

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE CIÊNCIAS RURAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DO SOLO**

**DISPOSIÇÃO NO SOLO E POTENCIAL
FERTILIZANTE DE UM RESÍDUO DA INDÚSTRIA
DE BIODIESEL**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Marcos Leandro dos Santos

**Santa Maria, RS, Brasil
2014**

DISPOSIÇÃO NO SOLO E POTENCIAL FERTILIZANTE DE UM RESÍDUO DA INDÚSTRIA DE BIODIESEL

Marcos Leandro dos Santos

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do Programa de Pós-graduação em Ciência do Solo, **Área de Concentração Organismos do Solo e Insumos Biológicos à Agricultura**, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Ciência do Solo**

Orientador: Prof. Dr. Rodrigo Josemar Seminoti Jacques

Santa Maria, RS, Brasil

2014

Ficha catalográfica elaborada através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Central da UFSM, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Santos, Marcos Leandro dos
DISPOSIÇÃO NO SOLO E POTENCIAL FERTILIZANTE DE UM
RESÍDUO DA INDÚSTRIA DE BIODIESEL / Marcos Leandro dos
Santos.-2014.
62 p.; 30cm

Orientador: Rodrigo Josemar Seminoti Jacques
Coorientador: Sandro José Giacomini
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Maria, Centro de Ciências Rurais, Programa de Pós-
Graduação em Ciência do Solo, RS, 2014

1. Serragem de filtração 2. Compostagem 3. Fertilidade
do solo 4. Efeito residual 5. Canola I. Jacques, Rodrigo
Josemar Seminoti II. Giacomini, Sandro José III. Título.

**Universidade Federal de Santa Maria
Centro de Ciências Rurais
Programa de Pós-graduação em Ciência do Solo**

A Comissão Examinadora, abaixo assinada,
aprova a Dissertação de Mestrado

**DISPOSIÇÃO NO SOLO E POTENCIAL FERTILIZANTE DE UM
RESÍDUO DA INDÚSTRIA DE BIODIESEL**

elaborada por
Marcos Leandro dos Santos

como requisito parcial para obtenção do grau de
Mestre em Ciência do Solo

Comissão Examinadora:

Rodrigo Josemar Seminoti Jacques, Dr. (UFSM)
(Presidente/Orientador)

Paulo Ademar Avelar Ferreira, Dr. (UFSM)
(Examinador)

Eduardo Giroto, Dr. (IFRS)
(Examinador)

Santa Maria/RS, 13 de Fevereiro de 2014.

Aos meus pais José e Eva, pelo carinho e educação que recebi. Sem vocês, meus maiores Mestres, eu não teria chegado aqui.

Dedico

AGRADECIMENTOS

A Deus pelas oportunidades da minha vida, saúde e inspiração para a realização deste trabalho.

Aos meus pais, José e Eva, pelo apoio e carinho em todas as etapas durante o período de Graduação e Mestrado. OBRIGADO MAIS UMA VEZ.

À Universidade Federal de Santa Maria, pela oportunidade de estudo.

Ao Professor Orientador Dr. Rodrigo Josemar Seminoti Jacques pela orientação, colaboração, incentivo e amizade durante todo o período de Graduação e Pós-graduação. Obrigado Professor.

À Professora Dra. Zaida Inês Antonioli, pela amizade e incentivos, durante todo o período, desde a Iniciação Científica durante a Graduação. Obrigado Professora.

Ao Professor Dr. Sandro José Giacomini pela Co-orientação, colaboração de idéias para o desenvolvimento desde trabalho.

Aos demais professores do Departamento de Solos da UFSM, pelos ensinamentos e convívio.

Aos funcionários do Departamento de Solos, Antônio, Alex, Finamor, Pozzobom, Paulinho e Michel. Ao secretário do PPGCS, Héverton.

Aos colegas de graduação e Pós-graduação do Departamento de Solos em especial aos colegas do Laboratório de Fertilidade do Solo: Lessandro De Conti e Paulo Ferreira, e do Laboratório de Biotransformações do N e C: Stefen, Gonzatto, Diego, Getúlio, Redin, Doneda e Eduardo.

Aos colegas e alunos de Iniciação Científica Francisco Wesz, Willian Braga dos Santos e Anderson Moro pelo auxílio durante a realização do trabalho.

Aos colegas do PPGCS e do Laboratório de Biologia do Solo e Ambiente da UFSM: Ricardo, Gerusa, Bárbara, Andressa, Daniel, Natielo, Sabrina, Daiana, Cristiane, Daiane, Afnan, Ângela, Manoeli e Juliane. Aos alunos de Iniciação Científica: Francisco, Willian, Anderson, Breno, Felipe, Jaime, Edicarla, Luana, Taís e Caroline. O convívio foi excelente pessoal, aprendi muito com cada um de vocês, podem ter certeza. Obrigado a todos, por fazer parte da minha história.

À CAPES pela concessão da bolsa de estudos.

E a todos que direta ou indiretamente ajudaram na realização deste trabalho.

MUITO OBRIGADO !!

RESUMO

Dissertação de Mestrado
Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo
Universidade Federal de Santa Maria

DISPOSIÇÃO NO SOLO E POTENCIAL FERTILIZANTE DE UM RESÍDUO DA INDÚSTRIA DE BIODIESEL

AUTOR: MARCOS LEANDRO DOS SANTOS
ORIENTADOR: RODRIGO JOSEMAR SEMINOTI JACQUES
CO-ORIENTADOR: SANDRO JOSÉ GIACOMINI
Data e Local da Defesa: Santa Maria, 13 de fevereiro de 2014.

A produção do biodiesel gera grandes volumes de resíduos, que quando dispostos de maneira inadequada, possuem potencial de contaminação ambiental. Os objetivos deste trabalho foram avaliar a disposição da serragem de filtração sem tratamento prévio em um Latossolo e em um Argissolo e produzir um composto orgânico, a partir da mistura da serragem de filtração com esterco bovino, visando conhecer o potencial fertilizante imediato e residual deste composto na canola, cultivada nestes dois tipos de solo. Amostras dos solos foram acondicionadas em frascos respirométricos e adicionadas de 2; 4 e 8 t ha⁻¹ de serragem de filtração, com e sem adição de N, P e K recomendados para a cultura da canola. Durante 120 dias, foi quantificada a produção de C-CO₂, a dinâmica destes nutrientes e a concentração de metais pesados. Em vasos em casa de vegetação, o composto orgânico produzido foi misturado a estes solos, no momento da semeadura ou seis meses antes. As doses avaliadas foram 0; 0,6; 1,2; 2,4; e 4,8 t ha⁻¹, com ou sem complementação de N, e quantificou-se a disponibilidade de nutrientes no solo, o acúmulo de massa seca e nutrientes nos tecidos da canola. A biodegradação da serragem de filtração foi moderada no solo, porém limitada pelo K no Latossolo e pelo P no Argissolo. A adição deste resíduo nos dois solos causa redução da disponibilidade de N e de K no Latossolo, mas não elevou os teores de metais pesados. O composto orgânico produzido apresenta características que permitem seu uso agrícola. A sua adição aos solos, no momento da semeadura ou seis meses antes, aumenta a disponibilidade de N, P e K, e substitui total ou parcialmente a adubação mineral da canola.

Palavras-chave: Serragem de filtração, descarte de resíduos, compostagem, fertilidade do solo, canola.

ABSTRACT

Master's Dissertation
Post-Graduation Program in Soil Science
Federal University of Santa Maria

ADDITIONIN SOIL AND POTENCIAL FERTILIZER OF A RESIDUE OF BIODIESEL INDUSTRY

AUTHOR: MARCOSLEANDRO DOS SANTOS

ADVISOR: RODRIGO JOSEMAR SEMINOTI JACQUES

CO-ADVISOR: SANDRO JOSÉ GIACOMINI

Date and Place of Defense: Santa Maria, February 13, 2014.

The biodiesel production generates large volumes of residues, which when improperly disposed have potential for environmental contamination. The objectives of this study were to evaluate the adding sawdust filtration untreated with a Oxisol and with an Paleudalf, producing an organic compound from the mixture of sawdust filtration with manure aiming to know the immediate potential and residual fertilizer of this organic compound in canola cultivated in these two soil types. Soil samples were placed in respirometric flasks and added 2; 4 and 8 t ha⁻¹ sawdust filtration with and without addition of N, P and K recommended for the culture of canola. During 120 days we quantified C-CO₂ production, the dynamics of these nutrients and the concentration of heavy metals. In pots in a greenhouse, the organic compound produced was mixed with these soils at planting or six months before. The doses were 0, 0.6, 1.2, 2.4 and 4.8 t ha⁻¹, with or without supplemental N, and we quantified the availability of nutrients in the soil, the accumulation of dry mass and nutrients in tissues of canola. The biodegradation of sawdust filtration in the soil was high but limited by K in Oxisol and by P in Paleudalf. The addition of this residue in both soils cause reduced availability of N, K in the Oxisol, but did not increase the levels of heavy metals. The organic compound produced presents characteristics that allow its use in agriculture and its addition to soils at the time of sowing or six months before increases the availability of N, P and K, and replaces total or partially the mineral fertilization of canola.

Keywords: Sawdust filtration, composting, soil fertility, residual effect, canola.

SUMÁRIO

| | |
|---|-----------|
| 1 INTRODUÇÃO GERAL..... | 10 |
| 2 ARTIGO I - BIODEGRADAÇÃO E DINÂMICA DE NUTRIENTES NO SOLO APÓS A APLICAÇÃO DE RESÍDUO DA INDÚSTRIA DE BIODIESEL | 14 |
| 2.1 Resumo..... | 14 |
| 2.2 Introdução | 15 |
| 2.3 Material e Métodos..... | 16 |
| 2.3.1 Coleta e caracterização dos solos e resíduo | 16 |
| 2.3.2 Degradação do resíduo no solo | 18 |
| 2.3.3 Disponibilidade de nutrientes e metais pesados no solo..... | 19 |
| 2.3.4 Análise estatística | 20 |
| 2.4 Resultados e Discussão..... | 20 |
| 2.4.1 Degradação do resíduo no solo | 20 |
| 2.4.2 Disponibilidade de Nitrogênio, Fósforo e Potássio no solo | 23 |
| 2.4.3 Metais pesados..... | 28 |
| 2.5 Conclusões..... | 30 |
| 2.6 Referências Bibliográficas | 31 |
| 3 ARTIGO II - POTENCIAL FERTILIZANTE IMEDIATO E RESIDUAL DO COMPOSTO ORGÂNICO PRODUZIDO A PARTIR DE RESÍDUO DA INDÚSTRIA DE BIODIESEL..... | 34 |
| 3.1 Resumo..... | 34 |
| 3.2 Introdução | 35 |
| 3.3 Material e Métodos..... | 37 |
| 3.3.1 Coleta e caracterização dos solos e resíduos..... | 37 |
| 3.3.2 Compostagem..... | 39 |
| 3.3.3 Disponibilidade de nutrientes no solo..... | 39 |
| 3.3.4 Cultivo da canola | 40 |
| 3.3.5 Análise estatística | 42 |
| 3.4 Resultados e Discussão..... | 42 |
| 3.4.1 Compostagem..... | 42 |
| 3.4.2 Disponibilidade de nutrientes no solo..... | 43 |
| 3.4.3 Cultivo da canola | 47 |
| 3.5 Conclusões..... | 55 |
| 3.6 Referências Bibliográficas | 56 |
| 4 CONSIDERAÇÕES FINAIS | 60 |
| 5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 61 |

1. INTRODUÇÃO GERAL

A indústria mundial de biocombustíveis surgiu como uma alternativa promissora de energia renovável nos anos 90, reduzindo a dependência da matriz energética dominada por combustíveis derivados do petróleo. A partir de então, estudos sobre a fabricação e utilização do biodiesel em motores receberam maior atenção. Pesquisadores encontraram similaridade de rendimento dos motores entre o biodiesel e o diesel de origem fóssil (BASHA et al., 2009; ATABANI et al., 2013; XUE, 2013), além da redução nas emissões de gases de efeito estufa (ISMAIL et al., 2013; XUE, 2013; GUARIEIRO et al., 2014).

A importância estratégica e ambiental desse tipo de bioenergia tem levado muitos países a investir cada vez mais em novas tecnologias. Dentre os principais produtores mundiais estão os Estados Unidos, a União Europeia e o Brasil, respectivamente (ANP, 2010). Segundo a Associação Brasileira das Indústrias de Óleos Vegetais (ABIOVE, 2012) no ano de 2012, no Brasil, foram produzidos aproximadamente 2,7 bilhões de metros cúbicos de biodiesel e o estado do Rio Grande do Sul foi responsável por 806 milhões de metros cúbicos deste biocombustível.

Como todo o processo industrial, a fabricação do biodiesel gera resíduos, e dentre estes, destaca-se a serragem de filtração do óleo vegetal bruto. Este material possui tempo de uso limitado na indústria e é frequentemente substituído, gerando grandes quantidades de resíduos. Para cada metro cúbico de óleo filtrado, é gerado aproximadamente 0,97 kg de serragem de filtração que quando disposto de maneira inadequada, possui potencial de contaminação ambiental.

Esse material é rico em celulose (54,38%) e lignina (45,51%) e apresenta maior eficiência na retenção de impurezas se comparada a sílica, otimizando a filtração e aumentando o tempo de uso do filtro. A serragem de filtração é classificada como resíduo Classe II A – não inerte, pela norma ABNT NBR 10.004 de 09/1987, e de acordo com a Resolução do CONAMA Nº 23, de 12 de dezembro de 1996, pode ser considerada não perigosa ao ambiente, se adequadamente descartada. Os resíduos assim classificados possuem características físico-químicas semelhantes ao lixo doméstico e possuem

propriedades como combustibilidade, biodegradabilidade ou solubilidade em água.

Segundo a Norma Técnica Nº 001/96-FEPAM, da Fundação Estadual do Meio Ambiente do Estado do Rio Grande do Sul, os resíduos que apresentam potencial de aproveitamento como fertilizante ou condicionador de solos, poderão ser incorporados em solos agrícolas, sem causar impactos ambientais negativos. De acordo com a Resolução CONAMA Nº 313, de 29 de outubro de 2002, a incorporação no solo é considerada uma forma de reutilização ou reciclagem do resíduo e a compostagem como uma alternativa de tratamento.

A incorporação de resíduos no solo e seu impacto no ambiente tem sido alvo de pesquisadores há algum tempo (PHILLIPS et al., 1977). Seu comportamento quanto à degradação, disponibilidade de nutrientes e metais pesados no solo dependerá muito da sua natureza física, química e biológica, bem como do tipo de solo. Por isso, a adição da serragem de filtração no solo somente poderá ser realizada após comprovação prévia do reduzido impacto no ambiente, o que é obtido através das pesquisas.

Um dos métodos mais utilizados para avaliar o comportamento e degradação de resíduos orgânicos quando incorporados ao solo é o ensaio de incubação em laboratório. É um procedimento seguro e possibilita o acompanhamento do CO₂ produzido em ambiente controlado, sendo possível quantificar outros parâmetros, como a disponibilidade de nutrientes e metais, sem o risco de contaminação ambiental. Tendo conhecimento da taxa de degradação e potencial de disponibilizar nutrientes e metais para o solo, o resíduo poderá ser disposto no solo ou tratado pela compostagem, se a legislação assim permitir. A compostagem é reconhecidamente uma das técnicas mais eficientes e ambientalmente corretas de tratamento de resíduos sólidos. As características do fertilizante orgânico estão regidas pelo Decreto Nº 4.954, de 14 de janeiro de 2004, e pode ser simples, misto ou composto. De acordo com a legislação, o fertilizante orgânico composto é um produto obtido por processos físicos, químicos, físico-químicos ou bioquímicos, natural ou controlado, a partir de matéria prima industrial, urbana ou rural, animal ou vegetal, isolados ou misturados.

Desta forma, o composto orgânico produzido a partir de resíduos sólidos e aplicado no solo na forma de fertilizante orgânico pode substituir parcial ou totalmente a adubação mineral de plantas cultivadas, melhorando as características químicas (STROJAKI et al., 2013), físicas (PIRES et al., 2008) e microbiológicas do solo (SANTOS et al., 2011).

A canola (*Brassica napus* L. var oleífera) é uma planta com grande potencial bioenergético, sendo a terceira oleaginosa mais cultivada no mundo (ARZANI et al., 2013). Seus grãos possuem um teor médio de 38% de óleo, enquanto a semente de soja apresenta um teor médio de 18% de óleo (EMBRAPA, 2010). Além disto, esta planta tem se constituído em uma alternativa muito interessante aos agricultores da região subtropical do Brasil, pois é cultivada no período de inverno, não competindo por área com as culturas de maior importância econômica, como o milho e a soja.

Apesar de a pesquisa ter buscado fornecer informações sobre as alternativas de reutilização, reciclagem e tratamento de resíduos industriais, ainda são necessários estudos para avaliar os possíveis impactos ambientais e o potencial fertilizante dos resíduos gerados pela indústria de biodiesel no solo, tendo em vista que a produção de biocombustíveis é relativamente recente em nosso país e no mundo.

Neste sentido, foram formuladas as seguintes hipóteses:

- 1) A disposição do resíduo da indústria de biodiesel denominado serragem de filtração em solo agrícola pode ser recomendada por ser um resíduo orgânico, degradável, possuir nutrientes em sua composição e baixos teores de metais pesados;
- 2) O composto orgânico produzido pela mistura entre a serragem de filtração e o esterco bovino pode suprir a demanda nutricional das plantas de canola.

Para testar estas hipóteses, formularam-se os seguintes objetivos:

- 1) Avaliar a disposição da serragem de filtração sem prévio tratamento em um Latossolo e em um Argissolo, quantificando sua biodegradação, influência na disponibilidade de nitrogênio, fósforo e potássio no solo, e potencial contaminante por metais pesados;

2) Produzir um composto orgânico a partir da mistura da serragem de filtração com esterco bovino e conhecer o potencial fertilizante imediato e residual deste composto orgânico na canola cultivada em um Latossolo e em um Argissolo.

2 ARTIGO I - BIODEGRADAÇÃO E DINÂMICA DE NUTRIENTES NO SOLO APÓS A APLICAÇÃO DE RESÍDUO DA INDÚSTRIA DE BIODIESEL

2.1 Resumo

A produção do biodiesel gera grandes volumes de resíduos, que quando dispostos de maneira inadequada, possuem potencial de contaminação ambiental. O objetivo deste trabalho foi avaliar a disposição de um resíduo da indústria de biodiesel, denominado serragem de filtração, em dois solos, quantificando sua biodegradação, influência na disponibilidade de nitrogênio, fósforo e potássio no solo, e potencial contaminante por metais pesados. Amostras de um Argissolo Vermelho distrófico e de um Latossolo Vermelho distroférico foram acondicionadas em frascos respirométricos e receberam as doses de serragem de filtração de 0, 2; 4 e 8 t ha⁻¹, com e sem adição de N, P e K recomendados para a cultura da canola. Durante 120 dias, foi quantificada a produção de C-CO₂, a dinâmica destes nutrientes e a concentração de metais pesados. Nas doses avaliadas, a serragem de filtração apresenta biodegradação alta no solo. A atividade microbiana na biodegradação da serragem de filtração no solo foi limitada pelo nutriente potássio no Latossolo, e pelo nutriente fósforo no Argissolo. A adição no solo deste resíduo da indústria de biodiesel causa redução da disponibilidade de N nos dois solos e de K no Latossolo. A disposição no solo da serragem de filtração de biodiesel na maior dose, não alterou significativamente os teores de metais pesados em ambos os solos. A disposição da serragem de filtração é uma alternativa viável, porém deve ser realizados estudos prévios, visando recomendar as doses de N, P e K a serem adicionadas para evitar a redução na disponibilidade dos nutrientes no solo.

Palavras chave: Serragem de filtração, descarte de resíduos, respirometria, disponibilidade de nutrientes, metais pesados.

2.2 Introdução

A indústria de biodiesel veio suprir a demanda mundial por combustíveis renováveis e de baixo impacto ambiental. Dentre os principais produtores estão os Estados Unidos, a União Europeia e o Brasil (ANP, 2010). Segundo dados da Associação Brasileira das Indústrias de Óleos Vegetais (ABIOVE, 2012), no ano de 2012 foram produzidos aproximadamente 2,7 bilhões de metros cúbicos de biodiesel no Brasil, sendo 806 milhões no Rio Grande do Sul. Conforme o Ministério de Minas e Energia (MME, 2010), a produção nacional de biodiesel tende a crescer, com projeção de quatro bilhões de metros cúbicos para o ano de 2020.

Como todo o processo industrial, a fabricação do biodiesel gera resíduos, que quando dispostos de maneira inadequada, possuem potencial de contaminação ambiental. Dentre os resíduos gerados em maiores quantidades destaca-se o material denominado de serragem de filtração, que é utilizado após a prensagem das sementes, para a filtragem do óleo vegetal bruto. Este material possui tempo de uso limitado na indústria e é frequentemente substituído, gerando grandes quantidades de resíduos. Segundo informações de uma indústria de produção de biodiesel no Rio Grande do Sul, para cada tonelada de biodiesel produzida são gerados aproximadamente 1,1 kg de serragem de filtração (dados não publicados). Este material é constituído principalmente de celulose (54,38%) e lignina (45,51%), sendo mais eficiente na filtragem do óleo do que a sílica. A serragem de filtração é classificada como resíduo Classe II A – não inerte, pela norma ABNT NBR 10.004 de 09/1987; e de acordo com a Resolução do CONAMA Nº 23, de 12 de dezembro de 1996, é considerada não perigosa ao ambiente, se adequadamente descartada (CONAMA, 1997).

Apesar da elevada concentração de nutrientes neste resíduo e a sua classificação ambiental, ainda não existem trabalhos na literatura sobre a adição da serragem de filtração ao solo, o que possibilitaria a ciclagem dos nutrientes, com o retorno de parte dos nutrientes retirados pelas plantas produtoras de bioenergia ao solo. Desta forma, a adição controlada da serragem de filtração no solo pode se constituir em uma alternativa barata e segura de disposição deste resíduo, sem a geração de passivos ambientais, e ainda poderá contribuir para a

melhoraria dos atributos químicos, físicos e biológicos do solo (JIN et al., 2011; SEGATTO et al., 2012).

Por outro lado, tendo em vista a falta de informações na literatura sobre os efeitos da adição da serragem de filtração ao solo, há necessidade de se analisar a sua biodegradabilidade e influência na dinâmica de nutrientes do solo, visando conhecer seu potencial de aumentar (mineralização) ou diminuir (imobilização) a disponibilidade de nutrientes.

Além disso, a disposição de resíduos ao solo demanda o monitoramento periódico da área, prevenindo uma possível contaminação com metais pesados. Como exemplo, Ramalho e Amaral Sobrinho (2001) demonstraram que a aplicação de torta de filtro da indústria sucroalcooleira pode substituir parcialmente a adubação mineral da cana-de-açúcar cultivada em um Cambissolo. Porém após 20 anos de aplicação desse resíduo no solo, aumentou significativamente os teores de Cd, Pb, Co, Cr, Cu e Ni, embora tenham permanecido em formas químicas pouco disponíveis às plantas.

Diante do exposto, o objetivo deste trabalho foi avaliar a disposição da serragem de filtração de biodiesel em dois solos, quantificando sua biodegradação, potencial contaminante por metais pesados e influência na dinâmica de nitrogênio, fósforo e potássio no solo.

2.3 Material e Métodos

2.3.1 Coleta e caracterização dos solos e resíduo

Dois solos com características distintas e muito representativos das áreas utilizadas para as culturas de sequeiro no Rio Grande do Sul e no Brasil foram coletados na camada de 0-20 cm, em áreas sem históricos de adubação ou adição de qualquer tipo de resíduo. Um Argissolo Vermelho distrófico (A) foi coletado em Santa Maria – RS (29° 43' 35" S e 53° 44' 59" W) e um Latossolo Vermelho distroférico (L) foi coletado em Ibirubá – RS (28° 33' 37" S e 53° 1' 20" W). Ambos foram secos a temperatura ambiente e peneirados em malha de 4 mm. Para elevar o pH dos solos próximo a 6,0, foi utilizado hidróxido de cálcio e óxido de magnésio na proporção molar de Ca e Mg de 3:1 e incubados com

umidade de 60% da capacidade de campo, por 60 dias. Após, uma amostra homogênea foi coletada para determinação de alguns parâmetros químicos conforme Tedesco et al. (1995) e físicos pelo método da pipeta (EMBRAPA, 1997) (Tabela 1).

A serragem de filtração do óleo vegetal bruto foi obtida em uma indústria de produção de biodiesel que utiliza sementes de soja como matéria prima. O resíduo foi seco em estufa de ar forçado à 60 °C até peso constante e homogeneizado para sua caracterização química (Tabela 1).

Tabela 1 - Caracterização do resíduo da indústria de biodiesel (serragem de filtração), e do Argissolo (A) e Latossolo (L), após correção do pH, . Santa Maria, RS. 2014.

| Serragem de filtração | | | Solos | | |
|-------------------------------|---------------------|-------------------|---------------------------|------------------------------------|-------|
| | | | | A | L |
| Umidade | % | 0,9 | | | |
| pH _(H2O) | - | 4,9 | Argila | g kg ⁻¹ | 210,0 |
| Relação C:N | - | 461:1 | Silte | g kg ⁻¹ | 320,0 |
| Relação C:P | - | 11:1 | Areia | g kg ⁻¹ | 470,0 |
| Relação C:K | - | 400:1 | pH _(H2O) | - | 5,9 |
| Carbono Total ¹ | g kg ⁻¹ | 600 | M.O.¹ | % | 1,4 |
| Nitrogênio Total ² | g kg ⁻¹ | 1,3 | H + Al | mg dm ⁻³ | 3,5 |
| Fósforo Total ² | g kg ⁻¹ | 53,9 | Alumínio trocável | mg dm ⁻³ | 0,1 |
| Potássio Total ² | g kg ⁻¹ | 1,5 | Saturação Bases | % | 63,2 |
| Cálcio Total ² | g kg ⁻¹ | 0,3 | CTC efetiva | cmol _c dm ⁻³ | 6,1 |
| Magnésio Total ² | g kg ⁻¹ | 1,0 | Cálcio trocável | cmol _c dm ⁻³ | 4,2 |
| Arsênio ³ | mg kg ⁻¹ | < 2,0 | Magnésio trocável | cmol _c dm ⁻³ | 1,6 |
| Bário ³ | mg kg ⁻¹ | 20,0 | Fósforo Mehlich-1 | mg dm ⁻³ | 6,8 |
| Cádmio ³ | mg kg ⁻¹ | < 0,2 | Potássio Mehlich-1 | mg dm ⁻³ | 56,0 |
| Chumbo ³ | mg kg ⁻¹ | < 2,0 | Cobre Mehlich-1 | mg dm ⁻³ | 5,1 |
| Cobre ³ | mg kg ⁻¹ | < 0,6 | Zinco Mehlich-1 | mg dm ⁻³ | 11,7 |
| Cromo ³ | mg kg ⁻¹ | 2,0 | | | 2,7 |
| Mercurio ³ | mg kg ⁻¹ | n.d. ⁴ | | | 2,7 |
| Molibdênio ³ | mg kg ⁻¹ | < 0,2 | | | 10,1 |
| Níquel ³ | mg kg ⁻¹ | 1,0 | | | 88,0 |
| Prata ³ | mg kg ⁻¹ | n.d. ⁴ | | | 4,5 |
| Selênio ³ | mg kg ⁻¹ | < 4,0 | | | 4,5 |
| Vanádio ³ | mg kg ⁻¹ | < 0,2 | | | 2,7 |
| Zinco ³ | mg kg ⁻¹ | 48,0 | | | |

¹Método Walkley-Black, conforme Tedesco et al. (1995);

²Digestão sulfúrica do resíduo e determinação conforme Tedesco et al. (1995);

³Método EPA 3050 e determinação em ICP-OES;

⁴n.d.: não detectado na análise.

2.3.2 Degradação do resíduo no solo

A quantificação da biodegradação do resíduo no solo foi realizada com o objetivo de subsidiar decisões acerca da possibilidade de utilização de uma área agrícola para realização da disposição final da serragem de filtração, semelhante ao que seria um sistema *landfarming*, já bastante utilizado para a destinação final de outros tipos de resíduos orgânicos.

O experimento foi conduzido de novembro de 2012 a março de 2013 em uma sala na temperatura ambiente de 33 ± 5 °C e a umidade do solo foi mantida a 60% da capacidade de campo, por meio da pesagem dos frascos.

Para os ensaios respirométricos foram utilizados frascos de vidro hermeticamente fechados com capacidade de 1 L, onde foram acondicionados 100 g de solo não compactado e com pH corrigido. Nos tratamentos que receberam a adição de nutrientes minerais, as doses foram calculadas de acordo com o Manual de Adubação e Calagem (CQFS-RS/SC, 2004) para o cultivo da canola (*Brassica napus* L. var oleífera), adicionando-se quantidades equivalentes a 28,57 mg kg⁻¹ de N; 42,85 mg kg⁻¹ de P e 17,85 mg kg⁻¹ de K para o Latossolo e 37,50 mg kg⁻¹ de N; 68,75 mg kg⁻¹ de P e 37,50 mg kg⁻¹ de K para o Argissolo na forma de solução aquosa de nitrato de amônio, fosfato de sódio e cloreto de potássio.

Para as doses de serragem de filtração aplicadas ao solo, verificou-se que, na grande maioria dos trabalhos sobre biodegradação de resíduos orgânicos no solo existentes na literatura, as melhores respostas foram encontradas com a aplicação de 2.000 mg kg⁻¹ de C. Portanto, para avaliar a atividade microbiana na biodegradação da serragem de filtração no Argissolo (A) e no Latossolo (L) foram utilizados os tratamentos: D1= 2 t ha⁻¹ (996,12 mg kg⁻¹ de C; D2= 4 t ha⁻¹ (1.998,07 mg kg⁻¹ de C); D3= 8 t ha⁻¹ (3.996,43 mg kg⁻¹ de C). Para avaliar a influência da aplicação de nutrientes sobre a biodegradação do resíduo em ambos os solos, optou-se em adicionar as doses de N, P e K recomendados para a cultura da canola, resultando nos tratamentos: D2+N; D2+P; D2+K; D2+NPK. Para comparação do comportamento da atividade microbiana após a adição dos

nutrientes em ambos os solos, com ou sem a serragem de filtração, foram utilizados também os tratamentos sem a serragem de filtração: N; P; K e NPK. Assim, o experimento constituiu-se um delineamento inteiramente casualizado, com 12 tratamentos com resíduo e/ou fertilizantes adicionados ao solo, dois tipos de solos (Argissolo e Latossolo) e três repetições.

Os frascos contendo os tratamentos foram equipados com aparato de captura de CO₂, composto por um copo de plástico de 50 mL, onde a cada avaliação era adicionado 20 mL de NaOH 1 mol L⁻¹, fechados hermeticamente e incubados a temperatura ambiente no laboratório. Semanalmente os frascos eram abertos e a solução de NaOH recebia 1 mL de BaCl₂ 1 mol L⁻¹, três gotas de fenolftaleína 1% e era titulada com solução de HCl 2 mol L⁻¹ padronizada com tris, conforme Tedesco et al. (1995). A produção de C-CO₂ foi quantificada através da fórmula de Stotzky (1965).

Para o cálculo da taxa de mineralização da serragem de filtração nos tratamentos, foi utilizada a fórmula: % C mineralizado = mg C mineralizado no tratamento – mg C mineralizado nas testemunhas (A ou L) / mg C adicionado x 100.

2.3.3 Disponibilidade de nutrientes e metais pesados no solo

Amostras de solos foram retiradas dos frascos respirométricos nos tempos 0 (dia da instalação do experimento), 30, 60 e 120 dias; e utilizadas para avaliações da disponibilidade de N (micro-Kjedahl), P (Mehlich-1) e K (Mehlich-1), conforme metodologia descrita por Tedesco et al. (1995).

Para a determinação dos metais pesados, as amostras de solo foram coletados no tempo 0, nos tratamentos controle (L e A); e no tempo 120 dias nos tratamentos que receberam a maior dose da serragem de filtração (L+D3 e A+D3). O método utilizado para as análises de metais foi a EPA 3050 e os metais foram determinados em ICP-OES.

2.3.4 Análise estatística

Para análise estatística, os resultados foram submetidos à análise de variância (ANOVA, $\alpha < 0,05$), quando detectado diferenças significativas, foi aplicado o teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade para a comparação das médias dos tratamentos, com auxílio do software SISVAR (FERREIRA, 1998). Através da análise de regressão, foram obtidas as equações para os ajustes das curvas e representação gráfica, utilizando o software SigmaPlot 11.0.

2.4 Resultados e discussão

2.4.1 Degradação do resíduo no solo

A caracterização da serragem de filtração (Tabela 1) indica que não foram ultrapassados os limites de metais pesados estabelecidos pela resolução do CONAMA Nº 23, de 12 de dezembro de 1996, assim este resíduo foi disposto no solo visando avaliar sua degradação. Na Tabela 2, observa-se que quanto maior a dose da serragem de filtração adicionada ao solo, maior foi a produção de C-CO₂, quantificada até os 120 dias, período em que o experimento foi encerrado, pois as curvas de produção de CO₂ indicavam que a degradação do resíduo havia sido reduzida significativamente, não havendo diferenças entre os tratamentos somente com o solo (L e A) e os demais (dados não apresentados) .

A serragem de filtração é rica em celulose (54,38%) e lignina (45,51%), o que pode ter estimulado a atividade microbiana (CAYUELA et al., 2009; CHEN et al., 2012), resultando na degradação de 40,79% do resíduo no Latossolo e 50,54% no Argissolo aos 120 dias, se considerada a média dos tratamentos D1, D2 e D3. A maior taxa de degradação observada no Argissolo foi no tratamento A+D1, o que provavelmente se deve a menor quantidade de fontes de carbono e energia para os microrganismos se comparado aos demais tratamentos deste solo.

Estes resultados indicam que mesmo sem a adição de fertilizantes minerais, este resíduo pode ter uma degradação relativamente alta nos solos estudados, considerando a sua constituição rica em celulose e lignina. Devido aos

teores elevados desses polímeros na serragem de filtração, esta pode ser considerada moderadamente degradável, sendo um dos critérios a serem considerados visando sua disposição no solo (CECCONELLO, 2005).

Tabela 2. Valores de C adicionado no solo na forma de resíduo da indústria de biodiesel (serragem de filtração), C-CO₂ produzido e porcentagem de mineralização do resíduo após 120 dias no solo. Onde L= Latossolo; A= Argissolo; D1= 2 t ha⁻¹ (996,12 mg kg⁻¹ de C); D2= 4 t ha⁻¹ (1.998,07 mg kg⁻¹ de C); D3= 8 t ha⁻¹ (3.996,43 mg kg⁻¹ de C); NPK= Nitrogênio, Fósforo e Potássio recomendados para a canola. Santa Maria, RS. 2014.

| Tratamentos | C adicionado mg Kg ⁻¹ de solo | C-CO ₂ produzido mg C-CO ₂ Kg ⁻¹ de solo | C mineralizado (%) |
|------------------|---|--|-----------------------|
| Latossolo | | | |
| L | 0 | 1.080,40 E | - |
| L+D1 | 996,12 | 1.490,55 D | 41,17 |
| L+D2 | 1.998,07 | 1.887,16 C | 40,37 |
| L+D3 | 3.996,43 | 2.712,60 A | 40,84 |
| L+D2+N | 1.998,07 | 1.876,57 C | 39,84 |
| L+D2+P | 1.998,07 | 1.890,74 C | 40,55 |
| L+D2+K | 1.998,07 | 2.224,89 B | 57,28 |
| L+D2+NPK | 1.998,07 | 1.936,49 C | 42,84 |
| L+N | 0 | 918,38 F | - |
| L+P | 0 | 1.444,56 D | - |
| L+K | 0 | 1.379,30 D | - |
| L+NPK | 0 | 1.111,05 E | - |
| Argissolo | | | |
| A | 0 | 1.024,20 E | - |
| A+D1 | 996,12 | 1.658,42 D | 63,66 |
| A+D2 | 1998,07 | 1.936,09 C | 45,63 |
| A+D3 | 3996,43 | 2.716,17 A | 42,33 |
| A+D2+N | 1998,07 | 1.765,54 D | 37,10 |
| A+D2+P | 1998,07 | 2.064,58 B | 56,02 |
| A+D2+K | 1998,07 | 1.845,39 C | 41,09 |
| A+D2+NPK | 1998,07 | 1.707,35 D | 34,19 |
| A+N | 0 | 687,26 F | - |
| A+P | 0 | 611,02 F | - |
| A+K | 0 | 445,40 G | - |
| A+NPK | 0 | 678,64 F | - |

*As médias seguidas de letras iguais na mesma coluna não diferem estatisticamente para o mesmo solo pelo teste Scott-Knott a 5% de probabilidade. Média de três repetições.

De maneira geral, a adição de nutrientes não elevou significativamente a degradação da serragem de filtração no solo. Provavelmente a concentração de nutrientes na serragem de filtração e naturalmente presente nos solos estudados são suficientes para fornecer adequada quantidade de nutrientes aos microrganismos degradadores, na maioria dos tratamentos.

A exceção disto é o fornecimento de K no Latossolo e P no Argissolo que aumentaram a degradação do resíduo (Tabela 2). No Latossolo, a adição de $17,85 \text{ mg kg}^{-1}$ de K no tratamento L+D2+K, resultou um aumento de 16,91% na degradação do resíduo. Neste solo, o teor natural de K foi de 80 mg dm^{-3} , considerado alto pelo Manual de Adubação e Calagem (CQFS-RS/SC, 2004), no entanto, pode não ter sido suficiente para suprir a demanda microbiana para a degradação do resíduo tendo em vista que a relação C:K do resíduo é alta (Tabela 1). Esse resultado corrobora com os encontrados por Chandra et al. (2002), que dispendo de doses crescentes de sais de K no solo, também verificaram aumentos da produção de C-CO₂ durante a degradação de efluente de destilaria no solo.

No caso do Argissolo o aumento da degradação do resíduo com adição de P foi de 10,39%. Nesse solo, o teor natural de P foi de $3,7 \text{ mg dm}^{-3}$, classificado como muito baixo segundo o Manual de Adubação e Calagem (CQFS-RS/SC, 2004) e o teor relativamente elevado de P total na serragem de filtração não foram suficientes para suprir a alta atividade microbiana durante a degradação dos resíduos. Isto em parte pode ser causado pelo P no resíduo estar predominantemente em forma orgânica, não prontamente disponível aos microrganismos do solo. Nessas condições, a aplicação de $68,75 \text{ mg kg}^{-1}$ de P, deve ter suprido a deficiência de P dos microrganismos, o que resultou em maior taxa de degradação do resíduo.

No Latossolo, no tratamento L+N e no Argissolo nos tratamentos A+D2+N e naqueles sem adição de resíduo (A+N; A+P; A+K e A+NPK) observou-se redução da atividade microbiana (Tabela 2). Esses resultados podem estar relacionados com a alta disponibilidade de nutrientes no solo em função da mineralização da matéria orgânica natural durante os procedimentos de preparo e incubação do solo, o que pode acarretar redução da produção de CO₂ do solo, conforme discutido no trabalho de JACQUES et al. (2010)

Confrontando-se os mesmos tratamentos no Latossolo e no Argissolo, observa-se que a produção de C-CO₂ foi maior no Latossolo para a maioria dos tratamentos, resultando em uma superioridade média de 10%, embora a porcentagem de degradação do resíduo tenha sido maior no Argissolo. Esse resultado pode estar relacionado com o maior teor de matéria orgânica natural no

Latossolo ($3,0 \text{ g kg}^{-1}$) quando comparado ao Argissolo ($1,4 \text{ g kg}^{-1}$) (Tabela 1), que contribui significativamente com o C-CO₂ produzido no solo.

Tais resultados indicam que é possível utilizar uma área agrícola para a disposição final da serragem de filtração do biodiesel, sem haver necessidade de adição de nutrientes minerais ou com adição em baixas doses de nutrientes, considerando os solos e as doses aqui avaliadas.

2.4.2 Disponibilidade de Nitrogênio, Fósforo e Potássio no solo

A adição da serragem da filtração sem adubos minerais não aumentou o teor de N amoniacal em ambos os solos. No Latossolo, os teores de N-NH₄⁺ no tratamento L+D2 não diferiram do tratamento L (controle), indicando que não houve mineralização nem imobilização do N (Figura 1A). No Argissolo verificou-se que somente a adição do resíduo causou redução dos teores de N amoniacal a valores menores do que no tratamento A (controle), provavelmente devido a imobilização microbiana. Nos tratamentos em que foram adicionados somente a serragem de filtração, sem o fornecimento de N, a fonte mais significativa desse nutriente pode ter provindo da matéria orgânica do solo, que mesmo após sua mineralização, não forneceu quantidades de N para evitar a imobilização microbiana do N, até os 60 dias de incubação (Figura 1B). Os maiores teores de N-NH₄⁺ foram observados sempre na primeira avaliação, nos tratamentos que receberam adubação mineral, com ou sem adição do resíduo. Após observou-se rápida redução nos teores de N amoniacal, que permanecem baixos até os 120 dias em ambos os solos (Figuras 2A e B).

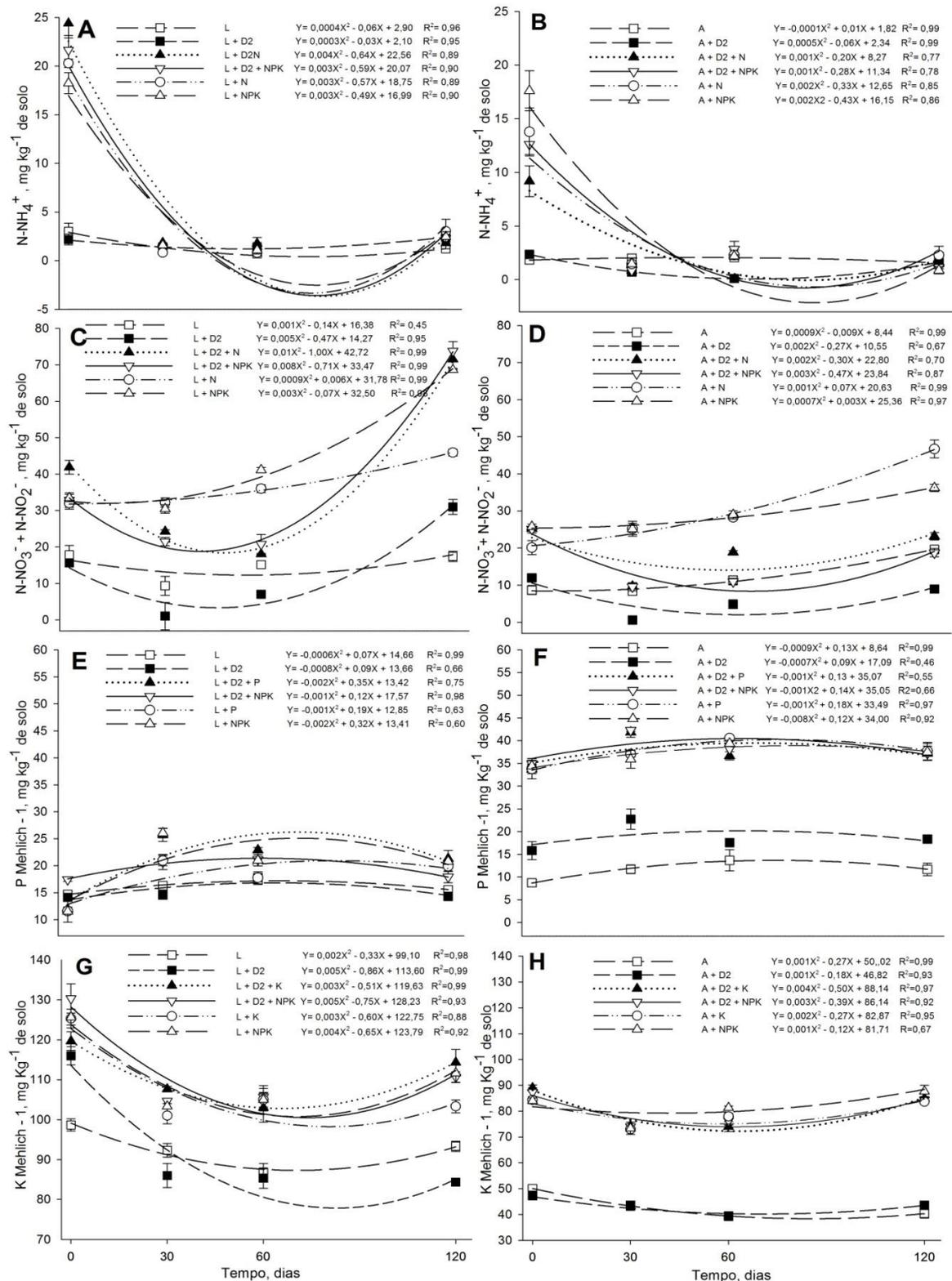


Figura 1. Disponibilidade de N, P e K durante os 120 dias de incubação do solo com doses de resíduo. Onde L= Latossolo; A= Argissolo; D2= 4 t ha⁻¹ de serragem de filtração; NPK= Dose recomendada para a canola. Média de três repetições. Barras representam o intervalo de confiança (5%). Santa Maria, RS. 2014.

Houve imobilização de N nítrico em todos os tratamentos com a disposição de serragem de filtração tanto no Latossolo (L+D2+N e L+D2+NPK) quanto no Argissolo (A+D2+N e A+D2+NPK) (Figuras 1C e D). No tratamento L+D2+NPK, houve a imobilização de até 54% do N nítrico aos 60 dias de incubação, quando comparado ao tratamento mineral L+NPK. Nessa avaliação, o tratamento L+D2+NPK disponibilizou 20,77 mg kg⁻¹ de N ao solo, ao passo que o tratamento L+NPK disponibilizou de 41,14 mg kg⁻¹ de N. O mesmo ocorreu no tratamento L+D2, onde houve imobilização do N se comparado ao tratamento L (controle) até os 60 dias (Figura 1C).

No Argissolo a imobilização microbiana de N pode ser observada durante os 120 dias de incubação (Figura 1D). Aos 60 dias, no tratamento A+D2+NPK, apenas 10,94 mg kg⁻¹ de N estava disponível no solo, porém no tratamento A+NPK havia 28,94 mg kg⁻¹ de N disponível. Por esses resultados percebe-se que com a aplicação da serragem de filtração, cerca de 35% do N mineral pode ter permanecido imobilizado à biomassa microbiana. Nesse solo, o tratamento A+D2 proporcionou imobilização do N nítrico dos 30 até os 120 dias de incubação, cujos valores foram menores que no tratamento A (controle).

A imobilização microbiana do N disponível pode estar relacionada a alta relação C:N da serragem de filtração (Tabela 1). Tahovska et al. (2013), utilizando ¹⁵N em solo com grande disponibilidade de carbono, encontraram imobilização de 38 a 45% do N aplicado em um período de 48 h. Com esse resultado é possível perceber que havendo C disponível no solo, a população microbiana pode atuar como dreno de N nítrico, tornando-o temporariamente indisponível no solo. Por outro lado, a disposição da serragem de filtração no solo pode contribuir para a redução de perdas de N por lixiviação ou desnitrificação, além do armazenamento e liberação gradual desse nutriente durante o ciclo das culturas ou para culturas sucessoras (VARGAS et al., 2005; CABEZAS; COUTO, 2007).

Dos 60 aos 120 dias no Latossolo, pode ter ocorrido a remineralização do N pela morte de parte da população microbiana, pois observou-se aumento no teor de N nítrico nos tratamentos L+D2+NPK (42,84%) e L+D2+N (39,84%) (Figura 2C). Aos 120 dias de incubação os tratamentos L+D2+NPK e L+D2+N não diferiram do tratamento mineral L+NPK, disponibilizando em média 73,71 mg kg⁻¹ de N no solo. Algo semelhante a isso pode ter ocorrido no L+D2, pois

aos 120 dias, com 40,37% do resíduo degradado, parte do N nítrico imobilizado pode ter retornado ao solo pela mineralização da biomassa microbiana morta.

A remineralização não ocorreu significativamente no Argissolo, pois os tratamentos com maior disponibilidade de N nítrico foram o A+N e A+NPK, com aproximadamente $20,34 \text{ mg kg}^{-1}$ de N aos 120 dias (Figura 2D). Ao final do experimento, os tratamentos com resíduo obtiveram baixas taxas de degradação A+D2+N (37,10%) e A+D2+NPK (34,19%), desta forma, apresentaram valores de N nítrico muito próximos ao tratamento controle A ($19,16 \text{ mg kg}^{-1}$ de N), inferindo que os microrganismos continuavam a degradar o resíduo e a imobilizar o N.

Essa diferença na remineralização entre os solos deve-se a maior degradação do resíduo no Latossolo. Por exemplo, no tratamento L+D2+NPK a taxa de degradação do C adicionado no solo aos 120 dias foi de 42,84% enquanto no Argissolo, no tratamento A+D2+NPK a taxa de degradação foi de 34,19% (Tabela 2).

Devido ao alto teor de P total do resíduo (Tabela 1), este foi suficiente para suprir a demanda da biomassa microbiana, não sendo observado nem imobilização nem mineralização líquida do P no Latossolo. Por consequência, todos os tratamentos com adição de P na forma mineral aumentaram a disponibilidade deste nutriente no solo. Aos 30 dias, o tratamento L+D2+P disponibilizou ao solo $25,73 \text{ mg kg}^{-1}$ de P (Figura 1E).

No Argissolo, a adição da serragem de filtração aumentou a disponibilidade de P no solo, pois o tratamento A+D2 apresentou durante os 120 dias uma concentração de P no solo, em média, 10% maior que no tratamento A (Figura 1F). Da mesma forma que o observado para o Latossolo, a adição de P mineral ao solo resultou em aumento da disponibilidade deste nutriente, não havendo diferenças entre os tratamentos na maioria das datas avaliadas. Comparando os dois solos, a disponibilidade de P foi maior no Argissolo do que no Latossolo. O que provavelmente se deve a maior capacidade de adsorção específica de íons fosfato aos óxidos da fração argila dos Latossolos (CESSA et al., 2011).

A disponibilidade de K no Latossolo foi maior na primeira avaliação (tempo 0) em todos os tratamentos, seguido de uma redução nos teores em todos os tratamentos aos 30 dias de incubação, à exceção do tratamento controle (Figura

2G). No tratamento L+D2 houve rápida e intensa redução do K disponível no solo aos 30 dias de incubação, os quais permaneceram menores que o tratamento L (controle) até o final do experimento (Figura 1G), o que indica que houve imobilização de K, fato também comprovado pela atividade dos microrganismos do solo, onde a adição de K resultou em aumento significativo da produção de C-CO₂ do tratamento L+D2+K se comparado ao tratamento L+D2 (Tabela 1). Os resultados desse estudo mostram que é indispensável a complementação com K no Latossolo, para aumentar a taxa de degradação do resíduo no solo.

Cabe ressaltar no entanto, que a imobilização do K no Latossolo foi também observada nos tratamentos que não receberam a adição da serragem de filtração, principalmente no intervalo entre 30 e 60 dias (Figura 1G). Isto indica que a imobilização do K se deveu também em parte a degradação da matéria orgânica natural do solo.

No Argissolo a disposição da serragem de filtração na dose estudada não influenciou significativamente a disponibilidade de K no solo (Figura 1H), pois os teores deste nutriente nos tratamentos A e A+D2 permaneceram muito próximos durante todo o experimento, assim como ocorreu para os tratamentos em que foram adicionados o K na forma mineral.

Neste ensaio ficou evidente as diferenças na dinâmica dos nutrientes P e K, nos dois solos com a adição do resíduo da indústria de biodiesel (Figura 1). No Argissolo, devido ao menor teor natural de P e matéria orgânica (Tabela 1), a adição de serragem de filtração contribuiu para o aumento do teor de P no solo, porém este aumento não foi suficiente para suprir as demandas deste nutriente pela microbiota do solo durante a degradação do resíduo. Devido a isso, a disposição de serragem de filtração na dose de 4 t ha⁻¹ no Argissolo, pode ser realizada preferencialmente juntamente com a adubação com P e K, visando o aumento da biodegradação deste resíduo.

Por outro lado, devido ao maior teor natural de matéria orgânica e a disposição da serragem de filtração no Latossolo, os microrganismos degradadores atuaram imobilizando o K do solo. Assim, a disposição de serragem de filtração na dose de 4 t ha⁻¹ no Latossolo, deve ser realizada preferencialmente juntamente com a adubação potássica.

2.4.3 Metais pesados

Em ambos os solos, não houveram aumentos significativos nos teores de metais pesados com a disposição da serragem de filtração na maior dose avaliada (8 t ha^{-1}) (Tabela 3). Os teores de metais pesados encontrados em ambos os solos permaneceram abaixo do limite estabelecido pela legislação, baseada na Resolução do CONAMA Nº 420, que dispõe sobre critérios e valores orientadores de qualidade do solo quanto à presença de substâncias químicas.

Além de não comprometer a qualidade dos solos, a disposição da serragem de filtração reduziu principalmente os teores de Cromo e Níquel em ambos os solo, embora essa resposta seja mais percebida no Argissolo (Tabela 3).

Os resultados obtidos nesse estudo indicam que a adição no solo da serragem de filtração da indústria de biodiesel de forma tecnicamente orientada, pode ser uma forma de disposição economicamente viável e ambientalmente correta desse resíduo.

Tabela 3. Metais pesados no solo (mg kg^{-1}) aos 120 dias após a aplicação de 8 t ha^{-1} de serragem de filtração (D3). O limite da legislação está baseado nos Valores Orientadores de Investigação para áreas agrícolas (APMax), da Resolução do CONAMA N° 420. Santa Maria, RS. 2014.

| Metal Pesado | Doses de serragem de filtração | | Diferença entre doses % | Legislação mg kg^{-1} |
|------------------|--------------------------------|----------------------|----------------------------|-----------------------------------|
| | 0 | 8 t ha^{-1} | | |
| Latossolo | | | | |
| Arsênio | < 2 | < 2 | 0 | 35 |
| Bário | 124 | 124 | 0 | 300 |
| Cádmio | < 0,2 | < 0,2 | 0 | 3 |
| Chumbo | 15 | 17 | 13,3 | 180 |
| Cobre | 122 | 122 | 0 | 200 |
| Cromo | 51 | 44 | -13,7 | 150 |
| Mercúrio | 0,01 | 0,01 | 0 | 12 |
| Molibdênio | < 0,2 | < 0,2 | 0 | 50 |
| Níquel | 32 | 27 | -15,6 | 70 |
| Prata | < 0,01 | < 0,01 | 0 | 25 |
| Selênio | < 4 | < 4 | 0 | 5 ¹ |
| Vanádio | 359 | 374 | 4,1 | 1.000 ² |
| Zinco | 114 | 111 | -2,6 | 450 |
| Argissolo | | | | |
| Arsênio | < 2 | < 2 | 0 | 35 |
| Bário | 141 | 148 | 4,9 | 300 |
| Cádmio | < 0,2 | < 0,2 | 0 | 3 |
| Chumbo | 8 | 6 | -25,0 | 180 |
| Cobre | 6 | 6 | 0 | 200 |
| Cromo | 34 | 16 | -52,9 | 150 |
| Mercúrio | 0,01 | 0,01 | 0 | 12 |
| Molibdênio | < 0,2 | < 0,2 | 0 | 50 |
| Níquel | 19 | 8 | -57,8 | 70 |
| Prata | < 0,01 | < 0,01 | 0 | 25 |
| Selênio | < 4 | < 4 | 0 | 5 ¹ |
| Vanádio | 24 | 23 | -4,1 | 1.000 ² |
| Zinco | 18 | 19 | 5,5 | 450 |

¹ Valor de prevenção, pois não há informação sobre valores de intervenção.

² Valor para áreas industriais, pois não há informação para área agrícola.

2.5 Conclusões

A serragem de filtração apresenta moderada biodegradação no solo;

A atividade microbiana de biodegradação da serragem de filtração no solo é limitada pelo nutriente potássio no Latossolo e pelo nutriente fósforo no Argissolo, nas doses do resíduo avaliadas;

A adição no solo deste resíduo da indústria de biodiesel, nas doses avaliadas, causa redução da disponibilidade de N nos dois solos avaliados e de K no Latossolo;

A disposição no solo da serragem de filtração de biodiesel na maior dose avaliada, não alterou significativamente os teores de metais pesados em ambos os solos;

A disposição da serragem de filtração nos solos estudados é uma alternativa viável, porém deve ser realizados estudos prévios visando recomendar doses complementares de N, P e K, a fim de evitar a redução na disponibilidade dos nutrientes.

2.6 Referências Bibliográficas

ABIOVE - Biodiesel: entrega e produção. (2012). Disponível em: <<http://www.abiove.org.br/site/index.php?page=estatistica&area=NC0yLTE=>>>. Acesso em 14 de abril de 2013.

ANP - Agência Nacional Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (2010). Disponível em: < [http:// www.anp.gov.br](http://www.anp.gov.br) />. Acesso em 15 de abril de 2013.

CABEZAS, W. A. R. L.; COUTO, P. A. Imobilização de nitrogênio da uréia e do sulfato de amônio aplicado em pré-semeadura ou cobertura na cultura do milho, no sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.31, n.2, p.739-752, may./apr.2007.

CAYUELA, M. L.; SINICCO, T.; MONDINI, C. Mineralization dynamics and biochemical properties during initial decomposition of plant and animal residues in soil. **Applied Soil Ecology**, Oxford, v.41, n.1,p.118-127, jan.2009.

CECCONELLO, C. M. **Pós-Tratamento de Lixiviado de Aterro de Resíduos Sólidos Urbanos Utilizando Leitões Cultivados**. 2005. 148f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Faculdade de Engenharia e Arquitetura, Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo, 2005.

CESSA, R. M. A. et al. Absorção de fósforo e crescimento do sorgo em função da aplicação de silício e fósforo em Latossolo Vermelho distroférrico. **Revista de Ciências Agrárias**, Lisboa, v.34, n.1,p.135-142, jan./jun. 2011.

CHANDRA, S.et al. Effect of potassium salts and distillery effluent on carbon mineralization in soil. **Bioresouce Technology**, New York, v.83, n.3, p.255-257, jul.2002.

CHEN, R. et al. Decomposition of biogas residues in soil and their effects on microbial growth kinetics and enzyme activities. **Biomass and bioenergy**, Amsterdam, v.33, n.1, p.221-229, oct.2012.

CQFS – RS/SC. Comissão de Química e Fertilidade do Solo. **Manual de adubação e calagem para os Estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina**. 10 ed. Porto Alegre: Núcleo Regional Sul, 2004. 400p.

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Manual de métodos de análises de solos**. Brasília: EMBRAPA: Centro Nacional de Pesquisas em Solos. 1997. 212p.

FERREIRA, D.F. **Programa Sisvar.exe: sistema de análise de variância**. Lavras: Ufla, 1998.

JACQUES, R. J. S. et al. Biorremediação de um solo contaminado com antraceno sob diferentes condições físicas e químicas. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.40, n.2, p.280-287, feb.2010.

JIN, V. L. et al. Potential carbon and nitrogen mineralization in soils from a perennial forage production system amended with class B biosolids. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, Amsterdam, v.141, n.3-4, p.461-465, may. 2011.

MME - Ministério de Minas e Energia. 2010. **Estratégias do País para Biocombustíveis**. Disponível em: http://www.celab.org.br/workshop3/Palestra01_MME_Biocombustiveis_Dornelles_Evento_III_Workshop_CELAB.pdf. Acesso em 18 de janeiro de 2014.

RAMALHO, J.F.G.P.; AMARAL SOBRINHO, N.M.B. Metais pesados em solo cultivado com cana de açúcar pelo uso de resíduos agroindustriais. **Floresta e Ambiente**, Rio de Janeiro, v.8, n.1, p. 120-129, out./dez. 2001.

SEGATTO, M. P. et al. Decomposição de resíduos industriais no solo. **Ciência e Natura**, Santa Maria, v.34, n.1, p.49-62, mar.2012.

STOTZKY, G. Microbial respiration. In: BLACK, C. A., (Ed) **Methods of soil analysis Part 2: Chemical and microbiological properties**. Madison: ASA, 1965, 1551-1572.

TAHOVSKÁ, K. et al. Microbial N immobilization is of great importance in acidified mountain spruce forest soils. **Soil Biology & Biochemistry**, London, v.59, n.1, p.58-71, apr. 2013.

TEDESCO, M. J. et al. **Análises de solo, plantas e outros materiais**. 2 ed. Porto Alegre, UFRGS, 1995. 174p.

VARGAS, L. K.; SELBACH, P. A.; SÁ, E.L. S. Imobilização do nitrogênio em solo cultivado com milho em sucessão à aveia preta nos sistemas plantio direto e convencional. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.35, n.1, p.76-83, jan./feb.2005.

ZORNOZA, R. et al. Carbon mineralization, microbial activity and metal dynamics in tailing ponds amended with pig slurry and marble waste. **Chemosphere**, New York, v.90, n.10, p.2606-2613, mar.2013.

3 ARTIGO II - POTENCIAL FERTILIZANTE IMEDIATO E RESIDUAL DO COMPOSTO ORGÂNICO PRODUZIDO A PARTIR DE RESÍDUO DA INDÚSTRIA DE BIODIESEL

3.1 Resumo

A conversão de resíduos orgânicos gerados pelas indústrias produtoras de biodiesel em compostos orgânicos de uso agrícola elimina o passivo ambiental e possibilita o retorno dos nutrientes para o solo. O objetivo do trabalho foi realizar a compostagem de um resíduo da indústria de biodiesel, denominado serragem de filtração, e conhecer o potencial fertilizante imediato e residual do composto orgânico na cultura da canola (*Brassica napus* L. var oleífera), em dois tipos de solos. O composto orgânico foi produzido a partir da mistura de serragem de filtração com esterco bovino. Foram utilizados um Argissolo Vermelho distrófico e um Latossolo Vermelho distroférico para avaliar a disponibilidade de N-NH_4^+ , $\text{N-NO}_3^- + \text{NO}_2^-$, P e K no solo e o crescimento da canola nas doses de composto orgânico de 0; 0,6; 1,2; 2,4 e 4,8 t ha⁻¹, com ou sem complementação com N, em vasos em casa de vegetação. Com a massa seca da parte aérea e raiz, e os teores de N, P e K acumulados nos tecidos da canola, foi avaliado o potencial fertilizante imediato do composto orgânico no Argissolo, bem como o seu potencial residual no Argissolo e no Latossolo. É possível realizar compostagem a partir do resíduo da indústria de biodiesel denominado serragem de filtração, desde que misturado ao esterco bovino. O composto orgânico produzido apresenta características que permitem seu uso agrícola de acordo com a legislação brasileira e sua adição ao solo aumenta a disponibilidade de nitrogênio, fósforo e potássio. O composto orgânico pode substituir total ou parcialmente a adubação mineral da canola, podendo ser aplicado ao solo no momento da semeadura ou seis meses antes.

Palavras chave: Serragem de filtração, compostagem, adubação orgânica, disponibilidade de nutrientes, canola.

3.2 Introdução

O biodiesel é um combustível proveniente de fontes renováveis, capaz de reduzir significativamente a emissão de gases de efeito estufa (XUE, 2013; GUARIEIRO et al., 2014), liberar na atmosfera menor número de partículas após a combustão (KOOTER et al., 2011; XUE, 2013), sem comprometer a eficiência dos motores (XUE, 2013). Estes, entre outros motivos, conduziram o governo brasileiro a instituir o Plano Nacional de Produção e Uso do Biodiesel (PNPB) no ano de 2004, que tornou obrigatória a mistura de 2% de biodiesel no diesel de petróleo (B2) a partir do ano de 2008 e de 5% (B5) a partir do ano de 2010. Segundo o Ministério de Minas e Energia (2012) até o ano de 2020, está prevista a adição de 10% (B10) de biodiesel no diesel de petróleo consumido no Brasil. Em outros países também há crescente uso dos biocombustíveis (USDE, 2013), pois estes podem substituir em até 100% os combustíveis de origem fóssil (AN et al., 2012)

No entanto, como todo o processo industrial, a fabricação do biodiesel também gera resíduos, que quando dispostos de maneira inadequada, possuem potencial de contaminação ambiental. Dentre os resíduos gerados destaca-se o material utilizado na filtragem do óleo vegetal bruto, também denominado de serragem de filtração, que possui tempo de uso limitado na indústria e é frequentemente substituído, gerando grandes quantidades de resíduos. De acordo com os dados fornecidos por uma indústria de produção de biodiesel do Rio Grande do Sul, para cada metro cúbico de biodiesel produzido, são gerados 0,97 kg de serragem de filtração (dados não publicados). Conforme o Ministério de Minas e Energia (MME, 2010), a produção nacional de biodiesel tende a crescer, sendo que para o ano de 2020, existe a projeção de serem produzidos aproximadamente quatro bilhões de metros cúbicos de biodiesel. Com essa produção, pode ser gerado aproximadamente 3,8 bilhões de kg de serragem de filtração, que é um resíduo orgânico, com alto teor de celulose (54,38%) e lignina (45,51%), e foi classificado como Classe II A – não inerte, passível de tratamento e reaproveitamento, segundo a NBR 10004, que pode ser tratada pela compostagem e inserida no sistema produtivo na forma de composto orgânico (SILVA; ANDREOLI, 2010).

Uma cultura agrícola com grande potencial bioenergético, mas com limitações de crescimento em solos com baixos teores de N, P, K e S é a canola (*Brassica napus* L. var oleífera), que é a terceira oleaginosa mais cultivada no mundo (ARZANI et al., 2013). Somente nos últimos anos sua produção tem sido direcionada à obtenção de biodiesel no Brasil, pois até então a extração do óleo permanecia restrita ao setor alimentício (BERGMANN et al., 2013). Seus grãos possuem um teor médio de 38% de óleo, enquanto a semente de soja apresenta um teor médio de 18% de óleo (EMBRAPA, 2010). Além disto, esta planta tem se constituído em uma alternativa muito interessante aos agricultores da região sul do Brasil, pois é cultivada no período de inverno, não competindo por área com as culturas de maior importância econômica, como o milho e a soja, além de se apresentar com uma excelente alternativa para a rotação de culturas (TOMM, 2004), tendo em vista que a grande maioria das lavouras de inverno do sul do Brasil é cultivada com gramíneas como aveia e trigo (CONAB, 2012).

A canola tem apresentado boa resposta a adubação orgânica, conforme demonstra Avramidou et al. (2013), que observaram maior crescimento da parte aérea e área foliar quando esta planta foi adubada com 50% de composto orgânico produzido a partir de resíduos sólidos urbanos e 50% com fertilizante mineral. Da mesma forma, Mohammadi e Rokhzadi (2012) também encontraram resultados positivos com aplicação de composto orgânico no cultivo da canola, como maior absorção de N pelas plantas e maior rendimento de óleo nos grãos.

Vários autores têm justificado os bons resultados obtidos com a adubação orgânica ao fato da disponibilização de nutrientes ocorrer de forma mais lenta, de acordo com a demanda da cultura, o que também resulta em efeito residual no solo às culturas subseqüentes. Santos et al. (2001) observou que o composto orgânico produzido a partir de resíduos agrícolas, propiciou efeito residual sobre a produção de alface, cultivadas de 80 a 110 dias após a aplicação da adubação, aumentando gradativamente os teores de bases, fósforo e a CTC no solo.

Diante do exposto, é possível que os resíduos gerados pela indústria do biodiesel possam ser tratados através da compostagem e utilizados para a fertilização de plantas com potencial bioenergético, possibilitando o retorno dos nutrientes para a lavoura, o aumento da produtividade das culturas e o descarte ambientalmente correto dos resíduos da indústria de biodiesel. Assim, o objetivo

do trabalho foi avaliar a realização da compostagem com o resíduo da indústria de biodiesel denominado serragem de filtração e conhecer o potencial fertilizante imediato e residual do composto orgânico produzido na cultura da canola, cultivada em dois tipos de solos.

3.3 Material e Métodos

3.3.1 Coleta e caracterização do solo e resíduos

Dois solos muito representativos das áreas utilizadas para as culturas de sequeiro no Rio Grande do Sul e no Brasil foram coletados na camada de 0-20 cm, em áreas sem histórico de adubação ou adição de qualquer tipo de resíduo. Um Argissolo Vermelho distrófico (solo A) foi coletado em Santa Maria – RS (29° 43' 35" S e 53° 44' 59" W) e um Latossolo Vermelho distroférico (solo L) foi coletado em Ibirubá – RS (28° 33' 37" S e 53° 1' 20" W). Ambos foram secos a temperatura ambiente e peneirados em malha de 4 mm. Para elevar o pH dos solos próximo a 6,0, foi utilizado doses de hidróxido de cálcio e óxido de magnésio na proporção molar de Ca e Mg de 3:1 e o solo foi incubado com umidade de 60% da capacidade de campo por 60 dias. Após esse período, uma amostra homogênea foi coletada para determinação de alguns parâmetros químicos conforme Tedesco et al. (1995), e físicos pelo método da pipeta (EMBRAPA, 1997) (Tabela 1).

O resíduo da indústria do biodiesel, denominado serragem de filtração do óleo vegetal bruto (SF), foi obtido de uma indústria que utiliza sementes de soja como matéria prima. Para a compostagem, foi coletado esterco bovino (EB) no Departamento de Zootecnia da UFSM. Três amostras de cada resíduo foram secas em estufa de ar forçado à 60°C até peso constante, homogeneizadas e analisados (Tabela 1).

Tabela 1 – Caracterização do Latossolo (L) e do Argissolo (A), após correção do pH, utilizados para o cultivo da canola; e dos resíduos serragem de filtração (SF) e esterco bovino (EB), utilizados para a produção do composto orgânico. Santa Maria, RS. 2014.

| Parâmetro | Unidade | Latossolo | Argissolo |
|--|------------------------------------|-----------|-----------|
| Argila | g kg ⁻¹ | 542,0 | 210,0 |
| Silte | g kg ⁻¹ | 254,0 | 320,0 |
| Areia | g kg ⁻¹ | 204,0 | 470,0 |
| pH _(H₂O) | - | 5,9 | 5,8 |
| Matéria Orgânica ¹ | g kg ⁻¹ | 1,4 | 3,0 |
| H + Al | mg dm ⁻³ | 3,5 | 3,9 |
| Alumínio _{O_{trocável}} | mg dm ⁻³ | 0,1 | 0,0 |
| Saturação Bases | % | 63,2 | 65,7 |
| CTC efetiva | mg dm ⁻³ | 6,1 | 7,5 |
| Cálcio _{trocável} | cmol _c dm ⁻³ | 4,2 | 4,6 |
| Magnésio _{trocável} | cmol _c dm ⁻³ | 1,6 | 2,7 |
| Fósforo _{Mehlich-1} | mg dm ⁻³ | 6,8 | 10,1 |
| Potássio _{Mehlich-1} | mg dm ⁻³ | 56,0 | 88,0 |
| Cobre _{Mehlich-1} | mg dm ⁻³ | 5,1 | 4,5 |
| Zinco _{Mehlich-1} | mg dm ⁻³ | 11,7 | 2,7 |

| Parâmetro | Unidade | Serragem de Filtração | Esterco Bovino | Composto Orgânico |
|--------------------------------|---------------------|-----------------------|-------------------|-------------------|
| Umidade | % | 0,9 | 18,0 | 19,0 |
| pH _(H₂O) | - | 4,9 | 6,1 | 6,2 |
| Relação C:N | - | 461:1 | 11:1 | 21:1 |
| Relação C:P | - | 11:1 | 5:1 | 2:1 |
| Relação C:K | - | 400:1 | 12:1 | 4:1 |
| Carbono Total ² | g kg ⁻¹ | 600 | 153 | 62 |
| Nitrogênio Total ² | g kg ⁻¹ | 1,3 | 13,2 | 2,9 |
| Fósforo Total ² | g kg ⁻¹ | 53,9 | 31,7 | 47,7 |
| Potássio Total ² | g kg ⁻¹ | 1,5 | 12,6 | 14,1 |
| Cálcio Total ² | g kg ⁻¹ | 0,3 | 2,0 | 2,1 |
| Magnésio Total ² | g kg ⁻¹ | 1,0 | 1,4 | 1,5 |
| Arsênio ³ | mg kg ⁻¹ | < 2,0 | n.a. ⁵ | < 2,0 |
| Bário ³ | mg kg ⁻¹ | 20,0 | n.a. | 145,0 |
| Cádmio ³ | mg kg ⁻¹ | < 0,2 | n.a. | < 0,2 |
| Chumbo ³ | mg kg ⁻¹ | < 2,0 | n.a. | 4,0 |
| Cobre ³ | mg kg ⁻¹ | < 0,6 | n.a. | 16,0 |
| Cromo ³ | mg kg ⁻¹ | 2,0 | n.a. | 33,0 |
| Mercúrio ³ | mg kg ⁻¹ | n.d. ⁴ | n.a. | 0,1 |
| Níquel ³ | mg kg ⁻¹ | 1,0 | n.a. | n.a. |
| Prata ³ | mg kg ⁻¹ | n.d. | n.a. | 0,1 |
| Selênio ³ | mg kg ⁻¹ | < 4,0 | n.a. | < 4,0 |
| Vanádio ³ | mg kg ⁻¹ | < 0,2 | n.a. | n.a. |
| Zinco ³ | mg kg ⁻¹ | 48,0 | n.a. | n.a. |

¹ Método Walkley-Black, descrito em Tedesco et al. (1995);

² Digestão sulfúrica e determinação conforme Tedesco et al. (1995);

³ Método EPA 3050 e determinação em ICP-OES;

⁴ n.d.: não detectado na análise;

⁵ n.a.: não avaliado.

3.3.2 Compostagem

Foi realizada durante nove semanas em uma usina de compostagem automatizada do Departamento de Solos da UFSM, que encontra-se em ambiente protegido e é composta de leiras de alvenaria, com dimensões de 1,5 m de comprimento, 1 m de largura e 1,2 m de altura. Sob as leiras há uma tubulação de PVC para aeração forçada automatizada, com motor de 30 cv.

Foi montada uma leira alternando camadas de esterco bovino (40 kg peso úmido) e serragem de filtração (5 kg peso úmido), a fim de que a relação C:N final da leira fosse de aproximadamente 30:1. A temperatura foi monitorada diariamente utilizando um termômetro de mercúrio que era inserido no interior da leira e sempre que atingia 65 °C, o sistema de aeração automatizado era ativado. A umidade foi monitorada e sempre que necessário era adicionado água. Com o auxílio de uma pá, nos primeiros 30 dias de compostagem, foi realizado um revolvimento semanal das leiras, para homogeneização do material.

3.3.3 Disponibilidade de nutrientes no solo

O experimento foi conduzido na casa de vegetação, de fevereiro à agosto de 2013, totalizando 180 dias. Para cada solo, estabeleceu-se um experimento em delineamento inteiramente casualizado, com 6 tratamentos x 7 datas de coletas e 4 repetições, totalizando 336 amostras. Em vasos sem plantas com capacidade de 5 kg, foram acondicionados 4 kg de solo, peneirado e com o pH corrigido. O composto orgânico foi seco em estufa de aeração forçada até peso constante e a dose a ser aplicada nos vasos foi determinada à partir do seu teor de P total, visando a adubação da canola, recomendada pelo Manual de Adubação e Calagem (CQFS-RS/SC, 2004), que foi de 60 kg ha⁻¹ (42,85 mg kg⁻¹ de P) para o Latossolo e 110 kg ha⁻¹ (78,57 mg kg⁻¹ de P) para o Argissolo. Foram adicionadas doses crescentes de composto orgânico em ambos os solos, sendo que os tratamentos foram: Controle (Latosolo, L ou Argissolo, A); NPK (adubação mineral com 100% da recomendação para a canola); DOSE 0,5 (0,45

g kg⁻¹ de composto, possui 20,03 mg kg⁻¹ de P e fornece 30 kg ha⁻¹ de P); DOSE 1 (0,90 g kg⁻¹ de composto, possui 40,06 mg kg⁻¹ de P e fornece 60 kg ha⁻¹ de P); DOSE 2 (1,82 g kg⁻¹ de composto, possui 81,77 mg kg⁻¹ de P e fornece 120 kg ha⁻¹ de P) e DOSE 3 (3,62 g kg⁻¹ de composto, possui 163,13 mg kg⁻¹ de P e fornece 240 kg ha⁻¹ de P).

Todos os fertilizantes foram aplicados na superfície e homogeneizados até 5 cm de profundidade no solo. No tratamento mineral foi aplicada uma solução aquosa de nitrato de amônio, de fosfato de sódio e de cloreto de potássio, nas doses de N, P e K recomendadas para a canola (CQFS-RS/SC, 2004).

A temperatura no interior da casa de vegetação foi monitorada diariamente. Nos meses de fevereiro à maio a temperatura permaneceu em 30±5 °C e nos meses de junho a agosto em 18±5 °C. A umidade do solo foi mantida a 70% da capacidade de campo durante todo o experimento, por meio de pesagens dos vasos.

As amostras de solo de cada vaso foram coletadas nos tempos 0 (dia da instalação do experimento), 15, 30, 60, 90, 120 e 180 dias com auxílio de um trado de PVC, com dimensões de 25 cm de altura e 4 cm de diâmetro. Para isso, de cada vaso foram retiradas 4 sub amostras de locais distintos e a 15 cm de profundidade, colocadas em um recipiente, homogeneizado e, então, uma amostra era tomada para a determinação de N (micro-Kjeldahl), P (Mehlich-1) e K (Mehlich-1), conforme Tedesco et al. (1995).

3.3.4 Cultivo da canola

O experimento foi conduzido na casa de vegetação de junho à agosto de 2013, durante 90 dias. Em vasos com capacidade de 5 kg, foram acondicionados 4 kg de solo, peneirado e com o pH corrigido à 6,0. Para esse experimento, foi testado o potencial fertilizante imediato do composto orgânico aplicado ao Argissolo no momento da semeadura (denominado de Argissolo Imediato), bem como o poder residual do composto no fornecimento de nutrientes para a canola, quando a aplicação foi realizada no Latossolo e no Argissolo seis meses antes da semeadura (denominado de Latossolo Residual e Argissolo Residual).

Como na serragem de filtração há alta quantidade de lignina e celulose, poderia ocorrer imobilização do N após a adição do composto no solo. Desta forma optou-se por fazer a complementação com N em alguns tratamentos. Os tratamentos utilizados nos três solos (Argissolo Imediato e Residual e Latossolo Residual) foram: Controle (sem aplicação de nenhum tipo de adubo); NPK (adubação mineral com 100% da recomendação para a canola); Dose 0,5 (0,45 g kg⁻¹ de composto); Dose 0,5 + N; Dose 1 (0,90 g kg⁻¹ de composto); Dose 1 + N; Dose 2 (1,82 g kg⁻¹ de composto); Dose 2 + N; Dose 3 (3,62 g kg⁻¹ de composto) e Dose 3 + N.

A complementação com N mineral foi realizada calculando-se a quantidade de N recomendada para a cultura da canola pelo Manual de Adubação e Calagem (CQFS-RS/SC, 2004), subtraindo-se a quantidade adicionada ao solo pelo composto orgânico. Desta maneira as quantidades de N mineral adicionadas foram: para o Argissolo Imediato e Argissolo Residual na Dose 0,5: 37,5 mg kg⁻¹ de N; na Dose 1: 37,5 mg kg⁻¹ de N; na Dose 2: 25 mg kg⁻¹ de N e na Dose 3: 25 mg kg⁻¹ de N. Para o Latossolo Residual na Dose 0,5 foi adicionado 28,57 mg kg⁻¹ de N; na Dose 1: 28,57 mg kg⁻¹ de N; na Dose 2: 28,57 mg kg⁻¹ de N e na Dose 3: 28,57 mg kg⁻¹ de N. Para isso utilizou-se uma solução de NH₄NO₃ e forneceu-se 30% de N no momento da semeadura e o restante em cobertura, aos 45 dias após a emergência das plantas, conforme o Manual de Adubação e Calagem (CQFS-RS/SC, 2004).

A cultivar de canola utilizada no experimento foi a Hyola 43, que por ser resistente a doença da canela-preta é uma variedade híbrida muito cultivada no Rio Grande do Sul. Foram semeadas cinco sementes por vaso e aos quinze dias após a emergência foi realizado o raleio, sendo conduzida uma planta por vaso até o final do experimento. A temperatura no interior da casa de vegetação foi de 18±5 °C. A umidade dos solos foi mantida a 70% da capacidade de campo durante todo o experimento, por meio da pesagem dos vasos.

As plantas foram colhidas em pleno florescimento, 90 dias após emergência. O tecido vegetal foi lavado com água corrente para a retirada do excesso de solo, posteriormente foi novamente lavado duas vezes em água destilada. A parte aérea e as raízes foram secas em estufa com aeração forçada a 60 °C até peso constante. Após a determinação da massa seca da parte aérea

e raízes, os tecidos foram triturados em moinho tipo Willey, resultando em partículas de 2 mm, aproximadamente. Para determinação dos teores de N, P e K totais na parte aérea e raízes, as amostras foram submetidas a digestão sulfúrica, conforme Tedesco et al. (1995). Após, foi realizada a determinação da concentração de N total (micro-Kjeldahl); P total (espectrofotômetro de absorção atômica) e K total (fotômetro de chama) dos tecidos.

3.3.5 Análise estatística

Os resultados foram submetidos à análise de variância (ANOVA, $\alpha < 0,05$) e quando detectado diferenças significativas foi aplicado o teste Scott-Knott a 5% de probabilidade para comparação entre as médias dos tratamentos, com auxílio do software SISVAR (FERREIRA, 1998). Através da análise de regressão foram geradas as equações para ajuste das curvas e a representação gráfica, utilizando o software SigmaPlot 11.0.

3.4 Resultados e Discussão

3.4.1 Compostagem

O aumento da temperatura ocorreu gradativamente na leira e atingiu a fase termofílica na terceira semana de compostagem (dados não apresentados). Após nove semanas de monitoramento a temperatura no interior da leira decresceu e no final do processo de compostagem a leira apresentava temperatura interna de 30 °C. Foi possível perceber a redução de aproximadamente 50% do volume das leiras e o processo foi dado por encerrado, pois o composto apresentava-se homogêneo, com coloração escura e sem odor dos materiais utilizados para a montagem das leiras (EMBRAPA, 2001).

O composto orgânico produzido apresenta características que permitem seu uso na agricultura (Tabela 1), de acordo com a Instrução Normativa Nº 25 do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, de julho de 2009 (BRASIL, 2009). Este resultado indica que a compostagem é uma alternativa simples, de baixo custo e eficiente para o tratamento da serragem de filtração gerada pela

indústria de biodiesel. Destaca-se neste aspecto que ao converter os resíduos em composto orgânico de uso agrícola, a indústria geradora não mais terá o passivo ambiental, ao contrário do que ocorreria, por exemplo, se o resíduo fosse depositado em um aterro sanitário, onde por um longo tempo a indústria geradora continuaria co-responsável e passível de receber multas geradas, se problemas ocorrerem com a disposição dos resíduos (ROVER et al., 2008).

3.4.2 Disponibilidade de nutrientes no solo

Os maiores teores de N amoniacal para os dois solos estudados foram observados na primeira avaliação (tempo 0) (Figuras 1A e B), o que em parte se deve à mineralização da matéria orgânica original dos solos e em parte a contribuição do amônio do composto orgânico. Após observou-se redução rápida e intensa do teor de amônio, que em parte foi convertido em $\text{NO}_3^- + \text{NO}_2^-$ e parte foi imobilizado na biomassa microbiana ou volatilizado na forma de amônia, pois o teor destes ânions não aumentou proporcionalmente ao decréscimo do teor de amônio. Como os teores de lignina e celulose neste composto eram altos, devido a elevada concentração destes polímeros na serragem de filtração, é provável que a biodegradação destes materiais continuou a ocorrer após a adição do composto no solo, o que resultou em imobilização do N na grande maioria dos tratamentos com adição do composto em ambos os solos (Figuras 2C e D). Esse resultado deve-se em parte também ao baixo teor de N (2,9%) no composto orgânico, pois segundo Palm et al. (2001), os materiais orgânicos com teores de N menores que 2,5% e lignina maiores que 15% causam imobilização de N no solo.

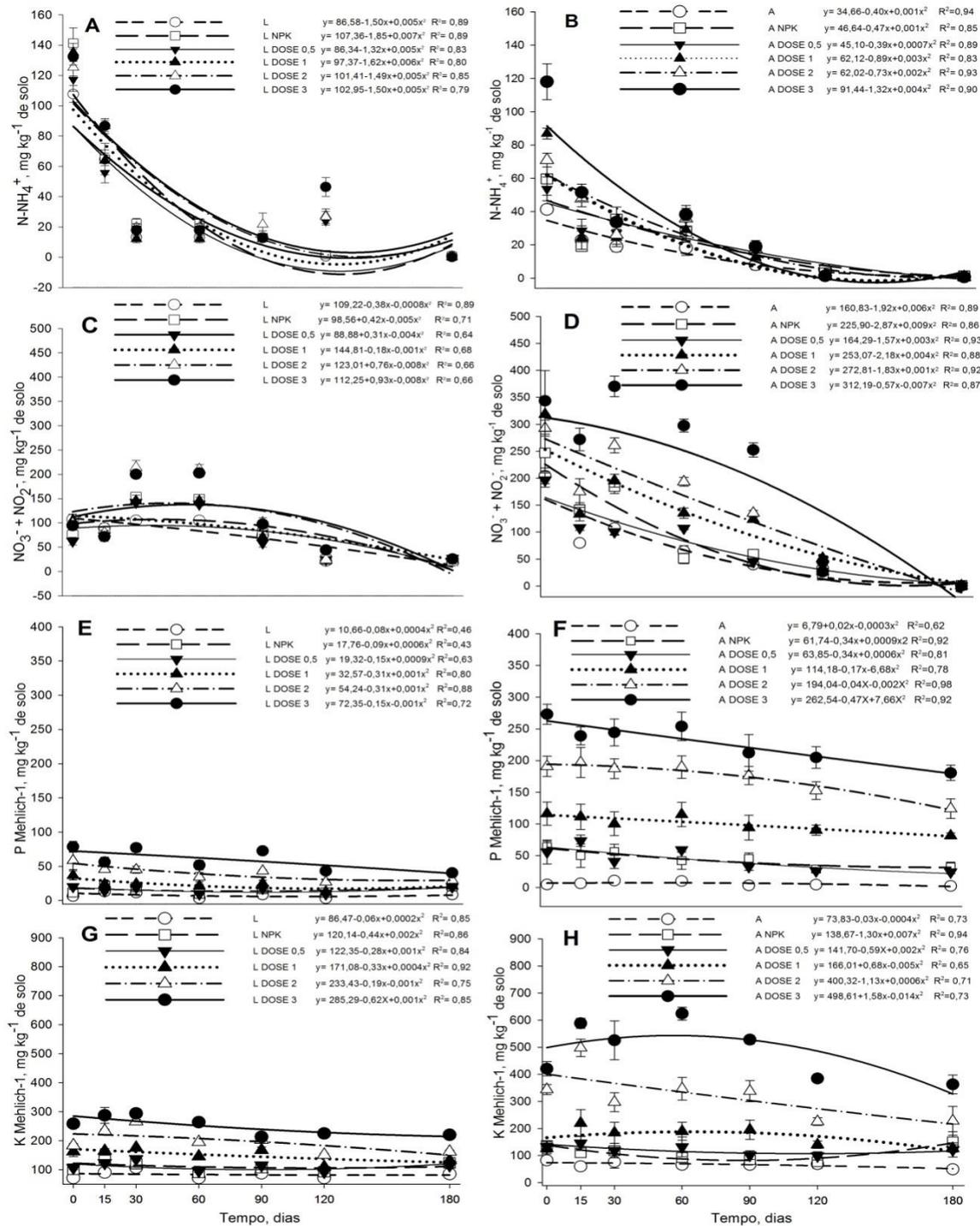


Figura 1 - Dinâmica da disponibilidade de NH_4^+ , $\text{NO}_3^- + \text{NO}_2^-$, P e K após 180 dias da adição do composto orgânico no Latossolo (L) e no Argissolo (A), em um experimento com vasos de 4 kg de solo em casa de vegetação. Onde A e L são os tratamentos controle para cada solo (sem adição de fertilizantes); NPK (adubação mineral com 100% da dose recomendada para a canola); DOSE 0,5 (dose de composto para fornecer 30 kg ha^{-1} de P); DOSE 1 (dose de composto para fornecer 60 kg ha^{-1} de P); DOSE 2 (dose de composto para fornecer 120 kg ha^{-1} de P) e DOSE 3 (dose de composto para fornecer 240 kg ha^{-1} de P). Média de 4 repetições. Barras são o intervalo de confiança (5%). Santa Maria, RS. 2014.

No Latossolo, após 15 dias de incubação percebe-se que, quanto maior a dose de composto orgânico aplicado, maior foi a disponibilidade de $\text{NO}_3^- + \text{NO}_2^-$. No tratamento L DOSE 1 ($1,2 \text{ t ha}^{-1}$ de composto) foi quantificado N em proporção semelhante ao encontrado no tratamento com adubação mineral recomendada para a cultura da canola (L NPK), que foi de aproximadamente 145 mg kg^{-1} de N dos 30 aos 60 dias (Figura 2C), período crítico e de maior demanda por N para a maioria das culturas, inclusive a canola (CQFS-RS/SC, 2004; CASTRO; BOARETTO, 2004).

Já para o Argissolo, o aumento dos teores de nitrato em resposta ao decréscimo nos teores de amônio foram menos evidentes, pois a intensidade do processo de imobilização demonstra ter sido mais intensa, se comparado ao Latossolo. Este comportamento diferenciado entre o Latossolo e o Argissolo pode ser em parte, devido ao menor teor de matéria orgânica natural do Argissolo, o que resultou em menores teores de N resultantes da mineralização desta matéria orgânica (Tabela 1). A disposição de compostos orgânicos em solos com baixo teor de matéria orgânica pode reduzir significativamente os teores de N disponíveis no solo, devido a imobilização microbiana (VARGAS et al., 2005). Apesar disso, o tratamento A DOSE 0,5 ($0,6 \text{ t ha}^{-1}$ de composto) forneceu aproximadamente 100 mg kg^{-1} de N dos 30 aos 60 dias de incubação, o que em média, se aproxima dos teores observados no tratamento A NPK (Figura 2D).

O índice de eficiência indica a proporção de N mineralizado em relação a quantidade de N total do composto orgânico adicionado ao solo ($2,9 \text{ g kg}^{-1}$). Os resultados deste estudo demonstram que dos 30 aos 60 dias, os valores de índice de eficiência foram de 0,63 (L DOSE 1) e 0,67 (A DOSE 0,5), que são superiores ao valor de 0,3 apresentado pelo Manual de Adubação e Calagem (CQFS-RS/SC, 2004) para compostos orgânicos produzidos a partir de esterco bovino. Os resultados desse trabalho divergem dos apresentados por Eckhardt (2011) que, aplicando compostos orgânicos a base de esterco bovino no solo, encontrou índices de eficiência média de 0,23, porém, o teor de N total dos compostos também foram, em média, menores ($2,0 \text{ g kg}^{-1}$) em relação a este trabalho ($2,9 \text{ g kg}^{-1}$).

A serragem de filtração e o esterco bovino apresentaram teores elevados de P total, resultando em um composto orgânico rico nesse nutriente (Tabela 1), que normalmente é uma deficiência dos compostos orgânicos (LIMA, 2011; OLIVEIRA et al., 2014). Por consequência disto, para os dois solos, quanto maior a dose adicionada de composto orgânico, maiores foram os teores de P disponível quantificados no solo (Figuras 2E e F).

Para os dois solos houve decréscimo do teor de P disponível com o passar do tempo, o que indica a ocorrência de sorção de P, em especial para o Latossolo, onde a fração argila é constituída por mineralogia predominantemente caulínica, contendo óxidos do tipo hematita, goethita, gibbsita e outros, os quais são capazes de promover rápida adsorção específica e irreversível do íon fosfato (CESSA et al., 2009).

No Latossolo, utilizando o tratamento L DOSE 1 (1,2 t ha⁻¹ de composto), foi disponibilizado 36,75 mg kg⁻¹ de P no tempo 0 (Figura 2E), sendo essa a dose média recomendada para a maioria das culturas de grãos (CQFS-RS/SC, 2004). Para esse mesmo solo, no tratamento L NPK, após a aplicação de 60 kg ha⁻¹ de P via solução aquosa, somente 11,87 mg kg⁻¹ de P encontrou-se disponível no suposto momento da semeadura (tempo 0) (Figura 2E), o que indica rápida sorção desse nutriente aos minerais do Latossolo.

Para o Argissolo, o tratamento A DOSE 0,5 (0,6 t ha⁻¹ de composto) disponibilizou P suficiente para não diferir do tratamento A NPK durante os 180 dias (Figura 2F). Nesse solo, em ambos os tratamentos, no intervalo até 60 dias, o teor de P disponível no solo permaneceu, em média, 56 mg kg⁻¹ de P. Após esse período, o teor de P nesses tratamentos reduziram para aproximadamente 28 mg kg⁻¹ até o fim do experimento (Figura 2F). Os maiores teores de P no Argissolo em relação ao Latossolo podem se explicar pelo maior teor de óxidos no Latossolo, conforme já comentado (CESSA et al., 2009).

O índice de eficiência na disponibilização de P do composto tanto no Latossolo quanto no Argissolo podem ser considerados muito baixos (0,01 e 0,04 respectivamente). Em nenhuma data avaliada, nos tratamentos com adição do composto em ambos os solos, os teores de P foram significativamente maiores do que os quantificados nos mesmos tratamentos no tempo 0. Esse resultado demonstra que, grande parte do P no composto orgânico produzido a partir da

serragem de filtração e esterco bovino pode estar na sua forma mineral (Figura 1E).

Assim como ocorreu para o P, quanto maior a dose adicionada de composto orgânico, maiores foram os teores de K disponível quantificados no solo (Figuras 2G e H). No Latossolo, o tratamento L DOSE 1 (1,2 t ha⁻¹ de composto), e no Argissolo, o tratamento A DOSE 0,5 (0,6 t ha⁻¹ de composto) mineralizaram aproximadamente 145 mg kg⁻¹ de K até os 60 dias, não diferindo do tratamento com NPK (Figuras 2G e H). A rápida mineralização do K em ambos os solos pode ser justificada pela grande disponibilidade de K no composto, o que provem do esterco e da serragem de filtração (Tabela 1).

O índice de eficiência na disponibilização do K no tratamento L DOSE 1 foi de 0,18 aos 30 dias, enquanto para o tratamento A DOSE 0,5 foi de 0,28 aos 15 dias de incubação. Esses valores podem ser considerados baixos, pois de acordo com o Manual de Adubação e Calagem o índice de eficiência de esterco bovino é 1,0 (CQFS-RS/SC, 2004).

De acordo com Castro e Boaretto (2004), o período de maior exigência nutricional pela cultura da canola é entre 45 até 60 dias após a semeadura, no período do florescimento. Segundo os autores, para a produção de 2.000 kg de grãos ha⁻¹ são necessários, no mínimo, as doses de 118; 52 e 93 kg ha⁻¹ de N, P e K disponíveis no solo. Diante dos resultados encontrados através deste ensaio prévio em vasos na casa de vegetação, observa-se para os solos estudados nesse trabalho que o composto orgânico produzido a partir de serragem de filtração de biodiesel e esterco bovino é capaz de suprir a demanda nutricional da canola. No Latossolo a aplicação de 1,2 t ha⁻¹ de composto e no Argissolo a aplicação de 0,6 t ha⁻¹ de composto, foram suficientes para suprir as quantidades de N, P e K próximas às recomendadas para o cultivo da canola.

3.4.3 Cultivo da canola

Alguns estudos mostram que, quanto maior a quantidade de massa seca da parte aérea de plantas de canola, maior é a produtividade de grãos (CASTRO; BOARETTO, 2004; DELIGIOS et al., 2013). Por isso, as plantas foram coletadas aos 90 dias, quando atingiram o máximo de matéria seca (CASTRO; BOARETTO,

2004). Nesse sentido, independente da época de aplicação do composto e do solo utilizado, houve incremento da massa seca da parte aérea (MSPA) e raiz (MSR) com aumento da dose aplicada (Tabela 2).

Tabela 2 - Massa seca da parte aérea (MSPA) e raiz (MSR) das plantas de canola colhidas no florescimento e adubadas com doses de composto orgânico produzido a partir de resíduo da indústria do biodiesel e complementado ou não com nitrogênio mineral. A adição do composto no solo foi realizada no momento da semeadura (Argissolo Imediato) ou 180 dias antes da semeadura (Argissolo Residual e Latossolo Residual). Santa Maria, RS. 2014.

| Tratamento ¹ | Argissolo Imediato | | Argissolo Residual | | Latossolo Residual | |
|------------------------------------|-----------------------|----------|--------------------|----------|--------------------|----------|
| | MSPA | MSR | MSPA | MSR | MSPA | MSR |
| ----- g planta ⁻¹ ----- | | | | | | |
| Controle | 1,616 dB ² | 0,706 cB | 0,749 dC | 0,081 cC | 3,241 bA | 1,282 bA |
| NPK | 5,689 aA | 1,622 aA | 5,185 aA | 0,935 bB | 5,524 aA | 1,795 aA |
| Dose 0,5 | 2,490 cB | 0,950 cB | 3,006 cB | 0,971 bB | 5,513 aA | 1,433 bA |
| Dose 0,5 + N | 4,757 bA | 1,257 bA | 5,234 aA | 1,089 bA | 4,880 aA | 1,367 bA |
| Dose 1 | 2,611 cB | 1,148 bA | 4,110 bA | 1,118 bA | 4,832 aA | 1,451 bA |
| Dose 1 + N | 4,986 bA | 1,457 aA | 5,535 aA | 0,983 bB | 5,884 aA | 1,813 aA |
| Dose 2 | 2,641 cC | 0,879 cB | 3,936 bB | 1,051 bB | 4,843 aA | 1,944 aA |
| Dose 2 + N | 5,561 aA | 1,660 aA | 5,290 aA | 1,175 bB | 4,544 aB | 1,347 bB |
| Dose 3 | 5,684 aA | 1,602 aA | 5,094 aA | 1,318 aA | 5,092 aA | 1,719 aA |
| Dose 3 + N | 6,038 aA | 1,742 aA | 6,536 aA | 1,184 aA | 5,047 aA | 1,427 bA |
| CV% | 12,19 | 19,30 | 18,33 | 14,01 | 12,50 | 22,79 |

¹Onde: Controle (sem aplicação de nenhum tipo de adubo); NPK (adubação mineral com 100% da recomendação para a canola); Dose 0,5 (0,6 t ha⁻¹ de composto); Dose 1 (1,2 t ha⁻¹ de composto); Dose 2 (2,4 t ha⁻¹ de composto); Dose 3 (4,8 t ha⁻¹ de composto). A adição de N foi realizada da seguinte forma: no Argissolo Imediato e Residual no tratamento Dose 0,5 + N (60 kg ha⁻¹ de N); Dose 1 + N (60 kg ha⁻¹ de N); Dose 2 + N (40 kg ha⁻¹ de N); Dose 3 + N (40 kg ha⁻¹ de N). No Latossolo Residual no tratamento Dose 0,5 + N (40 kg ha⁻¹ de N); Dose 1 + N (40 kg ha⁻¹ de N); Dose 2 + N (40 kg ha⁻¹ de N); Dose 3+N (40 kg ha⁻¹ de N).

²Médias seguidas por letras minúsculas iguais na mesma coluna não diferem estatisticamente entre as doses de composto, enquanto médias seguidas por letras maiúsculas iguais na mesma linha para cada parâmetro (MSPA e MSR) não diferem estatisticamente para cada época de aplicação do composto nos diferentes solos pelo teste Scott-Knott a 5% de probabilidade. Média de quatro repetições.

Dois aspectos podem ter contribuído para a redução do crescimento da canola nas menores doses do composto. Um é o pouco tempo para a mineralização do composto pela biomassa microbiana se comparado com os tratamentos residuais, o outro é a baixa temperatura do solo. Como no Argissolo Imediato, o composto foi adicionado ao solo no período de inverno, a temperatura de 18±5 °C pode ter reduzido a atividade microbiana de mineralização e, por isso, tenha disponibilizado baixos teores de N, P e K para a solução do solo. Avaliando a mineralização de resíduos agrícolas, muitos autores sugerem significativa

redução na respiração microbiana e no quociente metabólico nos períodos de inverno, indicando baixa atividade e, portanto, baixas taxas de mineralização em temperaturas de aproximadamente 15 °C (ESPÍNDOLA et al., 2001; DELL et al., 2012).

No Argissolo Residual, o composto foi aplicado seis meses antes do plantio, com temperaturas de 30 ± 5 °C, o que pode ter proporcionado maiores taxas de mineralização de N, P e K para o solo (Figura 1) e conseqüentemente maior produção de matéria seca das plantas de canola. Para esse solo, a MSPA dos tratamentos Dose 0,5+N, Dose 1+N, Dose 2+N, Dose 3 e Dose 3+N não diferiram estatisticamente do tratamento mineral NPK (Tabela 2). Mesmo com maior crescimento que o Argissolo Imediato, para a maioria dos tratamentos do Argissolo Residual foi necessária a complementação com N para que o crescimento da canola se equiparasse ao tratamento mineral NPK. Como o composto orgânico foi adicionado ao solo no verão e o plantio da canola foi realizado somente no inverno, a necessidade de complementação com N mineral pode ser justificada pela dinâmica desse nutriente no solo, ocasionando perdas para a atmosfera na forma de gases como NH_3^+ , N_2O , NO e N_2 (TASCA et al., 2011; SIQUEIRA NETO et al., 2010), reduzindo sua concentração no solo no momento da semeadura da canola (Figura 1D). No Argissolo Residual, deve-se considerar também que no tratamento Dose 3 (com ou sem N) foram quantificados os maiores valores de MSR, indicando maior exploração do solo pelo sistema radicular da canola.

No Latossolo Residual, a MSPA de todos os tratamentos com aplicação do composto, independente da dose aplicada, não diferiram estatisticamente do tratamento mineral NPK (Tabela 2). Esse resultado, em parte pode estar associado a maior mineralização da matéria orgânica natural no Latossolo, que era maior do que no Argissolo (Tabela 1) e a mineralização mais intensa do composto orgânico (Figura 2C), suprimindo a demanda nutricional da canola, mesmo nas doses menores de composto. Apesar disso, nesse solo, os tratamentos que apresentaram maiores MSR foram Dose 1+N, Dose 2 e Dose 3, não diferindo do tratamento mineral NPK. Araújo Neto et al. (2010) também avaliaram o poder residual de composto orgânico aplicado no solo sob a produção

de cebolinha, resultando em maior massa fresca comercializável na maior dose de composto aplicada nos cultivos anteriores.

No Argissolo Imediato, os maiores teores de N acumulados, tanto na MSPA quanto na MSR, foram quantificados no tratamento Dose 3+N, embora não tenham diferido dos tratamentos Dose 2+N e mineral NPK (Tabela 3). Nesse solo, como o composto orgânico foi aplicado no momento da semeadura da canola, houve curto período de tempo para a mineralização, imobilização do N pelos microrganismos (Figura 1D) e as baixas temperaturas podem ter limitado a atividade dos microrganismos do solo (DELL et al., 2012), o que pode explicar o menor acúmulo de N nos tecidos das plantas de canola nos tratamentos sem adição de N mineral. Por isso a necessidade de complementação com N mineral a qualquer dose do composto orgânico aplicado no momento da semeadura da canola no Argissolo, resultando em maior absorção de N (Tabela 3), bem como maior crescimento das plantas (Tabela 2).

Tabela 3 - Teores totais de N, P e K na massa seca da parte aérea (PA) e raiz (R) das plantas de canola colhidas no florescimento e adubadas com doses de composto orgânico produzido a partir de resíduo da indústria do biodiesel, complementado ou não com nitrogênio mineral. A adição do composto no solo foi realizada no momento da semeadura (Argissolo Imediato) ou 180 dias antes da semeadura (Argissolo Residual e Latossolo Residual). Santa Maria, RS. 2014.

| Tratamentos ¹ | N _{PA} | N _R | P _{PA} | P _R | K _{PA} | K _R |
|------------------------------------|---------------------|----------------|-----------------|----------------|-----------------|----------------|
| ----- Argissolo Imediato ----- | | | | | | |
| ----- g planta ⁻¹ ----- | | | | | | |
| Controle | 4,09 d ² | 1,14 b | 3,00 d | 1,28 b | 78,97 d | 28,35 b |
| NPK | 23,20 a | 3,69 a | 9,64 a | 4,46 a | 247,04 b | 66,47 a |
| Dose 0,5 | 6,57 d | 2,09 b | 2,82 e | 1,71 b | 108,22 d | 39,99 b |
| Dose 0,5 + N | 18,20 b | 3,55 a | 3,73 d | 1,62 b | 203,42 c | 43,48 b |
| Dose 1 | 6,31 d | 2,24 b | 6,54 c | 2,50 b | 106,11 d | 42,45 b |
| Dose 1 + N | 20,44 b | 3,07 a | 8,53 b | 2,34 b | 237,17 b | 50,68 b |
| Dose 2 | 6,82 d | 1,48 b | 6,11 c | 2,42 b | 124,47 d | 35,31 b |
| Dose 2 + N | 23,75 a | 3,33 a | 10,24 a | 3,72 a | 238,36 b | 67,05 a |
| Dose 3 | 15,50 c | 3,10 a | 12,01 a | 4,34 a | 251,51 b | 63,03 a |
| Dose 3 + N | 25,38 a | 4,12 a | 20,37 a | 5,36 a | 321,65 a | 74,44 a |
| CV% | 16,45 | 23,34 | 24,44 | 26,09 | 13,03 | 18,53 |
| ----- Argissolo Residual ----- | | | | | | |
| Controle | 4,26 e | 0,21 b | 1,45 d | 0,21 c | 28,94 e | 2,35c |
| NPK | 27,49 b | 2,90 a | 10,48 c | 2,96 b | 205,56 c | 31,18b |
| Dose 0,5 | 15,52 c | 2,36 a | 9,40 c | 2,88 b | 145,85 d | 32,42b |
| Dose 0,5 + N | 19,87 c | 2,96 a | 6,12 c | 2,04 b | 205,35 c | 33,56b |
| Dose 1 | 11,93 d | 3,39 a | 14,91 b | 6,08 a | 200,19 c | 51,44a |
| Dose 1 + N | 36,24 a | 3,11 a | 14,16 b | 2,82 b | 280,42 b | 34,93b |
| Dose 2 | 19,90 c | 2,73 a | 12,65 b | 6,13 a | 198,48 c | 45,52a |
| Dose 2 + N | 38,29 a | 3,07 a | 13,91 b | 4,48 a | 272,42 b | 39,30b |
| Dose 3 | 18,91 c | 3,27 a | 17,79 b | 6,00 a | 234,46 c | 46,93a |
| Dose 3 + N | 42,34 a | 3,36 a | 25,60 a | 5,85 a | 365,93 a | 41,96a |
| CV (%) | 23,20 | 24,90 | 22,97 | 25,94 | 25,79 | 18,78 |
| ----- Latossolo Residual ----- | | | | | | |
| Controle | 6,01 c | 5,25 a | 5,43 c | 0,24 e | 175,58 c | 6,90 c |
| NPK | 29,04 a | 5,05 a | 12,96 a | 0,54 d | 272,12 b | 2,52 e |
| Dose 0,5 | 24,14 b | 6,01 a | 7,60 c | 0,84 c | 274,64 b | 7,29 c |
| Dose 0,5 + N | 34,62 a | 5,09 a | 7,69 c | 0,39 d | 227,35 b | 2,34 e |
| Dose 1 | 25,20 b | 5,75 a | 9,12 b | 0,85 c | 246,19 b | 8,17 b |
| Dose 1 + N | 30,81 a | 6,81 a | 9,75 b | 0,98 c | 262,44 b | 3,05 e |
| Dose 2 | 24,92 b | 5,60 a | 10,46 b | 0,24 e | 240,08 b | 8,21 b |
| Dose 2 + N | 34,87 a | 4,65 a | 9,84 b | 0,76 c | 240,57 b | 5,22 d |
| Dose 3 | 29,89 a | 5,84 a | 11,15 a | 1,47 a | 258,28 b | 14,37 a |
| Dose 3 + N | 38,25 a | 5,92 a | 14,35 a | 1,14 b | 352,67 a | 3,48 e |
| CV (%) | 18,95 | 22,36 | 22,76 | 15,94 | 17,48 | 11,90 |

¹Onde: Controle (sem aplicação de nenhum tipo de adubo); NPK (adubação mineral com 100% da recomendação para a canola); Dose 0,5 (0,6 t ha⁻¹ de composto); Dose 1 (1,2 t ha⁻¹ de composto); Dose 2 (2,4 t ha⁻¹ de composto); Dose 3 (4,8 t ha⁻¹ de composto). A adição de N foi realizada da seguinte forma: no Argissolo Imediato e Residual no tratamento Dose 0,5+N (60 kg ha⁻¹ de N); Dose 1+N (60 kg ha⁻¹ de N); Dose 2+N (40 kg ha⁻¹ de N); Dose 3+N (40 kg ha⁻¹ de N). No

Latossolo Residual no tratamento Dose 0,5+N (40 kg ha⁻¹ de N); Dose 1+N (40 kg ha⁻¹ de N); Dose 2+N (40 kg ha⁻¹ de N); Dose 3+N (40 kg ha⁻¹ de N).

² Médias seguidas pelas mesmas letras na mesma coluna e para o mesmo solo, não diferem pelo teste Scott-Knott a 5% de probabilidade. Média de quatro repetições.

Nesse solo, a maior absorção de P, tanto na MSPA quanto na MSR, foi quantificada no tratamento Dose 3+N, que não diferiu dos tratamentos Dose 2+N, Dose 3 e NPK (Tabela 3). Os maiores valores de MSR (Tabela 2), e a possibilidade de haver alta concentração de P disponível nesses tratamentos logo após a adição do composto ao solo (Figura 1F), pode indicar que houve maior exploração radicular do solo e, conseqüentemente, maior extração do P disponível no solo e maior acúmulo nos tecidos das plantas (Tabela 2). Assim como pode ter favorecido a absorção de P, a aplicação do composto juntamente com o N mineral também aumentou a absorção de K pela canola cultivada nesse solo, visto que nos tecidos das plantas do tratamento Dose 3+N foi quantificado um teor de K superior ao do tratamento NPK (Tabela 3). Assim é possível que o maior crescimento radicular (Tabela 2), a alta concentração de K do composto (14,1 g kg⁻¹) e sua rápida mineralização (Figura 1H), favoreceram o aumento da absorção desse nutriente pelas plantas do tratamento Dose 3+N.

Se compararmos o acúmulo de nutrientes dos tratamentos do Argissolo Imediato e Argissolo Residual, percebe-se, em geral, maiores teores de N, P e K nos tecidos das plantas cultivadas no Argissolo Residual, o que provavelmente se deve ao maior crescimento das plantas (Tabela 2), e ao maior teor de nutrientes disponíveis no momento de semeadura da canola (Figura 1), devido ao maior tempo e temperatura disponíveis aos microrganismos do solo para a mineralização dos nutrientes do composto orgânico, conforme já discutido.

No Argissolo Residual, a absorção de N na MSPA foi maior no tratamento Dose 3+N, que não diferiu dos tratamentos Dose 1+N e Dose 2+N, e foram maiores que o tratamento mineral NPK (Tabela 3). Os teores de N nítrico no solo desses tratamentos, resultante da mineralização do composto durante seis meses antes da semeadura, eram altos, em média, 51 kg ha⁻¹ de N (Figura 1D). Além disso, a adubação de cobertura com N pode ter contribuído para aumentar a MSPA e MSR nesses tratamentos (Tabela 2), bem como a absorção de N (Tabela 3).

Nesse solo, a absorção de P foi maior no tratamento Dose 3+N, diferindo dos demais tratamentos, inclusive do mineral NPK (Tabela 3). No momento da semeadura da canola no Argissolo Residual, a disponibilidade de P no tratamento Dose 3, proveniente da mineralização do composto nesse solo era de 250 kg ha^{-1} , sendo considerado muito acima do recomendado pelo Manual de Adubação e Calagem (CQFS-RS/SC, 2004). Essas condições resultaram em maior crescimento das plantas (Tabela 2) e maiores acúmulos de P, tanto na MSPA quanto na MSR (Tabela 3). Semelhante a isso, para esse mesmo solo, no tratamento Dose 3+N foi quantificado o maior teor de K na MSPA, devido a alta disponibilidade desse nutriente resultante da mineralização do composto durante os 180 dias (Figura 1H), o que também resultou no maior crescimento da parte aérea (Tabela 2). Apesar disso, a concentração de K na MSR foi maior no tratamento Dose 1, mas não diferiu dos tratamentos Dose 2, Dose 3 e Dose 3+N (Tabela 3).

Comparando as três formas de manejo do composto orgânico nos solos, nos tratamentos sem adição de N mineral observa-se que no Latossolo Residual houve maior teor de N acumulado na MSPA e na MSR (Tabela 3). Esse resultado pode estar relacionado ao maior teor de matéria orgânica natural do Latossolo ($43,0 \text{ g kg}^{-1}$) em relação ao Argissolo ($20,0 \text{ g kg}^{-1}$) e a uma possível maior atividade microbiana que resultou em maior mineralização do N orgânico natural do solo e do adicionado pelo composto orgânico.

No entanto, no Latossolo Residual, a maior concentração de N na MSPA foi no tratamento Dose 3+N, que não diferiu dos tratamentos Dose 3, Dose 2+N, Dose 1+N, Dose 0,5+N e mineral NPK (Tabela 3). Esses resultados mostram que a adição de N pode aumentar a absorção de N pelas plantas de canola, favorecendo seu crescimento principalmente nas menores doses de composto aplicado seis meses antes do plantio.

Nesse solo, a maior absorção de P foi quantificada no tratamento Dose 3+N, que não diferiu dos tratamentos Dose 3 e do mineral NPK (Tabela 3). Após 180 dias da aplicação do composto orgânico ao solo, o tratamento Dose 3 foi o que mais disponibilizou P (68 kg ha^{-1} de P no momento da semeadura) (Figura 1E), resultando em maior acúmulo de P nos tecidos das plantas, sendo que a aplicação de N, de maneira geral não aumentou a absorção de P pelas plantas

nesse solo (Tabela 3). Além disso, na maioria dos tratamentos do Latossolo Residual, os teores de P tanto na MSPA quanto na MSR foram menores, se comparado ao Argissolo Residual. Essa resposta pode estar associada aos altos teores de óxidos no Latossolo que, são capazes de promover rápida adsorção específica do íon fosfato (CESSA et al., 2009).

O maior teor de K na MSPA foi quantificado no tratamento Dose 3+N, que diferiu dos demais tratamentos (Tabela 3), embora essa diferença não tenha reduzido o crescimento das plantas (Tabela 2). É interessante notar que, apesar de não ter afetado o crescimento MSPA, os teores de K quantificados na MSR das plantas foram menores na maioria dos tratamentos do Latossolo Residual, quando comparados aos da MSR do Argissolo Residual, e essa diferença é ainda maior em relação aos teores de K da MSR do Argissolo Imediato (Tabela 3). Esse comportamento em parte pode ser explicado pelo efeito diluição, pois observa-se maior crescimento das raízes da canola no Latossolo Residual, concomitante a quantificação dos menores teores de K nos tecidos (MAIA, 2012).

Pesquisas demonstram que através de modelos matemáticos, é possível associar a MSPA com a área foliar das plantas, e desta forma realizar previsões sobre o rendimento de grãos da canola (DELIGIOS et al., 2013). Segundo esses autores, quanto maior a MSPA, maior o rendimento de grãos por hectare. Apesar dessas informações, até então, poucos estudos foram realizados associando o acúmulo de macronutrientes nos tecidos das plantas com a produtividade de grãos da canola. Os resultados do presente estudo demonstram que a maior disponibilidade de nutrientes no momento da semeadura da canola devido ao efeito residual do composto orgânico aplicado ao solo, pode aumentar a absorção e acúmulo de nitrogênio, fósforo e potássio nos tecidos das plantas, o que pode resultar em maior acúmulo de MSPA e MSR, e maior produtividade de grãos da canola.

3.5 Conclusões

É possível realizar compostagem a partir do resíduo da indústria de biodiesel denominado serragem de filtração, desde que misturado a um material com baixa relação C/N, como o esterco bovino;

O composto orgânico produzido apresenta características que permitem seu uso agrícola de acordo com a legislação brasileira e sua adição ao solo aumenta a disponibilidade de nitrogênio, fósforo e potássio;

O composto orgânico pode substituir total ou parcialmente a adubação mineral recomendada para a cultura da canola, podendo ser aplicado ao solo no momento da semeadura ou seis meses antes de seu plantio.

3.6 Referências Bibliográficas

AN, H. et al. Combustion and emissions characteristics of diesel engine fueled by biodiesel at partial load conditions. **Applied Energy**, London, v.99, n.1, p.363-371, nov. 2012.

ARAUJO NETO, S. E. et al. Plantio direto de cebolinha sobre cobertura vegetal com efeito residual da aplicação de composto orgânico. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.40, n.5, p.1206-1209, may. 2010.

ARZANI, F. A.; GOMES, M. C. S.; PEREIRA, N. C. Biodiesel: Produção por transesterificação etílica do óleo de canola e separação do glicerol por ultrafiltração. **Revista de Saúde, Meio Ambiente e Sustentabilidade**, São Paulo, v.8, n.1, p.1-16, jun. 2013.

AVRAMIDOU, P.; EVANGELOU, A.; KOMILIS, D. Use of municipal solid waste compost as a growth media for an energy plant (rapeseed). **Journal of Environmental Management**, Xanthi, v.121, n.1, p.152-159, may. 2013.

BERGAMNN, J. C. et al. Biodiesel production in Brazil and alternative biomass feedstocks. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Amsterdam, v.21, n.1, p.411-420, may. 2013.

BRASIL. Instrução Normativa Nº25, de 23 de Julho de 2009. Aprova as Normas sobre as especificações e as garantias, as tolerâncias, o registro, a embalagem e a rotulagem dos fertilizantes orgânicos simples, mistos, compostos, organominerais e biofertilizantes destinados à agricultura. Diário Oficial da União, Brasília, DF, p. 20, 23 jul. 2009. Seção 1.

CASTRO, A. M. C.; BOARETTO, A. E. Teores e acúmulo de nutrientes em função da população de plantas de canola. **Scientia Agraria**, Curitiba, v.5, n.1, p.95-101, sep. 2004.

CESSA, R. M. A. et al. Área superficial específica, porosidade da fração argila e adsorção de fósforo em dois Latossolos Vermelhos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.33, n.5, p.1153-1162, set./out. 2009.

CQFS – Comissão de Química e Fertilidade do Solo - RS/SC –. **Manual de adubação e calagem para os Estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina**. 10 ed. Porto Alegre: Núcleo Regional Sul, 2004. 400p.

CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento. (2012). **Acompanhamento da Safra Brasileira 2011-2012.** Disponível em: http://www.cileite.com.br/sites/default/files/6graos_08.03.12.pdf. Acesso em janeiro de 2014.

DELL, E. A. et al. Heat stress and N fertilization affect soil microbial and enzyme activities in the creeping bentgrass (*Agrostis stolonifera* L.) rhizosphere. **Applied Soil Ecology**, New York, v.56, n.1, p.19-26, may. 2012.

DELIGIOS, P. A. et al. Predicting growth and yield of winter rapeseed in a Mediterranean environment: Model adaptation at a field scale. **Field Crops Research**, Davis, v.144, p.100-112, mar. 2013.

ECKHARDT, D.P. **Potencial fertilizantes de adubos orgânicos à base de esterco bovino e sua utilização na produção de mudas de alface.** 2011. 58f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Departamento de Solos, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria. 2011.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. 2010. Disponível em <<http://www.cnpt.embrapa.br/culturas/canola/index.htm>> Acesso em: 25 nov. 2013.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária Centro Nacional de Pesquisas de Solos. **Manual de métodos de análises de solos.** Brasília – DF: EMBRAPA. 1997.212p.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Compostagem.** Comunicado Técnico Nº50, p.1-10, 2001.

ESPÍNDOLA, J. A. A. et al. Flutuação sazonal da biomassa microbiana e teores de nitrato e amônio de solo coberto com *Paspalum notatum* em um agroecossistema. **Floresta e Ambiente**, Seropédica, v.8, n. único, p.104-113, jan./dez. 2001.

FERREIRA, D.F. **Programa Sisvar.exe: sistema de análise de variância.** Lavras: UFLA, 1998.

OLIVEIRA, L. B. et al. Características químicas do solo e produção de biomassa de alface adubada com compostos orgânicos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.18, n.2, p.157-164, out. 2014.

GUARIEIRO, A. L. N. et al. Redox activity and PAH content in size-classified nanoparticles emitted by a diesel engine fuelled with biodiesel and diesel blends. **Fuel**, London, v.116, n.1, p.490-497, jan.2014.

KOOTER, I. M. et al. Toxicological characterization of diesel engine emissions using biodiesel and a closed soot filter. **Atmospheric Environment**, Utrecht, v.45, n.8, p.1574-1580, mar. 2011.

LIMA, C. C. Disponibilidade de fósforo para a cana-de-açúcar em solo tratado com compostos ricos em silício. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.15, n.12, p.1222-1227, dec. 2011.

MAIA, C. E. Época de amostragem foliar para diagnóstico nutricional da bananeira. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.36, n.3, p.859-864, may./jun. 2012.

MME – Ministério de Minas e Energia. (2006). **Identificação das alternativas tecnológicas de controle, tratamento e reuso de resíduos industriais**. Disponível em: www.mma.gov.br/estruturas. Acesso em: 25 de novembro de 2013.

MOHAMMADI, K.; ROKHZADI, A. An integrated fertilization system of canola (*Brassica napus* L.) production under different crop rotations. **Industrial Crops and Products**, Amsterdam, v.37, n.1, p.264-269, may. 2012.

PALM, C. A. et al. Organic inputs for soil fertility management in tropical agroecosystems: Application of an organic resource database. **Agriculture, Ecosystems & Environmental**, New York, v.83, n.1-2, p.27–42, jan. 2001.

ROVER, S.; BORBA, J.A.; BORGERT, A. Como as empresas classificadas no Índice de Sustentabilidade Empresarial (ISE) evidenciam os custos e investimentos ambientais? **Custos e agronegócios**, Recife, v.4, n.1, p.2-25, jan./abr. 2008.

SANTOS, R. H. S. et al. Efeito residual da adubação com composto orgânico sobre o crescimento e produção de alface. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.36, n.11, p.1395-1398, nov. 2001.

SILVA, C. A.; ANDREOLI, C. V. Compostagem como alternativa a disposição final dos resíduos gerados na Ceasa de Curitiba/PR. **Engenharia Ambiental**, Espírito Santo do Pinhal, v.7, n.2, p.27-40, abr./jun. 2010.

SIQUEIRA NETO, M. et al. Mineralização e desnitrificação do nitrogênio no solo sob sistema plantio direto. **Bragantia**, Campinas, v.69, n.4, p.923-936, dec. 2010.

TASCA, F. A. et al. Volatilização de amônia do solo após a aplicação de ureia convencional ou com inibidor de uréase. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.35, n.2, p.493-502, mar./abr. 2011.

TEDESCO, M. J. et al. **Análises de solo, plantas e outros materiais**. 2 ed. Porto Alegre, UFRGS, 1995. 174p.

TOMM, G. O. **Efeito de épocas de semeadura sobre o desempenho de genótipos de canola em Três de Maio, RS** - Circular técnica 17. EMBRAPA TRIGO, Passo Fundo/RS, 2004.

USDE - United State Department Energy.(2013). **Biodiesel Blends**. Disponível em http://www.afdc.energy.gov/fuels/biodiesel_blends.html. Acesso em dezembro de 2013.

VARGAS, K.K.; SELBACH, P.A.; SÁ, E.L.S. Imobilização de nitrogênio em solo cultivado com milho em sucessão à aveia preta nos sistemas plantio direto e convencional. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.35, n.1, p.76-83, jan./feb.2005.

XUE, J. Combustion characteristics, engine performances and emissions of waste edible oil biodiesel in diesel engine. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Nanjing, v.23, n.1, p.350-365, jul.2013.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados deste estudo demonstram que é possível utilizar uma área agrícola para a disposição final do resíduo da indústria de biodiesel denominado serragem de filtração, possibilitando a sua biodegradação, sem haver necessidade de adição de nutrientes minerais ou com adição de baixas doses de nutrientes, visando o aumento da degradação do resíduo, considerando os solos e as doses aqui avaliadas. A disposição da serragem de filtração ao solo não aumentou a concentração de metais pesados nos solos, mas pode haver redução da disponibilidade de nutrientes.

O tratamento deste resíduo pela compostagem pode ser uma alternativa para aumentar a eficiência de reaproveitamento da serragem de filtração de biodiesel em áreas agrícolas, pois o composto orgânico produzido apresenta características que possibilitam seu uso na agricultura de acordo com a legislação brasileira, e é fonte de nitrogênio, fósforo e potássio ao solo, podendo substituir total ou parcialmente a adubação recomendada para a cultura da canola.

5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABIOVE – Associação Brasileira das Indústrias de Óleos Vegetais. **Biodiesel: entrega e produção.** (2012). Disponível em: <<http://www.abiove.org.br/site/index.php?page=estatistica&area=NC0yLTE=>>>. Acesso em 14 abr. 2013.

ANP - Agência Nacional Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. (2010). Disponível em: < [http:// www.anp.gov.br />. Acesso em 15 de dezembro de 2013.](http://www.anp.gov.br/)

ARZANI, F. A.; GOMES, M. C. S.; PEREIRA, N.C. Biodiesel: Produção por transesterificação etílica do óleo de canola e separação do glicerol por ultrafiltração. **Revista de Saúde, Meio Ambiente e Sustentabilidade**, São Paulo, v.8, n.1,p.1-16, abr. 2013.

ATABANI, A. E. et al. Non-edible vegetable oils: A critical evaluation of oil extraction, fatty acid composition, biodiesel production, characteristics, engine performance and emissions production. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, London, v. 18, v.1, p.211-245, feb. 2013.

BASHA, S. A.; GOPAL, K. R.; JEBARAJ, S. A review on biodiesel production, combustion, emissions and performance. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, London, v. 13, n.6-7, p.1628-1634, aug./sep.2009.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. (2010). Disponível em <<http://www.cnpt.embrapa.br/culturas/canola/index.htm>> Acesso em: 25 nov. 2013.

GUARIEIRO, A. L. N. et al. Redox activity and PAH content in size-classified nanoparticles emitted by a diesel engine fuelled with biodiesel and diesel blends. **Fuel**, Oxford, v.116, n.1, p.490-497, jan.2014.

ISMAIL, H.M. et al. Computational study of biodiesel–diesel fuel blends on emission characteristics for a light-duty diesel engine using OpenFOAM. **Applied Energy**, New York, v.111, n.1, p.827-841, nov.2013.

PHILLIPS, C. R.; NATHWANI, J. S. Development of a soil—waste interaction matrix for assessing land disposal of industrial wastes. **Water Research**, London, v.11, n.10, p.859-868, may. 1977.

PIRES, A. A. et al. Efeito da adubação alternativa do maracujazeiro-amarelo nas características químicas e físicas do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.32, n.5, p.1997-2005, jan./mar. 2008.

SANTOS, J. A. et al. Tannery sludge compost amendment rates on soil microbial biomass of two different soils. **European Journal of Soil Biology**, Amsterdam, v.47, n.2, p.146-151, mar./apr. 2011.

STROJAKI, T. V. et al. Atributos químicos do solo e produtividade de girassol e milho em função da aplicação de composto de lixo urbano. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v.43, n. 3, p.278-285, jul./set. 2013.

XUE, J. Combustion characteristics, engine performances and emissions of waste edible oil biodiesel in diesel engine. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, London, v.23, n.1, p.350-365, jul.2013.