minerais e orgânicos, definidos pelo Decreto nº 8.384, de 29 de dezembro de 2014 (BRASIL, 2014) e pela Instrução Normativa nº 25, de 23 de julho de 2009 (MAPA, 2009). Os fertilizantes organominerais contêm em sua composição uma fração mineral, normalmente a mais representativa no fornecimento de nutrientes, e uma fração orgânica, que também contribui com nutrientes, além de desempenhar outras funções importantes. A fração orgânica, intimamente, associada à fração mineral é submetida a reações

no solo, ocorrendo a liberação de ácidos orgânicos que, por competirem com sítios de fixação de ânions, aumenta a capacidade de troca catiônica da matéria orgânica. Esses ácidos orgânicos também blindam as reações de fixação de fósforo, uma vez que podem ser responsáveis pelo recobrimento da superfície das argilas (LEAL et al., 2013).

A matéria orgânica proporciona ao solo a melhoria de vários atributos físicos, tais como: a redução da densidade do solo; melhoria na união entre argilas e partículas do solo, formando agregados com maior estabilidade e tamanho maior; aumenta a porosidade; aumenta a retenção da água de forma direta e a drenagem, devido à melhor estrutura, e, indiretamente, por minimizar a formação de crostas impermeáveis na superfície do solo; reduz a tenacidade, plasticidade e aderência, melhorando a friabilidade do solo; pode ocorrer a complexação de elementos tóxicos; entre outros benefícios que favorecem a emergência de plântulas e o desenvolvimento das culturas. (MARÍN et al., 2005 *apud* RABELO, 2015; LEAL et al., 2013).

A agregação do solo é favorecida pelos diferentes graus de decomposição de compostos orgânicos que, assim, podem fornecer substâncias cimentantes como polissacarídeos, ácidos orgânicos e exsudatos, como também pela atuação de fungos do solo devido à ação mecânica exercida pelas hifas, o que leva a uma aproximação das partículas minerais (LEAL et al., 2013).

Os sistemas agrícolas necessitam da disponibilidade dos nutrientes essenciais para o desenvolvimento das culturas. Além disso, a cada ciclo de cultivo há a remoção de nutrientes por extração devido à colheita do produto agrícola comercial. Esta disponibilidade de nutrientes ainda está sujeita à sua interação com o sistema solo, que leva a uma redução da sua disponibilidade. Os solos cultivados no Brasil, em sua grande maioria, apresentam óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio na fração argila, resultado do intenso intemperismo a que foram submetidos. Esta característica faz com que estes solos tenham grande capacidade de troca de ânions (CTA), diferentemente de solos pouco intemperizados, em que predomina a capacidade de troca de cátions (CTC) (SOUZA et al., 2017). Pode-se citar, como exemplo, o que acontece com o fósforo que, ao interagir com grupamentos funcionais na superfície de óxidos, oxiidróxidos e hidróxidos de Fe e Al, podem ser fixados. O nitrogênio também pode ter sua disponibilidade reduzida nesses solos por meio da lixiviação devido à sua alta mobilidade e à baixa capacidade de retenção (CTC) dos solos brasileiros. O fornecimento e a reposição desses nutrientes são feitos pela aplicação de fertilizantes, em sua maioria de fontes minerais solúveis e que apresentam as limitações discutidas acima.

Uma alternativa ao manejo destas áreas, no tocante à fertilidade, é a reposição de nutrientes via fertilizantes organominerais (FOM). Os FOMs condicionam o solo de forma que os nutrientes adicionados permaneçam disponíveis às plantas, permitindo maior produtividade ao sistema e favorecendo a ciclagem e aumento do teor de matéria orgânica do solo. Este efeito não é função direta da matéria orgânica que compõe o fertilizante organomineral, mas sim função indireta, devido ao efeito condicionante que proporciona. As perdas de macronutrientes no solo estão associadas à ausência de matéria orgânica e, quando se compara a fertilizantes convencionais, observa-se em média um aumento de 20% no aproveitamento de NPK adicionado ao solo quando do emprego de organominerais, (CRUZ et al., 2017).

A fertilidade do solo é melhorada via aplicação de fertilizantes minerais, orgânicos e corretivos. Contudo, a melhoria das propriedades físicas do solo ocorre com a aplicação de fertilizantes baseados em fontes orgânicas, fato que não ocorre com a aplicação de fertilizantes minerais (RABELO, 2015). Desta forma, o mecanismo mais relevante desta classe de fertilizante é proporcionar ao solo a capacidade de restabelecer as funções ecológicas as quais, aliadas ao manejo realizado, podem contribuir para tornar o sistema mais produtivo.

As atividades produtoras urbanas, agrícolas ou industriais geram resíduos orgânicos em quantidades consideráveis que são desperdiçados na maioria das vezes, que geram um enorme passivo, mas que poderiam ser reutilizados, na agricultura como condicionador de solo, como

fertilizante em plantações agrícolas e florestais, ou ainda na recuperação de áreas degradadas ou como componente de substratos destinados à produção de mudas florestais (DE ABREU et al., 2017; CABREIRA et al., 2017; LIMA FILHO et al., 2019)

O aproveitamento de resíduos na agricultura permite não só a melhoria da qualidade do solo e a diminuição do uso de insumos na agricultura, como também reduz a poluição causada pelo seu descarte. Para utilizar um resíduo na agricultura é importante que a sua caracterização seja feita, a fim de que se possa conhecer tanto o seu potencial em fornecer nutrientes quanto se há riscos de contaminação, ou seja, qual a sua composição química (DE ABREU et al., 2017). Esse aproveitamento de resíduos pode ser potencializado se forem adicionadas a eles fontes minerais de nutrientes, como K e P, o que pode garantir não só o suprimento de nutrientes essenciais, como uma melhoria geral nos atributos do solo.

Assim, o processamento e uso dos resíduos parecem ser uma alternativa viável para o retorno dos nutrientes à cadeia produtiva, minimizando a dependência por recursos naturais e energéticos atrelados à produção de fertilizantes minerais, bem como mitigando possíveis danos ao ambiente.

2.2 Avaliação da Eficiência de Fertilizantes

O benefício de um fertilizante não deve se basear apenas na disponibilidade do principal nutriente na sua composição, mas nos seus efeitos gerais sobre a fertilidade do solo e a nutrição das espécies cultivadas. Nesse sentido, a melhor fonte não é, necessariamente, aquela que forneça as maiores quantidades de nutrientes, mas sim a que a forneça de maneira eficiente, propiciando proporções adequadas de nutrientes como também condições favoráveis à sua absorção (GAVA et al., 1997).

É importante avaliar o potencial de um fertilizante, a fim de se eliminar os menos eficientes. Esta etapa consiste em determinar a composição química, a solubilidade e as características físicas da fonte. Ainda em laboratório, por meio de incubação do solo, é possível estudar as reações que o fertilizante teve com o solo, sendo possível estimar não só a disponibilidade do nutriente para as plantas, como também a dinâmica desses nutrientes. Essa dinâmica é realizada por meio da obtenção de isotermas de adsorção para estimar a fixação de P, por exemplo (GOEDERT et al., 1986).

Alguns métodos têm sido propostos para avaliar a eficiência da fonte de nutrientes (fertilizante) no desenvolvimento de uma determinada cultura, uma vez que esta eficiência está relacionada à disponibilização e tempo de liberação desses nutrientes e, como estes influenciam os atributos do solo, considerando os diferentes aspectos na sua caracterização (ECKHARDT, 2015; DOBERMANN, 2007; GAVA et al., 1997.; GOEDERT et al., 1986; SCIVITTARO et al., 1997).

2.2.1 Índices de eficiência agrônômica

Scivittaro e colaboradores (1997) avaliaram a eficiência agrônômica dos fertilizantes fosfatados pelo método mais usual, ou seja, qual o seu efeito sobre as características das plantas cultivadas. Com base nos parâmetros agrônômicos, também foi avaliada a eficiência de fertilizantes fosfatados, proposta por Goedert e colaboradores (1986), que consideram três métodos: Índice de Eficiência Agrônômica (IEA); Equivalente em Superfosfato Triplo (EqST) e método da dosagem de fósforo pela comparação de curvas de resposta (MPCCR).

O parâmetro IEA é calculado com base no diferencial de produção obtido pela comparação entre as fontes de fósforo, utilizando uma mesma dose de P total aplicado. Quando avaliado em casa de vegetação, a produção pode ser expressa por matéria seca produzida ou

por quantidade de nutrientes absorvidos pela planta. Já no campo, é preferível utilizar como parâmetro a produção física comercial de cada cultura.

O parâmetro EqST quantifica a produção da determinada fonte avaliada comparada à produção obtida ao utilizar superfosfato triplo (ST) no caso de adubos fosfatados, uma vez que o ST apresenta alta solubilidade e disponibilidade rápida de nutrientes, favorecendo o desenvolvimento da cultura.

O último método abordado por Goedert e colaboradores (1986) é o da escolha da dose. Nesse caso, ao se comparar duas doses é importante fazer a escolha considerando as curvas de resposta (MPCCR) da cultura ao nutriente, pois sem utilizá-las é possível a escolha de doses muito baixas ou muito elevadas, o que invalidaria as conclusões. Para validar a eficiência de uma fonte de nutriente é necessária a obtenção de curvas de resposta completas para todas as fontes. Contudo, este método só é viável com um número pequeno de fontes.

Outros métodos podem ser utilizados para a determinação do IEA, como o usado por Korndörfer e Melo (2009), onde o IEA foi calculado pela avaliação da produção com o uso do fertilizante, sem o uso do fertilizante e com o uso de uma fonte solúvel.

O método desenvolvido por Gava e colaboradores (1997) para avaliar a eficiência dos adubos fosfatados na produção de eucalipto avaliava não só o efeito na produção, mas também a fertilidade do solo, ou seja, a disponibilidade dos nutrientes, correlacionando os dois aspectos na eficiência do fertilizante utilizado. Desse modo, é destacada a importância de considerar a dinâmica do fertilizante no solo para um fornecimento eficiente de nutrientes.

2.2.2 Índice de eficiência de fertilizantes

Considerando que os FOMs possuem na sua composição fontes orgânicas, é interessante considerar não só os parâmetros referentes à eficiência agrônômica, mas também a um parâmetro que indique a dinâmica do fertilizante no solo, ou seja, a mineralização/disponibilização.

Desse modo, alguns autores vêm desenvolvendo o conceito de índice de eficiência de fertilizantes (IE), o qual se refere à proporção dos nutrientes que será disponibilizada às culturas em relação à quantidade total de nutrientes adicionados pelos fertilizantes orgânicos (COMISSÃO DE QUÍMICA E FERTILIDADE DO SOLO - CQFS/RS, 2004). Por isso, a recomendação das doses dos fertilizantes orgânicos, como o esterco bovino e outros insumos orgânicos considera IE com quantidades fixas. No entanto, essas quantidades fixas são oriundas, principalmente, de experimentos de curta duração, com produtos de determinada origem, podendo resultar em equívocos de sub ou superestimação, uma vez que não consideram o potencial de mineralização dos fertilizantes orgânicos (ECKHARDT, 2015).

Eckhard (2015), ao avaliar a eficiência de esterco bovino compostado e vermicompostado como fonte de nutrientes, utiliza um método de incubação do esterco, composto e vermicomposto que considera o efeito da mineralização sobre a disponibilidade total desses fertilizantes. Esse mesmo efeito deve ser considerado quando do uso dos FOMs devido à dinâmica de sua composição orgânica no solo.

2.3 Os Solos de Textura Arenosa

Como abordado anteriormente, a presença do componente orgânico permite aos FOMs uma melhoria na qualidade do solo pela ciclagem de nutrientes, agregação e capacidade de troca catiônica. Desse modo, o seu uso é uma estratégia que pode ser adotada em conjunto com outros manejos para aumentar a matéria orgânica e construir a fertilidade nos solos intemperizados, especialmente os solos arenosos, que são considerados solos frágeis, uma vez que estes solos,

muitas vezes, são utilizados para a produção de alimentos, mesmo sendo baixa produtividade em função das suas limitações químicas, físicas e biológicas.

Os solos arenosos apresentam *fragilidade textural* pois, além dos teores de areia elevados, possuem conteúdos de matéria orgânica baixos, capacidade de troca catiônica baixa (MIELNICZUK et al., 2003) e estabilidade dos agregados reduzida (WOHLENBERG et al., 2004; REELEDER et al., 2006; MARCATTO & SILVEIRA, 2016), podendo ser classificados como solos frágeis. Em tais solos, a decomposição da matéria orgânica ocorre de forma acelerada, em especial em condições de clima tropical. Em função dessas características, esses solos apresentam limitações para a agricultura, pelas suas deficiências nutricionais, baixa capacidade de troca catiônica e baixa retenção de água. (DONAGEMMA et al., 2016).

A incorporação de matéria orgânica em solos arenosos, quando comparado com outros ambientes, é extremamente difícil devido à sua baixa recalcitrância química e física. (DE CASTRO & HERNANI, 2015). Durante vinte e três anos de prática de agricultura orgânica no Sistema Integrado de Produção Agroecológica - SIPA (Embrapa/UFRRJ; Fazendinha Agroecológica), foi evidenciada a ocorrência de um baixo acúmulo de C_{org} (PIAN, 2015). Como os solos arenosos ou com horizontes superficiais de textura arenosa apresentam uma grande tendência à degradação, em especial pelo processo erosivo. Portanto, é necessário desenvolver neles estratégias de manejo e produção de alimentos de forma sustentável, promovendo a sua preservação e favorecendo o acúmulo da matéria orgânica (BELL & SENG, 2005). Assim, o uso dos FOMs pode ser uma das estratégias de manejo sustentável para esses sistemas.

2.4 Utilização de Resíduos de Tratamento de Esgoto

A coleta e o tratamento de esgotos são fundamentais para a preservação do meio ambiente e da saúde pública. Segundo dados Sistema Nacional de Informações sobre o Saneamento (SNIS, 2018), indicador médio de tratamento de esgoto dos municípios em 2017 foi de 55,61%. Por outro lado, a coleta/tratamento do esgoto tem aumentado no Brasil quando comparado a 2016 (54,33%), indicando que alguns avanços foram atingidos, mesmo que o número absoluto ainda seja bastante preocupante. O estudo também fez um ranking das 100 maiores cidades do país baseado nos diversos indicadores de saneamento básico, como acesso ao abastecimento de água e à coleta de esgoto, o percentual do esgoto tratado e investimentos e arrecadação no setor, com o município do Rio de Janeiro ocupando o 39º lugar no ranking do Saneamento Nacional. (INSTITUTO TRATA BRASIL, 2019). O Ranking é importante para avaliar a velocidade com que avançam os serviços de água, coleta e tratamento de esgotos no Brasil e constatou que a tão necessária universalização dos serviços não acontecerá sem um maior engajamento dos prestadores e do comprometimento dos governos federal, estaduais e municipais (VELASCO, 2018). Além disso é necessário destacar que o aumento e a melhora nos serviços de tratamento das águas residuárias (esgoto), conseqüentemente, gerará maior quantidade de resíduo a ser tratado e/ou descartado.

O resíduo sólido no Brasil é, geralmente, descartado em aterros sanitários o que, além de oneroso, colabora com a sobrecarga dos aterros em áreas urbanas; ao ser tratado, estabilizado e devidamente condicionado, é então denominado de bio-sólido se atender à Norma P4.230 da CETESB (CETESB, 1999), podendo ser usado com segurança na agricultura se atender à Resolução CONAMA nº 375, de 29 de agosto de 2006 (CONAMA, 2006).

De acordo com Pereira (2015) em sua revisão sobre o assunto, os primeiros trabalhos publicados no Brasil exaltando o potencial de uso agrícola desse resíduo foram realizados por Santos (1979), Carvalho e Barral (1981), Bettiol e Carvalho (1982) e Boaretto (1986). Também foi destacado por Pereira (2015) que o lodo de esgoto pode fornecer N às plantas em quantidades satisfatórias, além de outros elementos, como P, Ca, Mg, Zn e Cu, sendo que a

maioria desses nutrientes estão na forma orgânica, sendo apenas cerca de 30 a 50 % do N total é, prontamente, aproveitável pelas plantas, e que 70% encontra-se na forma orgânica, possivelmente, aproveitável no primeiro ano de cultivo, e que a maior parte do K encontra-se, prontamente, disponível aos vegetais.

O biossólido por ser rico em nutrientes e matéria orgânica torna possível o seu reaproveitamento, podendo ser aplicado, dentre outras atividades, em solos agrícolas ou como substrato para a produção de mudas. (DE ABREU et al., 2017; CABREIRA et al., 2017; ALONSO, 2018; LIMA FILHO et al., 2019). E, também, dado ao volume elevado de material gerado pelo tratamento de esgoto, com N, P e micronutrientes em sua composição, sua utilização na produção vegetal é promissora por suprir elementos essenciais (CAMPOS et al., 2019; MAGUIRE et al., 2019; BETIOL, 2004). Por fim, a utilização do biossólido na agricultura, reduz a emissão de CO₂ causada pela incineração, diminui a necessidade de adição fertilizantes químicos e aumenta o teor de matéria orgânica do solo (PEREIRA, 2015), e, que, para que este uso seja eficiente deve-se seguir um programa de planejamento e monitoramento adequado desse biossólido, tal como adequações necessárias para as estações de tratamento de esgoto e monitoramento ambiental, alternativas de higienização, aptidão das áreas de aplicação e operação da distribuição, estimativa da produção, avaliação da qualidade desse biossólido como destacado por Carvalho e Barral (1981).

Porém, quando se realiza a caracterização química das amostras de biossólidos observa-se uma grande variabilidade em sua composição, que depende de onde é oriundo e até mesmo com o é o comportamento desse biossólido ao longo do tempo (ALONSO, 2018), gerando algumas preocupações à sua utilização na agricultura, pois um possível impacto deve ser sempre observado. Diversos trabalhos se dedicam em observar os impactos da aplicação do biossólido como fonte de fertilizantes. Uma das preocupações se dá pela presença de elementos tóxicos, que podem se acumular nos solos contaminando os recursos hídricos, assim como determinada cultura a ser produzida na área (CAMPOS et al., 2019). Há, também, a possibilidade da alteração da carga microbiana devido ao uso de “lodos de esgoto”, dependendo especialmente do seu processo de tratamento (ALONSO, 2018). Betiol (2004) estudou a correlação entre as doses de aplicação de biossólido e incidência de *fusarium* na cultura do milho e concluiu que isto ocorreu por um desequilíbrio da relação N/K.

Como discutido acima, a regulação da aplicação do biossólido é essencial para garantia de um bom manejo da fertilidade e qualidade do solo. Nesse cenário, o uso do biossólido deve ser sempre baseado nas recomendações estabelecidas, como a exemplo da Companhia Ambiental do estado de São Paulo (CETESB, 1999), através da norma P.4.230, e da norma 375 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA, 2006), esta última mais restritiva, especialmente, quando comparada a outros países que tem maior e mais estabilizada a aplicação de biossólidos na agricultura. Entretanto, a partir do estabelecimento da norma do CONAMA número 375, o estado de São Paulo passou a utilizar essa norma, já que uma norma federal está, hierarquicamente, acima de uma estadual.

Desse modo, a utilização do Biossólido no FOM como fonte de nutrientes, principalmente nitrogênio, e matéria orgânica, pode ser uma alternativa de destinação do resíduo gerado pelo tratamento de esgoto, desde que o produto esteja em consonância com critérios estabelecidos na norma 375 do CONAMA. Além disso, os dados obtidos nesse trabalho podem favorecer a discussão acerca da flexibilização e recomendações (doses) destes resíduos na agricultura.

**3 CAPÍTULO I: CARACTERIZAÇÃO E ÍNDICE DE EFICIÊNCIA
 DOS FERTILIZANTES ORGANOMINERAIS**

3.1 RESUMO

A textura do solo afeta, diretamente, a dinâmica de nutrientes. Em solos de textura arenosa, o fenômeno de lixiviação é favorecido, estes estão mais propensos à perda de nutrientes por lixiviação, especialmente, N e K causando uma menor disponibilidade para as plantas. Por sua vez, o P tem uma maior disponibilidade devido à menor potencial de fixação, sendo esta disponibilidade melhorada pela adição de matéria orgânica. Como a matéria orgânica é importante para a manutenção da fertilidade em solos frágeis, os fertilizantes organominerais surgem como uma estratégia de adubação, por conterem em sua composição uma fração orgânica que contribui com nutrientes e também condiciona o solo. Assim, este capítulo tem o objetivo de avaliar a eficiência dos fertilizantes organominerais (FOMs) na disponibilidade de nutrientes e nas perdas por lixiviação. As fontes usadas para a formulação dos fertilizantes foram caracterizadas e apresentaram o teor de nutrientes adequados e não apresentaram contaminantes acima dos limites permitidos para sua utilização. A mineralização e o índice de eficiência foram avaliados por meio de incubação, comparando o controle aos FOMs, nas proporções de N-P-K: 1-0-0, 0-1-0, 0-0-1, 1-2-0, 1-4-0, 1-0-2, 1-2-2, 1-2-4, além do Biossólido, Fosfato Natural Reativo e Sulfato de Potássio que não foram granulados. Também foram realizados ensaios para avaliar as perdas de nutrientes por lixiviação nos mesmos tratamentos, utilizando colunas de lixiviação. De maneira geral, os FOMs apresentaram uma redução no N mineralizado líquido no período de 14 a 56 dias e não apresentaram imobilização de N. A maior disponibilidade de P, na maioria dos tratamentos, se deu a partir dos 14 dias, principalmente nos FOMs. Apesar da flutuação da disponibilidade de P, o índice de eficiência (IEP) médio da maioria dos tratamentos foi positivo. A disponibilidade de K pelos fertilizantes apresentou aumento gradual até 14 dias e disponibilidade substancial dos 28 dias aos 56 dias. Os fertilizantes 1-0-2, 1-2-2 e 1-4-2 apresentaram índice de eficiência de potássio (IEK) satisfatórios. Os FOMs apresentaram maiores perdas de K por lixiviação do que o tratamento 0-0-1, ainda que não tenha havido diferença significativa. As maiores lixiviações de N se deram nos tratamentos que continham P e K. As formulações com fontes minerais contribuíram para o aumento da eficiência na disponibilidade de N, P e K. A granulação do Sulfato de Potássio foi eficiente na redução das perdas por lixiviação de K. Os FOMs apresentaram maior lixiviação de N.

3.2 ABSTRACT

Soil texture directly affects the dynamics of nutrients. In sandy soils, the leaching phenomenon is favored because they are more prone to loss of nutrients by leaching, especially N and K, causing less availability for plants. In turn, P has a greater availability due to the lower fixation potential on these soils, and the addition of organic matter can improve this availability. As organic matter is crucial for maintaining fertility in fragile soils, organomineral fertilizers appear as a fertilizing strategy, as they contain an organic fraction that contributes to nutrients and also conditions the soil. Thus, this chapter aims to assess the efficiency of organomineral fertilizers (FOMs) in nutrient availability and leaching losses. The sources used for the formulation of the fertilizers were characterized and presented the content of adequate nutrients and did not present contaminants above the limits allowed for their use. Mineralization and the efficiency index were evaluated through incubation, comparing the control to the FOMs, in the proportions of NPK: 1-0-0, 0-1-0, 0-0-1, 1-2-0, 1-4-0, 1-0-2, 1-2-2, 1-2-4, plus Biosolids, Reactive Natural Phosphate and Potassium Sulfate, these not been granulated. Tests have also been carried out to assess nutrient losses by leaching with the same treatments, using leaching columns. In general, the FOMs showed a reduction in the liquid mineralized N in the period from 14 to 56 days and did not show immobilization of N. The greatest availability of P, in most treatments, occurred after 14 days, mainly in the FOMs. Despite the fluctuation of P availability, the average efficiency index (IEP) of most treatments was positive. The availability of K by fertilizers showed a gradual increase up to 14 days and substantial availability from 28 days to 56 days. Fertilizers 1-0-2, 1-2-2 and 1-4-2 showed satisfactory potassium efficiency index (IEK). FOMs showed higher K losses by leaching than the 0-0-1 treatment, although there was no significant difference. The greatest leaching of N occurred in the treatments that contained P, and K. The formulations with mineral sources contributed to the increase of efficiency in the availability of N, P and K. The granulation of Potassium Sulfate was efficient in reducing the losses by leaching of K. FOMs showed higher leaching of N.

3.3 INTRODUÇÃO

As principais formas de N encontradas no solo e absorvidas pelas plantas são nitrato (N-NO_3^-) e amônio (N-NH_4^+). No solo ocorrem várias reações envolvendo o N e umas delas, o processo de nitrificação, converte o N amoniacal em nítrico, forma altamente móvel no solo, o que interfere na eficiência do uso do N e na qualidade ambiental. Assim, manter o N na forma de NH_4^+ estende seu tempo de permanência na zona radicular, favorecendo sua absorção pelas plantas. A nitrificação ocorre rapidamente na maioria dos solos agrícolas com pH adequado, sendo a maior parte do NH_4^+ aplicado nitrificado dentro de quatro semanas. Logo, a textura do solo também afeta diretamente a dinâmica de N sendo que, em solos de textura arenosa (menor CTC, maior aeração e boa drenagem), espera-se um predomínio de N-NO_3^- e uma maior possibilidade de lixiviação (BREDEMEIER & MUNDSTOCK, 2000; DE CASTRO & HERNANI, 2015).

A dinâmica de P nos solos frágeis, por sua vez, ocorre em sentido contrário ao de N. O P é associado aos colóides do solo, por sua capacidade de formar ligações covalentes fortes com os minerais secundários típicos presentes na fração argila de solos intemperizados, sendo sua adsorção ao solo maior quanto maior for o teor de argila do solo. Além disso, o P se movimenta no solo por difusão e a distâncias curtas, sendo influenciado pelo maior fluxo de água em solos arenosos. Assim, sendo menor a adsorção e maior a movimentação do nutriente no solo, o fornecimento de P às plantas é favorecido, resultando em aplicação de doses menores e com maior economia para o produtor (DE CASTRO & HERNANI, 2015).

O potássio está presente como K^+ , cátion monovalente, sendo retido na matriz coloidal dos solos por ligações eletrostáticas fracas. O K^+ é transportado por difusão e atinge maiores concentrações na solução do solo, o que lhe confere maior mobilidade. Em solos de textura leve e com baixa CTC são favorecidas as perdas de potássio por lixiviação (DE CASTRO & HERNANI, 2015).

Desse modo, é possível ressaltar a importância da matéria orgânica para a manutenção de solos frágeis, visto que ela contribui significativamente para a CTC e retenção dos nutrientes, principalmente N e K. Os fertilizantes organominerais contêm em sua composição uma fração orgânica que contribui não só com nutrientes, mas também condiciona o solo de forma que os nutrientes adicionados permaneçam disponíveis às plantas, permitindo maior produtividade ao sistema e favorecendo a ciclagem e aumento do teor de matéria orgânica do solo (CRUZ et al., 2017). Porém, diferentemente dos fertilizantes minerais, os orgânicos têm uma disponibilização distinta porque dependem da mineralização do nutriente pelos organismos do solo. Em alguns casos, os nutrientes podem ser imobilizados, isto é, ficam indisponíveis para o uso pelas plantas. Uma das principais relações que regulam a mineralização/imobilização é a relação C/N. Em valores para C/N na faixa de 20 a 30, a mineralização e a imobilização tendem a ser iguais. Um aumento deste valor resulta em predomínio da imobilização, enquanto uma diminuição leva a que a mineralização passe a ser maior do que a imobilização, até que a atividade microbiana diminua, chegando a valores de C/N próximos a 10, que indicam estabilidade da matéria orgânica (CANTARELLA, 2007).

Neste capítulo será estudada a eficiência dos fertilizantes quanto a dinâmica de liberação dos nutrientes ao longo do tempo e o efeito da mineralização/imobilização na disponibilidade de nutrientes; também será estudado o efeito do uso das diferentes formulações de FOM compostos nas perdas por lixiviação dos nutrientes (N, P e K) quando comparados às suas fontes isoladas.

3.4 MATERIAL E MÉTODOS

Para o presente estudo foi utilizado o biossólido fornecido pela Companhia Estadual de Águas e Esgotos do Rio de Janeiro (CEDAE) como fonte de N e matéria orgânica do FOM. O uso do biossólido foi utilizado como alternativa de destinação econômica desse resíduo, que é gerado em quantidade elevada no tratamento de águas residuárias (esgoto). As fontes de potássio e fósforo usadas para a formulação dos FOMs compostos foram Sulfato Duplo de Magnésio e Potássio (*Paulifétil*), que será denominado somente como sulfato de potássio e Fosfato Natural Reativo, que será denominado de fosfato natural, respectivamente. Ambas as fontes de potássio e fósforo são permitidas na agricultura orgânica, permitindo a avaliação da dinâmica desses fertilizantes quando utilizados como fração mineral em fertilizantes organominerais.

3.4.1 Obtenção do biossólido oriundo da Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) – CEDAE

A Estação de Tratamento de Esgoto da CEDAE está localizada na Rua Domingos Mondin, 315, na Ilha do Governador, Zona Norte da cidade do Rio de Janeiro – RJ, que tem como coordenadas 22°47'44"S e 43°11'15"W. Essa ETE trata todo o esgoto da região da Ilha do Governador, prioritariamente residencial, pelo processo de digestão anaeróbia, tendo uma capacidade instalada de tratamento de 535 L s⁻¹ de esgoto.

O tratamento do resíduo (Figura 1) se inicia com os tratamentos preliminar e, posteriormente primário, onde o efluente é submetido ao gradeamento, seguido de desarenação e decantação. O tratamento secundário é realizado pelo sistema de lodos ativados, onde o efluente passa por tanque de aeração e depois por decantador. O biossólido é gerado nos decantadores, em ambas as fases do tratamento. Nessa estação, o lodo do tratamento primário é misturado ao do tratamento secundário antes do adensamento, que é realizado em centrífuga. Após o adensamento, o material é estabilizado em digestor anaeróbio, depois desidratado em centrífuga e disposto em leitos de secagem a pleno sol, onde permanece por pelo menos 90 dias, atingindo umidade abaixo de 20%. (DE ABREU et al., 2017; ALONSO, 2018).

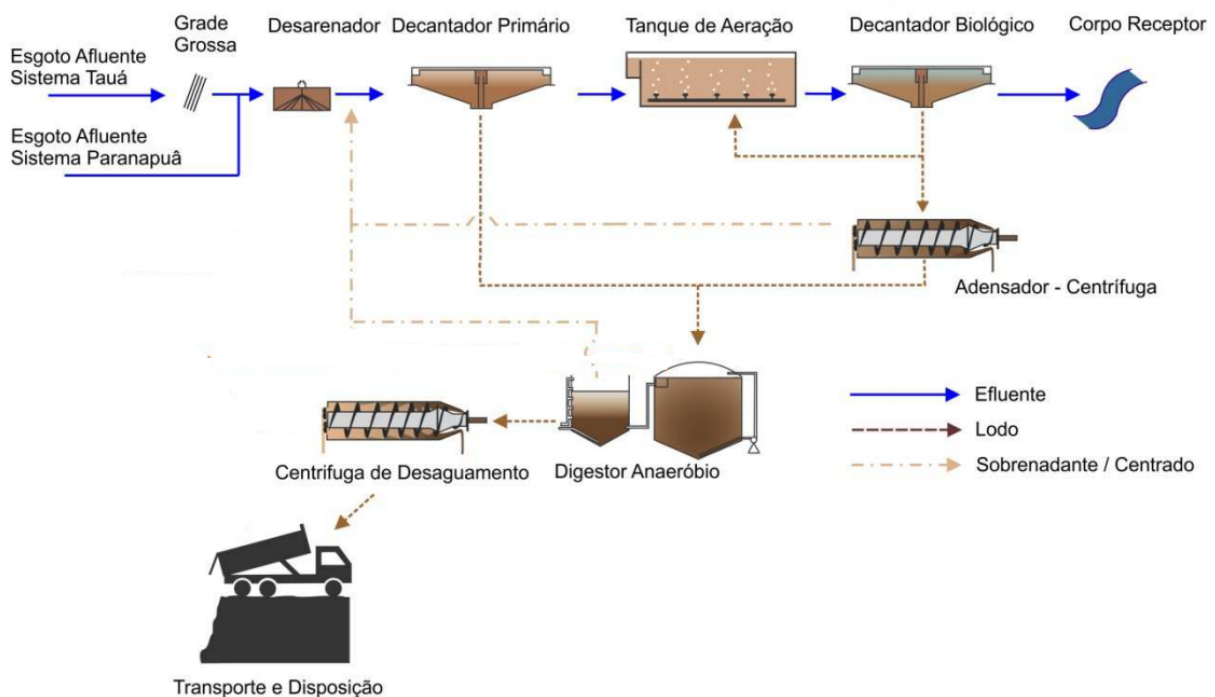


Figura 1 - Fluxograma da ETE Ilha do Governador (adaptado de BIELSCHOWSKY, 2014).

O material originado desse processo, denominado de Biossólido, foi utilizado como fonte de nitrogênio e matéria orgânica para a formulação do FOM composto.

3.4.2 Caracterização química de cada componente utilizado na formulação do fertilizante organomineral

Os teores dos elementos foram quantificados no Laboratório Solo Planta do Departamento de Solos do Instituto de Agronomia da UFRRJ, os teores de N, P e K foram determinados de acordo com o *Manual de métodos analíticos oficiais para fertilizantes minerais, orgânicos, organominerais e corretivos* (MAPA, 2014). Os teores pseudo-totais dos elementos tóxicos por meio da metodologia USEPA 3050b (1996). A determinação dos teores de P foi realizada por colorimetria, de K por fotometria de emissão de chama e os metais Ca, Mg, Fe, Cu, Mn, Ni, Zn, Pb e Cd por espectrometria de absorção atômica. Nitrogênio e carbono foram analisados por análise elementar pelo método CHN.

Na Tabela 1 estão apresentados os resultados dos teores totais dos elementos obtidos no biossólido, Sulfato de Potássio e Fosfato Natural.

Tabela 1 – Caracterização química das fontes orgânicas e minerais usadas na granulação dos fertilizantes.

Fonte	C	N	P	K	Ca	Mg	Ni
	-----%-----		-----g kg ⁻¹ -----				
Biossólido	12 ± 0,50	2 ± 0,05	5,5 ± 0,70	0,7 ± 0,00	0,03 ± 0,02	0,03 ± 0,00	8,00 ± 1,80
Sulfato de Potássio	3,0 ± 0,64	0,1 ± 0,03	4,1 ± 0,30	456 ± 14,5	0,10 ± 0,09	0,20 ± 0,00	6,86 ± 0,40
Fosfato Natural	4 ± 0,02	0,2 ± 0,02	224 ± 12,0	0,9 ± 0,08	0,06 ± 0,02	0,06 ± 0,00	1,43 ± 0,05
	Fe	Cu	Mn	Cr	Zn	Pb	Cd
	-----mg kg ⁻¹ -----						
Biossólido	236 ± 6,28	2,3 ± 0,16	2,3 ± 0,46	0,3 ± 0,03	10,4 ± 1,34	1,0 ± 0,09	0,03 ± 0,01
Sulfato de Potássio	1,9 ± 0,11	0,06 ± 0,01	0,05 ± 0,00	0,04 ± 0,01	0,5 ± 0,4	0,0 ± 0,0	0,01 ± 0,00
Fosfato Natural	71 ± 1,7	0,3 ± 0,06	1,6 ± 0,010	3,0 ± 0,10	1,7 ± 0,26	0,14 ± 0,14	0,85 ± 0,10

3.4.3 Formulação dos fertilizantes

O Biossólido e as fontes de fósforo e potássio foram classificados de acordo com a Instrução Normativa (IN) nº 25, de 23 de julho de 2009 do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA, 2009) e, posteriormente, processados quanto à granulometria, através de moagem, quando necessário, e peneiramento em malha de 35 mesh.

As proporções N:P:K de granulação foram estabelecidas conforme as calibrações das doses obtidas por Ferrari (2017) e Dias (2017), que foram preestabelecidas, de acordo com a Tabela 2.

Tabela 2 – Proporções das fontes orgânicas e minerais na composição de cada tratamento.

Tratamento/Composição	N:P:K
Controle	0-0-0
Biossólido + Fosfato Natural + Sulfato de Potássio	1-0-0
Biossólido + Fosfato Natural + Sulfato de Potássio	0-1-0
Biossólido + Fosfato Natural + Sulfato de Potássio	0-0-1
Biossólido + Fosfato Natural + Sulfato de Potássio	1-2-0
Biossólido + Fosfato Natural + Sulfato de Potássio	1-4-0
Biossólido + Fosfato Natural + Sulfato de Potássio	1-0-2
Biossólido + Fosfato Natural + Sulfato de Potássio	1-2-2
Biossólido + Fosfato Natural + Sulfato de Potássio	1-4-2

A granulação das fórmulas foi realizada em disco pelletizador de prato (Figura 2) e, para auxiliar a granulação e melhorar a qualidade do produto final, foi adicionado à mistura seca de cada formulação 3% do aditivo PVP (Polivinilpirrolidona). Ao final da granulação, os fertilizantes foram passados em peneiras de 4 mm e 2 mm, tendo sido selecionados os grânulos com diâmetro entre 2 e 4 mm, como ilustrado na Figura 3.



Figura 2 – Disco pelletizador de prato.



Figura 3 – T9 - Biossólido + Fosfato Natural Reativo + Sulfato de Potássio (1:2:4) granulado e com diâmetro entre 2 e 4 mm.

3.4.4 Índice de Eficiência do Fertilizante (IE)

O experimento de incubação foi conduzido em estufa incubadora para demanda bioquímica de oxigênio (DBO), avaliando as diferentes proporções dos FOMs segundo Eckhardt (2015). O delineamento experimental utilizado foi inteiramente casualizado (11 tratamentos + controle x 4 repetições x 6 datas). O solo utilizado na incubação foi coletado na camada 0-5 cm de um Planossolo Háptico, sendo acondicionado em saco plástico até o momento da incubação. As características do solo estão descritas na Tabela 3.

Tabela 3 – Característica (atributos químicos) do Planossolo Háptico utilizado no experimento de incubação.

Atributos Químicos	Valores
pH em água (1:2,5)	4,7
C	2,2 g kg ⁻¹
Saturação por bases	72%
Matéria orgânica	0,4 g kg ⁻¹
P	3,5 mg L ⁻¹
K ⁺	15,5 mg l ⁻¹
H+Al	2,0 cmol _c dm ⁻³
Al ⁺³	0,4 cmol _c dm ⁻³
Ca ⁺²	0,4 cmol _c dm ⁻³
Mg ⁺²	0,5 cmol _c dm ⁻³
Na ⁺	0,15 cmol _c dm ⁻³

O solo foi peneirado em malha 4 mm; a ele foi adicionado calcário dolomítico PRNT 80% (na dose de 2 ton ha⁻¹ por 20 dias), foi homogeneizado e a umidade ajustada a 9% (umidade gravimétrica).

A quantidade de FOM adicionado em cada recipiente foi equivalente à adição de 80 kg N ha⁻¹, de acordo com a recomendação para cultura de milho no Manual de Adubação e

Calagem do Rio de Janeiro (Freire et al., 2013). Em cada recipiente foram colocados, em duas etapas, 134 g de solo com 9% de umidade gravimétrica (equivalente a 123,3 g de solo seco a 105°C) e cada fertilizante, de acordo com a Tabela 1, e cada fonte isolada, sem granulação, a saber: Resíduo, Fosfato Natural Reativo e Sulfato de Potássio. Na primeira etapa foram adicionados 68,5 g de solo úmido e a metade da quantidade dos fertilizantes orgânicos. O material foi homogeneizado e compactado até a uma altura de 2,5 cm dos recipientes. Na segunda etapa foi adicionado o restante do solo e cada fertilizante orgânico, homogeneizando e compactando-os até a altura de 5 cm. Cada recipiente recebeu apenas uma dose de fertilizante orgânico, alcançando-se desta forma, a densidade de 1,2 g cm⁻³.

Quatro repetições de cada tratamento foram acondicionadas aleatoriamente em 12 potes de vidro com capacidade de 2,0 L, os quais foram, hermeticamente, fechados e acondicionados em câmara incubadora na ausência de luminosidade e condições controladas de temperatura (25±1°C) (Figura 4).



Figura 4 – Acondicionamento dos tratamentos nos potes de vidro de 2,0 L no DBO.

Os potes foram abertos por 10 minutos para evitar a deficiência de O₂, momento em que a umidade do solo foi monitorada por pesagem das unidades experimentais. Quando a perda de massa foi maior do que 0,5% foi feita a adição de água destilada na superfície do solo dos frascos de vidro.

A avaliação da mineralização de N e P, assim como a disponibilidade de K dos fertilizantes orgânicos das unidades experimentais, foram realizadas após a instalação do experimento de incubação (tempo 0), e aos 7, 14, 28, 56 e 112 dias após o início da incubação. Em cada tempo de avaliação, o solo foi retirado dos recipientes e homogeneizado antes de proceder às avaliações químicas. Os teores de amônio (N-NH₄⁺) e nitrito + nitrato (N-NO₂⁻ + N-NO₃⁻), P e K disponíveis (Mehlich-1) foram determinados, conforme descrito em Tedesco e colaboradores (1995). Os resultados foram expressos em mg kg⁻¹ solo seco. Com os valores de N-NH₄⁺ e N-NO₂⁻ + N-NO₃⁻ foram obtidos os valores de N mineral do solo (N_{min}) (Equação 1):

$$N_{\min} = N-NH_4^+ + N-NO_2^- + N-NO_3^- \quad (\text{Equação 1})$$

Os processos de mineralização ou imobilização de N dos fertilizantes orgânicos no solo ao longo do período de incubação foram avaliados através da mineralização líquida de N (N_{liq}) (Equação 2):

$$N_{\text{liq}} = N_{\min} \text{ do solo com fertilizante} - N_{\min} \text{ do solo controle} \quad (\text{Equação 2})$$

A N_{liq} indica se houve predomínio da mineralização do N (valor positivo) ou da imobilização do N (valor negativo) a cada tempo de coleta e para cada combinação solo/material orgânico (ECKHARDT, 2015).

A disponibilização ou imobilização de P e de K dos fertilizantes orgânicos no solo foi avaliada através da disponibilização líquida de P (P_{liq}) e K (K_{liq}) (Equações 3 e 4, respectivamente):

$$P_{liq} = P \text{ solo com fertilizante} - P \text{ do solo controle} \quad (\text{Equação 3})$$

$$K_{liq} = K \text{ solo com fertilizante} - K \text{ do solo controle} \quad (\text{Equação 4})$$

O Índice de Eficiência dos fertilizantes orgânicos (Equações 5, 6 e 7) foi calculado a partir dos valores totais de N, P e K (N_{tot} , P_{tot} e K_{tot} , respectivamente) adicionados e quantidade disponível de N, P e K presentes no solo após cada tratamento:

$$IE = (N_{min}/N_{tot}) \quad (\text{Equação 5})$$

$$IE = (P_{liq}/P_{tot}) \quad (\text{Equação 6})$$

$$IE = (K_{liq}/K_{tot}) \quad (\text{Equação 7})$$

Onde: IE = índice de eficiência; tot = quantidade adicionada via fertilizante + teor no solo, determinado, segundo Tedesco e colaboradores (1995), ($mg\ kg^{-1}$); min = teores em cada tempo avaliado ($mg\ N\ kg^{-1}$).

3.4.5 Ensaio em colunas de lixiviação

Para determinar a dinâmica de liberação de potássio e de outros elementos, foi conduzido um ensaio com colunas de lixiviação, pela adaptação da metodologia de Bamberg e colaboradores (2012). O ensaio foi realizado na área experimental do Departamento de Solos – Instituto de Agronomia da UFRRJ, Seropédica - RJ. O delineamento experimental utilizado foi de blocos inteiramente casualizados (11 tratamentos + controle x 3 repetições x 10 lixiviações). Foram utilizados os tratamentos descritos na Tabela 1 e outros 3 tratamentos: Biossólido sem granulação, Sulfato de Potássio sem granulação e Fosfato Natural Reativo sem granulação. O solo foi peneirado em malha de 2 mm e a ele foi adicionado calcário dolomítico (na dose de 2 toneladas ha^{-1}), homogeneizado e acondicionado nas colunas.

As unidades experimentais foram constituídas de colunas de PVC de 10 cm de diâmetro, conforme exemplificado na Figura 5. As colunas foram preenchidas com o solo corrigido até uma altura de 45 cm, a fim de obter um pH ideal (5,5 - 6,5) para disponibilidade dos nutrientes. Os fertilizantes foram adicionados na dose de 80 $kg\ N\ ha^{-1}$ e posicionados a 5 cm de profundidade na coluna. A umidade do solo no interior da coluna foi ajustada à sua capacidade de campo. As lixiviações foram correspondentes à aplicação de um volume de água destilada (V) equivalente ao saldo entre as médias anuais da Precipitação (P) e Evapotranspiração potencial (Etp) de Seropédica, ou seja, $P = 1354\ mm$ e $Etp = 912\ mm$ (DE CARVALHO et al., 2015), fornecendo então $V = 442\ mm/ano$. Considerando 365 dias, tem-se que $V = 1,2\ mm/dia$. Uma frequência de lixiviações que permite a avaliação laboratorial dos nutrientes do percolado está na ordem de 7 a 14 dias, portanto é recomendada a utilização deste intervalo. Considerando-se a frequência das lixiviações como uma vez por semana, a aplicação da lâmina de lixiviação foi de 8,5 mm por semana ($1,2\ mm/dia \times 7\ dias$). Esse valor foi multiplicado por um fator de

aceleração do processo igual a 5 (pode variar entre 5 a 10, segundo o método) e uma lixiviação por semana ao longo de 10 semanas, a fim de totalizar 10 lixiviações, correspondente ao que poderia ser disponibilizado em 50 semanas em uma condição de campo. A água foi aplicada e distribuída com auxílio de um pote com furos, que permitiu uma vazão aproximada de $0,8 \text{ mm min}^{-1}$, sem permitir o acúmulo de água para não criar condições de redução (Figura 4).

A estimativa da quantidade de K liberado na forma de K_2O , NH_4^+ e $\text{NO}_3^- + \text{NO}_2^-$ totais para a solução do solo foi obtida pelas equações 8, 9 e 10:

$$K_t = K_r - K_c \quad (\text{Equação 8})$$

$$\text{NH}_4^+{}_t = \text{NH}_4^+{}_r - \text{NH}_4^+{}_c \quad (\text{Equação 9})$$

$$(\text{NO}_3^- + \text{NO}_2^-)_t = (\text{NO}_3^- + \text{NO}_2^-)_r - (\text{NO}_3^- + \text{NO}_2^-)_c \quad (\text{Equação 10})$$

Onde: “t” é a quantidade total lixiviada de cada nutriente, “r” é a quantidade lixiviada pelo tratamento com fertilizante e “c” é a quantidade lixiviada no tratamento controle.

As soluções percoladas foram coletadas em frascos de plástico. A preservação e as análises dos elementos presentes seguiram a metodologia proposta no *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA, 1992). P, K e NH_4^+ e $\text{NO}_3^- + \text{NO}_2^-$, foram determinados, respectivamente, por colorimetria, espectrometria de chama e destilação.

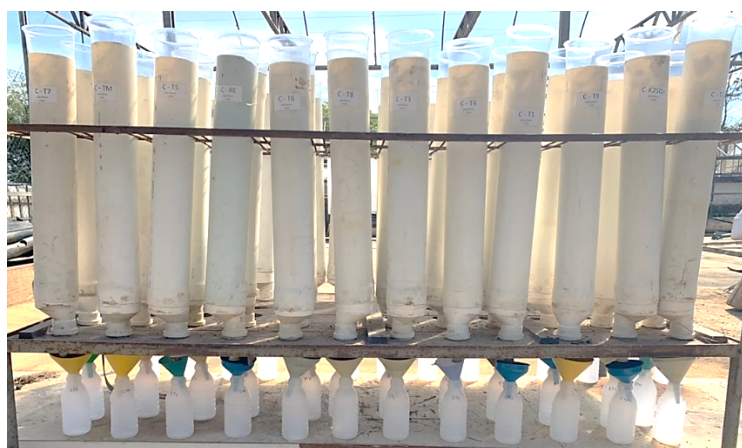


Figura 5 – Colunas de lixiviação em PVC.

3.4.6 Análises estatísticas

Os resultados obtidos foram analisados quanto à sua normalidade pelo teste Shapiro-Wilk e, quando os dados não atenderam aos requisitos, foram transformados por Box-Cox utilizando o *software* PAST. Posteriormente, os dados foram submetidos à análise de variância, e as médias dos tratamentos para o experimento de incubação foram comparadas através do teste de Tukey e para o experimento de lixiviação com o teste Scott-Knott a 5% de probabilidade com uso de *software* R.

3.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.5.1 Caracterização das fontes usadas na formulação e dos FOMs

Ao caracterizar cada fonte para preparação das formulações (Tabela 3), pode-se fazer as seguintes observações quanto ao teor de N, P e K: o teor de N está dentro do que, usualmente, é encontrado em resíduos de tratamento de esgoto e que, normalmente, varia entre 0,5 e 2%, como observado por Ahmed e colaboradores (2010) e corrobora com os resultados encontrados para o biossólido oriundo da mesma estação de tratamento (ETE Ilha – CEDAE RJ) utilizada neste trabalho com valores entre 1,5 - 3,0% ao longo de diferentes anos (DE ABREU *et al.* 2017, ALONSO, 2018). É importante destacar que a composição do biossólido é variável, visto que a carga de entrada dos resíduos domésticos também varia ao longo do tempo. O teor de P obtido no Fosfato Natural Reativo e o de K no Sulfato de Potássio foi de, respectivamente, $22,4 \pm 1,2 \%$ e $45,6 \pm 1,5 \%$. Considerando a margem de erro, os resultados estão de acordo com o informado nos rótulos dos produtos, isto é, 29 % (m/m) P_2O_5 total e 50 % (m/m) K_2O .

A determinação do teor total de alguns cátions metálicos nas fontes que compuseram os diferentes FOMs teve a finalidade de averiguar se estas fontes têm o potencial de ser utilizadas como insumos de produção agrícola a serem adicionados ao solo. Os teores de ferro (Fe), crômio (Cr) e cádmio (Cd) são maiores no Fosfato Natural Reativo do que nas demais fontes, porém apenas o crômio tem limite regularizado na Instrução Normativa nº 7, de 2 de maio de 2016 (MAPA, 2016), e está abaixo do limite máximo permitido (40 mg kg^{-1}) em contaminantes admitidos em substrato para plantas. O Biossólido apresentou os maiores teores de ferro, cobre, manganês, zinco e chumbo. De acordo com a legislação (MAPA, 2016) que regula apenas cádmio, crômio e chumbo em material orgânico (valores máximos permitidos 70, 3 e 150 mg kg^{-1} , respectivamente), a caracterização apresentou valores abaixo do limite máximo permitido. Os valores de níquel, cobre, crômio, zinco, chumbo e cádmio (valores máximos permitidos 50, 1500, 1000, 300 e 39 mg kg^{-1} , respectivamente) também estão abaixo do limite máximo estabelecido pela legislação do CONAMA (2006), que regula os requisitos de qualidade do lodo de esgoto para aplicação na agricultura.

A caracterização química dos fertilizantes orgânicos utilizados na incubação está descrita na Tabela 4.

Tabela 4 – Caracterização química dos fertilizantes granulados.

Tratamento	Nitrogênio	Fósforo	Potássio	Carbono	C/N	pH
	% (m/m)					
1-0-0	2,1	0,5	0,7	11,7	5,5	4,5
0-1-0	0,5	5,2	0,4	1,1	2,0	6,3
0-0-1	1,2	0,5	25,9	1,8	1,5	7,2
1-2-0	1,6	0,9	0,7	10,4	6,5	5,5
1-4-0	1,9	1,8	0,8	10,2	5,3	5,0
1-0-2	1,9	0,6	1,4	10,8	5,7	6,0
1-2-2	1,4	1,2	1,6	10,7	6,1	6,2
1-4-2	1,7	2,0	1,3	11,4	6,7	6,3

A proporção dos nutrientes está de acordo com os valores determinados para a formulação dos organominerais. O teor de nitrogênio total (N_{total}) é similar aos dos FOMs que possuem o nutriente, consequência da utilização do mesmo material como fonte de N, ou seja, resíduo de estação tratamento de esgoto. O mesmo comportamento se dá com o potássio nos fertilizantes que possuem Sulfato de Potássio na composição. Para os valores de Fósforo (P) há variação esperada entre as diferentes proporções de P.

O biossólido e o fertilizante granulado 1-0-0 (biossólido sob granulação) apresentaram os menores valores de pH. Os fertilizantes minerais de fontes de P, assim como os FOMs com todas as fontes de K na composição (1-0-2, 1-2-2 e 1-4-2), apresentaram pH mais ácidos, enquanto os de fonte de K, um pH próximo à neutralidade. Este comportamento pode ser explicado pela composição de fonte potássica utilizada, o sulfato de potássio oriundo do mineral polihalita, que além de sulfato de potássio possui sulfato de cálcio e magnésio na sua composição. O pH deste fertilizante é próximo ao dos produtos que possuem gesso ($CaSO_4$) na sua composição. A adição de fertilizantes com pH próximo ou acima de 7,0 pode apresentar uma ação corretiva da acidez do solo devido à sua ação tampão (SOARES et al., 2004), melhorando as condições para o desenvolvimento das plantas, principalmente em solos ácidos e arenosos, como os da baixada do Estado do Rio de Janeiro. Entretanto, uma condição mais alcalina pode favorecer as perdas de $N-NH_4^+$ por volatilização.

Os fertilizantes que contêm N apresentaram relação similar de carbono total (C) e C/N. A relação C/N é um dos parâmetros mais utilizados para indicar a estabilização dos fertilizantes orgânicos, considerada ideal quando está entre 15 e 20. O produto final com valores de C/N superiores a 20 pode causar impactos negativos para as plantas. (DORES-SILVA et al., 2013). Entretanto, quando os valores da relação C/N são menores que 10 favorecem perdas de N amoniacal. Essa relação C/N baixa favorece, contudo, a mineralização e a disponibilidade do nutriente para as culturas. Os valores da relação C/N para todos os FOMs estudados estiveram abaixo desse valor, condizente com a relação C/N de lodo ativado (KIEHL, 2010). Cabe destacar que o biossólido utilizado na produção dos FOMs passou por um processo de estabilização.

3.5.2 Índice de eficiência do fertilizante

De maneira geral, os FOMs apresentaram uma redução no N mineralizado líquido no período de 14 a 56 dias (Figura 6), porém avaliando o Índice de Eficiência de N (IEN) (Tabela 5), não houve imobilização (valores negativos) na maioria dos FOMs.

Tabela 5 – Índice de Eficiência de nitrogênio (N), fósforo (P) e potássio (K) nos fertilizantes.

Fertilizante	Dias					
	0	7	14	28	56	112
Índice de eficiência de N						
1-0-0	0,25 a	0,30 a	0,26 abc	0,16 ab	0,20 abcd	0,08 a
0-1-0	0,07 ab	-0,12 b	0,14 bcd	0,05 ab	0,07 abcd	-0,17 a
0-0-1	0,05 ab	0,02 b	-0,07 cd	-0,40 b	-0,11 cd	-0,03 a
1-2-0	0,16 ab	0,32 a	0,29 abc	-0,07 ab	0,10 abcd	-0,06 a
1-4-0	0,12 ab	0,24 a	0,21 abcd	0,31 a	0,27 ab	0,07 a
1-0-2	0,19 a	0,36 a	0,40 a	0,21 ab	0,26 abc	-0,10 a
1-2-2	0,06 ab	0,36 a	0,35 ab	0,28 a	0,29 ab	0,19 a
1-4-2	0,02 ab	0,27 a	0,35 ab	0,17 ab	0,27 ab	0,19 a
Biossólido	0,02 ab	0,26 a	0,26 abc	-0,11 ab	0,33 a	0,14 a
Fosfato Natural Reativo	-0,08 ab	0,16 a	0,02 bcd	0,00 ab	0,00 bcd	-0,07 a
Sulfato de Potássio	-0,03 b	0,09 a	-0,30 d	-0,03 ab	-0,33 d	-0,27 a
Índice de eficiência de P						
1-0-0	0,68 a	-0,29 bc	0,93 ab	0,71 a	0,53 ab	0,88 a
0-1-0	0,52 a	0,90 a	0,97 a	0,94 a	0,97 ab	0,96 a
0-0-1	0,39 a	0,14 b	0,69 ab	0,16 b	2,84 a	0,24 b
1-2-0	0,55 a	0,94 a	0,99 ab	0,92 a	0,96 ab	0,74 a
1-4-0	0,14 a	0,18 b	1,29 a	0,98 a	0,98 ab	0,99 a
1-0-2	0,38 a	0,05 b	0,93 ab	0,65 a	0,79 ab	0,93 a
1-2-2	-2,65 b	-0,60 c	0,53 b	0,92 a	0,88 ab	0,97 a
1-4-2	-0,69 a	-1,01 c	0,47 b	0,98 a	0,98 ab	0,99 a
Biossólido	0,66 a	0,75 ab	0,92 ab	0,96 a	0,97 ab	0,29 b
Fosfato Natural Reativo	0,94 a	0,95 a	0,99 ab	0,93 a	0,98 ab	0,98 a
Sulfato de Potássio	0,05 a	-0,34 bc	0,78 ab	0,90 a	-1,86 b	0,32 a
Índice de eficiência de K						
1-0-0	0,09 bcd	0,06 bc	-0,05 b	-0,13 b	0,05 b	-0,59 d
0-1-0	0,23 abc	0,02 bc	-0,09 b	-0,17 b	0,00 b	-0,74 d
0-0-1	-0,14 d	0,45 ab	0,69 a	0,78 a	0,81 a	0,61 b
1-2-0	0,22 bc	0,07 bc	0,03 b	-0,37 bc	-0,03 b	-0,57 d
1-4-0	0,26 abc	0,07 abc	0,05 b	-0,17 b	0,10 b	-0,30 d
1-0-2	0,52 ab	0,66 ab	0,76 a	0,74 a	0,79 a	0,59 b
1-2-2	0,18 bcd	0,53 ab	0,68 a	0,72 a	0,85 a	0,57 b
1-4-2	0,15 bcd	0,50 ab	0,71 a	0,78 a	0,87 a	0,53 b
Biossólido	0,00 cd	-0,01 c	-0,07 b	-0,44 bc	-0,04 b	0,23 c

Fosfato Natural Reativo	0,07 bcd	0,07 bc	-0,11 b	-0,28 b	0,01 b	0,06 cd
Sulfato de Potássio	0,71 a	0,71 a	0,76 a	0,74 a	0,81 a	0,85 a

Letras iguais na mesma coluna não diferem pelo teste de Tukey, $P < 0,0$

Não ter havido imobilização nesse período é um fator importante, pois a falta de N no solo pode limitar o desenvolvimento de culturas (ECKHARDT, 2015). Eckhardt e colaboradores (2018) observaram um comportamento diferente nesse período, ao utilizar como fertilizante esterco bovino leiteiro. Esta diferença pode estar relacionada à dinâmica de mineralização dos FOMs quando comparados ao esterco bovino. O esterco bovino possui relação C/N e %C elevados, enquanto os FOMs possuem relação C/N e %C menores. Quando a relação C/N dos materiais adicionados ao solo é baixa favorece a mineralização de nitrogênio do solo, mas também disponibiliza mais lentamente o nutriente do que os fertilizantes solúveis, reduzindo as perdas. (KIEHL, 2010)

Em todo o período de avaliação, os FOMs 1-2-2 e 1-4-2 apresentaram uma mineralização líquida de N superior entre os fertilizantes avaliados, com valor médio de 56 e 67 mg N kg⁻¹ de solo, respectivamente (Figura 6).

De maneira geral, os FOMs apresentaram maior Índice de Eficiência de nitrogênio (IEN) (Tabela 5), em especial os tratamentos 1-2-2 e 1-2-4, que não apresentaram imobilização de N até os 112 dias, apresentando IEN médios de 0,26 e 0,21, respectivamente. Estes tratamentos foram os que tinham a maior relação N:P na composição, destacando a influência do P como promotor de liberação do nitrogênio, especialmente porque esse N está bem estabilizado no bio sólido (processo de tratamento descrito no Item 3.4.1).

Estes resultados são semelhantes ao IEN médio do bio sólido granulado (0,21) e superiores ao do bio sólido sem granulação (0,15). O IEN médio > 0,21 encontrado nos FOMs e no bio sólido granulado é superior ou semelhante aos encontrados por Eckhardt e colaboradores (2018) ao estudarem fertilizantes orgânicos que apresentaram IEN entre 0,10 e 0,20 no período total de avaliação. Os IEN encontrados no presente trabalho também foram superiores ao encontrado por de Oliveira e colaboradores (2012), que estudaram a mineralização do N para 15 compostos orgânicos, em curto período de observação em campo (28 dias), e encontraram para bio sólido um valor negativo para IEN, indicando a ocorrência de um processo de imobilização, a diferença nesses valores pode estar expressa também na composição dos resíduos de esgoto (bio sólido) serem variáveis dependendo da sua origem.

Os resultados encontrados corresponderam aos IEN esperados de acordo com o *Manual de Adubação e Calagem para os Estados do RS e SC* (CQFS/RS, 2004), que apontam IE de 0,2 para bio sólido e composto de lixo. Os fertilizantes que apresentaram redução do N líquido na fase inicial foram os que não possuíam N na sua composição. Algumas composições do FOM apresentaram imobilização aos 28 e 112 dias, mas os IEN médios (ao longo de 112 dias) de todos os FOMs foram > 0,10.

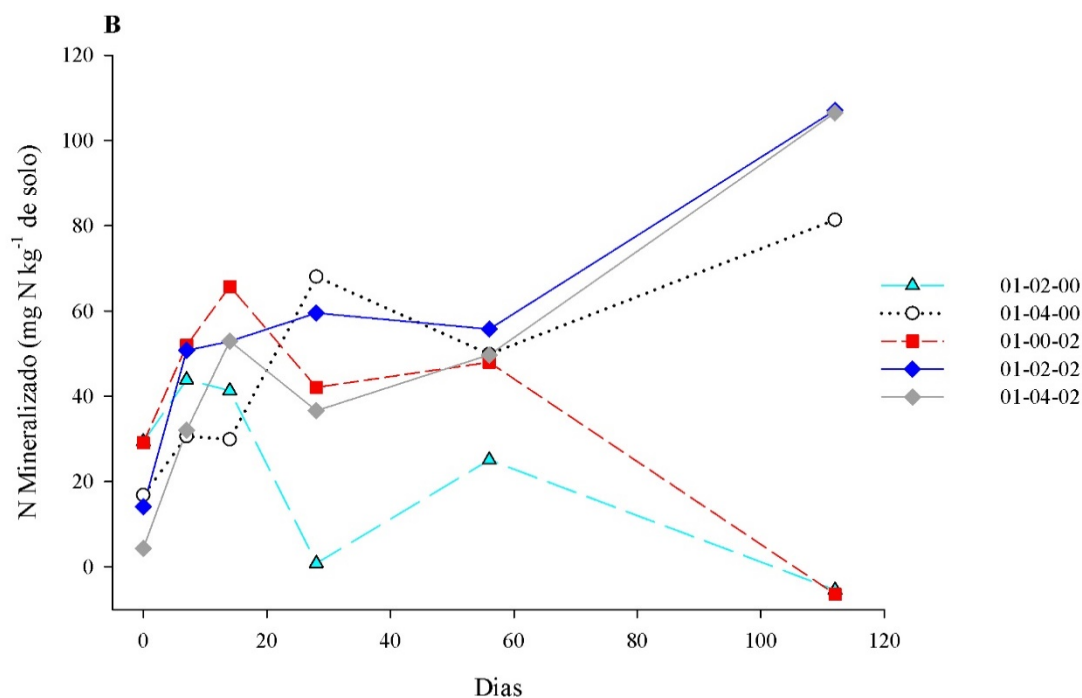
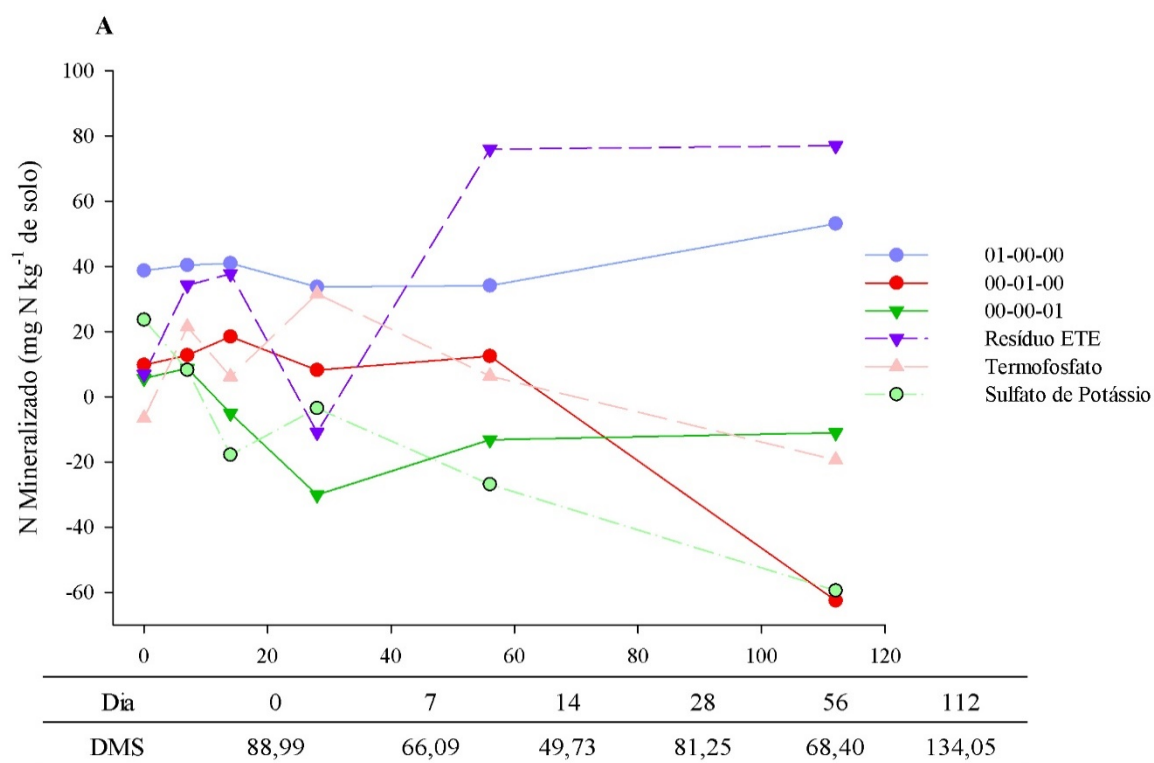


Figura 6 – Mineralização líquida do nitrogênio dos fertilizantes no solo. A) Mineralização dos tratamentos: 1-0-0,0-1-0, 0-0-1, Biossólido, Fosfato Natural Reativo e Sulfato de potássio. B) Mineralização dos tratamentos: 1-2-0,1-4-0, 1-0-2, 1-2-2 e 1-4-2. Os valores são a média de quatro repetições. Os valores na tabela representam a diferença mínima significativa (Tukey, $P < 0,05$).

Como era de se esperar, as maiores quantidades de P solubilizado (Figura 7) foram observadas nos fertilizantes fosfatados (fontes de P granuladas e não granuladas) e nos FOMs com as maiores doses de P (1-4-0 e 1-4-2), com estes fertilizantes, apresentando o maior teor inicial de P entre os tratamentos. A maior disponibilidade de P na maioria dos tratamentos se deu a partir dos 14 dias, principalmente, nos FOMs. A fração orgânica protege a fração mineral e reduz a superfície de contato do P com os sítios ativos para imobilização (KIEHL, 2010), o que pode ser confirmado pela IEP (Tabela 5) inicial dos FOMs 1-2-2 e 1-2-4, que apresenta valores negativos. Isso indica que ocorreu um processo de imobilização, ou seja, este tratamento apresentou valores mais baixos do que o controle, onde o P presente no solo foi imobilizado antes que começasse a ser liberado pelos fertilizantes adicionados, que ocorre a partir 28º dia. Segundo Ranno e colaboradores (2007), após a adição do fósforo ao solo ocorre a transferência de fósforo da solução do solo para a fase sólida, com parte deste elemento ficando adsorvido especificamente a óxidos de ferro e de alumínio, e, portanto, ficando indisponível às culturas. Nos FOMs a transferência do P para a solução, por sua vez, se torna mais lenta devido à granulação, indicando que a fração orgânica contribuiu para o aumento da CTC do solo, desfavorecendo a fixação de P no solo. Os tratamentos com Biossólido e Sulfato de Potássio granulado e não granulado, mesmo sem sofrer adição de P em sua composição, apresentaram comportamento semelhante quanto à disponibilidade de P, mas com menores valores para P disponível.

Apesar da flutuação dos resultados da disponibilidade de P, o índice de eficiência (IEP) médio da maioria dos tratamentos foi positivo (Tabela 6), com IEP negativo apenas para o Sulfato de Potássio (não granulado). Os FOMs com os maiores IEP médios corresponderam aos fertilizantes fosfatados e os FOMs 1-2-0 e 1-4-0. Os FOMs 1-2-2 e 1-2-4, que, apesar de apresentarem imobilização de P até os 7 dias, foram os que apresentaram IEP > 0,90 a partir dos 28 dias. Estes valores são superiores aos encontrados por Eckhardt e colaboradores (2018), que encontraram IEP > 0,53 a partir dos 28 dias, para os fertilizantes obtidos de esterco bovino vermicompostado. Esta diferença encontrada entre os trabalhos está principalmente na composição, onde o IEP dos estercos é menor pois se leva em consideração a quantidade de P encontrada no resíduo orgânico, enquanto no presente trabalho há uma adição de fonte fosfatada afim de elevar o IEP do biossólido quando numa formulação. O *Manual de Adubação e Calagem para os Estados do RS e SC* (CQFS/RS, 2004) não estipula IEP para esgoto e composto de lixo, mas o IEP médio (0,88 e 0,76) obtido para o Biossólido 1-0-0, granulado e não granulado, são semelhantes ao IEP=0,8 para a categoria “outros resíduos” disponível no manual. Sendo assim, a adição de uma fonte fosfatada eleva o IEP do fertilizante, quando em formulação, de um resíduo que geralmente não possui elevadas quantidades de P. O IEP foi maior no 1-0-0 (biossólido granulado), podendo ser relacionado à eficiência da granulação na redução da fixação de P (KIEHL, 2010).

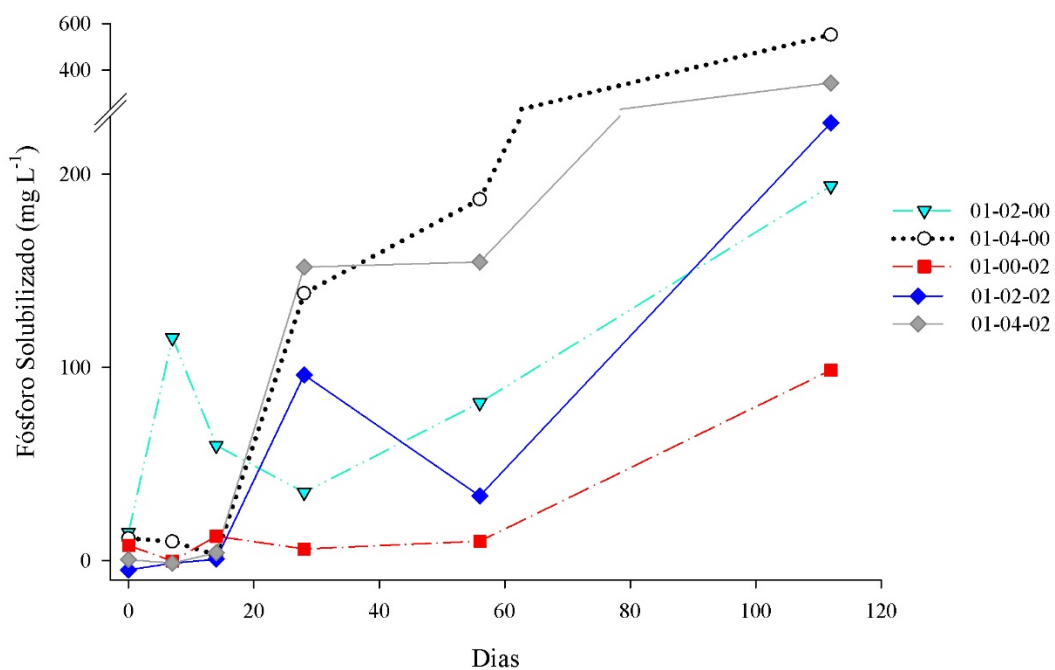
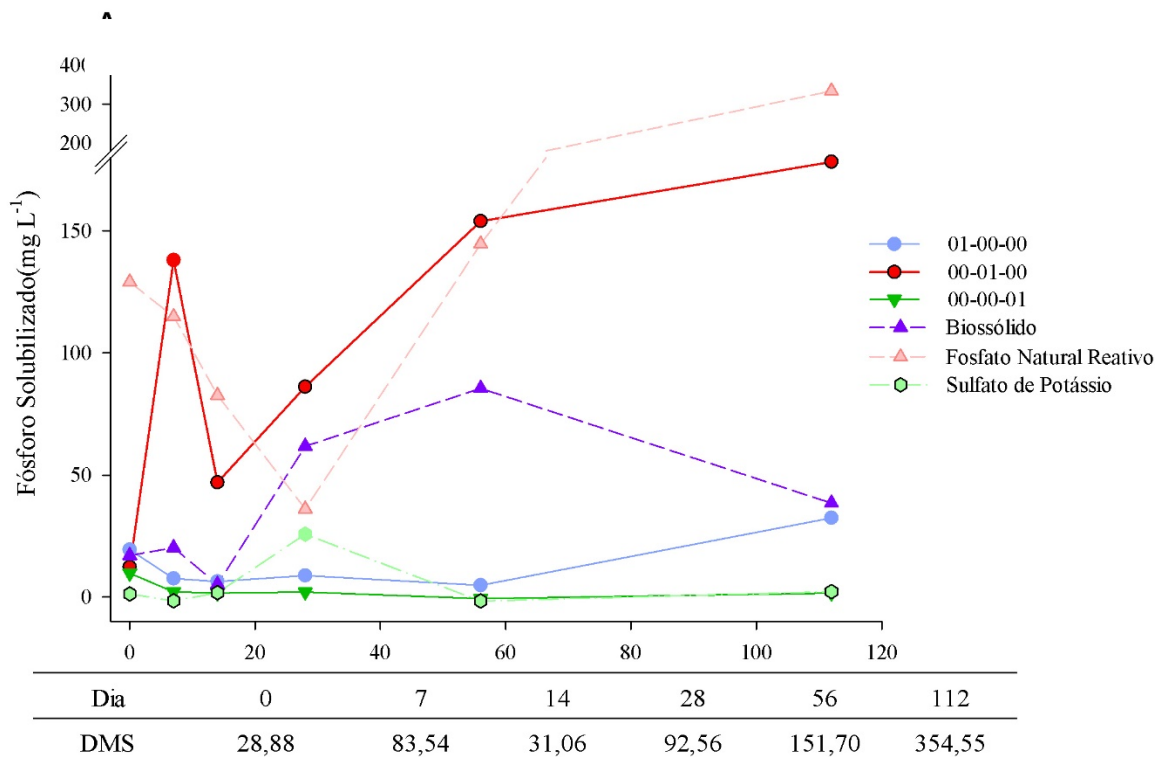


Figura 7 – Disponibilidade líquida do fósforo dos fertilizantes no solo. A) Mineralização dos tratamentos: 1-0-0,0-1-0, 0-0-1, Biossólido, Fosfato Natural Reativo e Sulfato de Potássio. B) Mineralização dos tratamentos: 1-2-0,1-4-0, 1-0-2, 1-2-2 e 1-4-2. Valores são a média de quatro repetições. Os valores na tabela representam a diferença mínima significativa (Tukey, $P < 0,05$).

A disponibilidade de K pelos fertilizantes (Figura 8) apresentou comportamento similar, com aumento gradual até 14 dias e disponibilidade substancial do 28º ao 56º dia, com exceção do tratamento 0-0-1, que a disponibilidade reduziu a partir do 28º dia. Esse comportamento na redução da disponibilidade de K após os 56 dias também foi observada nos fertilizantes orgânicos avaliados por Eckhardt e colaboradores (2018). As maiores disponibilidades de K foram observadas nos FOMs e no 0-0-1, incluindo os fertilizantes que não possuíam K na sua composição (1-2-0 e 1-4-0), o que pode ser explicado pelo efeito da fração orgânica na disponibilidade do nutriente (KIEHL, 2010).

Alguns tratamentos apresentaram índice de eficiência de potássio (IEK) negativo, indicando imobilização do nutriente, principalmente, nos fertilizantes sem K na sua formulação (Tabela 5). Entretanto, no tempo 0, o IEK da amostra 0-0-1 (Sulfato de Potássio granulado) também apresentou valor negativo, o que pode indicar que a granulação promove a liberação mais controlada do nutriente, visto que o Sulfato de Potássio tem boa solubilidade e %K considerável. O IEK no *Manual de Adubação e Calagem para os Estados do RS e SC* (CQFS/RS, 2004), assim como o IEP, não tem valor definido para bio sólido e composto de lixo, mas o valor do IEK considerado para a categoria “outros resíduos” é 0,7. Os fertilizantes 1-0-2, 1-2-2 e 1-4-2 foram os únicos que apresentaram IEK próximos a essa faixa, especialmente no período de 14 a 56 dias, quando há a recomendação de adubação potássica para culturas olerícolas (FREIRE et al., 2013), maior destaque da produção dos solos arenosos da baixada do Rio de Janeiro. Como os bio sólidos, de maneira geral, apresentam baixo conteúdo de K (DE ABREU et al. 2017, ALONSO, 2018) pois é um nutriente móvel em água, a adição de uma fonte potássica permite uma maior eficiência desse nutriente somado à fonte orgânica. O bio sólido, por sua vez, como fonte orgânica tem o potencial de reduzir a perda desse nutriente, que é maior em solos arenosos por estes serem bem drenados.

De modo geral, o Bio sólido de Estação de Tratamento de Esgoto pode ser utilizado como um componente dos FOMs pois apresentou características adequadas para %N, relação C/N, mineralização de N e IEN (CQFS/RS, 2004). A estratégia da granulação desse Bio sólido para a síntese do organomineral possibilitou ainda uma elevação no índice de eficiência de P e K, avaliado no IEP e IEK dos organominerais, em comparação com o resíduo, especialmente após 14 dias (Tabela 5). Desse modo, utilizar os fertilizantes organominerais granulados pode aumentar a eficiência do fertilizante quanto a disponibilidade de nutrientes.

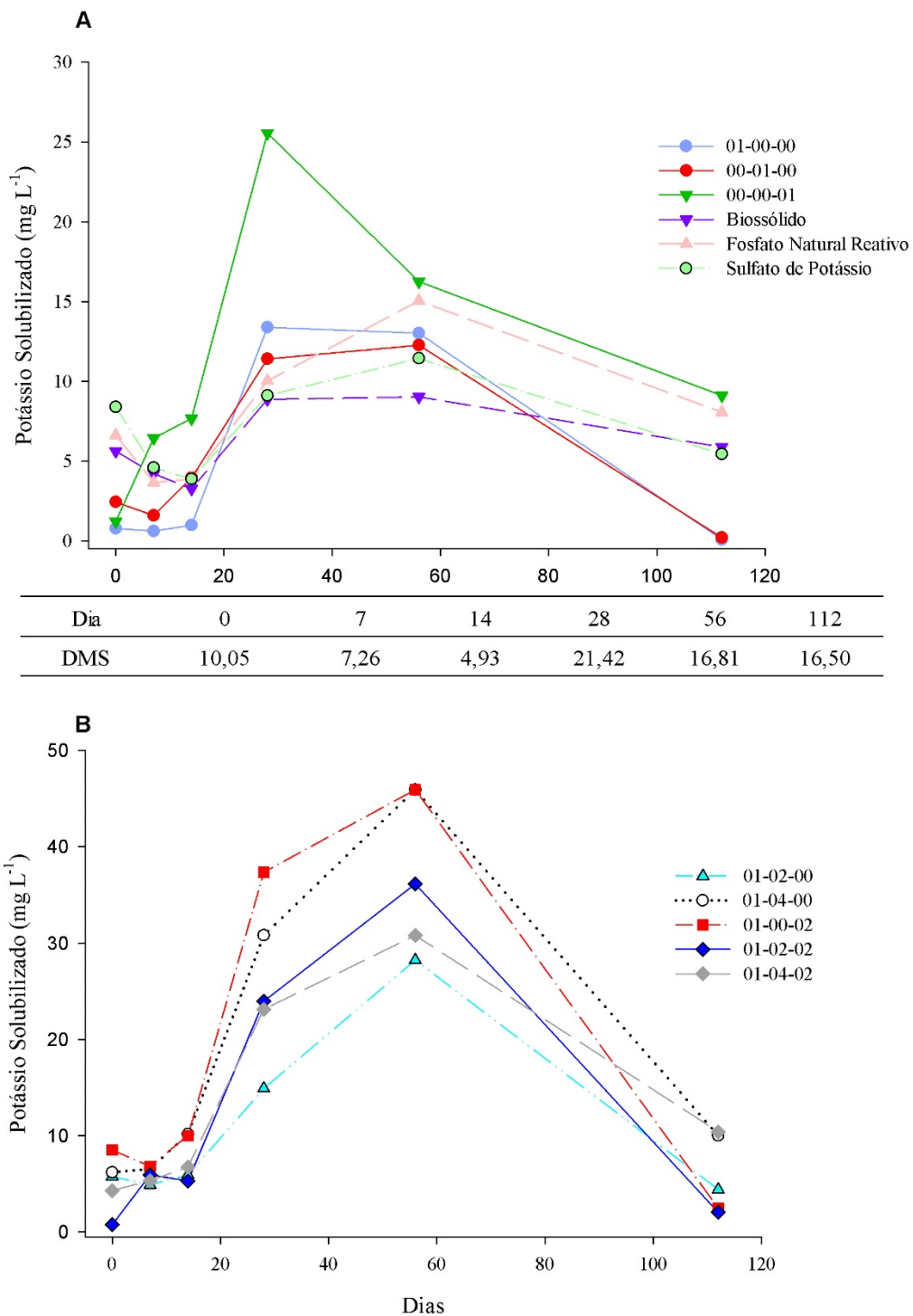


Figura 8 – Disponibilidade líquida do potássio dos fertilizantes no solo. A) Mineralização dos tratamentos: 1-0-0,0-1-0, 0-0-1, Biossólido, Fosfato Natural Reativo e Sulfato de potássio. B) Mineralização dos tratamentos: 1-2-0,1-4-0, 1-0-2, 1-2-2 e 1-4-2. Valores são a média de quatro repetições. Os valores na tabela representam a diferença mínima significativa (Tukey, $P < 0,05$).

No presente estudo, a determinação da mineralização/disponibilização dos nutrientes é estimada em condições ideais de temperatura e umidade, ou seja, a disponibilização dos nutrientes tende a ser diferente em condições de campo. A extrapolação deste índice para culturas, ou ainda, para fertilizantes, pode resultar em uma adubação abaixo das necessidades da cultura, disponibilizando nutrientes em quantidades insuficientes à nutrição da planta, implicando em menor produtividade e, conseqüentemente, no desinteresse pela fertilização orgânica e na transformação destes resíduos. Porém, estes parâmetros de IE permitem avaliar o desempenho dos fertilizantes com propriedades similares, como no caso dos FOMs, em que foram utilizadas fontes minerais naturais como o Sulfato de potássio e o Fosfato Natural Reativo (permitidos na agricultura orgânica). Estes fertilizantes, por sua vez, se comparados com fontes mais solúveis e/ou sintéticas, provavelmente apresentariam desempenho inferior, mas quando os IE são comparados a fontes alternativas (uso de resíduos na agricultura) torna-se possível compreender um pouco mais sobre a sua dinâmica.

3.5.3 Ensaio de lixiviação

A primeira lâmina aplicada não superou a capacidade de campo, portanto não produziu lâmina lixiviada, não tendo sido detectada a presença de fósforo no lixiviado. A Figura 9 apresenta o comportamento da lixiviação do potássio ao longo de 10 semanas de lixiviação. O tratamento que promoveu a maior lixiviação foi o Sulfato de Potássio sem granulação. O tratamento 0-0-1 apresentou valores semelhantes aos FOMs, na dinâmica de liberação de nutrientes ao longo do tempo, os quais foram ainda menores do que para o bio-sólido granulado (1-0-0). Isso é um indicativo de que a granulação pode ser uma estratégia para a redução de perdas por lixiviação em solos arenosos.

Os FOMs e demais fertilizantes apresentaram uma dinâmica de lixiviação similar com “ciclos” de aumento e posterior redução de Potássio total lixiviado ao longo do tempo do ensaio. Esse comportamento foi semelhante ao encontrado por Werle e colaboradores (2008) que, ao avaliarem a dinâmica de lixiviação em solos arenosos e argilosos, obtiveram nos solos argilosos mesma variação. Essa variação pode ser explicada pela dinâmica na mobilidade vertical da água e pelo Poder Tampão de Potássio (PTK). O PTK é a capacidade que o solo tem de manter estável a concentração de K^+ na solução, à medida que o K^+ é adicionado ou retirado do solo (ERNANI et al., 2007). O solo do experimento foi corrigido pela adição de calcário e a elevação do pH promove um aumento do PTK disponibilizando K^+ para a solução. Desse modo, a variação se dá porque o potássio perdido pela lixiviação é repostado para a solução pelo solo (PTK). Isso ocorre, pois, o PTK pode ser elevado tanto pela adição de K^+ , como pela alteração das formas disponíveis de K. Quando o equilíbrio é mantido pelo K^+ trocável, há uma rápida reposição de K para a solução; por outro lado, quando o equilíbrio ocorre por outras formas de K, ele é variável e mais lento (ERNANI et al., 2007). Como os FOMs apresentam formas de disponibilização lenta desse nutriente, é possível atribuir esse comportamento flutuante, de K nas lâminas lixiviadas, ao PTK.

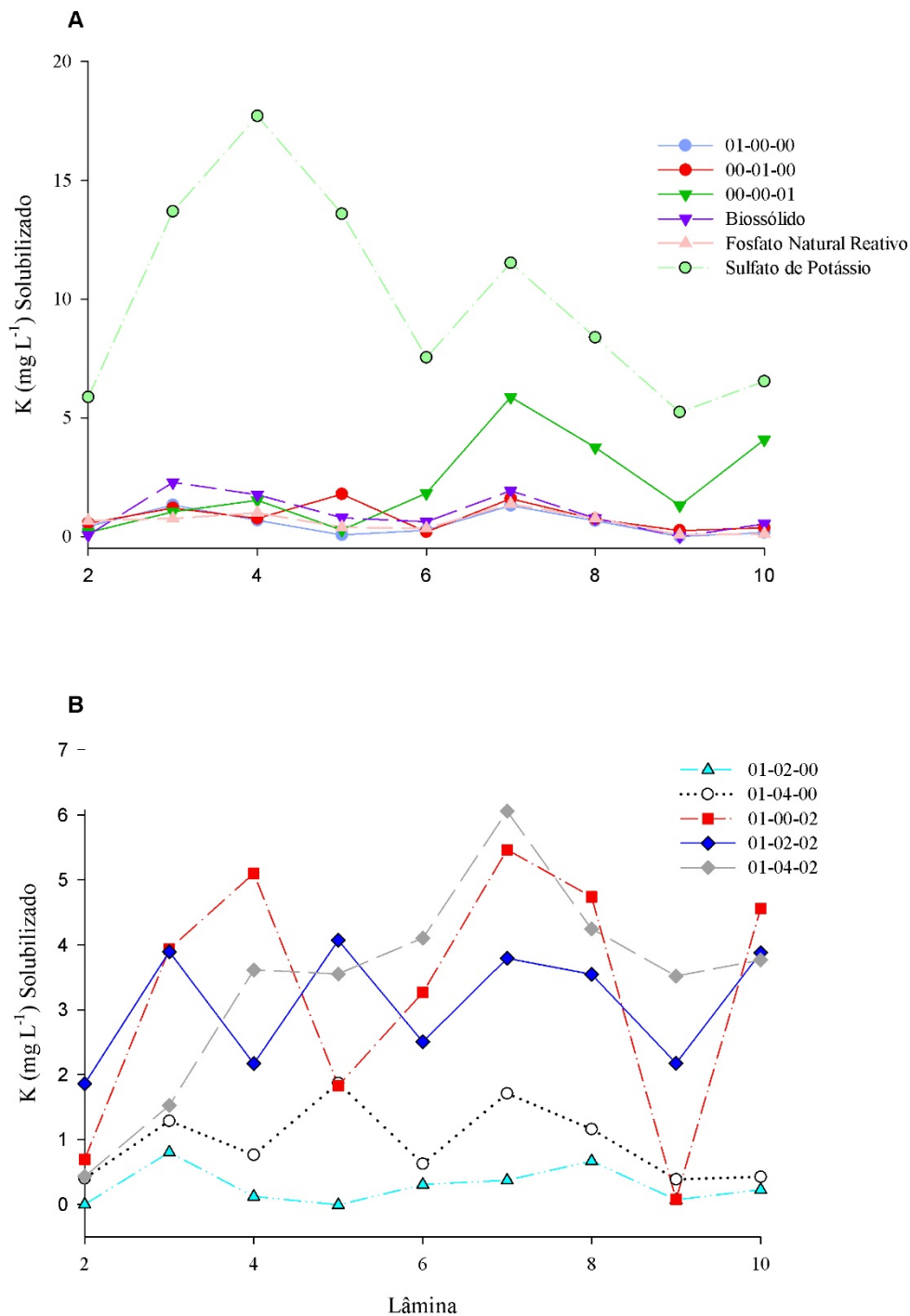


Figura 9 – Dinâmica de lixiviação do potássio ao longo de 10 semanas de aplicação das lâminas de lixiviação. A) Dinâmica nos tratamentos: 1-0-0,0-1-0, 0-0-1, Biossólido, Fosfato Natural Reativo e Sulfato de Potássio. B) Dinâmica nos tratamentos: 1-2-0,1-4-0, 1-0-2, 1-2-2 e 1-4-2.

A Tabela 6 apresenta os resultados do total lixiviado de todas lâminas do ensaio de lixiviação.

Tabela 6 – Total da lixiviação de Potássio (K) e Nitrogênio inorgânico (NH_4^+ e $\text{NO}_3^- + \text{NO}_2^-$) em colunas de PVC preenchidas com Planossolo Háplico acrescido dos fertilizantes granulados.

Tratamento	Total lixiviado		
	K^+	NH_4^+	$\text{NO}_3^- + \text{NO}_2^-$
	----- mg L ⁻¹ -----		
01:00:00	4,91 b	17,17 a	122,76 a
00:01:00	7,48 b	11,07 a	53,84 a
00:00:01	19,84 b	14,85 a	110,65 a
01:02:00	2,55 b	20,07 a	86,74 a
01:04:00	8,62 b	21,50 a	60,89 a
01:00:02	29,66 b	15,19 a	61,79 a
01:02:02	27,88 b	24,65 a	126,88 a
01:04:02	30,81 b	24,10 a	110,31 a
Biossólido	8,78 b	21,88 a	88,03 a
Fosfato Natural Reativo	5,50 b	13,42 a	92,30 a
Sulfato de Potássio	90,08 a	16,10 a	72,68 a

Letras iguais na mesma coluna não diferem pelo teste de Tukey, $P < 0,05$.

O tratamento com Sulfato de Potássio apresentou as maiores médias de lixiviação de potássio. O fertilizante não foi granulado, desse modo a disponibilização foi mais rápida, favorecendo a disponibilidade de K na solução e, portanto, a lixiviação. Esse comportamento também foi observado por Werle e colaboradores (2008), que encontraram teores mais altos de K^+ lixiviado nos tratamentos que receberam as maiores doses de adubação com Sulfato de Potássio. Esta dinâmica pode explicar também a diferença para os teores médios de lixiviação mais altos para os FOMs com potássio em sua composição, a partir da 6ª lixiviação (42 dias). Esses dados são explicados também pelos resultados da liberação de K^+ encontrados no ensaio de Índice de Eficiência (Item 3.5.2), onde a maior disponibilidade dos FOMs se deu a partir do 56º dia.

Ao analisar o K^+ total nos experimentos de lixiviação (Tabela 6), foi possível avaliar que o teor de K^+ no lixiviado do experimento com Sulfato de Potássio foi maior, como esperado. Contudo, nos FOMs houve maior perda de K, ou perda similar, por lixiviação comparado ao tratamento 0-0-1, pois os resultados não diferiram significativamente. Este comportamento pode estar relacionado ao suprimento de N pelos FOMs, inexistente no tratamento 0-0-1. A presença de N favorece as perdas de K^+ por concentração, comportamento esse que também é avaliado na lixiviação de amônio, discutido na sequência. Ao adicionar uma fonte de nitrogênio, há a liberação de fontes amoniacais que, por ser também um próton, competem pelos sítios

ativos do complexo trocável do solo, quando há a presença de nitrogênio (FOMs) há maior lixiviação do que na fonte potássica granulada (0-0-1) devido à essa dinâmica.

O K^+ é um nutriente móvel que devido à energia de retenção dos cátions trocáveis presentes nos coloides do solo é retido mais fracamente, de acordo com a série liotrófica dos cátions trocáveis ($Ca^{2+} > Mg^{2+} > K^+ > NH_4^+$), resultando em uma maior lixiviação de K^+ em solos bem drenados, principalmente em solos com menor CTC, como os solos arenosos. Essa energia de retenção se torna importante para explicar porque houve mais lixiviação de K no Sulfato de Potássio não granulado comparado ao granulado, pois com a superfície de contato reduzida também foi reduzido o efeito do pH e disponibilização de magnésio que compete pelos sítios de adsorção, uma vez que o fertilizante Sulfato de Potássio utilizado é um composto de sulfato duplo de potássio e magnésio. De maneira geral, a granulação foi eficiente em reduzir as perdas por lixiviação da adubação potássica, o que é perfeitamente possível, pois a granulação reduz a área superficial dos fertilizantes, liberando lentamente os nutrientes em sua composição, o que melhora a sua eficiência e durabilidade, inclusive promovendo efeitos residuais (RODRIGUES, 2012).

A lixiviação de N foi estudada como NH_4^+ e $NO_3^-+NO_2^-$, pois o N orgânico é primeiramente convertido à forma amoniacal (KIEHL, 2010). Entretanto, os tratamentos não apresentaram diferença quanto à lixiviação total de NH_4^+ . Os tratamentos que mais lixiviaram NH_4^+ (Figura 10) foram os que apresentaram maior mineralização, a partir do 56º dia no experimento de incubação (item 3.5.2) 1-2-2 e 1-2-4. Esses FOMs possuem NPK em sua composição, o que pode ter favorecido a mineralização de N, e conseqüentemente maiores perdas por lixiviação. As perdas destacadas nos experimentos 1-2-2 e 1-4-2 são explicadas pela composição do FOM, onde a lixiviação é favorecida pelo K^+ , que como está em maior concentração, desloca N para a solução favorecendo as perdas de N por lixiviação; o que não acontece com as fontes de fertilizante que não tem K, mas que têm a mesma quantidade de N.

Os valores para a lixiviação de amônio encontrados neste trabalho foram semelhantes ao encontrados por Neiverth e colaboradores (2015) e Silva e colaboradores (2009), sendo que os fertilizantes avaliados não eram orgânicos. Desse modo, é possível que o FOM não favoreça as perdas por lixiviação, mantendo-as em valores inerentes ao processo.

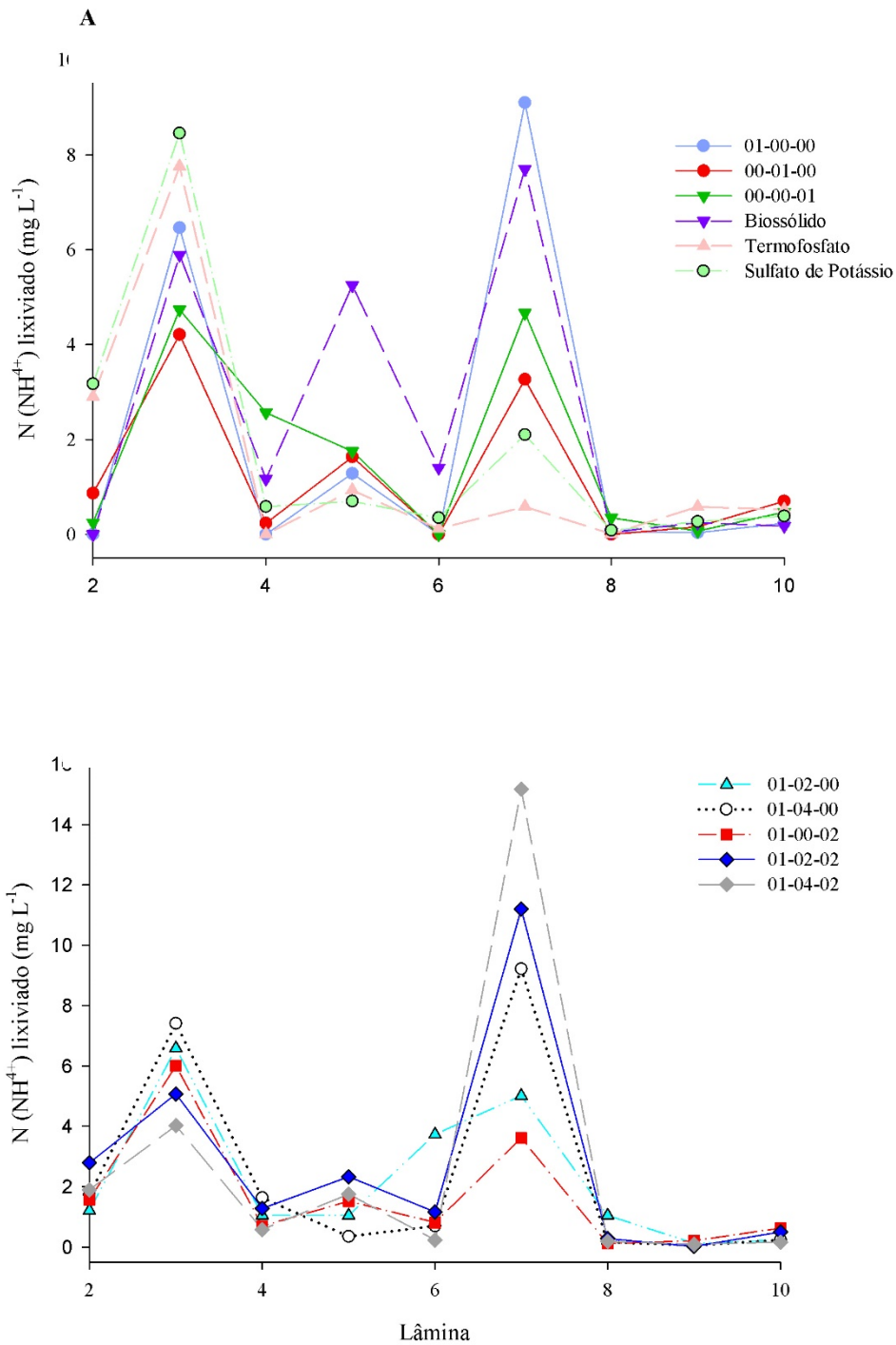


Figura 10 – Dinâmica de lixiviação do amônio (NH₄⁺) ao longo de 10 semanas de aplicação das lâminas de lixiviação. A) Dinâmica nos tratamentos: 1-0-0,0-1-0, 0-0-1, Biossólido, Fosfato Natural Reativo e Sulfato de Potássio. B) Dinâmica nos tratamentos: 1-2-0,1-4-0, 1-0-2, 1-2-2 e 1-4-2.

Os teores de NO₃⁻+NO₂⁻ (Figura 11) lixiviados foram mais elevados até a 3^a lâmina, principalmente nos tratamentos que receberam potássio na sua formulação, ou seja, 0-0-1, 1-2-2 e 1-4-2.

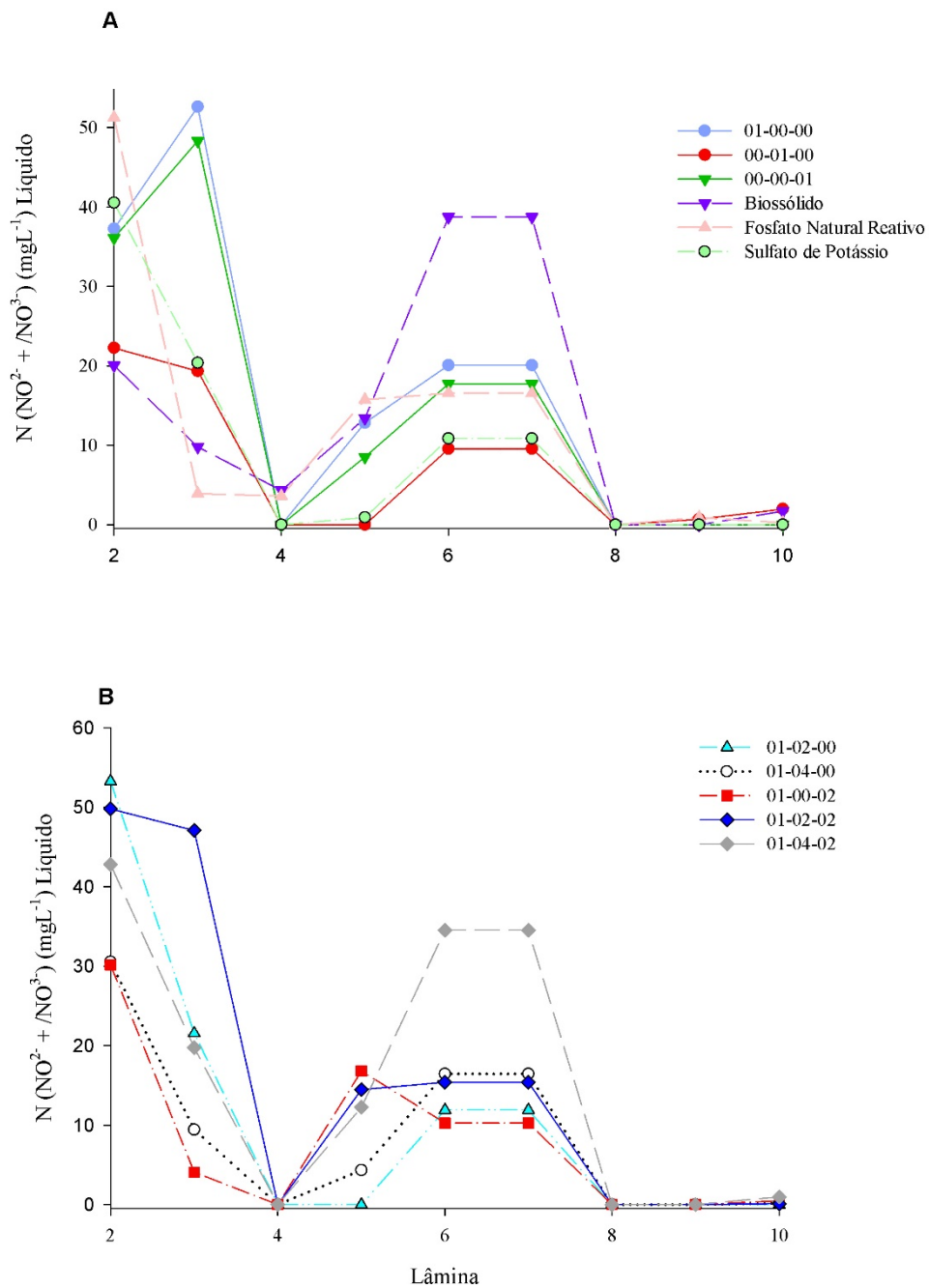


Figura 11 – Dinâmica de lixiviação de nitrato + nitrito ($\text{NO}_3^- + \text{NO}_2^-$) ao longo de 10 semanas de aplicação das lâminas de lixiviação. A) Dinâmica nos tratamentos: 1-0-0,0-1-0, 0-0-1, Biossólido, Fosfato Natural Reativo e Sulfato de Potássio. B) Dinâmica nos tratamentos: 1-2-0,1-4-0, 1-0-2, 1-2-2 e 1-4-2.

Entretanto, não houve diferença significativa no total das lâminas de lixiviação. Considerando que a mineralização desses tratamentos ainda não estava no máximo (aproximadamente 56 dias), as perdas de nitrato e nitrito por lixiviação ocorreram em decorrência do que já havia no solo. A partir da 6ª semana, a lixiviação de $\text{NO}_3^- + \text{NO}_2^-$ apresentou um aumento, porém com menores concentrações de N no lixiviado do que nas primeiras semanas. Assim como verificado para o amônio, essa data se aproxima do 56º dia da incubação (Item 3.5.2), quando houve uma maior mineralização de N dos FOMs.

As maiores perdas por lixiviação destacadas nos tratamentos 1-2-2 e 1-4-2 são explicadas pela composição do FOM, como observado no item 3.5.2 onde a maior mineralização de N se deu nas formulações com NPK, desse modo, onde há a maior mineralização, há maior quantidade líquida de N propenso a ser perdido. Destaca-se o comportamento do 1-4-2, onde se observou as maiores perdas de $\text{NO}_3^- + \text{NO}_2^-$ por lixiviação, reforçando a hipótese de que as maiores concentrações de P nos FOMs favorecem a mineralização.

É interessante destacar, novamente, o comportamento do Sulfato de Potássio sem granulação. Este fertilizante é composto de sulfato de magnésio e potássio, fertilizante de pH próximo a neutralidade que pode influenciar o pH por efeito de tamponamento. A hipótese de efeito no pH, ainda que de maneira pontual, favorece as perdas de amônia por volatilização, influenciando na atividade das nitrossomonas e nitrobacters que não terão substrato para a produção de nitrato e nitrito. Consequentemente, o Sulfato de Potássio apresenta as menores perdas de $\text{NO}_3^- + \text{NO}_2^-$ por lixiviação. Esse comportamento, por sua vez, não é observado para o tratamento 0-0-1. Provavelmente, a granulação afetou o pH e consequentemente a dinâmica de NH_4^+ deste fertilizante no solo, como já observado quanto à lixiviação de K^+ .

3.6 CONCLUSÕES

As formulações com fontes minerais contribuíram para o aumento da eficiência na mineralização de N nos fertilizantes organominerais. A adição de fontes minerais ao Biossólido constituindo os FOMs elevou o índice de eficiência dos fertilizantes. Os fertilizantes organominerais apresentaram resultados semelhantes aos estabelecidos pela literatura para o índice de eficiência de nitrogênio. Os fertilizantes Sulfato de Potássio e Fosfato Natural Reativo melhoraram os índices de eficiência de fósforo e potássio do biossólido ao serem granulados nos fertilizantes organominerais.

A granulação do Sulfato de Potássio foi eficiente na redução das perdas por lixiviação de K^+ e os FOMs apresentaram comportamento semelhante quanto à granulação. Com a adição de fontes de P e K ao biossólido houve maior mineralização de N, e conseqüentemente mais perdas de nitrogênio por lixiviação. A presença de potássio nos FOMs, por concentração, favoreceu a lixiviação de N.

**4 CAPÍTULO 2: EFICIÊNCIA AGRONÔMICA DOS
FERTILIZANTES ORGANOMINERAIS EM CASA-DE-VEGETAÇÃO.**

4.1 RESUMO

A fertilidade do solo é melhorada pela aplicação de fertilizantes minerais, orgânicos e corretivos. A melhoria das propriedades físicas do solo ocorre com a aplicação de fertilizantes baseados em fontes orgânicas, fato que não ocorre com a aplicação de fertilizantes minerais. Na agricultura orgânica são permitidos apenas os fertilizantes minerais de origem natural e de baixa solubilidade, como por exemplo, os fosfatos naturais, os calcários e os pós de rocha, com a liberação desses nutrientes sendo mais lenta do que a dos fertilizantes minerais permitidos na agricultura convencional. Neste capítulo, será estudada a eficiência agronômica dos FOM na produção de uma cultura indicadora, o milho, assim como o efeito residual no solo quando comparado às suas fontes isoladas. O experimento foi implantado em blocos ao acaso, com 9 tratamentos: 1-0-0, 0-1-0, 0-0-1, 1-2-0, 1-4-0, 1-0-2, 1-2-2, 1-2-4 e o controle. Cada unidade correspondeu a um pote com capacidade para 10 L, que foi preenchida com terra coletada de um Planossolo Háptico, onde o milho foi cultivado. As amostras de planta e solo foram coletadas para a determinação dos parâmetros a serem avaliados. Em relação à massa seca, os FOMs compostos (NPK) apresentaram o melhor desempenho. Quanto ao teor e acúmulo de N e P, alguns tratamentos apresentaram valores semelhantes ao controle. Os teores de micronutrientes na parte aérea foram adequados, assim como os de metais pesados, que não ultrapassaram os limites encontrados na literatura. No solo, os fertilizantes com fontes de P e K deixaram maior efeito residual. Não foi encontrada diferença significativa para o C orgânico total. Na avaliação do fósforo nas frações orgânicas e inorgânicas, os maiores efeitos foram verificados nas frações inorgânicas. Contudo, é importante que seja avaliado o comportamento dos fertilizantes organominerais durante um maior tempo de avaliação e condições de acúmulo de matéria orgânica.

4.2 ABSTRACT

Soil fertility is improved by the application of mineral, organic, and corrective fertilizers. The improvement of the physical properties of the soil occurs with the application of fertilizers based on organic sources, a fact that does not occur with the application of mineral fertilizers. In organic agriculture, only mineral fertilizers of natural origin and low solubility are allowed, for example, natural phosphates, limestones, and rock powders, with the release of these nutrients being slower than that of mineral fertilizers allowed in conventional agriculture. In this chapter, the agronomic efficiency of the FOMs in the production of an indicator crop, corn, will be studied. Also, the residual effect of the FOMs on the soil will be studied when compared to its separated sources. The experiment was implemented in randomized blocks, with 9 treatments: 1-0-0, 0-1-0, 0-0-1, 1-2-0, 1-4-0, 1-0-2, 1-2-2, 1-2-4, and control. Each experimental unit corresponded to a pot with a 10 L capacity, which was filled with soil collected from a Planossolo Háplico, where the corn was cultivated. Plant and soil samples were collected to evaluate the parameters determined. Regarding dry mass, FOMs (NPK) showed the best performance. As for the content and accumulation of N and P, some treatments showed similar values when compared to the control. The micronutrient levels in the aerial part were adequate, as well as those of heavy metals, which did not exceed the limits described in the literature. In the soil, fertilizers with P and K sources left a greater residual effect. No significant difference was found for total organic C. In the evaluation of phosphorus in organic and inorganic fractions, the most substantial effects were seen in inorganic fractions. However, it is important to assess the behavior of organomineral fertilizers during a longer evaluation period and conditions of accumulation of organic matter.

4.3 INTRODUÇÃO

A fertilidade do solo é melhorada via aplicação de fertilizantes minerais, orgânicos e corretivos. Contudo, a melhoria das propriedades físicas do solo ocorre com a aplicação de fertilizantes baseados em fontes orgânicas, fato que não ocorre com a aplicação de fertilizantes minerais (RABELO, 2015). Desta forma, o mecanismo mais relevante desta classe de fertilizante é proporcionar ao solo a capacidade de restabelecer as funções ecológicas, as quais, aliadas ao manejo realizado, podem contribuir para tornar o sistema mais produtivo.

Na agricultura orgânica são permitidos apenas os fertilizantes minerais de origem natural e de baixa solubilidade, tal como, os fosfatos naturais, os calcários e os pós de rocha. Podem ser utilizados também os termofosfatos de origem natural, sulfato de magnésio, sulfato de potássio, sulfato duplo de potássio e magnésio, micronutrientes e guano (DE SOUZA & DE ALCANTARA, 2008). Neste caso, a liberação desses nutrientes é mais lenta do que a dos fertilizantes minerais permitidos na agricultura convencional, que possuem alta solubilidade e disponibilização mais rápida.

Neste capítulo, será estudada a eficiência agronômica dos fertilizantes organominerais (FOMs) na produção de uma cultura indicadora, o milho, assim como o efeito residual no solo, quando comparados às suas fontes isoladas, de baixa solubilidade, que são permitidas na agricultura orgânica (Fosfato Natural Reativo e Sulfato duplo de Potássio e Magnésio).

Os resultados obtidos com a utilização dos FOMs podem auxiliar na construção de hipóteses sobre o comportamento dos organominerais quanto à eficiência dos mesmos na disponibilidade de nutrientes. Daí, ao sintetizar os FOMs, o interesse principal foi avaliar o potencial do uso de organominerais como estratégia para aumentar a eficiência da adubação em solos arenosos.

Das diferentes fontes alternativas que estão sendo experimentadas, este trabalho utilizou um bio sólido de estação de tratamento de esgoto (ETE) como fonte orgânica e de N na composição desses fertilizantes, que não é permitido na agricultura orgânica (MAPA, 2011), além do fosfato natural e sulfato duplo de potássio e magnésio (fontes de P e K), permitidos na agricultura orgânica.

Espera-se que, com os resultados apresentados aqui possam favorecer a discussão do uso responsável de resíduos urbanos, que são gerados em grande quantidade nas estações de tratamento de esgoto.

4.4 MATERIAL E MÉTODOS

4.4.1 Desenho experimental

O experimento foi implantado em blocos ao acaso, com 8 tratamentos mais controle, conforme estabelecido na Tabela 1 (item 3.4.3), com 4 repetições (blocos), totalizando 36 unidades experimentais. Os tratamentos foram sorteados dentro dos blocos. Cada unidade correspondeu a um pote com capacidade para 10 L, que foi preenchido com terra coletada de um Planossolo Háplico (descrição item 3.4.4), onde foi cultivado milho. A quantidade de fertilizante organomineral (80 kg N ha^{-1}) foi aplicada abaixo e ao lado da linha de semeadura. Quando o tratamento não tinha fonte de nitrogênio, este foi calculado em comparação com a menor dose do nutriente fornecida pelo fertilizante organomineral.

4.4.2 Implantação e condução da cultura indicadora

O pote foi preenchido e o solo umedecido para umidade próxima a 70% da capacidade de campo. A aplicação dos tratamentos foi feita mantendo a linha de adubação abaixo e ao lado da linha de semeadura. A manutenção da umidade do solo foi feita mediante pesagem de 10% dos potes amostrados aleatoriamente, mantendo umidade próxima a 70% da capacidade de campo. A espécie vegetal utilizada foi o milho. Foram semeadas 8 sementes por pote, com uma taxa de emergência de 40%, sendo necessário o transplântio entre plantas de mesmo tratamento para obtenção de 2 plantas por unidade experimental (Figura 12).

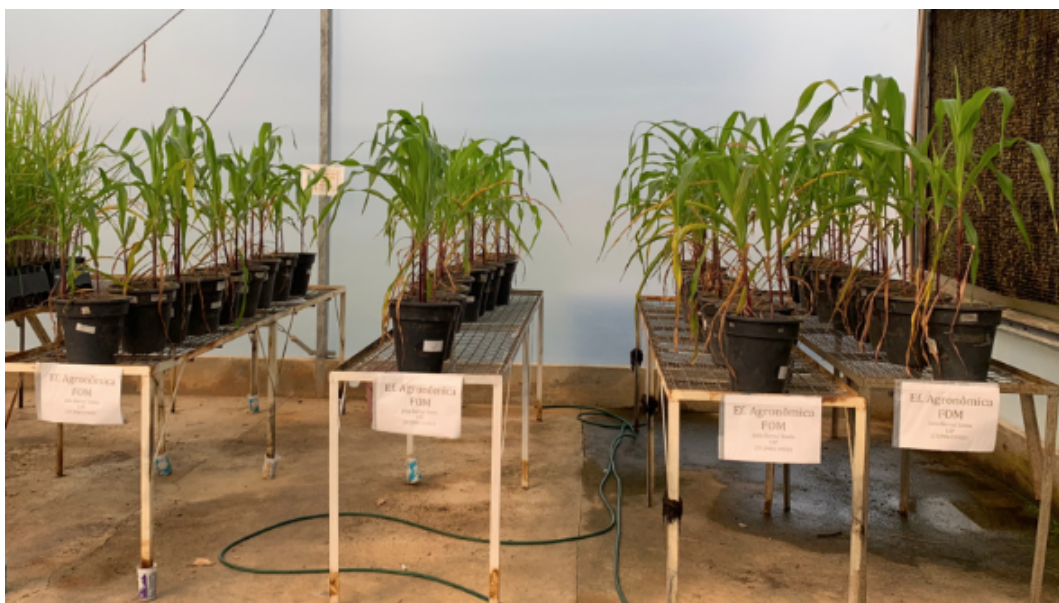


Figura 12 – Vista do experimento instalado em casa de vegetação, 60 DAS.

Ao final do período de 60 dias, as plantas foram coletadas e seccionadas em raiz e parte aérea. Foram coletadas amostras de planta e solo para a determinação dos parâmetros a serem avaliados.

4.4.3 Análises Biométricas da Planta

As análises fisiológicas referentes à parte aérea das plantas avaliadas foram: altura das plantas, diâmetro do colmo, massa seca, acúmulo (relação entre o teor total dos nutrientes e massa seca) de P, K, Ca, Mg, Na e micronutrientes (Cu, Fe, Mn, Ni e Zn) na biomassa, após extração por meio da metodologia USEPA 3051 (2007). A altura da planta foi determinada na

altura da bainha da primeira folha completamente expandida. O diâmetro foi medido com paquímetro digital na altura mediana do colmo. Nos extratos da digestão foram determinados o teor total de P, por colorimetria, os teores de K e Na, por fotometria de chama e os teores de Ca, Mg e micronutrientes, por espectrometria de absorção atômica (EMBRAPA, 1997).

4.4.4 Avaliação das características químicas do solo após o desenvolvimento da cultura indicadora

Por ocasião da coleta das plantas, também foram coletadas amostras representativas do solo em cada pote, 200 g de terra fina seca ao ar para avaliar o efeito residual após o cultivo do experimento. Nestas amostras foram analisados e determinados os atributos químicos de rotina de fertilidade do solo (Ca, Mg, P, K, Na, Al), segundo metodologia descrita pela Embrapa (1997). O carbono orgânico total foi determinado por meio da oxidação úmida (YOEMANS e BREMNER, 1988). Também foram coletadas amostras de solos para a determinação da extração sequencial do P.

4.4.5 Extração sequencial de fósforo no solo

Para a extração sequencial de fósforo orgânico foi utilizado o método proposto por Bowman (1989) e Duda (2000). As formas (compartimentos) orgânicas, inorgânicas e totais das frações (labilidade) de fósforo lábil, moderadamente lábil e moderadamente resistente foram extraídas por diversas extrações (BOWMAN, 1989; DUDA, 2000). A fração extraída pelos extratores (NaHCO_3 , H_2SO_4 e NaOH), sem digestão é a inorgânica (P_i). A fração lábil do fósforo (P_{il}) foi obtida por extração com NaHCO_3 $0,5 \text{ mol L}^{-1}$ ($\text{pH} = 8,5$), sendo o P total lábil (P_{tl}) obtido por digestão perclórica. A fração moderadamente lábil do fósforo (P_{iml}) foi obtida por extração com H_2SO_4 $1,79 \text{ mol L}^{-1}$, sendo o P total moderadamente lábil (P_{tml}) obtido por digestão perclórica. Por fim, a fração recalcitrante (P_{irec}) foi obtida por extração com NaOH $0,5 \text{ mol L}^{-1}$, sendo o P total recalcitrante (P_{trec}) obtido por digestão perclórica. O P total residual (P_{res}) foi determinado com digestão perclórica do solo após as três extrações anteriores. Em seguida, as formas orgânicas (P_o) foram obtidas por diferença entre o P_t e P_i de cada fração, sendo este último quantificado no extrato não digerido. O P total (P_t) foi calculado pela soma dos totais das frações. O P_t e as suas formas e frações foram determinadas por colorimetria após a redução do complexo fosfomolibdico com ácido ascórbico. A taxa de recuperação, que configura a eficiência de quantificação do método, pode ser calculada pela soma das frações digeridas em relação ao P total. O % de P orgânico foi calculado pela relação de P inorgânico e total.

4.4.6 Análises estatísticas

Os resultados obtidos foram analisados quanto à sua normalidade pelo teste Shapiro-Wilk e, quando os dados não atenderam aos requisitos, foram transformados por Box-Cox utilizando o *software* PAST. Posteriormente, os dados foram submetidos à análise de variância e as médias dos tratamentos foram comparadas através do teste de Tukey, utilizando o *software* SISVAR. A ACP (Análise de Componentes Principais) foi realizada utilizando o programa estatístico SAS versão 9.2 (SAS, 2002) e, para isso, os dados foram padronizados para média 0 e variância 1, a fim de evitar interferências das unidades de medida nas análises.

4.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.5.1 Análises Biométricas da Planta

A Figura 13 apresenta os dados avaliados para os parâmetros de massa seca (parte aérea e raiz), diâmetro e altura. O FOM que apresentou maior massa seca de parte aérea foi o 1-4-2 (6,9 g planta⁻¹), que não diferiu estatisticamente dos tratamentos 1-2-2 e 1-0-2 (6,1 e 6,6 g planta⁻¹, respectivamente). Esse comportamento pode ser explicado pelo fato desses fertilizantes fornecerem os nutrientes mais exigidos pela cultura do milho, na fase inicial, de acordo com o que preconiza a lei de Liebig (lei do mínimo). Os valores para massa seca encontrados (média de 5 g planta⁻¹) são superiores aos encontrados por Fernandes e colaboradores (2012) ao avaliar doses de diferentes tipos de esterco em sistema agroecológico, sem fonte sintética de N, sob condições semelhantes às deste trabalho. Esses valores também são próximos aos encontrados por Guareschi e colaboradores (2013), que obtiveram um teor médio de massa seca em torno de 7,5 g planta⁻¹ aos 30 DAS. Nesse caso, os autores compararam diferentes doses de esterco bovino na adubação de milho, porém, segundo a metodologia descrita, na adubação também foram adicionadas fontes sintéticas de NPK. Os resultados obtidos no presente trabalho, por sua vez, diferem dos resultados obtidos por Dias (2017) e Ferrari (2017) que, em experimentos com milho e testando fertilizantes minerais com alta solubilidade, encontraram, em média, um teor de massa seca de 100 g planta⁻¹.

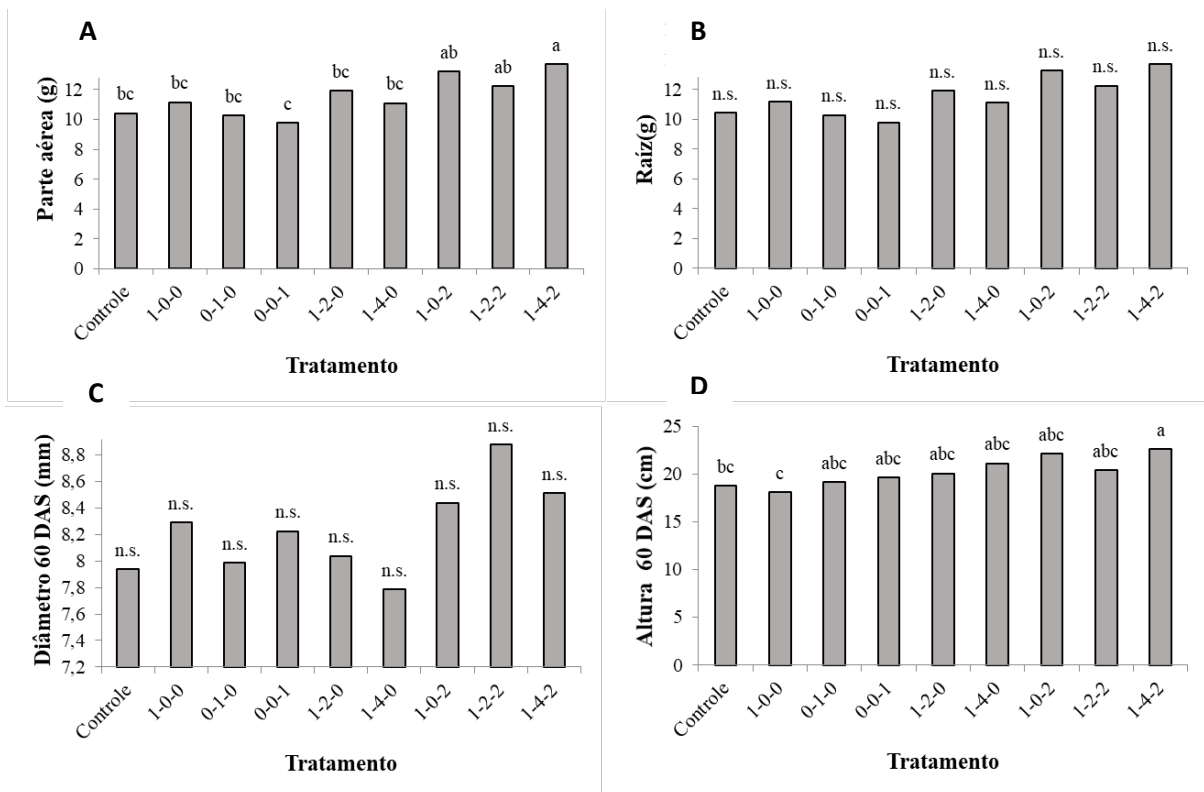


Figura 13 – Parâmetros vegetativos da cultura indicadora (milho – *Zea mays*) sob manejo com FOMs, em casa de vegetação. A) Massa seca da parte aérea, B) Massa seca da raiz, C) Diâmetro 60 dias após a semeadura (coleta), D) Altura 60 dias após a semeadura (coleta). Letras iguais na mesma coluna não diferem pelo teste de Tukey, $P < 0,05$.

A Tabela 7 apresenta os teores totais e acúmulo de macronutrientes no milho. O maior teor de N foi encontrado no tratamento 1-4-0 na parte aérea, porém todos os tratamentos apresentaram acúmulo maior do que a concentração média de 10 g kg⁻¹ geralmente encontrada no tecido das plantas (DECHEN & NACHTGALL, 2007). Esses resultados indicam que as plantas não apresentaram deficiência, que se dá quando os teores são menores do que 10 g kg⁻¹ de N na parte aérea (Tabela 8). Entretanto, estes mesmos autores consideram os teores adequados para o desenvolvimento da planta entre 20 e 50 g kg⁻¹, o que pode explicar porque o desenvolvimento das plantas e, conseqüentemente o acúmulo de massa seca, não se deu de maneira satisfatória (Figura 13). Além disso, alguns tratamentos apresentaram comportamento inferior ao controle, o que pode ser explicado por um possível efeito da imobilização inicial de N ao adicionar o fertilizante orgânico (KIEHL, 2010).

Tabela 7 – Teores totais e acúmulo de macronutrientes na cultura indicadora (milho – *Zea mays*) sob manejo com FOMs em casa de vegetação.

Parte Aérea						
TRATAMENT O	N		P		K	
	Teor Total (g kg ⁻¹)	Acúmulo (mg planta ⁻¹)	Teor Total (g kg ⁻¹)	Acúmulo (mg planta ⁻¹)	Teor Total (g kg ⁻¹)	Acúmulo (mg planta ⁻¹)
Controle	18,11 ab	234,3 a	3,02 a	43,5 a	4,96 c	7,15 b
1-0-0	15,97 b	228,2 a	3,13 a	45,1 a	5,63 bc	8,11 b
0-1-0	12,99 b	170,9 a	3,36 a	48,4 a	5,38 bc	7,76 b
0-0-1	16,32 b	191,4 a	3,33 a	48,0 a	26,3 a	38,0 a
1-2-0	17,41 ab	253,3 a	3,41 a	49,1 a	6,77 b	9,76 b
1-4-0	25,73 a	358,8 a	3,05 a	43,9 a	5,53 bc	7,97 b
1-0-2	13,56 b	223,8 a	2,97 a	42,7 a	24,6 a	35,4 a
1-2-2	13,96 b	232,9 a	2,98 a	42,9 a	25,6 a	37,0 a
1-4-2	15,84 b	292,2 a	3,79 a	54,5 a	22,7 a	32,7 a

Raiz						
TRATAMENT O	N		P		K	
	Teor Total (g kg ⁻¹)	Acúmulo (mg planta ⁻¹)	Teor Total (g kg ⁻¹)	Acúmulo (mg planta ⁻¹)	Teor Total (g kg ⁻¹)	Acúmulo (mg planta ⁻¹)
Controle	9,49 a	125,30 a	1,70 b	24,42 b	1,50 c	2,15 c
1-0-0	10,9 a	152,20 a	1,66 b	23,79 b	1,50 c	2,15 c
0-1-0	9,54 a	140,27 a	1,54 b	22,04 b	1,40 c	2,01 c
0-0-1	8,40 a	108,35 a	1,24 b	17,75 b	5,91 b	8,47 b
1-2-0	8,75 a	145,75 a	1,86 ab	26,59 ab	1,60 c	2,30 c
1-4-0	9,23 a	155,41 a	2,04 ab	29,19 ab	1,88 c	2,69 c
1-0-2	11,7 a	155,45 a	1,94 ab	27,81 ab	8,62 ab	12,35 ab
1-2-2	10,9 a	166,05 a	2,15 ab	30,77 ab	9,54 a	13,68 a
1-4-2	9,63 a	188,82 a	2,82 a	40,46 a	6,39 ab	9,15 ab

Letras iguais na mesma coluna não diferem pelo teste de Tukey, P < 0,05.

Tabela 8 – Teores médios comumente encontrados nas plantas, teores ótimos e limites para deficiência e toxidez de macro e micronutrientes segundo Dechen e Nachtgall (2007).

Nutriente	Teores encontrados	Teores Ótimos	Deficiência	Toxidez
N (g kg ⁻¹)	2 a 75	20 a 50	< 10	> 50
P (g kg ⁻¹)	0,5 a 3,0	1,0 a 1,5	< 1,0	> 3,0
K (g kg ⁻¹)	6,0 a 50	10 a 30	< 8,0	> 50
Cu (mg kg ⁻¹)	2 a 75	5 a 20	<4	>20
Fe (mg kg ⁻¹)	10 a 1500	50 a 100	< 10	> 80
Mn (mg kg ⁻¹)	5 a 1500	20 a 500	< 20	> 700
Ni (mg kg ⁻¹)	0,3 a 3,5	~1,5	--	--
Zn (mg kg ⁻¹)	3 a 150	--	< 25	--

Os valores de N na biomassa da planta podem ter sido limitantes devido à lenta mineralização do fertilizante, fato observado no experimento de Índice de Eficiência (Item 3.5.2.), onde a mineralização de N e sua maior disponibilidade se dá a partir do 56º dia, já próximo ao final do experimento (60 DAS). Porém, para formulação de outra hipótese quanto ao desenvolvimento da biomassa é importante destacar que o método adotado para recomendação do fertilizante foi de 4 ton ha⁻¹, contudo como destacado por De Abreu e colaboradores (2017), as recomendações de aplicação de biofósforos para a cultura de milho variam na literatura de 25 a 76 t ha⁻¹, podendo indicar que a dose utilizada apenas considerando a exigência de N pelo milho no estado do Rio de Janeiro (FREIRE, 2013) pode não ter sido suficiente para o desenvolvimento inicial da cultura indicadora. Sendo assim, é relevante considerar os resultados promissores de outros trabalhos, onde uma dose adequada para cultura do milho é considerada 46,5 t ha⁻¹ (DE ABREU, 2017), e os cálculos de acordo com as recomendações de órgãos regulatórios, como o CONAMA, que consideram não só a exigência da cultura para cálculo da recomendação de adubação, mas também a relação C/N e as diversas formas de N inorgânico disponíveis no biofósforo usado (CONAMA, 2006).

O teor de P, por sua vez, não diferiu entre os tratamentos na parte aérea, com todos sendo superiores ou próximos a 3,0 g kg⁻¹. Os teores de P na planta considerados ótimos estão entre 1 e 1,5 g kg⁻¹ (Tabela 8). O teor elevado de P nas plantas pode ser explicado pela quantidade utilizada na preparação de cada FOM, que foi calculada em função das doses de N, enquanto P e K foram adicionados nas proporções encontradas nos FOMs, de modo que a adubação fosfatada foi adicionada em dose superior à recomendada para a cultura.

O potássio foi significativamente maior nos FOMs que continham potássio em sua composição (1-4-2, 1-2-2 e 1-0-2). Os teores foram superiores à média de 10 g kg⁻¹, usualmente encontrada nas plantas. Porém, os teores estão entre 10 e 50 g kg⁻¹, considerado adequado segundo Dechen e Nachtgall (2007), compilados na Tabela 8.

Os teores de Fe na parte aérea variaram entre 41,7 a 91,5 mg kg⁻¹, dentro da faixa normalmente encontrada em plantas, de 50 a 100 mg kg⁻¹ (Tabela 8). O tratamento 1-4-0 apresentou valores superiores a 80 mg kg⁻¹ e, como algumas plantas podem apresentar sintomas de toxicidade ao Fe em teores acima de 80 mg kg⁻¹ (Tabela 8), é importante considerar a cultura, e a sua sensibilidade ao nutriente Fe, ao utilizar os FOMs para adubação, pois há a possibilidade de elevar a disponibilidade desse micronutriente a valores tóxicos ao desenvolvimento da planta (sobredose).

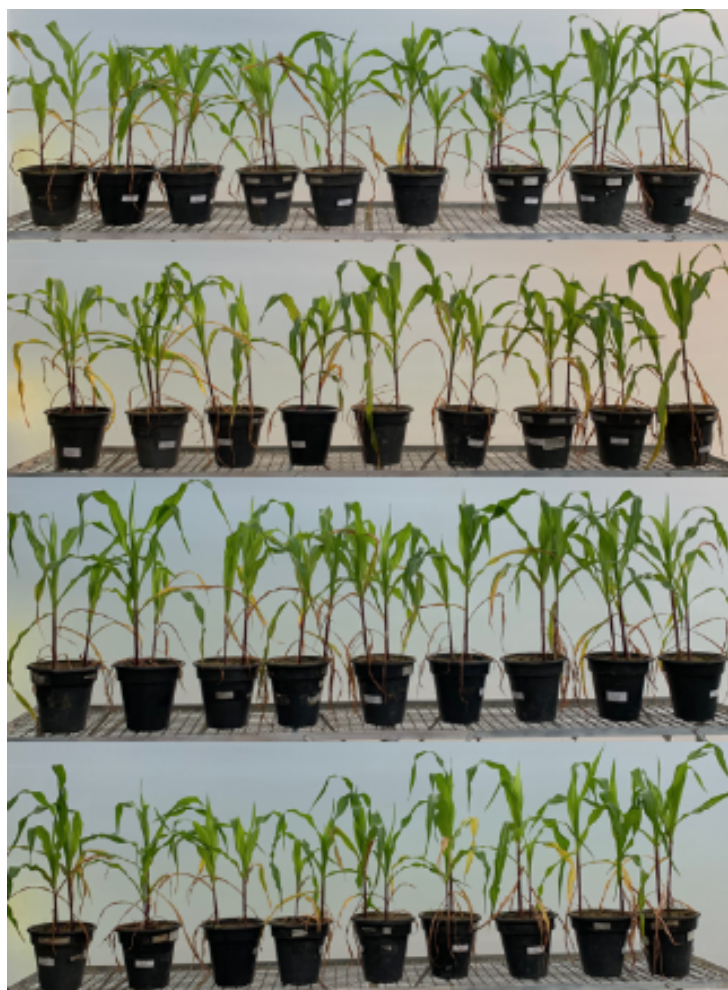


Figura 14 – Experimento em casa de vegetação, 60 DAS (coleta), da esquerda para a direita: controle, 1-0-0, 0-1-0, 0-0-1, 1-2-0, 1-4-0, 1-0-2, 1-2-2 e 1-4-2. A) Bloco A; B) Bloco B; C) Bloco C; e D) Bloco D.

O acúmulo de nutrientes pode ser calculado em relação à massa seca da planta. Como a produção do milho, neste experimento, foi inferior aos experimentos conduzidos por Dias (2017) e Ferrari (2017), que avaliaram o manejo com diferentes fertilizantes solúveis (potássio com substâncias húmicas e formulações N:P), também utilizando milho como cultura indicadora sensível ao manejo da adubação. Entretanto, considerando o acúmulo de N, as médias foram superiores à encontrada por de Oliveira Neto e Oliveira (2016) ao avaliar o acúmulo nas plantas de milho crioulo com doses de 8 t ha⁻¹ de esterco caprino, destacando a diferença no desenvolvimento da planta de acordo com a natureza do fertilizante utilizado.

Uma preocupação quanto ao uso de resíduos na agricultura é a sua composição e o quanto eles podem contribuir para favorecer a absorção de elementos tóxicos às plantas (BRADY & WEIL, 2009). Neste caso há toda uma legislação de como e por quanto tempo utilizar um resíduo e qual o limite permitido em plantas. Neste experimento, o milho não foi cultivado ao estágio de colheita, mas pode servir, como destacado neste experimento, como um indicativo do potencial de uso desse resíduo (biossólido).

Primeiramente analisando os micronutrientes, a saber: níquel, manganês, zinco e cobre que, em concentrações elevadas, podem ser elementos tóxicos a humanos e animais. Na Tabela

9 estão compilados os teores de micronutrientes e elementos tóxicos determinados no milho após 56 dias de experimento. Os micronutrientes estão dentro dos limites considerados adequados ao crescimento do milho, segundo Dechen e Nachtgall (2007) descritos na Tabela 8.

Tabela 9 – Teores totais de micronutrientes e elementos tóxicos na cultura indicadora (milho – *Zea mays*) sob manejo com FOMs em casa de vegetação.

Parte Aérea																		
Tratamento	Na		Pb		Zn		Cd		Ni		Cu		Mn		Fe		Cr	
----- mg kg ⁻¹ -----																		
Controle	4,96	a	0,00	a	35,4	a	0,55	a	3,10	A	2,60	a	31,7	a	41,6	a	1,07	a
1-0-0	5,63	a	0,00	a	39,1	a	0,62	a	1,81	A	3,94	a	38,5	a	77,4	a	0,60	a
0-1-0	5,38	a	0,00	a	49,8	a	0,55	a	1,91	A	4,49	a	33,1	a	49,0	a	0,00	a
0-0-1	26,3	a	0,00	a	63,0	a	0,62	a	2,98	a	5,06	a	37,6	a	68,6	a	0,00	a
1-2-0	6,77	a	0,00	a	50,8	a	0,57	a	1,86	a	4,59	a	34,2	a	61,4	a	0,12	a
1-4-0	5,53	a	0,00	a	45,6	a	0,62	a	2,08	a	4,44	a	38,6	a	91,5	A	0,22	a
1-0-2	24,6	a	0,00	a	55,7	a	0,74	a	2,43	a	4,96	a	45,3	a	74,4	A	0,00	a
1-2-2	25,6	a	0,00	a	45,6	a	0,77	a	1,79	a	4,49	a	37,6	a	57,6	A	0,00	a
1-4-2	22,7	a	0,00	a	55,6	a	0,67	a	2,55	a	3,99	a	33,1	a	62,8	A	0,32	a

Raiz																		
Tratamento	Na		Pb		Zn		Cd		Ni		Cu		Mn		Fe		Cr	
----- mg kg ⁻¹ -----																		
Controle	65,1	ab	0,0	a	32,8	abcd	1,30	a	0,00	a	9,4	a	51,6	a	3109	A	3,43	a
1-0-0	77,	ab	0,0	a	25,6	bcd	0,95	a	0,00	a	9,8	a	47,4	a	1908	b	0,00	a
0-1-0	100	ab	0,0	a	29,3	bcd	0,95	a	0,00	a	11,8	a	55,6	a	2427	ab	0,08	a
0-0-1	47,6	b	0,0	a	22,5	cd	1,03	a	0,00	a	11,8	a	52,6	a	2126	ab	0,65	a
1-2-0	97,7	ab	0,0	a	15,7	d	1,05	a	0,00	a	12,5	a	51,6	a	2173	ab	0,83	a
1-4-0	5,53	a	0,0	a	30,0	abcd	1,28	a	0,00	a	11,6	a	55,8	a	2599	ab	3,63	a
1-0-2	90,2	ab	0,0	a	47,0	abc	1,53	a	0,15	a	12,8	a	63,4	a	2984	A	0,80	a
1-2-2	120	ab	0,0	a	51,8	ab	1,28	a	0,58	a	19,5	a	53,9	a	2619	ab	1,73	a
1-4-2	103	ab	0,0	a	56,8	a	0,98	a	0,55	a	10,6	a	41,7	a	2558	ab	1,50	a

Letras iguais na mesma coluna não diferem pelo teste de Tukey (p < 0,05)

Para os metais pesados será utilizada a legislação internacional, WHO (1996), que indica os valores máximos permitidos de cádmio, cromo, cobre, chumbo e níquel em plantas (Tabela 10). Existe também a legislação nacional, da ANVISA, que na RDC nº 42, de 29 de agosto de 2013 (ANVISA, 2013) indica os valores permitidos de arsênio, cádmio, chumbo, mercúrio e estanho em alimentos, contudo, como o milho não foi cultivado até o estágio de produção de milho para consumo alimentício (grão), não foi considerada para a discussão destes resultados.

Os teores de cádmio no milho (Tabela 8) foram superiores ao estabelecido WHO (1996) em plantas (Tabela 10), porém não foram estatisticamente superiores ao controle. Desse modo, é possível destacar que a presença de cádmio acima do limite permitido em plantas não se deu pela adição dos tratamentos, mas sim pelo conteúdo presente originalmente no solo, já que o tratamento controle também apresentou teores elevados e não recebeu nenhum tipo de fertilizante.

Os valores de chumbo (Tabela 8) não foram detectáveis pela leitura do aparelho, de modo que são considerados inexistentes e inferiores aos limites de 2 mg kg⁻¹ (WHO, 1996).

Tabela 10 – Limites de elementos tóxicos permitidos em plantas (WHO, 1996).

Elemento tóxico (mg kg ⁻¹)	Teor permitido (mg kg ⁻¹)
Cd	0,02
Cr	1,3
Cu	10
Pb	2
Ni	10

O cromo, com limites em plantas de 1,3 mg kg⁻¹ determinados pela WHO (1996), teve esse valor ultrapassado somente na raiz, apresentado valores elevados no tratamento controle e menores no fertilizante. Desse modo, a presença de Cr não é limitante ao uso dos FOMs.

Tanto o cobre quanto o níquel têm o limite máximo em plantas estabelecido em 10 mg kg⁻¹ pela WHO (1996) e, para esses dois elementos, os valores mostrados na Tabela 8 para a parte aérea são inferiores a esse limite. Por outro lado, o valor de cobre na raiz foi maior do que o limite permitido em alguns tratamentos (0-1-0, 0-0-1, 1-2-0, 1-4-0, 1-2-2, 1-4-2), sendo que até mesmo o controle e o tratamento 1-0-0 apresentaram valores próximos a 10 mg kg⁻¹.

4.5.2 Avaliação das características químicas do solo após o desenvolvimento da cultura indicadora

A Tabela 11 apresenta os atributos químicos do solo após o final do experimento. Os maiores valores de P foram encontrados nos tratamentos que receberam P na composição, entretanto os teores e acúmulo de P não diferiram significativamente na parte aérea das plantas (item 4.5.1). Estes valores podem estar relacionados ao comportamento dos fertilizantes, principalmente dos FOMs onde a maior disponibilidade de P se dá após os 56 dias (item 3.5.2), próximo ao fim do experimento e coleta das amostras de solo.

Os teores de K também foram superiores nas fontes com o fertilizante potássico em sua composição. É interessante destacar que os maiores valores de K no solo foram encontrados nos tratamentos sem P (0-0-1 e 1-0-2), seguidos daqueles com menores doses de P (1-2-2).

Como todos os tratamentos receberam a mesma correção de acidez, com adição de calcário dolomítico, nenhum dos tratamentos apresentou diferença para Ca, Mg, Al e H+Al.

Tabela 11 – Propriedades químicas do solo após cultivo da cultura indicadora (milho – *Zea mays*) sob manejo com FOMs, em casa de vegetação.

TRATAMENTO	P --- mg L ⁻¹ ---	K	Na	Ca	Mg cmolc dm ⁻³	Al	H + Al	COT g kg ⁻¹	pH
Controle	3,50 b	192 c	0,06 b	2,10 a	0,63 a	0,00 a	0,77 a	5,5 a	5,9 a
1-0-0	5,81 b	213 bc	0,06 b	2,15 a	0,64 a	0,00 a	0,72 a	5,6 a	5,8 a
0-1-0	57,7 a	187 c	0,07 ab	2,05 a	0,60 a	0,00 a	0,75 a	7,1 a	5,8 a
0-0-1	2,88 b	302 a	0,06 b	2,03 a	0,66 a	0,00 a	0,75 a	8,5 a	5,7 a
1-2-0	32,4 a	187 c	0,07 ab	2,08 a	0,57 a	0,00 a	0,75 a	5,9 a	5,6 a
1-4-0	28,3 a	197 c	0,08 a	2,09 a	0,61 a	0,00 a	0,75 a	4,1 a	6,0 a
1-0-2	6,26 b	299 a	0,06 b	2,19 a	0,63 a	0,00 a	0,80 a	7,0 a	5,7 a
1-2-2	29,8 a	273 a	0,07 ab	2,14 a	0,64 a	0,00 a	0,76 a	4,4 a	5,8 a
1-4-2	35,9 a	259 ab	0,07 ab	2,14 a	0,62 a	0,00 a	0,76 a	6,0 a	5,8 a

COT= Carbono orgânico total. Letras iguais na mesma coluna não diferem pelo teste de Tukey (P < 0,05).

Os valores de carbono orgânico e matéria orgânica (M.O.) foram baixos, sendo que em alguns tratamentos foram ainda menores do que para o controle. Este comportamento é explicado porque, mesmo com a adição de matéria orgânica, as doses utilizadas não foram suficientes para promover um aumento significativo da matéria orgânica do solo (DIAS et al., 2015). Maiores efeitos quanto ao conteúdo de carbono podem ser observados quando o uso dos FOMs for somado a outras estratégias conservacionistas que preservem e/ou visem aumentar o conteúdo de matéria orgânica (M.O.).

A Figura 15 apresenta a Análise de Componentes Principais (ACP) que relaciona os diferentes parâmetros vegetativos e do solo com os tratamentos analisados, permitindo verificar a variável que mais contribuiu para a separação de cada grupo de amostras. A variância explicada pelas duas primeiras componentes principais (PCs) foi de 64,6% e permite correlacionar as informações previamente discutidas.

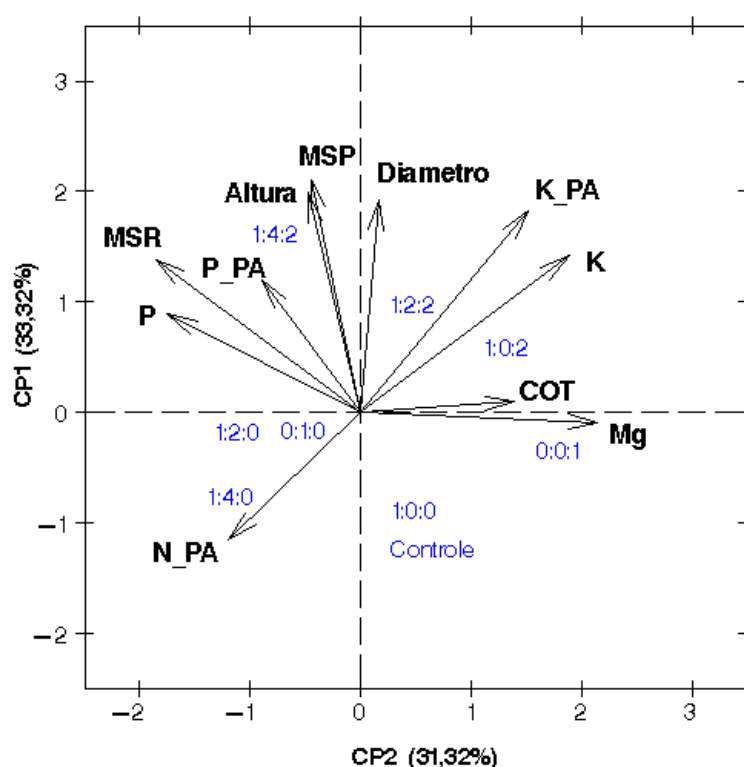


Figura 15 – Análise das componentes principais (ACP) da relação dos diferentes parâmetros com os tratamentos analisados. P_PA- Acúmulo de fósforo na parte aérea, P- Fósforo residual no solo, MSP- Massa seca parte aérea, MSR- Massa seca raiz, K_PA- Acúmulo de potássio parte aérea, K- Potássio residual no solo, COT- Carbono orgânico total, Mg- Matéria orgânica, N_PA- Acúmulo de nitrogênio na parte aérea.

O desenvolvimento de uma planta está ligado a diversos fatores, podendo-se destacar o suprimento nutricional das mesmas (BRADY & NEIL, 2013). O acúmulo de massa seca e aumento do crescimento das plantas é favorecido por ótimas condições de crescimento. Desse modo, destaca-se na ACP que os parâmetros de massa seca (planta e raiz), diâmetro, altura e acúmulo de nutrientes têm se correlacionam positivamente, principalmente, os tratamentos 1-2-2 e 1-4-2, que são aqueles que fornecem os macronutrientes essenciais às plantas na sua integridade, indicando que a adubação com FOMs 1-2-2 e 1-4-2 favoreceu um melhor

desempenho das plantas de milho cultivadas, possivelmente pelo suprimento de nutrientes adequado, demonstrando o potencial para o uso destas duas formulações na produção.

Estes tratamentos (1-2-2 e 1-4-2) também se relacionam com o maior teor residual de P e K no solo. Como já discutido anteriormente (item 4.5.1), as doses de P e K foram adicionadas proporcionalmente à dose de N presente no FOM 1-2-2, e não na dose recomendada ideal para a cultura (FREIRE et al., 2013). O fornecimento dos nutrientes NPK permitem um melhor desenvolvimento das plantas, mas permanece ainda um efeito residual. O teor residual elevado dos nutrientes P e K, mesmo após o cultivo e extração, se dá devido à dose ser maior do que a exigida pela cultura e também pelo não desenvolvimento da cultura até o estágio de colheita.

A relação entre o K disponível é mais próxima aos tratamentos 1-0-2 e 1-2-2, mesmo com a proporção de K sendo a mesma em ambos, do que no tratamento 1-4-2. Esse comportamento pode ser explicado por uma possível interação entre o P e o K nos fertilizantes.

4.5.3 Extração sequencial de fósforo no solo

A Tabela 12 apresenta a média dos teores totais de P, % de P orgânico e taxa de recuperação obtidas no fracionamento. Os maiores teores de P total foram encontrados no tratamento 0-1-0 (185 mg kg⁻¹), seguido pelos tratamentos 1-2-0 (130 mg kg⁻¹), 1-2-2 (123 mg kg⁻¹), 1-2-4 (117 mg kg⁻¹) e 1-4-0 (110 mg kg⁻¹). Este comportamento pode ser explicado pela presença de fósforo na composição destes fertilizantes.

Tabela 12 – Teores médios de fósforo total, taxa de recuperação e percentual de fósforo orgânico.

Tratamento	P total	Taxa de Recuperação	P orgânico
	(g kg ⁻¹)	%	%
Controle	77,95 b	78,61 a	50,38 ab
1-0-0	87,92 b	76,31 a	52,24 a
0-1-0	185,0 a	79,70 a	14,80 d
0-0-1	90,65 ab	76,64 a	45,30 abc
1-2-0	130,2 ab	71,99 a	22,52 cd
1-4-0	110,0 ab	87,07 a	35,02 abcd
1-0-2	78,60 b	83,43 a	42,32 abc
1-2-2	123,2 ab	79,87 a	23,03 bcd
1-2-4	116,9 ab	81,74 a	37,08 abcd

Letras iguais na mesma coluna não diferem pelo teste de Tukey (P < 0,05).

O P total recuperado no fracionamento (soma das frações) representou de 71,99 a 87,07% do P total obtido por digestão ácida, com valor médio de 79,48%, o que assegura que os dados gerados no fracionamento foram satisfatórios.

O tratamento que apresentou maior percentual de P orgânico foi o 1-0-0, que possui apenas fonte orgânica na sua composição. Não houve efeito da composição e doses dos fertilizantes organominerais nos teores de Fósforo orgânico lábil (P_{ol} – Figura 16), Fósforo orgânico moderadamente lábil (P_{oml} – Figura 17) e Fósforo orgânico recalcitrante (P_{or} – Figura 17), frações estas que são referentes ao P orgânico. Em termos gerais, os tratamentos apresentaram pouca influência sobre os teores de P orgânico disponíveis no solo, o que sugere que o tempo entre a aplicação e a coleta de solo, assim como o baixo conteúdo de matéria orgânica, não foram suficientes para elevar estes teores no solo. Segundo Bünemann e

colaboradores (2012), os teores elevados de P_i , fornecido via fertilizante, podem inibir a mineralização do compartimento orgânico, uma vez que ele pode inibir a produção de fosfatases.

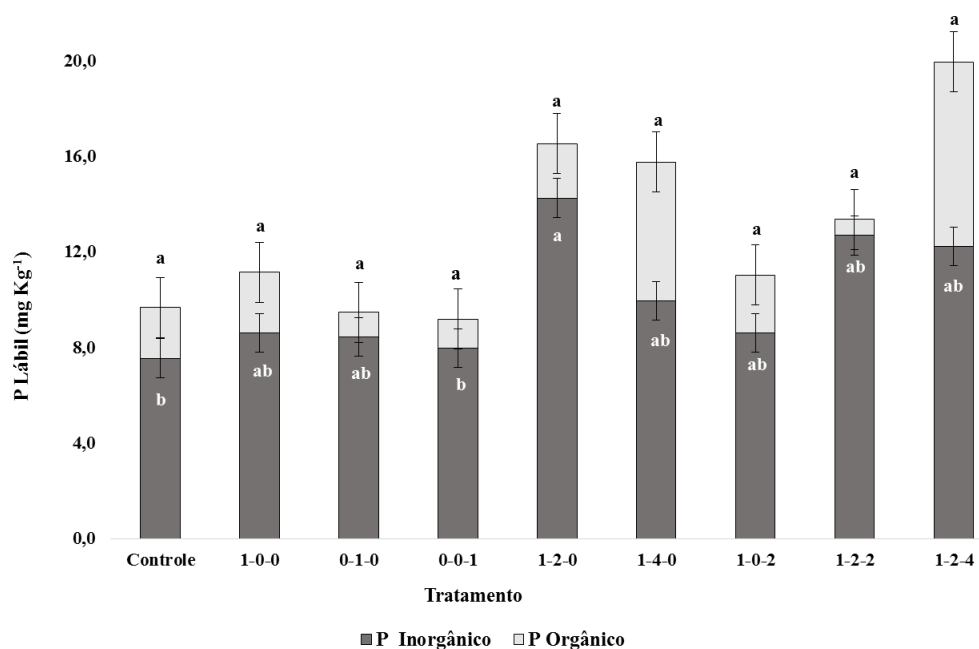


Figura 16 – Conteúdo de fósforo lábil orgânico e inorgânico do solo cultivado com milho sob os diferentes tratamentos.

Letras iguais na mesma coluna não diferem pelo teste de Tukey, $P < 0,05$. Cada valor representa a média, enquanto que as barras de erro indicam o desvio padrão das médias ($n=4$).

A adubação nitrogenada também interfere na distribuição das formas e na disponibilidade de fósforo (P). Ela pode aumentar a produção de biomassa de plantas, acesso do sistema radicular aos nutrientes e favorecer também a biomassa microbiana que atua no processo de ciclagem de P (LEITE et al., 2016). Outro fator que pode ter contribuído para os maiores teores de P total no tratamento 0-1-0 (Tabela 10) é a ausência de outros compostos (nutrientes) em sua formulação. Observa-se que, à medida que foram sendo acrescentados as fontes de N (resíduo) e a fonte de K (sulfato de potássio), os teores totais de P foram diminuindo (Tabela 10).

Em relação à fração lábil total de P (Figura 16), os maiores valores foram encontrados nos tratamentos que continham as maiores doses de P. Entre eles, o tratamento 1-2-4, que apresentou maior proporção de P lábil orgânico ($19,97 \text{ mg kg}^{-1}$) em relação ao total. O P inorgânico lábil foi maior no tratamento 1-2-0, entretanto, foram verificadas diferenças estatísticas apenas para o controle e para o tratamento que continha apenas a fonte de K em sua formulação (0-0-1).

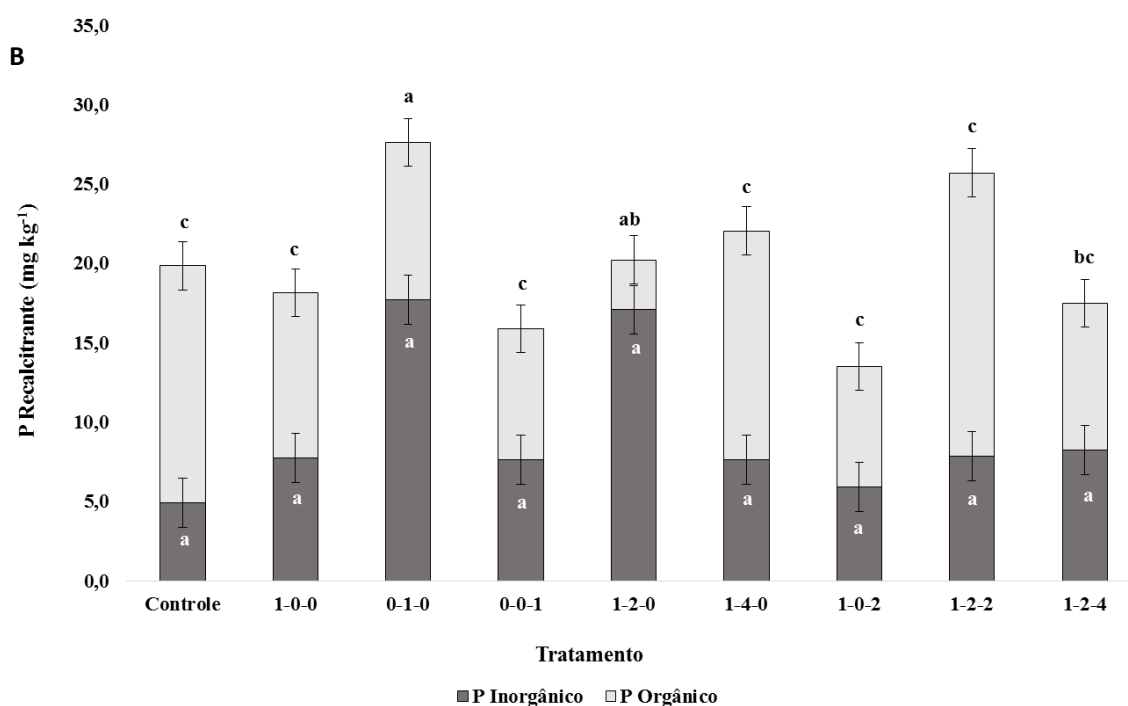
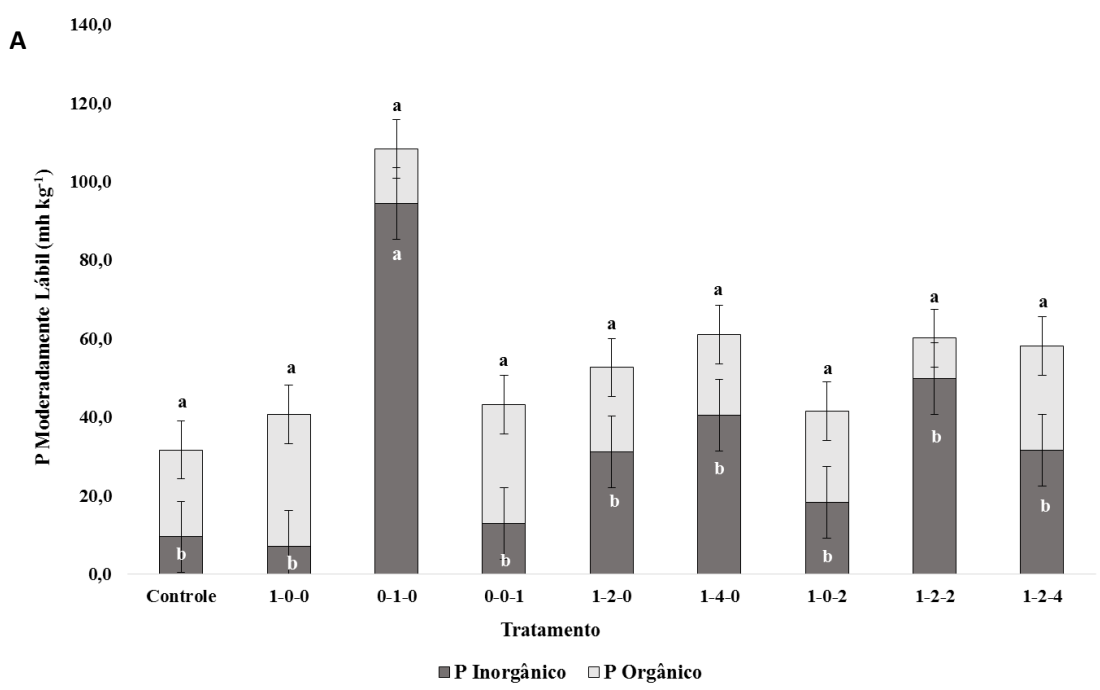


Figura 17 - Conteúdo de fósforo orgânico e inorgânico do solo cultivado com milho sob os diferentes tratamentos.

A) Fósforo moderadamente lábil. B) Fósforo recalcitrante. - Letras iguais na mesma coluna não diferem pelo teste de Tukey, $P < 0,05$. Cada valor representa a média e as barras de erro o desvio padrão das médias ($n=4$).

Em valores numéricos, os FOMs apresentaram maiores teores de P na fração lábil. Considerando que o P adicionado aplicado no tratamento 0-1-0 foi proporcional à menor dose

de P no FOM, é possível levantar a hipótese de que os organominerais aumentam os teores de P nas frações mais lábeis. Contudo, a duração do experimento e o uso de um planossolo com baixo teor de matéria orgânica (sem características de manejos conservacionistas, para permitir acúmulo de M.O., podem ter contribuído para não terem sido observadas diferenças significativas entre os tratamentos, principalmente nas frações orgânicas. Leite e colaboradores (2016), ao estudarem o efeito de plantas de cobertura e adubação nitrogenada nas diferentes frações de P no solo, observaram que o manejo de algumas plantas de cobertura influenciou o P em frações mais lábeis e na manutenção de P oriundo das frações orgânicas.

Para o P_{iml} (Figura 16), P_{irec} (Figura 17) e P_{res} (Figura 18) os maiores teores encontrados também o foram no tratamento onde havia apenas a presença da fonte de P (0-1-0), resultado este que diferiu dos demais tratamentos. Estes resultados demonstram que o Fosfato Natural Reativo utilizado como fonte de P apresenta disponibilidade lenta desse nutriente, se concentrando nas frações mais indisponíveis do solo.

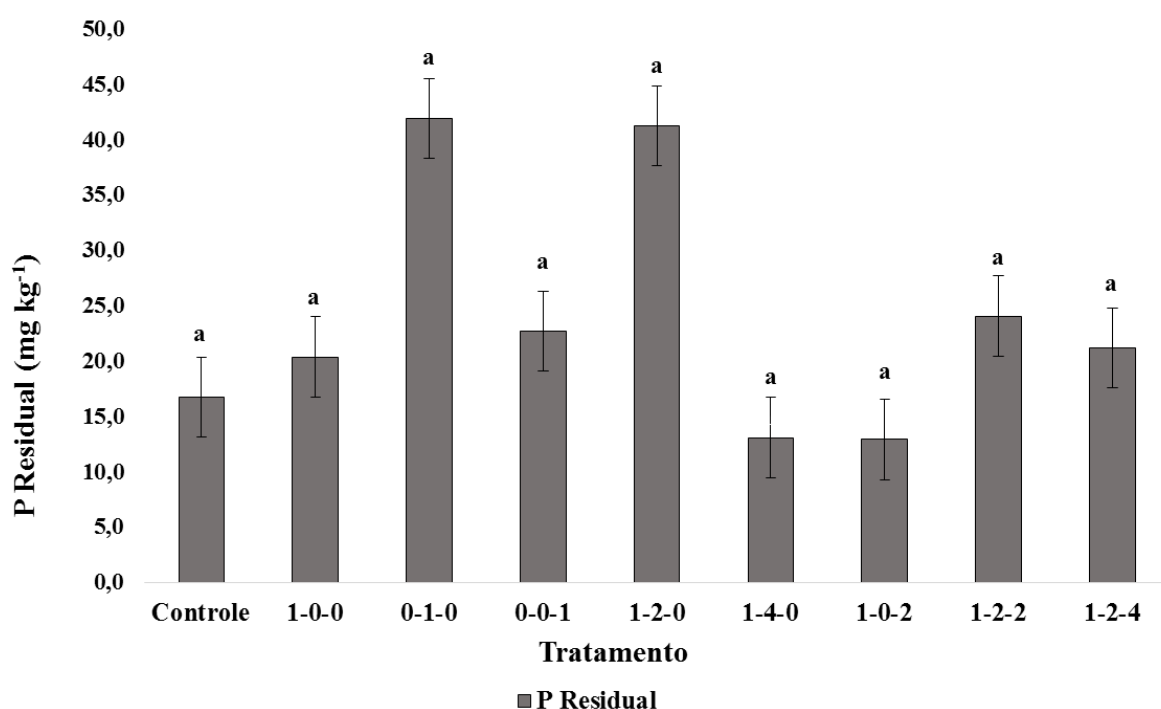


Figura 18 - Conteúdo de fósforo residual do solo cultivado com milho sob os diferentes tratamentos. Letras iguais na mesma coluna não diferem pelo teste de Tukey, $P < 0,05$. Cada valor representa a média e as barras de erro o desvio padrão das médias ($n=4$).

A Figura 19 apresenta a análise de componentes principais (ACP) da relação entre as frações de P no solo, P acumulado e os tratamentos analisados, permitindo verificar a variável que mais contribuiu para a separação de cada grupo de amostras. A variância explicada pelas duas primeiras componentes principais (CPs) foi de 71,2% e permite correlacionar as informações previamente discutidas.

Os maiores teores de P (total, inorgânico, moderadamente lábil, recalcitrante e residual) estão altamente correlacionados com o tratamento 0-1-0, onde se tem somente a fonte de P na granulação (Fosfato Natural Reativo). Esta correlação também foi observada na comparação das médias e análise de variância, quando se analisou o efeito da adição do fertilizante fosfatado mineral nas formulações.

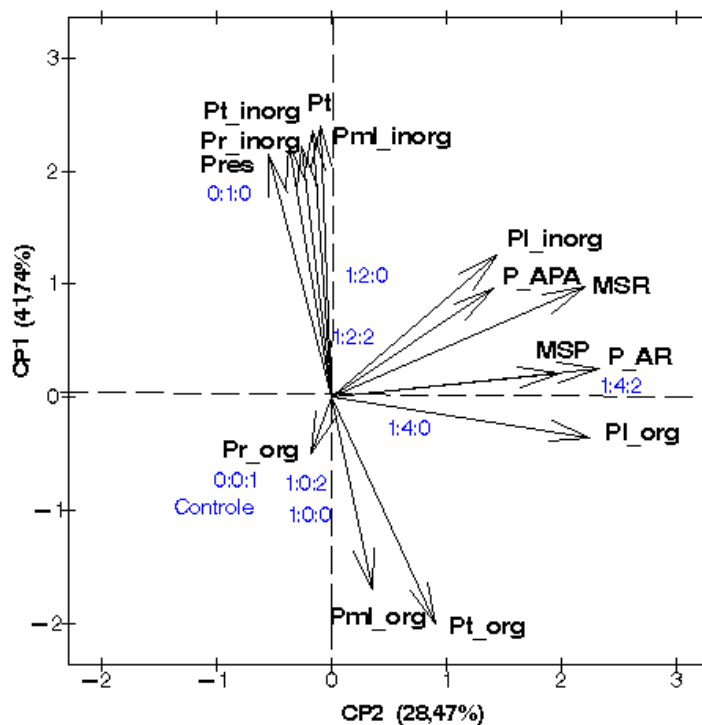


Figura 19 – Análise de componentes principais (ACP) da relação entre as frações de fósforo no solo, fósforo acumulado na parte aérea e os tratamentos analisados, permitindo verificar qual variável mais contribuiu para a separação de cada grupo de amostras.

Inorg - inorgânico, Org.- orgânico, Pt - fósforo total, PI- fósforo lábil, Pml- fósforo moderadamente lábil, Pr- fósforo recalcitrante, Pres- fósforo residual MSP- massa seca parte aérea, MSR- massa seca raiz, P_APA - fósforo acumulado na parte aérea, P_AR - fósforo acumulado na raiz.

Todavia, tanto o P lábil orgânico quanto o inorgânico estão correlacionados com o tratamento 1-4-2. Como a fração lábil do P é a fração mais disponível, esta é que é utilizada primeiro pelos organismos que crescem e se desenvolvem no solo, daí os maiores valores de acúmulo de P e massa seca também altamente correlacionados com o tratamento 1-4-2, e com certa correlação com os tratamentos 1-2-0, 1-4-0 e 1-2-2, que também têm fonte de P na formulação.

As frações orgânicas, concentradas na parte inferior do biplot, se correlacionam com os tratamentos que não possuem P na formulação (controle, 1-0-0, 0-0-1, e 1-0-2). Esse comportamento pode ser explicado porque o solo é pobre em P, e não recebeu nenhuma entrada de P inorgânico. Sendo assim, a fração orgânica que atua como um *pool* de P apresentou os maiores valores nestes tratamentos.

Deve-se considerar que o experimento foi conduzido durante 60 dias, que o teor de carbono orgânico no solo utilizado foi baixo e que o conteúdo adicionado via FOMs não foi suficiente para promover aumento significativo no conteúdo de matéria orgânica. Esses fatores favorecem a presença de P nas diversas frações, principalmente nas orgânicas (DUDA et al., 2013; LEITE et al., 2016). Ainda assim, ao avaliar o fracionamento de P, é possível verificar que a adubação fosfatada afeta, principalmente, as frações de P inorgânicas. Contudo, a adubação como uma fonte orgânica apresentou os maiores valores de P na fração lábil e, conseqüentemente, favoreceu o melhor desenvolvimento das plantas, como mostrado pela ACP (Figura 19).

4.6 CONCLUSÕES

A produção de massa em todos os tratamentos seca foi muito baixa comparado a produção ótima do milho. Quanto à presença de nutrientes, os FOM permitiram o desenvolvimento das plantas sem que os seus teores caracterizassem alguma deficiência. Nenhum dos tratamentos ultrapassou o limite de metais pesados permitido na massa seca das plantas.

Como esperado os teores de fósforo e potássio no solo foram superiores nos tratamentos que receberam estes fertilizantes na sua composição, entretanto, esse comportamento pode ser mais significativo visto que as plantas não se desenvolveram suficiente para maior extração desses nutrientes e de que as doses de P e K foram calculadas em proporção à adição de nitrogênio caracterizando grande entrada. Os tratamentos não apresentaram diferença nos teores de carbono orgânico e matéria orgânica.

Os tratamentos não causaram alteração na maior parte das formas de P orgânicas do solo, porém influenciaram nas frações inorgânicas. Contudo, é importante se investigar o comportamento dos fertilizantes organominerais durante maior tempo de avaliação e condições de acúmulo de matéria orgânica.

5 CONCLUSÕES GERAIS

De modo geral, o Biossólido de Estação de Tratamento de Esgoto pode ser utilizado como um componente dos FOMs, pois apresentou características adequadas para %N, relação C/N, mineralização de N e IEN. A estratégia da granulação desse Biossólido com fontes de P e K para a síntese do organomineral possibilitou ainda uma elevação no índice de eficiência de disponibilização de P e K, avaliado no IEP e IEK dos organominerais, em comparação com o biossólido, para aumentar a eficiência de disponibilizar nutrientes. Contudo, é importante a adequação das doses de adubação com biossólidos e avaliação de diferentes culturas sob a adubação, visto que o efeito à curto prazo não foi eficiente ao acumular massa seca nas plantas de milho.

Os FOMs e a granulação do fertilizante podem reduzir as perdas por lixiviação de potássio; daí, utilizar esta estratégia em solos arenosos, que apresentam baixa CTC e são bem drenados, com fácil movimento da água e conseqüente lavagem de nutrientes, melhora-se a eficiência dos fertilizantes na adubação desses solos. Cabe ressaltar que este experimento avalia a dinâmica da lixiviação considerando apenas o solo, em condições experimentais, sem cultivo de plantas.

Os fertilizantes organominerais permitiram o desenvolvimento das plantas sem deficiências nutricionais, e não ultrapassando os limites de metais pesados permitidos na legislação. Todavia, o acúmulo de massa seca não foi satisfatório quando comparado à produção do milho híbrido com fontes minerais de N. Os FOMs também levaram a uma elevação nos teores de fósforo e potássio no solo. Os diferentes tratamentos influenciaram as frações inorgânicas de fósforo do solo. Os fertilizantes organominerais, adicionando biossólido na formulação como fonte de carbono e nitrogênio, têm potencial para uso como fertilizantes. Contudo, é importante que seja investigado o comportamento dos fertilizantes organominerais durante um maior tempo de avaliação e condições de acúmulo de matéria orgânica.

É importante destacar que os resultados obtidos utilizando essas fontes de adubação são insatisfatórios quando comparados a trabalhos que utilizam fontes de adubação permitidas na agricultura convencional. Entretanto, quando se compara os resultados apresentados neste trabalho com aqueles provenientes de fontes alternativas, estes resultados são promissores, têm potencial produtivo e servem de incentivo à discussão acerca da permissão de utilização na agricultura do biossólido de tratamento de esgoto, isto é, o composto de lodo estabilizado.

Para futuros trabalhos com o biossólido recomenda-se o cálculo das doses de acordo com a metodologia CONAMA 375. Contudo, se o uso for via FOMs seria interessante usar complementação de fonte de N, evitando elevada aplicação de P e K que são proporcionalmente adicionados pelas fórmulas. É interessante avaliar o comportamento de outras fontes orgânicas quanto a dinâmica de liberação, índice de eficiência, lixiviação e desempenho agrônômico quando utilizadas como formulações NPK, a fim de certificar a vantagem da granulação e estratégia do uso de fertilizantes organominerais.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AHMED, H.K.; FAWY, H.A. Study of sewage sludge use in agriculture and its effect on plant and soil. **Agriculture and Biology Journal of North America**, v. 1, n. 5, p. 1044 - 1049, 2010.
- ALONSO, J.M. Caracterização de biossólidos para a produção de mudas de espécies arbóreas da mata atlântica, Tese de Doutorado em Ciências Ambientais e Florestais, UFRRJ, Seropédica, RJ. **2018**.
- ANDA (Agência Nacional de Águas), 2018. Setor de Fertilizantes, Anuário Estatístico: balanço de fertilizantes em nutrientes. São Paulo, SP: Associação Nacional para Difusão de Adubos, 2018.
- ANVISA (Agência Nacional De Vigilância Sanitária), 2013 - RDC N° 42, de 29/08/2013, que dispõe sobre Limites Máximos de Contaminantes Inorgânicos em Alimentos. Disponível em: http://portal.anvisa.gov.br/documents/33880/2568070/rdc0042_29_08_2013.pdf/c5a17d2d-a415-4330-90db-66b3f35d9fbd. Acessado em: 24/01/2020.
- APHA (American Public Health Association), 2012 - Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 20rd Edition, Washington, DC, 2012.
- BAMBERG, A.; GRECCO, M.; SILVEIRA, C.; MARTINAZZO, R.; POTES, M.; LOUZADA, R. Uso de colunas de lixiviação para a determinação da dinâmica de liberação de nutrientes a partir de rochas moídas. In Embrapa Clima Temperado - Artigo em anais de congresso (ALICE). In: Workshop insumos para agricultura sustentável, 2012, Pelotas. Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 2012. 1 CD-ROM. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/950256/1/2AGBamberg.pdf>. Acessado em 10/07/2019.
- BELL, R.W.; SENG, V. **The management of the agro-ecosystems associated with sandy soils, In: Management of Tropical Sandy Soils for Sustainable Agriculture**. Khon Kaen, Thailand. 2005.
- BETTIOL, W., Effect of sewage sludge on the incidence of corn stalk rot caused by Fusarium. **Summa Phytopathologica**, v. 30, n. 1, p. 16 - 22, 2004.
- BETTIOL, W.; CARVALHO, P.C.T. Resíduo orgânico como fertilizante para a cultura do milho (*Zea mays L.*) híbrido HMDO 7974. **Fertilizantes**, v. 4, p. 9 - 11, 1982.
- BIELSCHOWSKY, M.C. Modelo de gerenciamento de lodo de estação de tratamento de esgotos: aplicação do caso da bacia da Baía de Guanabara. Dissertação de Mestrado em Engenharia Ambiental, UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, **2014**.
- BOARETTO, A.E. **Uso de lodo de esgoto como fertilizante**. FINEP - Financiadora de Estudos e Projetos, Botucatu, p. 185, 1986.
- BOWMAN, R.A. A sequential extraction procedure with concentrated sulfuric acid and dilute base for soil organic phosphorus. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 53, n. 2, p. 362 - 366, 1989.
- BRADY, N.C.; WEIL, R.R. Elementos da natureza e propriedades dos solos. Bookman Editora, 2009.
- BRASIL. 2014. Decreto nº 8.384, Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília (DF), de 29/12/2014, que altera o Anexo ao Decreto nº 4.954, de 14/01/2004, que aprova o Regulamento da Lei nº 6.894, de 16 de dezembro de 1980, e dispõe sobre a inspeção e

fiscalização da produção e do comércio de fertilizantes, corretivos, inoculantes ou biofertilizantes destinados à agricultura. 2014.

BREDEMEIER, C.; MUNDSTOCK, C.M. Regulação da absorção e assimilação do nitrogênio nas plantas, **Ciência Rural**, v. 30, n. 2, p. 365 - 372, 2000.

BÜNEMANN, E.K.; OBERSON, A.; LIEBISCH, F.; KELLER, F.; ANNAHEIM, K.E.; HUGUENIN-ELIE, O.; FROSSARD, E. Rapid microbial phosphorus immobilization dominates gross phosphorus fluxes in a grassland soil with low inorganic phosphorus availability. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 51, p. 84 - 95, 2012.

CABREIRA, G.V.; LELES, P.S.S.; ALONSO, J.M.; DE ABREU, A.H.M.; LOPES, N.F.; DOS SANTOS, G.R. Biossólido como componente de substrato para produção de mudas florestais, **Floresta**, v. 47, n. 2, p. 165 - 176, 2017.

CAMPOS, T., CHAER, G., LELES, P.D.S., SILVA, M. AND SANTOS, F. Leaching of heavy metals in soils conditioned with biosolids from sewage Ssludge. **Floresta e Ambiente**, 26 (SPE1), 2019.

CANTARELLA, H. Nitrogênio. *In*: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ, V.H.V.; BARROS, N.F.; FONTES, R.L.F.; CENTARUTTI, R.B.; NEVES, J.C.L, eds. **Fertilidade do Solo**. Viçosa, Minas Gerais, p. 375 - 470, 2007.

CARVALHO, P.C.T.; BARRAL, M.F. Aplicação de lodo de esgoto como fertilizante, **Fertilizantes**, São Paulo, v. 3, n. 2, p. 1 - 4, 1981.

CETESB (COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO). Norma P 4. 239: 1999. 29 p.

CONAMA (CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE). 2006. Resolução nº 375, de 29 de agosto de 2006. Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil, 2006.

CQFS/RS (Comissão De Química E Fertilidade Do Solo/RS), 2004. **Manual de recomendações de adubação e calagem para os estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina**. 10º ed. Porto Alegre, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo - Núcleo Regional Sul, 2004. 394 p.

CRUZ, A.C.; PEREIRA, F.S.; FIGUEIREDO, V.S. Fertilizantes organominerais de resíduos do agronegócio: avaliação do potencial econômico brasileiro. *In*: BNDES Setorial, v. 1, 2017.

DE ABREU, A.H.M; LELES, P.S.S.; MELO, L.A.; OLIVEIRA, R.R; ALVES, D.H.A. Caracterização E potencial de substratos formulados com biossólido na produção de mudas de *Schinus terebinthifolius* Raddi e *Handroanthus heptaphyllus* (vell.) Mattos, **Ciência Florestal**, v. 27, n. 4, p. 1179 - 1190, 2017.

DE ABREU, A.H.M., DOS SANTOS LELES, P.S., ALONSO, J.M., DA SILVA ABEL, E.L. DE OLIVEIRA, R.R. Characterization of sewage sludge generated in Rio de Janeiro, Brazil, and perspectives for agricultural recycling, **Semina: Ciências Agrárias**, v. 38, n. 4, p. 2433 - 2447, 2017.

DE CARVALHO, D.F.; DA ROCHA, H.S.; BONOMO, R.; DE SOUZA, A.P. Estimativa da evapotranspiração de referência a partir de dados meteorológicos limitados, **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.50, n. 1, p. 1 - 11, 2015.

DE CASTRO, S.S.; HERNANI, L.C. **Solos frágeis: caracterização, manejo e sustentabilidade**. Embrapa Solos - Livro Técnico (INFOTECA-E), 2015.

- DECHEN, A.R.; NACHTIGALL, G.R. **Elementos requeridos à nutrição de plantas** in Fertilidade do Solo, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo (SBCS), Viçosa, 2007.
- DE OLIVEIRA NETO, T.I.; COSTA, M.C.G.; DE OLIVEIRA, V.P.V. Acúmulo de nitrogênio em plantas de milho crioulo em resposta à adubação orgânica. **Revista Equador**, v. 5, n. 4, p. 207 - 220, 2016.
- DE SOUZA, R.B.; DE ALCÂNTARA, F.A. Adubação no sistema orgânico de produção de hortaliças. Embrapa Hortaliças - Circular Técnica (INFOTECA-E), 2008.
- DIAS, R.D.C.; TEIXEIRA, P.C.; POLIDORO, J.; RAGUZZONI, K.; ZONTA, E. Produção de matéria seca em plantas de milho em função da aplicação de fertilizante organomineral fosfatado. In Embrapa Solos - Artigo em anais de congresso (ALICE). In: Congresso Brasileiro de Ciência do Solo, p. 35, 2015, Natal. O solo e suas múltiplas funções. Em Anais. Natal: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2015.
- DIAS, R.C. Avaliação de Fertilizantes Granulados a Base de Cloreto de Potássio e Ácidos Húmicos no Desenvolvimento Vegetativo da Cultura do Milho (*Zea mays* L.). Dissertação de Mestrado em Ciência do Solo, UFRRJ, Seropédica, Rio de Janeiro, 2017.
- DOBERMANN, A. **Nutrient use efficiency: measurement and management.** In **International Fertilizer Industry Association. Fertilizer best management practices.** Paris, p. 1 - 28, 2007.
- DONAGEMMA, G.K.; FREITAS, P.L.D.; BALIEIRO, F.D.; FONTANA, A.; SPERA, S.T.; LUMBRERAS, J.F.; ...; MACEDO, M.C.M. Characterization, agricultural potential, and perspectives for the management of light soils in Brazil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 51, n. 9, p. 1003 - 1020, 2016.
- DORES-SILVA, P.R.; LANDGRAF, M.D.; REZENDE, M.O.O. Processo de estabilização de resíduos orgânicos: vermicompostagem *versus* compostagem. **Química Nova**, v. 36, n. 5, p. 640 - 645, 2013.
- DUDA, G.P. Conteúdo de fósforo microbiano, orgânico e biodisponível em diferentes classes de solos. Tese (Doutorado em Agronomia – Ciência do Solo), UFRRJ. Seropédica, Rio de Janeiro. 2000.
- DUDA, G.P.; GUERRA, J.G.M.; PEREIRA, M.G.; DOS ANJOS, L.H.C.; RIBEIRO, M.R. Avaliação da biodisponibilidade de fósforo em diferentes classes de solos do Brasil. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 34, n. 4, p. 1563 - 1575, 2013.
- ECKHARDT, D.P. Fertilizantes orgânicos: Índice de eficiência e produção de alface, cenoura e mudas de eucalipto. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Santa Maria. 2015.
- ECKHARDT, D.P.; REDIN, M.; SANTANA, N.A.; CONTI, L.D.; DOMINGUEZ, J.; JACQUES, R.J.S.; ANTONIOLLI, Z.I. Cattle manure bioconversion effect on the availability of nitrogen, phosphorus, and potassium in soil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 42, Viçosa, 2018. Epub, July 26, 2018.
- EMBRAPA. 1997. **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes.** Brasília, Embrapa Comunicação para Transferência de Tecnologia. 1997. 370 p.
- ERNANI, P.R.; AMEIDA, J.A.; DOS SANTOS, F.C. **Potássio** in Fertilidade do Solo, Sociedade Brasileira de Solos (SBCS), Viçosa, 2007.

FAO (Food and Agriculture Organization), 2001. Lecture notes on the major soils of the world. USA. 2001. 307 p.

FERNANDES, A.L.M.; DE OLIVEIRA, M.K.T.; DA SILVA, E.F.; LEITÃO, A.R.F. Desenvolvimento inicial do milho em função de diferentes teores de esterco bovino. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, v. 7, n. 1, p. 15 - 18, 2012.

FERRARI, A. Uso de resíduos da indústria de bioenergia na formulação de fertilizantes organominerais fosfatados. Tese de Doutorado em Ciência do Solo, UFRRJ, Seropédica, Rio de Janeiro, **2017**.

FRAVET, P.R.F.; SOARES, R.A.B.; LANA, R.M.Q.; LANA, Â.M.Q.; KORNDÖRFER, G.H. Efeito de doses de torta de filtro e modo de aplicação sobre a produtividade e qualidade tecnológica da soqueira de cana-de-açúcar. **Ciência Agrotecnológica**, v. 34, n. 3, p. 618 - 624, 2010.

FREIRE, L.; BALIEIRO, F.D.C.; ZONTA, E.; ANJOS, L. D.; PEREIRA, M.; LIMA, E.; ... CAMPOS, D.D.; POLIDORO, J.C. **Manual de calagem e adubação do estado do Rio de Janeiro. Manual de Calagem e Adubação do Estado do Rio de Janeiro**. UFRRJ/Embrapa. 2013. 362 p.

GAVA, J.L.; GONCALVES, J.L.M.; SHIBATA, F.Y.; CORRADINI, L. Eficiência relativa de fertilizantes fosfatados no crescimento inicial de eucalipto cultivado em solos do cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 21, n. 3, p. 497 - 504, 1997.

GERARD, C.J. Laboratory experiments on the effects of antecedent moisture content and residue application on structural properties of a fragile soil. **Soil and Tillage Research**, v. 7, n. 1 - 2, p. 63 - 74, 1986.

GUARESCHI, R.F.; SILVA, A.; DA SILVA JUNIOR, H.R.; PERIN, A.; GAZOLLA, P.R. Adubação orgânica na produção de biomassa de milho em latossolo de cerrado. **Global Science and Technology**, v. 6, n. 2, 2013.

GOEDERT, W.J.; DE SOUSA, D.M.G.; REIN, T.A. Princípios metodológicos para avaliação agrônômica de fontes de fósforo. Embrapa Cerrados - Documentos (INFOTECA-E), 1986.

INSTITUTO TRATA BRASIL. 2019. **Ranking do Saneamento 2017** (SNIS, 2017), São Paulo, julho, 2019. Acessado em: 26/01/2020.

KÖRNDORFER, G.H.; MELO, S.P. Fontes de fósforo (fluida ou sólida) na produtividade agrícola e industrial da cana-de-açúcar, **Ciência e Agrotecnologia**, v. 33, n. 1, p. 92 - 97, 2009.

KIEHL, E.J. **Novos fertilizantes orgânicos**. Piracicaba: 1ª ed., v. 248, 2010.

LEAL, M.A.A.; BALIEIRO, F.C.; INÁCIO, C.T.; CAMPOS, D.V.B.; GUERRA, J.G.M.; ZONTA, E.; FREIRE, L.R. **Uso e manejo da matéria orgânica para fins de fertilidade do solo**. In: Manual de calagem e adubação para o estado do Rio de Janeiro. Editor técnico, Luiz Rodriguez Freire ... [et al.]. Seropédica, RJ. Editora Universidade Rural, 2013.

LEITE, J.N.F.; CRUZ, M.C.P.D.; FERREIRA, M.E.; ANDRIOLI, I.; BRAOS, L.B. Frações orgânicas e inorgânicas do fósforo no solo influenciadas por plantas de cobertura e adubação nitrogenada. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 51, n. 11, p. 1880 - 1889, 2016.

LIMA FILHO, P.; LELES, P.S.S.; DE ABREU, A.H.M.; DA SILVA, E.V.; FONSECA, A.C. Produção de mudas de *Ceiba speciosa* em diferentes volumes de tubetes utilizando o biossólido como substrato, **Ciência Florestal**, v. 29, n. 1, p. 27 - 39, 2019.

MAGUIRE, R., THOMASON, W.E., EVANYLO, G.K. AND ALLEY, M.M., 2019. **Nitrogen soil testing for corn in Virginia**. Virginia Cooperative Extension, publication 418-016, 2019.

MAPA (MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO), 2009. Secretaria de Defesa Agropecuária, Instrução Normativa nº 25, de 23/07/2009, Anexos à presente Instrução Normativa. 2009. Disponível em: <http://extranet.agricultura.gov.br/sislegis-consulta/consultarLegislacao.do?operacao=visualizar&id=20542>. Acessado em 20/07/2018.

MAPA (MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO), 2011. Instrução Normativa Nº 46 de 06/10/2011 (Produção vegetal e animal), regulada pela IN 17-2014), que estabelece o Regulamento Técnico para os Sistemas Orgânicos de Produção, bem como as listas de substâncias e práticas permitidas para uso nos Sistemas Orgânicos de Produção, na forma desta Instrução Normativa e de seus Anexos I a VIII. 2011.

MAPA (MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO), 2014. Manual de métodos analíticos oficiais para fertilizantes minerais, orgânicos, organominerais e corretivos. Brasília, 2014. Secretaria de Defesa Agropecuária. Coordenação - Geral de Apoio Laboratorial; Murilo Carlos Muniz Veras (Org.) – Brasília: MAPA/ SDA/CGAL, 2014. 220 p.

MAPA (MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO) 2016. Secretaria de Defesa Agropecuária, Instrução Normativa nº 7, DOU de 02/05/2016 (nº 82, Seção 1, pág. 9), que dispõe que os Anexos IV e V do Art. 1º da Instrução Normativa SDA nº 27, de 5 de junho de 2006. Disponível em: http://www.agricultura.gov.br/assuntos/insumos-agropecuarios/insumos_agricolas/fertilizantes/legislacao/in-sda-27-de-05-06-2006-alterada-pela-in-sda-07-de-12-4-16-republicada-em-2-5-16.pdf. Acessado em 26/01/2020.

MARCATTO, F.S.A.; SILVEIRA, H. Relação entre as propriedades físico-hídricas dos solos e os tipos de uso da terra como subsídio ao manejo e conservação do solo e da água na bacia hidrográfica do rio Pirapó - PR (*Relation between the soil's hydro-physical attributes and the land use...*). **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 9, n. 6, p. 1769 - 1783, 2016.

MIELNICZUK, J.; BAYER, C.; VEZZANI, F.M.; LOVATO, T.; FERNANDES, F.F.; DEBARBA, L. Manejo de solo e culturas e sua relação com os estoques de carbono e nitrogênio do solo. *In*: CURI, N.; MARQUES, J.J.; GUILHERME, L.R.G.; LIMA, J.M.; LOPES, A.S.; ALVAREZ, V.H. **Tópicos em Ciência do Solo**, eds. Viçosa, MG, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, v. 3, p. 209 - 248, 2003.

NEIVERTH, C.A.; LIBARDI, P.L.; DE LURDES MACHADO, M.; SCHNEIDER, F.A. Lixiviação de nitrato e amônio em colunas indeformadas de solos de uma pedossequência do Estado do Paraná. *Anais do EVINCI - UniBrasil*, v. 1, n. 4, p. 1676 - 1691, 2015.

OLIVEIRA, L.B., ACCIOLY, A.M.A., MENEZES, C., SIMÕES, R., ALVES, R.N., BARBOSA, F.S., DOS SANTOS, C.L.R. Parâmetros indicadores do potencial de mineralização do nitrogênio de compostos orgânicos. *Idesia (Arica)*, v. 30, n. 1, p. 65 - 73, 2012.

PEREIRA, M.S. Utilização de lodo de esgoto na agricultura (Revisão bibliográfica), **Revista Brasileira de Gestão Ambiental - RBGA**, Pombal, PB, v. 9, n. 1, p. 01 - 08, 2015.

PIAN, L.B. Fungos micorrízicos arbusculares e matéria orgânica em um módulo de cultivo intensivo de hortaliças orgânicas. Dissertação de Mestrado em Ciência do Solo, UFRRJ, Seropédica, Rio de Janeiro, 2015.

RABELO, K.C.C. Fertilizantes organomineral e mineral: aspectos fitotécnicos na cultura do tomate industrial. Dissertação de Mestrado em Agronomia: Solo e Água, UFG, Goiânia, 2015.

RANNO, S.K.; SILVA, L.S.D.; GATIBONI, L.C.; RHODEN, A.C. Capacidade de adsorção de fósforo em solos de várzea do Estado do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, n. 1, p. 21 - 28, 2017.

REELEDER, R.D.; MILLER, J.J.; BALL, B.R.; COELHO, R.C. Impacts of tillage, cover crop, and nitrogen on populations of earthworms, microarthropods, and soil fungi in a cultivated fragile soil. **Applied Soil Ecology**, v. 33, n. 3, p. 243 - 257, 2006.

RODRIGUES, R.D.F. Influência das condições de processo na granulação de supersimples em tambor rotativo. Tese de Doutorado em Engenharia Química, UFU, Uberlândia, Minas Gerais, **2012**.

SAS (2002). SAS Institute Inc. **Statistical Analysis System, guide**. 1. ed. Cary, EUA, v. 9. 2002. 513p.

SANTOS, H.F. Aplicação do lodo de estações de tratamento de esgotos em solos agrícolas. **Revista DAE**, v. 32, p. 31 - 40, 1979.

SANTOS, H.G.; JACOMINE, P.K.T.; ANJOS, L.H.C.; OLIVEIRA, V.A.; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M.R.; ALMEIDA, J.A.; ARAUJO FILHO, J.C.; OLIVEIRA, J.B.; CUNHA, T. J.F. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos, 2018, Embrapa Solos, Brasil <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1094003/sistema-brasileiro-de-classificacao-de-solos>. Acesso em 20/04/2020.

SCIVITTARO, W.B.; BOARETTO, A.E.; MURAOKA, T. Eficiência agronômica de fertilizantes fosfatados fluidos e sólidos. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, v. 21, n. 3, p. 505 - 511, 1997.

SILVA, C.A.; MACHADO, P.L.O.A. Sequestro e emissão de carbono em ecossistemas agrícolas: estratégias para o aumento dos estoques de matéria orgânica em solos tropicais. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/336828/sequestro-e-emissao-de-carbono-em-ecossistemas-agricolas-estrategias-para-o-aumento-dos-estoques-de-materia-organica-em-solos-tropicais>. Acessado em 06/04/2020.

SILVA, M.B.; ANJOS, L.H.C.; PEREIRA, MG. NASCIMENTO, R.A.M. Estudo de toposequência da baixada litorânea fluminense: efeitos do material de origem e posição topográfica, **Revista Brasileira Ciência do Solo**, v. 25, p. 965 - 976, 2001.

SILVA, D.D.F.; AMARAL, T.A.; ANDRADE, C. ARAUJO, S.G.A. Lixiviação de nitrato e amônio no perfil de Latossolo cultivado com milho irrigado. *In* Embrapa Milho e Sorgo - Artigo em anais de congresso (ALICE). *In*: Congresso Nacional de Irrigação e Drenagem, 19, 2009, Montes Claros. Os efeitos multiplicadores da agricultura irrigada: anais. Montes Claros: ABID, 2009.

SNIS (SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SANEAMENTO), 2018. Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgoto. Disponível em: <http://www.snis.gov.br/diagnostico-anual-agua-e-esgotos/diagnostico-dos-servicos-de-agua-e-esgotos-2018>. Acessado em: 02/03/2020.

SOARES, J.P.; SOUZA, J.A.; CAVALHEIRO, E.T.G. Caracterização de amostras comerciais de vermicomposto de esterco bovino e avaliação da influência do pH e do tempo na adsorção de Co(II), Zn(II) e Cu(II). **Química Nova**, v. 27, n. 1, p. 5 - 9, 2004.

SOUZA, R.P.D.; PEGORARO, R.F.; DOS REIS, S.T. Disponibilidade de fósforo e produção de biomassa de pinhão manso em solos com distintas texturas e doses de fósforo. **Revista Agro@ambiente On-line**, v. 11, n. 1, p. 1 - 10, 2017.

TEDESCO, M.J.; GIANELLO, C.; BISSANI, C.A.; BOHNEN, H.; VOLKWEISS, S.J. **Análises de solo, plantas e outros materiais**. Boletim Técnico Nº 5 - Departamento de Solos - UFRGS, 1995. 174 p.

USEPA (United States Environmental Protection Agency). **Method 3050B: Acid digestion of sediments, sludges, soils**. Revision 2, USEPA, 1996.

USEPA (United States Environmental Protection Agency). **Method 3051: Microwave assisted acid digestion of sediments, sludges, soils, and oils**. Test. Methods Evaluation Solid Waste 1e30, 2007.

USHERWOOD, N.R.; SEGARS, W.I. Nitrogen interactions with phosphorus and potassium for optimum crop yield, nitrogen use effectiveness, and environmental stewardship. **The Scientific World Journal**, v. 1, p. 57 - 60, 2001.

WERLE, R.; GARCIA, R.A.; ROSOLEM, C.A. Lixiviação de potássio em função da textura e da disponibilidade do nutriente no solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, n. 6, 2297 - 2305, 2008.

WHO (World Health Organization), 1996. **Permissible limits of heavy metals in soil and plants**. Geneva, Switzerland, 1996.

WOHLENBERG, E.V.; REICHERT, J.M.; REINERT, D.J.; BLUME, E. Dinâmica da agregação de um solo franco-arenoso em cinco sistemas de culturas em rotação e em sucessão. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 28, n. 5, p. 891 - 900, 2004.

WRB (World Reference Base for Soil), 2006. IUSS Working Group World reference base for soil resources 2006. World Soil Resources Reports No. 103. FAO, Rome, 2006.

VELASCO, C. Saneamento avança, mas Brasil ainda joga 55% do esgoto que coleta na natureza, reportagem publicada no G1. 2018. Disponível em: <https://g1.globo.com/economia/noticia/saneamento-avanca-mas-brasil-ainda-joga-55-do-esgoto-que-coleta-na-natureza-diz-estudo.ghtml>. Acessado em: 06/04/2020.

YEOMANS, J.C.; BREMNER, J.M. A rapid and precise method for routine determination of organic carbon in soil, **Communications Soil Science Plant Analysis**, v. 19, p. 1467 - 1476, 1988.

ZONTA, E.; PRATES, F.S.P.; FREITAS, F.C.; GENUNCIO, D.C.; PRESOTTO, R.A.; STAFFANATO, J.B. Uso de tortas de oleaginosas na agricultura. *In*: Moura Brasil, N. do A. S.; CHAGAS, C.I.; Zonta, E. (Org.) **Impactos Ambientais Provenientes da Produção Agrícola: Experiências Argentinas e Brasileiras**. 1ª edição Rio de Janeiro: FAPERJ, v. 1, p. 561 - 588, 2016.

7. ANEXOS

ANEXO 1 – Resumo da análise de variância dos índices de eficiência de nitrogênio (IEN), fósforo (IEP) e potássio (IEK).

Parâmetro observado	F calculado	Valor P	CV (%)
IEN			
0 dias	2,8980	0,0116	320,39
7 dias	1,7290	0,1190	27,25
14 dias	6,2500	0,0000	36,61
28 dias	3,7770	0,0022	29,20
56 dias	5,3590	0,0001	31,56
112 dias	1,6610	0,1351	40,06
IEP			
0 dias	11,1400	0,0000	21,88
7 dias	10,3100	0,0000	95,10
14 dias	19,3300	0,0000	64,20
28 dias	7,9200	0,0000	63,61
56 dias	7,4346	0,0000	68,52
112 dias	9,0455	0,0000	24,21
IEK			
0 dias	7,4220	0,0000	28,85
7 dias	42,8900	0,0000	15,59
14 dias	86,0500	0,0000	12,09
28 dias	22,8906	0,0000	27,94
56 dias	94,9740	0,0000	10,68
112 dias	11,7860	0,0000	29,96

* Significativo a 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

ANEXO 2 – Resumo da análise de variância do ensaio de lixiviação.

Parâmetro observado	F calculado	Valor P	C.V. (%)
Lixiviação de K			
Total	4,6700	0,0016*	35,60
Lixiviação de NH₄⁺			
Total	1,0570	0,4359	18,80
Lixiviação de NO₃⁻ + NO₂⁻			
Total	0,7280	0,6904	60,06

*
5% de

pele teste de Tukey.

Significativo a
probabilidade

ANEXO 3 – Resumo da análise de variância dos parâmetros vegetativos do experimento de casa de vegetação.

Parâmetro observado	F calculado	Valor P	CV (%)
Massa seca (parte aérea)	6,880	0,0001*	13,13
Massa Seca (raiz)	1,283	0,2984	5,83
Diâmetro	1,645	0,1645	7,63
Altura	3,892	0,0045*	10,4
Teores parte aérea			
N	4,537	0,0018*	21,51
P	3,000	0,0176*	0
K	156,117	0,0000*	0,56
Na	0,637	0,7390	130
Pb
Zn	1,129	0,3801	33,15
Cd	0,993	0,4660	25,48
Ni	0,405	0,9068	70,22
Cu	1,569	0,1867	27,26
Mn	0,405	0,9064	35,68
Fe	0,969	0,4823	47,39
Cr	0,919	0,5184	292,78
Teores raiz			
N	0,724	0,6688	26,26
P	4,304	0,0025*	22,88
K	21,68	0	33,85

Na	2,542	0,0368*	38,02
Pb
Zn	6,345	0,0002*	32,17
Cd	1,535	0,1975	28,6
Ni	1,134	0,3767	322,98
Cu	1,301	0,2897	42,83
Mn	0,879	0,5478	24,16
Fe	3,619	0,0068*	16,51
Cr	1,731	0,1423	144,05
Acúmulo parte aérea			
N	1,226	0,3264	28,07
P	1,068	0,4170	16,23
K	156,327	0,0000*	3,05
Acúmulo raiz			
N	1,226	0,3264	28,07
P	4,303	0,0025*	22,89
K	27,703	0,0000*	33,85

* Significativo a 5% de probabilidade pelo teste de Tukey; CV – coeficiente de variação.

ANEXO 4 – Resumo da análise de variância dos parâmetros químicos do solo e fracionamento de P do experimento de casa de vegetação.

Parâmetro observado	F calculado	Valor P	CV (%)
Solo			
H+Al	0,363	0,9297	8,52
P	20,22	0,0000*	18,81
K	19,33	0,0000*	5,02
Na	5,285	0,0007*	10,71
Ca	0,372	0,9249	7,99
Mg	0,914	0,5222	8,52
Carbono Orgânico Total	1,234	0,3224	40,53
pH	0,796	0,6115	4,02
Fracionamento de P			
P lábil orgânico	1,306	0,2871	143,31
P lábil inorgânico	3,747	0,0056*	24,9
P moderadamente lábil orgânico	1,212	0,3337	59,58
P moderadamente lábil inorgânico	90,03	0,0000*	55,3
P recalcitrante orgânico	0,4939	0,8480	118,85
P recalcitrante inorgânico	6,145	0,0002*	39,75
P residual	2,889	0,0358*	4,23
P total orgânico	1,016	0,4505	43,01
P total inorgânico	10,02	0,0000*	37,78
P total	4,3164	0,0024*	29,24
Taxa de recuperação	1,2739	0,3025	9,57
% de P orgânico	5,3794	0,0000*	31,98

* Significativo a 5% de probabilidade pelo teste de Tukey; CV – coeficiente de variação.