

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS**  
**INSTITUTO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM PRODUÇÃO VEGETAL**

**PRODUÇÃO DE ADUBO ORGÂNICO A PARTIR DE LODO DE ESGOTO  
CULTIVADO COM *Pennisetum purpureum* e *Urochloa brizantha*, NA PRESENÇA E  
AUSÊNCIA DE AERAÇÃO, E COMPOSTADO**

**PAULO HENRIQUE SILVEIRA CARDOSO**

**Montes Claros**

**2018**

Cardoso, Paulo Henrique Silveira.

C268p  
2018

Produção de adubo orgânico a partir de lodo de esgoto cultivado com *Pennisetumpurpureume Urochloabrizantha*, na presença e ausência de aeração, e compostado / Paulo Henrique Silveira Cardoso. Montes Claros, MG: ICA/UFMG, 2018.

97 f.: il.

Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal) Universidade Federal de Minas Gerais / Instituto de Ciências Agrárias.

Orientador: Regynaldo Arruda Sampaio.

Banca examinadora: Rodinei Facco Pegoraro, Gevany Paulino de Pinho, Victor Martins Maia.

Inclui referências: f. 26-31; 54-56; 73-76; 94-97.

1. Adubo orgânico. 2. Biodegradação. 3. Fitorremediação. 4. HPAs. 5. Reciclagem de Resíduos. I. Sampaio, Regynaldo Arruda II. Universidade Federal de Minas Gerais. Instituto de Ciências Agrárias. III. Título.

CDU: 631.8

**Paulo Henrique Silveira Cardoso**

**Produção de Adubo Orgânico a Partir de Lodo de Esgoto Cultivado com *Pennisetum purpureum* e *Urochloa brizantha*, na Presença e Ausência de Aeração, e Compostado**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre em Produção Vegetal.

Área de Concentração: Produção Vegetal  
Orientador: Prof. Reginaldo Arruda Sampaio

Montes Claros  
Fevereiro de 2018

**Paulo Henrique Silveira Cardoso**

**Produção de Adubo Orgânico a Partir de Lodo de Esgoto Cultivado com *Pennisetum purpureum* e *Urochloa brizantha*, na Presença e Ausência de Aeração, e Compostado**

Aprovada pela banca examinadora constituída pelos professores:

Prof. Rodinei Facco Pegoraro  
ICA/UFMG

Profa. Gevany Paulino de Pinho  
ICA/UFMG

Prof. Victor Martins Maia  
UNIMONTES

---

Prof. Reginaldo Arruda Sampaio – Orientador  
ICA/UFMG

Montes Claros, 23 de fevereiro de 2018

Dedico este trabalho à Paula, às minhas irmãs,  
Gabriella e Rafaela e, principalmente, à minha  
mãe Lindaura.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por ter abençoado todos os momentos de minha vida, por ter iluminado meus passos e por ter me dado forças para enfrentar os momentos mais difíceis de minha caminhada.

Agradeço a meu pai Roberto (*in memoriam*) com quem, mesmo que eu tenha convivido pouco, influencia-me bastante.

Agradeço à minha mãe Lindaura, que, com garra, coragem, força de vontade e determinação conseguiu criar minhas irmãs e a mim, praticamente sozinha, não deixando-nos nada faltar em nossas vidas. Ensinou-nos a ser honestos e trabalhadores e nos incentivou a ser pessoas de bem e compromissadas com nossos deveres.

Agradeço às minhas irmãs, Gabriella e Rafaela, pelo companheirismo, amizade e união.

Agradeço à minha namorada Paula Wellen, por todo carinho, amor, amizade, respeito, compreensão, incentivo e cumplicidade. Além disso, pela ajuda para a realização deste trabalho.

Agradeço ao Prof. Regynaldo pela orientação, incentivo, ensinamentos, dedicação e, especialmente, confiança. Exemplo de competência, dedicação e honestidade e a quem vou seguir durante minha carreira. Meus sinceros agradecimentos.

Agradeço aos companheiros de laboratório, Márcio e, em especial, Sandra, Gustavo e Isabelle pela amizade, companheirismo e auxílio.

Agradeço à Ane e Érica, pelos momentos de descontração, pela amizade que adquirimos e pela confiança que têm em mim.

Agradeço aos professores Rodinei, Gevany e Victor por terem disponibilizado um tempo para comporem a banca avaliadora.

Agradeço ao ICA/UFMG pela oportunidade de realização do curso de Engenharia Agrícola e Ambiental e do mestrado em Produção Vegetal.

Agradeço à FUMP, à CAPES e à Fapemig pelo apoio financeiro, pela bolsa de estudo e financiamento para realização deste trabalho.

Meu muito obrigado!

“Lembre-se: seu foco determina a sua realidade.”

Qui-Gon Jinn

(Star Wars – The Phantom Menace)

## **Produção de Adubo Orgânico a Partir de Lodo de Esgoto Cultivado com *Pennisetum purpureum* e *Urochloa brizantha*, na Presença e Ausência de Aeração, e Compostado**

### **RESUMO**

A compostagem é um dos principais processos de estabilização do lodo de esgoto, em que ocorre a mineralização da matéria orgânica e aumento da disponibilidade de nutrientes. Já a fitorremediação é um processo em que ocorre a extração, estabilização e/ou imobilização de metais pesados e compostos orgânicos tóxicos pelas plantas. Essas técnicas, isoladas ou em conjunto, visam à obtenção de um composto orgânico mais seguro a ser utilizado na agricultura. Diante do exposto, o objetivo deste trabalho foi avaliar os atributos físicos, químicos e microbianos e o teor de HPAs em lodo de esgoto compostado, após cultivo com *Pennisetum purpureum* ou *Urochloa brizantha* na presença e ausência de aeração. O experimento foi conduzido em área experimental do ICA/UFMG, em DBC, com quatro repetições e esquema fatorial 2x2+2. Os fatores consistiram em cultivo de *P. purpureum* ou *U. brizantha* (densidade de plantio de 50 plantas/m<sup>2</sup>) em lodo de esgoto, com aeração intermitente (30 min on/off) por 60 dias (vazão de 0,14 m<sup>3</sup> min<sup>-1</sup> m<sup>-3</sup>) ou sem aeração. Os tratamentos adicionais foram sem cultivo com ou sem aeração. Após 90 dias de cultivo, a gramínea foi cortada, triturada e incorporada ao lodo de esgoto. Durante 60 dias, o material foi revolvido quinzenalmente e irrigado assim que necessário. Após esse período, o material foi coletado e levado para o laboratório, onde foram realizadas análises físicas, químicas, microbianas e de HPAs. Os dados obtidos foram submetidos à análise de variância com desdobramento dos tratamentos em contrastes ortogonais a 5% de probabilidade pelo teste F. Os atributos granulometria, densidade aparente e de partícula, porosidade, condutividade elétrica e capacidade de retenção de água apresentaram valores que adequa o lodo de esgoto produzido como substrato para produção de mudas. Em relação aos atributos químicos, houve aumento da CTC, relação CTC/C, disponibilidade de N e teores totais de P e Ca, com redução da relação C/N e teores totais de K e Mg, quando comparados à amostra inicial de lodo de esgoto. Os teores totais de Zn, Cu, Pb e Ni ficaram abaixo do limite máximo estabelecido pela resolução CONAMA nº 375. A atividade microbiana, avaliada pela respiração basal e acumulada, o C da biomassa microbiana e os quocientes metabólico e o microbiano demonstraram que os compostos orgânicos produzidos apresentaram-se estáveis. Dentre os 16 HPAs sugeridos pela resolução proposta pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (USEPA) para monitoramento, apenas seis foram quantificados no lodo de esgoto, dos quais seu somatório apresentou teor médio de 1,15 mg kg<sup>-1</sup> ao final do experimento, sendo este valor, aproximadamente, cinco vezes inferior ao limite máximo

permitido pela legislação. Pode-se concluir que o composto de lodo de esgoto produzido pode ser utilizado de forma mais segura em áreas agrícolas, diminuindo-se os riscos de contaminação do ambiente.

**Palavras-chave:** adubo orgânico, biodegradação, fitorremediação, HPAs, reciclagem de resíduos.

## **Production of Organic Fertilizer from Sewage Sludge Cultivated with *Pennisetum purpureum* and *Urochloa brizantha*, in the Presence and Absence of Aeration, and Composted**

### **ABSTRACT**

Composting is one of the main processes of stabilization of sewage sludge, in which occurs the mineralization of organic matter and increase of nutrient availability. Already the phytoremediation is a process in which occurs the extraction, stabilization and/or immobilization of heavy metals and toxic organic compounds by plants. These techniques, isolated or in combination, aim to obtain a safer organic compound to be used in agriculture. In view of the above, the objective of this work was to evaluate the physical, chemical and microbial attributes and HPA content in composted sewage sludge after cultivation with *Pennisetum purpureum* or *Urochloa brizantha* in the presence and absence of aeration. The experiment was conducted in an ICA/UFMG experimental area, in DBC, with four replications and a 2x2+2 factorial scheme. The factors consisted of cultivation of *P. purpureum* or *U. brizantha* (planting density of 50 plants/m<sup>3</sup>) in sewage sludge, with intermittent aeration (30 min on/off) for 60 days (flow rate of 0.14 m<sup>3</sup> min<sup>-1</sup> m<sup>-3</sup>) or without aeration. The additional treatments were without cultivation with or without aeration. After 90 days of cultivation, the grass was cut, crushed and incorporated into the sewage sludge. During 60 days, the material was revolved biweekly and irrigated as needed. After this period, the material was collected and taken to the laboratory, where physical, chemical, microbial and HPA analysis were performed. The obtained data were submitted to analysis of variance with unfolding of the treatments in orthogonal contrasts at 5% of probability by the test F. The attributes granulometry, apparent and particle density, porosity, electrical conductivity and water retention capacity presented values that adequate the sewage sludge produced as substrate for seedling production. In relation to the chemical attributes, there was an increase of the CTC, CTC/C ratio, N availability and total P and Ca contents, with reduction of C/N ratio and total K and Mg contents when compared to the initial sewage sludge sample. The total Zn, Cu, Pb and Ni contents were below the maximum limit established by the CONAMA resolution n° 375. The microbial activity, evaluated by basal and accumulated respiration, the C of the microbial biomass and the metabolic and microbial quotients showed that the organic compounds produced presented stable. Among the 16 PAHs suggested by resolution proposed by the United States Environmental Protection Agency (USEPA) for monitoring, only six were quantified in the sewage sludge, of which its sum presented an average content of 1.15 mg kg<sup>-1</sup> at the end of the experiment, being this value approximately five times lower than the maximum

limit allowed by the legislation. It can be concluded that the sewage sludge compound produced can be used more safely in agricultural areas, reducing the risk of contamination of the environment.

**Keywords:** biodegradation, organic fertilizer, PAHs, phytoremediation, waste recycling.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

### **CAPÍTULO 2 – Atributos químicos e microbianos de lodo de esgoto cultivado com *Pennisetum purpureum* e *Urochloa brizantha* na presença e ausência de aeração**

Figura 1	– Vista dos caixotes de madeirite recoberto com plástico (esquerda). Vista dos caixotes preenchidos com lodo de esgoto (direita) .....	34
Figura 2	– Tubo de PVC perfurado em forma de garfo (esquerda). Ventilador tipo sirocco (direita) .....	35
Figura 3	– Toletes do <i>P. purpureum</i> (esquerda) e mudas de <i>U. brizantha</i> (direita) recém-plantadas no lodo de esgoto .....	37
Figura 4	– Lâmina de ferro utilizada para cortar o lodo e bloco de lodo de esgoto retirado para as coletas das amostras .....	38
Quadro 1	– Contrastes ortogonais utilizados na análise estatística do experimento e suas finalidades .....	39

### **CAPÍTULO 3 – Caracterização de lodo de esgoto cultivado com *Pennisetum purpureum* e *Urochloa brizantha*, na presença e ausência de aeração, e compostado**

Quadro 1	– Contrastes ortogonais utilizados na análise estatística do experimento e suas finalidades .....	61
----------	---	----

### **CAPÍTULO 4 – Fitorremediação de HPAs em lodo de esgoto cultivado com *Pennisetum purpureum* e *Urochloa brizantha*, na presença e ausência de aeração, e compostado**

Quadro 1	– Contrastes ortogonais utilizados na análise estatística do experimento e suas finalidades .....	81
----------	---	----

## LISTA DE TABELAS

### CAPÍTULO 2 – Atributos químicos e microbianos de lodo de esgoto cultivado com *Pennisetum purpureum* e *Urochloa brizantha* na presença e ausência de aeração

Tabela 1	– Dados meteorológicos durante a realização do experimento (nov./2016 – jan./2017) .....	34
Tabela 2	– Caracterização química e microbiana do lodo de esgoto utilizado para realização do experimento .....	36
Tabela 3	– Matéria seca da parte aérea (MSPA), sistema radicular (MSR) e total (MST) (g por planta) de <i>P. purpureum</i> e <i>U. brizantha</i> cultivado em lodo de esgoto com ou sem aeração .....	39
Tabela 4	– Teor de nutrientes e metais pesados nos tecidos orgânicos de <i>P. purpureum</i> e <i>U. brizantha</i> cultivado em lodo de esgoto com ou sem aeração .....	41
Tabela 5	– Médias e significância dos contrastes para pH em H <sub>2</sub> O e CaCl <sub>2</sub> 0,01 mol L <sup>-1</sup> de lodo de esgoto cultivado com <i>P. purpureum</i> e <i>U. brizantha</i> com ou sem aeração .....	43
Tabela 6	– Médias e significância dos contrastes para matéria orgânica (MO) e resíduo mineral total (RMT) de lodo de esgoto cultivado com <i>P. purpureum</i> e <i>U. brizantha</i> com ou sem aeração .....	44
Tabela 7	– Médias e significância dos contrastes para resíduo mineral insolúvel (RMI) e solúvel (RMS) de lodo de esgoto cultivado com <i>P. purpureum</i> e <i>U. brizantha</i> com ou sem aeração .....	45
Tabela 8	– Médias e significância dos contrastes para C orgânico (C org.), N total (Nt) e capacidade de troca catiônica (CTC) de lodo de esgoto cultivado com <i>P. purpureum</i> e <i>U. brizantha</i> com ou sem aeração .....	48
Tabela 9	– Médias e significância dos contrastes para as relações C/N e CTC/C de lodo de esgoto cultivado com <i>P. purpureum</i> e <i>U. brizantha</i> com ou sem aeração .....	50
Tabela 10	– Médias e significância dos contrastes para C-biomassa microbiana (CBM) de lodo de esgoto cultivado com <i>P. purpureum</i> e <i>U. brizantha</i> com ou sem aeração .....	51
Tabela 11	– Médias e significância dos contrastes para respiração basal (RB) (mg CO <sub>2</sub> kg <sup>-1</sup> h <sup>-1</sup> lodo, base seca) e acumulada (RAc) (mg CO <sub>2</sub> kg <sup>-1</sup> lodo, base seca) e quociente metabólico (qCO <sub>2</sub> ) (mg C-CO <sub>2</sub> g <sup>-1</sup> CBM h <sup>-1</sup> , base seca) de lodo de esgoto cultivado com <i>P. purpureum</i> e <i>U. brizantha</i> com ou sem aeração .....	52
Tabela 12	– Médias e significância dos contrastes para quociente microbiano (qMIC) de lodo de esgoto cultivado com <i>P. purpureum</i> e <i>U. brizantha</i> com ou sem aeração .....	53

### **CAPÍTULO 3 – Caracterização de lodo de esgoto cultivado com *Pennisetum purpureum* e *Urochloa brizantha*, na presença e ausência de aeração, e compostado**

Tabela 1	– Caracterização física, química e microbiana do lodo de esgoto utilizado para realização do experimento .....	61
Tabela 2	– Médias e significância dos contrastes para granulometria de lodo de esgoto cultivado com <i>P. purpureum</i> e <i>U. brizantha</i> , com ou sem aeração, e compostado .....	63
Tabela 3	– Médias e significância dos contrastes para densidade aparente (DAp) e de partículas (DP), porosidade total (PT) e capacidade de retenção de água (CRA) de lodo de esgoto cultivado com <i>P. purpureum</i> e <i>U. brizantha</i> , com ou sem aeração, e compostado ....	64
Tabela 4	– Médias e significância dos contrastes para pH em H <sub>2</sub> O e CaCl <sub>2</sub> 0,01 mol L <sup>-1</sup> , condutividade elétrica (CE), matéria orgânica (MO) e resíduo mineral total (RMT), insolúvel (RMI) e solúvel (RMS) de lodo de esgoto cultivado com <i>P. purpureum</i> e <i>U. brizantha</i> , com ou sem aeração, e compostado .....	65
Tabela 5	– Médias e significância dos contrastes para os teores de C orgânico (C org.) e N total (Nt), capacidade de troca catiônica (CTC) e das relações C/N e CTC/C de lodo de esgoto cultivado com <i>P. purpureum</i> e <i>U. brizantha</i> , com ou sem aeração, e compostado ....	67
Tabela 6	– Médias e significância dos contrastes para os teores de N amoniacal (NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> ), nitrato e nitrito (NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ), mineral (N min.), orgânico (N org.) e disponível (N disp.) de lodo de esgoto cultivado com <i>P. purpureum</i> e <i>U. brizantha</i> , com ou sem aeração, e compostado .....	68
Tabela 7	– Médias e significância dos contrastes para os teores de P, K, Ca, Mg, Fe e Na de lodo de esgoto cultivado com <i>P. purpureum</i> e <i>U. brizantha</i> , com ou sem aeração, e compostado .....	69
Tabela 8	– Médias e significância dos contrastes para os teores de Zn, Cu, Mn, Ni e Pb de lodo de esgoto cultivado com <i>P. purpureum</i> e <i>U. brizantha</i> , com ou sem aeração, e compostado .....	70
Tabela 9	– Médias e significância dos contrastes para respiração basal (RB) e acumulada (RAc), C da biomassa microbiana (CBM) e quocientes microbiano (qMIC) e metabólico (qCO <sub>2</sub> ) de lodo de esgoto cultivado com <i>P. purpureum</i> e <i>U. brizantha</i> , com ou sem aeração, e compostado .....	72

**CAPÍTULO 4 – Fitorremediação de HPAs em lodo de esgoto cultivado com *Pennisetum purpureum* e *Urochloa brizantha*, na presença e ausência de aeração, e compostado**

Tabela 1	– Teor de Hidrocarbonetos Policíclicos Aromáticos (HPAs), Ftalatos (FTs) e Cresóis (CRs) presente no lodo de esgoto utilizado para realização do experimento (mg kg <sup>-1</sup> , base seca) .....	82
Tabela 2	– Médias e significância dos contrastes para Fenantreno (mg kg <sup>-1</sup> , base seca) em lodo de esgoto cultivado com <i>P. purpureum</i> e <i>U. brizantha</i> com ou sem aeração .....	83
Tabela 3	– Médias e significância dos contrastes para Fluoranteno (mg kg <sup>-1</sup> , base seca) em lodo de esgoto cultivado com <i>P. purpureum</i> e <i>U. brizantha</i> com ou sem aeração .....	85
Tabela 4	– Médias e significância dos contrastes para Pireno (mg kg <sup>-1</sup> , base seca) em lodo de esgoto cultivado com <i>P. purpureum</i> e <i>U. brizantha</i> com ou sem aeração .....	86
Tabela 5	– Médias e significância dos contrastes para Benzo(a)antraceno (mg kg <sup>-1</sup> , base seca) em lodo de esgoto cultivado com <i>P. purpureum</i> e <i>U. brizantha</i> com ou sem aeração .....	88
Tabela 6	– Médias e significância dos contrastes para Criseno (mg kg <sup>-1</sup> , base seca) em lodo de esgoto cultivado com <i>P. purpureum</i> e <i>U. brizantha</i> com ou sem aeração .....	89
Tabela 7	– Médias e significância dos contrastes para Indeno[1,2,3-cd]pireno (mg kg <sup>-1</sup> , base seca) em lodo de esgoto cultivado com <i>P. purpureum</i> e <i>U. brizantha</i> com ou sem aeração .....	90
Tabela 8	– Médias e significância dos contrastes para o Σ6HPAs (mg kg <sup>-1</sup> , base seca) em lodo de esgoto cultivado com <i>P. purpureum</i> e <i>U. brizantha</i> com ou sem aeração .....	91
Tabela 9	– Médias e significância dos contrastes para os teores de HPAs (mg kg <sup>-1</sup> , bases seca) em lodo de esgoto cultivado com <i>P. purpureum</i> e <i>U. brizantha</i> , com ou sem aeração, e compostado .....	92

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANOVA	–	Análise de Variância
BaA	–	Banzo(a)antraceno
CAPP	–	Lodo com Aeração e Cultivado com <i>Pennisetum purpureum</i>
CASC	–	Lodo com Aeração e sem Cultivo
CAUB	–	Lodo com Aeração e Cultivado com <i>Urochloa brizantha</i>
CBM	–	Carbono da Biomassa Microbiana
CBs	–	Clorobenzenos
CC	–	Lodo com Cultivo
CE	–	Consutividade Elétrica
CFs	–	Clorofenóis
CG-EM	–	Cromatógrafo a Gás Acoplado a Espectrômetro de Massas
Comp.	–	Compostagem
CONAMA	–	Conselho Nacional do Meio Ambiente
COPASA	–	Companhia de Saneamento de Minas Gerais
CRA	–	Capacidade de Retenção de Água
CRI	–	Criseno
CRs	–	Cresóis
CTC	–	Capacidade de Troca Catiônica
DA	–	Dias de Aeração
DAP	–	Densidade Aparente
DBC	–	Delineamento Inteiramente Casualizado
DBP	–	Dibutil ftalato
DC	–	Dias de Cultivo
DEHP	–	Dietil hexil ftalato
DMP	–	Dimetil ftalato
DP	–	Densidade de Partícula
ESL-PBT	–	Extração Sólido-Líquido com Purificação em Baixa Temperatura
ETE	–	Estação de Tratamento de Esgoto
FEN	–	Fenantreno
FLUO	–	Fluoranteno
FM	–	Fração de Mineralização
FTs	–	Ftalatos
HPAs	–	Hidrocarbonetos Policíclicos Aromáticos
IARC	–	Agência Internacional de Pesquisa em Câncer (sigla em inglês)
IBGE	–	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IN	–	Instrução Normativa
IND	–	Indeno[1,2,3-cd]pireno
LEAs	–	Leiras Estáticas Aeradas
MAPA	–	Misnitério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento
MO	–	Matéria Orgânica
MSPA	–	Matéria Seca Parte Aérea
MSR	–	Matéria Seca Sistema Radicular
MST	–	Matéria Seca Total

- PA – Parte Aérea
- PCBs – Bifenilas Policloradas
- PIR – Pireno
- PNRS – Política Nacional de Resíduos Sólidos
- POPs – Poluentes Orgânicos Tóxicos
- PP – Lodo Cultivado com *Pennisetum purpureum*
- PT – Porosidade Total
- qCO<sub>2</sub> – Quociente metabólico
- qMIC – Quociente Microbiano
- RAc – Respiração Acumulada
- RB – Respiração Basal
- RMI – Resíduo Mineral Insolúvel
- RMS – Resíduo Mineral Solúvel
- RMT – Resíduo Mineral Total
- SAPP – Lodo sem Aeração e Cultivado com *Pennisetum purpureum*
- SASC – Lodo sem Aeração e sem Cultivo
- SAUB – Lodo sem Aeração e Cultivado com *Urochloa brizantha*
- SC – Lodo sem Cultivo
- Trat. – Tratamentos
- UB – Lodo Cultivado com *Urochloa brizantha*
- USEPA – Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (sigla em inglês)

## SUMÁRIO

<b>CAPÍTULO 1 – Revisão de literatura</b> .....	<b>18</b>
<b>1 Revisão de Literatura</b> .....	<b>18</b>
1.1 Lodo de Esgoto .....	18
1.2 Potencial Poluidor do Lodo de Esgoto .....	20
1.2.1 Organismos Patogênicos .....	20
1.2.2 Metais Pesados .....	20
1.2.3 Compostos Orgânicos Tóxicos .....	21
1.2.3.1 Hidrocarbonetos Policíclicos Aromáticos (HPAs) .....	21
1.3 Fitorremediação .....	22
1.4 Compostagem .....	23
1.4.1 Compostagem em Leiras Estáticas Aeradas .....	24
1.5 Caracterização do <i>Pennisetum purpureum</i> e da <i>Urochloa brizantha</i> .....	24
<b>2 Objetivos</b> .....	<b>25</b>
2.1 Objetivo Geral .....	25
2.2 Objetivos Específicos .....	25
<b>Referências</b> .....	<b>26</b>
<b>CAPÍTULO 2 – Atributos químicos e microbianos de lodo de esgoto cultivado com <i>Pennisetum purpureum</i> e <i>Urochloa brizantha</i> na presença e ausência de aeração</b> .....	<b>32</b>
<b>1 Introdução</b> .....	<b>32</b>
<b>2 Material e Métodos</b> .....	<b>33</b>
2.1 Local e Instalação do Experimento .....	33
2.2 Delineamento Experimental e Tratamentos .....	36
2.3 Coleta e Análises das Amostras .....	37
2.4 Análises Estatísticas .....	38
<b>3 Resultados e Discussão</b> .....	<b>39</b>
3.1 Produção de <i>P. purpureum</i> e <i>U. brizantha</i> cultivadas em lodo de esgoto .....	39
3.2 Atributos químicos de lodo de esgoto cultivado com <i>P. purpureum</i> e <i>U. brizantha</i> na presença ou ausência de aeração .....	42
3.3 Atributos microbianos de lodo de esgoto cultivado com <i>P. purpureum</i> e <i>U. brizantha</i> na presença ou ausência de aeração .....	51
<b>4 Conclusões</b> .....	<b>53</b>
<b>Referências</b> .....	<b>54</b>

<b>CAPÍTULO 3 – Caracterização de lodo de esgoto cultivado com <i>Pennisetum purpureum</i> e <i>Urochloa brizantha</i>, na presença e ausência de aeração, e compostado</b>	<b>57</b>
<b>1 Introdução</b>	<b>57</b>
<b>2 Material e Métodos</b>	<b>58</b>
2.1 Instalação, Delineamento e Tratamentos do Experimento	58
2.2 Coleta e Análises das Amostras	59
2.2.1 Caracterização Física	60
2.2.2 Caracterização Química	60
2.2.3 Caracterização Microbiana	61
2.3 Análises Estatísticas	62
<b>3 Resultados e Discussão</b>	<b>62</b>
3.1 Caracterização Física	62
3.2 Caracterização Química	65
3.3 Caracterização Microbiana	71
<b>4 Conclusões</b>	<b>73</b>
<b>Referências</b>	<b>73</b>

<b>CAPÍTULO 4 – Fitorremediação de HPAs de lodo de esgoto cultivado com <i>Pennisetum purpureum</i> e <i>Urochloa brizantha</i>, na presença e ausência de aeração, e compostado</b>	<b>77</b>
<b>1 Introdução</b>	<b>77</b>
<b>2 Material e Métodos</b>	<b>78</b>
2.1 Instalação, Delineamento e Tratamentos do Experimento	78
2.2 Coleta das Amostras	79
2.3 Extração dos HPAs e Condições Cromatográficas	80
2.4 Análises Estatísticas	81
<b>3 Resultados e Discussão</b>	<b>81</b>
3.1 Fenantreno (FEN)	83
3.2 Fluoranteno (FLUO)	84
3.3 Pireno (PIR)	86
3.4 Benzo(a)antraceno (BaA)	87
3.5 Criseno (CRI)	88
3.6 Indeno[1,2,3-cd]pireno (IND)	89
3.7 Somatório HPAs ( $\Sigma$ 6HPAs)	90
3.8 HPAs após a compostagem	91
<b>4 Conclusões</b>	<b>94</b>
<b>Referências</b>	<b>94</b>

# CAPÍTULO 1 – REVISÃO DE LITERATURA

## 1 Revisão de Literatura

### 1.1 Lodo de Esgoto

Segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), no início de 2018, o Brasil atingiu cerca de 208 milhões de habitantes e tem-se a projeção de que, em 2030, haverá cerca de 223 milhões de habitantes (IBGE, 2018). Concomitante ao crescimento populacional há o aumento da produção de lixo e resíduos sólidos, visto que no Brasil a produção *per capita* de lixo é de, aproximadamente, 1,04 kg dia<sup>-1</sup> (ABRELPE, 2016), tornando-se necessária a construção, ampliação e melhorias em aterros sanitários e incentivos à coleta seletiva.

Outro resíduo que aumentará sua produção, a partir do crescimento populacional, é o esgoto doméstico (TUCCI, 2008). Esse resíduo é proveniente do uso da água em atividades domésticas de higiene e alimentação, sofrendo alteração das suas características naturais, compondo-se, assim, de água de banho, de lavagem de roupas e louças, de peças sanitárias, restos de alimentos, detergentes e sabões, entre outros (FERREIRA; ANDREOLI, 1999).

O esgoto doméstico é composto por, aproximadamente, 99,9% de água e 0,1% de sólidos, responsável pela poluição dos cursos d'água quando aquele é disposto sem tratamento. O esgoto é caracterizado por mau cheiro e cor/turbidez dependente do seu grau de maturação, os sólidos são constituídos de 70% por matéria orgânica (carboidratos, proteínas, gorduras e outros) e de 30% de matéria inorgânica (areia e minerais dissolvidos) e organismos patogênicos ou não, como vírus, algas, bactérias e fungos (SPERLING, 2005).

O esgoto coletado é conduzido para a Estação de Tratamento de Esgoto (ETE), onde passa por diversos processos de tratamento, gerando diferentes tipos de resíduos sólidos, dentre eles, o lodo de esgoto, um material orgânico e rico em nutrientes, como nitrogênio e fósforo (HAANDEL; ALEM SOBRINHO, 2006). Pelo elevado volume gerado do lodo de esgoto, as ETES enfrentam um sério problema, que é a disposição ambientalmente correta desse resíduo, em que a sua gestão pode chegar a 60% dos custos de operação de uma ETE (GODOY, 2013).

As formas mais utilizadas de disposição do lodo são incineração, disposição oceânica, em aterros sanitários e em áreas agrícolas e florestais, como fertilizante e/ou condicionador do solo. A disposição oceânica apresenta um elevado risco ambiental pela contaminação das águas, sendo esta técnica de pequena utilização e proibida na Europa e nos EUA. A incineração é o processo que apresenta maior custo por tonelada de lodo (GODOY, 2013), além de ser um possível poluidor da atmosfera, pela formação de fuligem e compostos orgânicos, como as dioxinas

(USEPA, 1999). Quanto à disposição em aterros sanitários, a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), lei nº 12.305 de agosto de 2010 (BRASIL, 2012), restringe a destinação de resíduos sólidos para aterros sanitários que ainda sejam passíveis de reciclagem e/ou reutilização, como o lodo de esgoto (MORETTI *et al.*, 2015).

A utilização do lodo de esgoto na agricultura, como fertilizante orgânico e/ou condicionador do solo, é uma destinação nobre a este resíduo, por seu elevado teor de matéria orgânica e nutrientes, melhorando os atributos químicos e físicos do solo. Sampaio *et al.* (2012) estudando as propriedades físicas do solo de uma área degradada, após aplicação de doses de lodo de esgoto, constataram que, em 6 meses, houve aumento da porosidade total, além do aumento da capacidade de retenção de água do solo e, em 12 meses, há um aumento na agregação do solo e da microporosidade. De Maria *et al.* (2010) também observaram melhoria dos atributos físicos de um Latossolo Vermelho eutrófico degradado após a aplicação de lodo de esgoto, de acordo com a demanda nutricional por N da cultura do milho, por 6 anos consecutivos, verificando que, a partir do 3º ano de aplicação, houve redução da densidade aparente e microporosidade e aumento da macroporosidade. De Maria *et al.* (2007), neste mesmo estudo, constataram que houve uma maior estabilidade dos agregados do solo pela aplicação do lodo após o segundo cultivo do milho.

Em cultivo de girassol, adubado com diferentes estabilizações de lodo de esgoto (solarizado, compostado, vermicompostado e caleado) e com fertilizante químico, Nascimento *et al.* (2015) observaram maior produtividade do girassol em relação à adubação química e melhor fertilidade do solo adubado com o lodo de esgoto caleado. Da mesma forma, Zuba Junio *et al.* (2013) concluíram que a adubação do solo com composto de lodo de esgoto proporcionou maior produtividade e melhor nutrição da cultura do milho quando comparado com adubação química. Concomitantemente, Bueno *et al.* (2011) constataram que a aplicação de lodo de esgoto no solo, em doses que suprem a demanda de N por milho, por 7 anos consecutivos, proporcionou macro e micronutrientes disponíveis às plantas sem necessidade de complementação química.

Além desses estudos, encontram-se, na literatura, diversos trabalhos com produção de compostos orgânicos (CORRÊA *et al.*, 2007; YUAN *et al.*, 2016), vermicompostos (DORES-SILVA *et al.*, 2010; HE *et al.*, 2016) e substratos para produção de mudas (FAUSTINO *et al.*, 2005; SCHEER *et al.*, 2010; GOMES *et al.*, 2013; ROCHA *et al.*, 2013) a partir de lodo de esgoto, evidenciando a possibilidade de uso agrícola desse resíduo.

## 1.2 Potencial Poluidor do Lodo de Esgoto

Apesar de os benefícios apresentados do uso do lodo de esgoto na agricultura, o lodo, normalmente, apresenta em sua constituição contaminantes que podem restringir o seu uso em solos agrícolas e florestais. Esses contaminantes são os metais pesados, compostos orgânicos tóxicos e organismos patogênicos (NASCIMENTO *et al.*, 2014). Em virtude de sua presença no lodo, o Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) regulamentou, em agosto de 2006, a Resolução nº 375, que dispõe de critérios e procedimentos do uso do lodo de esgoto e seus derivados na agricultura, além de classificar e estabelecer limites máximos permitidos de metais pesados e organismos patogênicos no lodo e de compostos orgânicos tóxicos em solos condicionados com lodo de esgoto (BRASIL, 2006).

### 1.2.1 Organismos Patogênicos

Os organismos patogênicos englobam helmintos, vírus, protozoários e bactérias e a presença destes no lodo é preocupante por causarem maior risco à saúde pública. Neste caso, métodos como a compostagem e vermicompostagem são utilizadas para reduzir ou eliminarem os patógenos do lodo de esgoto (CORRÊA *et al.*, 2007; DORES-SILVA *et al.*, 2010). Esses autores reduziram de 93 a 100% do total de ovos de helmintos viáveis na vermicompostagem de lodo de esgoto e relataram que as minhocas apresentaram melhor desenvolvimento na presença de patógenos humanos, servindo-lhes de alimento. Consequentemente, o processo de vermicompostagem torna-se mais eficiente na eliminação de patógenos humanos presentes no substrato.

### 1.2.2 Metais Pesados

Os metais pesados são elementos potencialmente tóxicos que acarretam, em excesso, sérios danos ao ecossistema em geral (VILLANUEVA *et al.*, 2012). Sua presença e teor no lodo são dependentes do tipo de esgoto gerado, por exemplo, em cidades mais industrializadas, em que pode haver a presença de mais elementos e em maior teor. Os metais comumente encontrados no lodo de esgoto são o arsênio (As), cádmio (Cd), chumbo (Pb), cobre (Cu), cromo (Cr), níquel (Ni) e zinco (Zn), sendo o cobre e zinco micronutrientes essenciais às plantas por fazerem parte de diversos processos metabólicos; no entanto, em níveis elevados, podem tornar-se tóxicos (BETIOL; CAMARGO, 2006).

Os metais pesados adicionados ao solo pela aplicação de lodo de esgoto podem apresentar vários destinos. Um deles é ser absorvido pelas plantas, podendo lhes causar toxidez. Merlino *et al.* (2010) estudaram os teores de Ba, Cd, Cr e Pb nas folhas e grãos de milho cultivado em solo

adubado com lodo de esgoto, durante 11 anos, e obtiveram valores desses elementos abaixo do teor considerado tóxico à cultura do milho. Rangel *et al.* (2006) obtiveram resultados semelhantes em cultivo de milho adubado com lodo de esgoto com doses de N de até 8 vezes o recomendado para a cultura. Esses autores observaram incremento no teor de Zn e Mn nas folhas e grãos de milho, no entanto eles ainda permaneceram abaixo dos limites considerados tóxicos e para o consumo humano. Entretanto é ressaltado que ainda há a possibilidade de transferência desses metais para a cadeia alimentar.

Outro destino dos metais é a sua lixiviação para as camadas mais profundas do solo, lençóis freáticos e, posteriormente, cursos d'água (LINHARES *et al.*, 2009). Todavia a liberação dos metais, para o meio, é decorrente de vários fatores tanto do solo como do lodo aplicado. Esses fatores são pH, teor de matéria orgânica, argila e óxidos de Mn, Fe e Al, capacidade de troca catiônica (CTC) do solo, além da quantidade de lodo aplicada e a sua concentração em metais pesados (SOUZA *et al.*, 2012). Desses fatores, o que mais influencia a disponibilidade dos metais e, conseqüentemente, para as plantas, é o pH, porque há maior liberação dos metais no solo em meio ácido (CHAVES *et al.*, 2008).

### 1.2.3 Compostos Orgânicos Tóxicos

Os clorobenzenos, ésteres de ftalatos, fenóis clorados e não clorados, hidrocarbonetos aromáticos policíclicos (HPAs) e os poluentes orgânicos persistentes (POPs) são os grupos de compostos orgânicos tóxicos que devem ser monitorados de acordo com a resolução CONAMA nº 375 (BRASIL, 2006). Bittencourt *et al.* (2016), em revisão de literatura, concluíram que o caráter hidrofóbico e/ou hidrofílico dos compostos tóxicos determinam a sorção nas partículas do lodo de esgoto, no processo de tratamento da água residuária, ou seja, compostos hidrofóbicos apresentam maior potencial de sorção ao lodo, no entanto pode ocorrer de alguns compostos hidrofílicos serem adsorvidos no lodo por interações eletrostáticas.

Os compostos orgânicos listados pela resolução CONAMA nº 375 são compostos hidrofóbicos que apresentam baixa taxa de degradação no ambiente, bioacumuláveis e potencialmente carcinogênicos e mutagênicos (OLESZCZUK, 2006; ZENNEGG *et al.*, 2013; MENG *et al.*, 2014; BAO *et al.*, 2016; GANI; KAZMI, 2016; ZHANG *et al.*, 2010; ZHAO *et al.*, 2016).

#### 1.2.3.1 Hidrocarbonetos Policíclicos Aromáticos (HPAs)

Os hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (HPAs) são compostos aromáticos constituídos por átomos de C e H, arrançados em dois ou mais anéis benzênicos, sendo reconhecidos mais de

100 diferentes compostos. No entanto a Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (USEPA) estabelece como prioridade, para monitoramento ambiental, apenas 16 desses compostos, sendo eles: naftaleno, acenaftileno, acenafteno, fluoreno, fenantreno, antraceno, fluoranteno, pireno, benzo(a)antraceno, criseno, benzo(k)fluoranteno, benzo(b)fluoranteno, benzo(a)pireno, benzo(g,h,i)perileno, dibenzo(a,h)antraceno e indeno(1,2,3-cd)pireno (ZELINKOVA; WENZL, 2015).

Os HPAs ocorrem, naturalmente, na natureza a partir da espelidação de fumaça em erupções vulcânicas e queimadas de florestas e carvões minerais. De forma antrópica, os HPAs são adicionados na natureza a partir da queima de combustíveis, combustão incompleta de materiais, como madeira, plástico, entre outros e em processos industriais (CRISTALDI *et al.*, 2017).

Além disso, os HPAs são compostos de alta hidrofobicidade e baixa solubilidade, caracterizando-se como de baixa degradabilidade, alta persistência e ubiquidade no meio ambiente, podendo ser bioacumulado na cadeia trófica e causar sérios danos à saúde animal e humana, por ser mutagênico, carcinogênico e teratogênico (PARAÍBA *et al.*, 2011).

### 1.3 Fitorremediação

Os solos que se apresentam contaminados são de difícil remediação, pois os métodos utilizados são onerosos e, às vezes, ineficientes, como a retirada das camadas para descontaminação (processo *ex situ*) ou o uso de produtos químicos (processo *in situ*) (MARQUES *et al.*, 2011). Dessa forma, uma terceira opção para a recuperação do solo é o uso de plantas, que podem extrair, imobilizar ou volatilizar os poluentes, técnica essa denominada de fitorremediação. A fitorremediação é definida como um processo em que plantas sequestram, estabilizam ou imobilizam poluentes presentes no solo, em especial, os metais pesados (PILON-SMITS, 2005). Segundo Hooda (2007); Marques *et al.* (2011), a fitorremediação divide-se em:

- (i) Fitoextração: acumulação de metais nos órgãos das plantas.
- (ii) Fitovolatilização: “evaporação” de poluentes do solo.
- (iii) Fitoestabilização: redução da biodisponibilidade de metais em solos por plantas.
- (iv) Fitodegradação: degradação de contaminantes orgânicos promovido por enzimas de tecidos vegetais.
- (v) Rizofiltração: descontaminação de águas poluídas pelas raízes das plantas.

A fim de otimizar e aumentar a eficiência da fitorremediação, as plantas a serem utilizadas devem apresentar elevada biomassa, tanto da parte aérea quanto da raiz, rápido crescimento, fácil colheita e, principalmente, ser tolerante e acumuladora dos contaminantes em questão (HE *et al.*, 2005).

Lin *et al.* (2007) estudaram a absorção de HPAs em plantas de milho e observaram que as raízes e folhas absorveram HPAs de solução aquosa e da atmosfera, proporcionalmente ao nível de exposição. Asland *et al.* (2007) sugerem tiririca, abóbora e festuca como plantas com potencial fitoextrator de PCBs, enfatizando que a fitorremediação tornou-se mais eficiente em solo com menor concentração desse composto; para a abóbora, quanto maior a densidade de plantio maior será o fator de bioacumulação das bifenilas pelo encurtamento das plantas.

Guerin (2008) concluiu que a biodegradação de clorobenzeno (CB) e diclorobenzeno (DCB) em solo torna-se possível quando a microflora do solo é estimulada com aeração e nutrientes, visto que a decomposição desses compostos ocorreu com menos de 5% de perdas por volatilização e de 90% por biodegradação.

#### 1.4 Compostagem

Compostagem é definida como um processo acelerado de biooxidação aeróbica exotérmica de um substrato orgânico, propiciado por manter as condições adequadas à atividade microbiana, caracterizado pela liberação de CO<sub>2</sub>, água, mineralização de nutrientes, como nitrogênio e fósforo, redução do volume inicial do resíduo, estabilização da matéria orgânica pela formação de substâncias húmicas (húmus) e degradação de substâncias tóxicas e patógenos (FERNANDES; SILVA, 1999; ORRICO JUNIOR *et al.*, 2009).

O processo de compostagem se divide em etapa de biodegradação e de maturação do composto. No começo da etapa de biodegradação há maior atuação dos microrganismos mesófilos, caracterizado pela temperatura entre 25 e 40 °C, menor exigência por O<sub>2</sub> e menor atividade microbiana. À medida que a temperatura da pilha de compostagem é elevada, há redução da atuação dos microrganismos mesófilos e intensificação da atividade dos microrganismos termófilos, com temperatura ótima entre 50 e 55 °C e, conseqüentemente, maior exigência por O<sub>2</sub>, com intensa degradação da matéria orgânica dos resíduos. Com a diminuição da matéria orgânica no final desta etapa, há uma redução da temperatura e retorno dos microrganismos mesófilos, dando início à fase de maturação ou bioestabilização, com humificação da matéria orgânica decomposta, ou seja, polimerização de moléculas orgânicas (FERNANDES; SILVA, 1999).

A compostagem é influenciada pelo tipo de resíduo utilizado, microrganismos presentes no resíduo, relação C/N inicial, umidade, aeração, pH, temperatura, granulometria e dimensões das leiras. No entanto a aeração é o parâmetro que apresenta maior influência na atividade microbiana e, conseqüentemente, na eficiência da técnica. Esse fato ocorre porque em condições de anaerobiose, sem oxigênio, há a redução da atividade dos microrganismos, prolongando a

decomposição dos resíduos. Em condições em que há elevada aeração das pilhas de compostagem, pode ocorrer elevação dos custos do processo e diminuição de sua eficiência causada pela perda excessiva de calor, água e amônia (N) (VALENTE *et al.*, 2009; YAUN *et al.*, 2016).

Diante da importância da aeração na compostagem, diversos tipos de compostagem foram desenvolvidos. A mais utilizada é a compostagem em leiras de revolvimento – *windrow* (CORRÊA *et al.*, 2007; ORRICO JUNIOR *et al.*, 2009), compostagem em reatores biológicos – *in-vessel* (GAO *et al.*, 2010; GUO *et al.*, 2012; YUAN *et al.*, 2016) e a compostagem em leiras estáticas aeradas – *static piles* (PAIVA *et al.*, 2012; SHEN *et al.*, 2012; SANTOS *et al.*, 2016).

#### 1.4.1 Compostagem em Leiras Estáticas Aeradas

A compostagem em leiras estáticas aeradas (LEAs) é um processo em que o material a ser compostado é disposto sobre uma tubulação perfurada, a qual é conectada a um ventilador industrial, para que haja sucção ou injeção de ar na massa do resíduo, não havendo, assim, necessidade de revolvimento da pilha (FERNANDES; SILVA, 1999).

Trabalhos reportados na literatura apresentam elevada eficiência no uso desta técnica para a compostagem de lodo de esgoto, dentre eles Cai *et al.* (2007a) obtiveram melhor desempenho de sistemas de injeção intermitente de ar em pilhas aeradas de lodo de esgoto na remoção de HPAs. Em aeração contínua de lodo de esgoto, neste mesmo sistema, Cai *et al.* (2007b) obtiveram menor potencial de toxidez por metais pesados no composto produzido.

#### 1.5 Caracterização do *Pennisetum purpureum* e da *Urochloa brizantha*

O capim elefante cv. roxo (*Pennisetum purpureum* Schum.) é uma gramínea de origem africana que se adaptou bem às condições climáticas do Brasil. É uma monocotiledônea da família Poaceae que apresenta ciclo vegetativo perene, raiz fasciculada, altura em crescimento livre de 3,5 m e cresce de forma ereta. Pode ser utilizada como forragem, picada verde *in natura*, para pastejo e fenação, pois apresenta digestibilidade e palatabilidade satisfatória (SARAIVA; KONIG, 2013).

Além da utilização do *P. purpureum* em pastagens ou alimentação animal, ainda pode ser utilizada na produção de energia pela produção de briquetes com sua biomassa, pois se caracteriza pelo alto acúmulo de matéria em razão de sua eficiência na fixação de CO<sub>2</sub> da atmosfera (FLORES *et al.*, 2012). Isso é mostrado por Morais *et al.* (2009), que estudaram diferentes genótipos do capim para produção de bioenergia por combustão direta e constataram que a espécie é uma grande promissora na produção de bioenergia.

Vários estudos relatam o potencial fitorremediador do *P. purpureum* e da sua tolerância a solos contaminados, destacando sua alta capacidade em acumular biomassa (LOTFY; MOSTAFA, 2014), capacidade fitoextratora de zinco e cádmio (ZHANG *et al.*, 2010), tolerância ao estresse por cobre (LIU *et al.*, 2009) e alta acumulação de céσιο na biomassa (KANG *et al.*, 2012).

As gramíneas do gênero *Urochloa* apresentam distribuição em toda a zona tropical do mundo, ocorrendo, predominantemente, nas savanas africanas de onde foram originadas (CEZÁRIO *et al.*, 2015). A *Urochloa brizantha* cv. Marandu é uma gramínea da família Poaceae com ciclo fotossintético do tipo C<sub>4</sub> com crescimento cespitoso, produzindo afilhos eretos e rizomas curtos e encurvados (CAMARÃO; SOUZA FILHO, 2005; SILVA *et al.*, 2005). As touceiras da gramínea podem chegar a 1,0 m de diâmetro e altura de até 1,5 m (OURIVES *et al.*, 2010).

Esta Poaceae apresenta uma boa resistência à seca (BENETT *et al.*, 2008), em razão do sistema radicular da planta que, em condições adequadas, pode chegar a 1,95 m de profundidade, possibilitando também absorção de nutrientes em camadas mais profundas no perfil do solo (CAMARÃO; SOUZA FILHO, 2005). O braquiarião ou brizantão, nomes populares, também apresentam resistência ao frio, às queimadas, ao sombreamento e ao ataque das ciguarrinhas-das-pastagens, boa produção de matéria verde, sementes viáveis e alto valor forrageiro, no entanto não toleram solos encharcados (SILVA *et al.*, 2005; BENETT *et al.*, 2008).

Braga *et al.* (2016) estudaram o potencial fitorremediador do herbicida picloran por *U. brizantha* em diferentes pH de solo e relataram que o capim pode ser utilizado na remediação de solos contaminados com o herbicida, sendo mais eficiente em solos que apresentam baixo pH, evitando-se também a sua lixiviação para as camadas mais profundas no solo por ocorrer sorção nas partículas do solo.

## 2 Objetivos

### 2.1 Objetivo geral

- Avaliar a concentração de HPAs em lodo de esgoto cultivado com *Pennisetum purpureum* e *Urochloa brizantha* na presença e ausência de aeração e, posteriormente, compostado.

### 2.2 Objetivos Específicos

- Avaliar a produção da gramínea *Pennisetum purpureum* e *Urochloa brizantha* cultivadas em lodo de esgoto.

- Avaliar a eficiência do cultivo de gramíneas em lodo de esgoto na decomposição da matéria orgânica e dos HPAs.
- Avaliar qual espécie de gramínea é mais eficiente na decomposição da matéria orgânica e dos HPAs.
- Avaliar a decomposição da matéria orgânica e dos HPAs na presença de aeração do lodo de esgoto.
- Avaliar as características agrônômicas do lodo de esgoto após período de cultivo das gramíneas e da compostagem.

## Referências

- ABRELPE. Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil – 2016. Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais, 2016. Disponível em: <<http://www.abrelpe.org.br/Panorama/panorama2016.pdf>>. Acesso em: 02 Fev. 2018.
- ASLAND, M. L. W.; ZEEB, B. A.; RUTTER, A.; REIMER, K. J. In situ phytoremediation of polychlorinated biphenyl (PCB) contaminated soil. *Science of the Total Environment*, v.374, p.1-12, 2007.
- BAO, Z.; CHEN, X.; ZHAO, J.; LIN, F.; LI, J.; ZHANG, Y. Exploring the relationship between the EPS property and the toxicity of sludge for treating 4-chlorophenol synthetic wastewater in a sequencing batch reactor. *International Biodeterioration and Biodegradation*, v.110, p.24-31, 2016.
- BENETT, C. G. S.; YAMASHITA, O. M.; KOGA, P. S.; SILVA, K. S. Resposta da *Brachiaria brizantha* cv. Marandu a diferentes tipos de adubação. *Revista de Ciências Agro-Ambientais*, v.6, p.13-20, 2008.
- BETTIOL, W.; CAMARGO, O. A., A disposição de lodo de esgoto em solo agrícola. In: BETTIOL, W.; CAMARGO, O. A., Lodo de Esgoto: Impactos Ambientais na Agricultura. Jaguariuna: Embrapa Meio Ambiente, 2006. 349p.
- BITTENCOURT, S.; AISSÉ, M. M.; SERRAT, B. M.; AZEVEDO, J. C. R. Sorção de poluentes orgânicos emergentes em lodo de esgoto. *Revista Engenharia Sanitária e Ambiental*, v.21, p.43-53, 2016.
- BRAGA, R. R.; SANTOS, J. B.; ZANUNCIO, J. C.; BIBIANO, C. S.; FERREIRA, E. A.; OLIVEIRA, M. C.; SILVA, D. V.; SERRÃO, J. E. Effect of growing *Brachiria brizantha* on phytoremediation of picloram under different pH environments. *Ecological Engineering*, v.94, p.102-106, 2016.
- BRASIL. Conselho Nacional de Meio Ambiente - CONAMA. Resolução nº 375, de 29 de Agosto de 2006. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 30 de ago. de 2006. Seção 1. p.141-146. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/legiano1.cfm?ano=todos&codlegitipo=3>>. Acesso em: 27 jul. 2016.
- BRASIL. Ministério da Casa Civil. Lei nº 12.305, de 02 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. 2.ed. Brasília, 2012. Disponível em: <[fld.com.br/catadores/pdf/politica\\_residuos\\_solidos.pdf](http://www.fld.com.br/catadores/pdf/politica_residuos_solidos.pdf)>. Acesso em: 27 jul. 2016.
- BUENO, J. R. P.; BERTON, R. S.; SILVEIRA, P. D.; CHIBA, M. K.; ANDRADE, C. A.; MARIA, I. C. Chemical and microbiological attributes of an oxisol treated with successive applications of sewage sludge. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.35, p.1461-1470, 2011.

- CAI, Q. Y.; MO, C. H.; WU, Q. T.; ZENG, Q. Y.; KATSOYIANNIS, A.; FÉRARD, J. F. Bioremediation of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs)-contaminated sewage sludge by different composting processes. *Journal of Hazardous Materials*, v.142, p.535-542, 2007a.
- CAI, Q. Y.; MO, C. H.; WU, Q. T.; ZENG, Q. Y.; KATSOYIANNIS, A. Concentration and speciation of heavy metals in six different sewage sludge-composts. *Journal of Hazardous Materials*, v.147, p.1063-1072, 2007b.
- CAMARÃO, A. P.; SOUZA FILHO, A. P. S. Limitações e potencialidades do capim-braquiarião (*Brachiaria brizantha* cv. Marandu (A. Rich) Stapf.) para a Amazônia. Belém-PA: EMBRAPA Documentos 211, 2005. 52p.
- CEZÁRIO, A. S.; RIBEIRO, K. G.; SANTOS, S. A.; VALADARES FILHO, S. C.; PEREIRA, O. G. Silages of *Brachiaria brizantha* cv. Marandu harvested at two regrowth ages: Microbial inoculant responses in silage fermentation, ruminant digestion and beef cattle performance. *Animal Feed Science and Technology*, v.208, p.33-43, 2015.
- CHAVES, L. H. G.; SOUZA, R. S.; TITO, G. A. Adsorção de zinco em argissolo do estado da Paraíba: efeito do pH. *Revista Ciência Agronômica*, v.39, p.511-516, 2008.
- CORRÊA, R. S.; FONSECA, Y. M. F.; CORRÊA, A. S. Produção de biossólido agrícola por meio de compostagem e vermicompostagem de lodo de esgoto. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.11, p.420-426, 2007.
- CRISTALDI, A.; CONTI, G. O.; JHO, E. H.; ZUCCARELLO, P.; GRASSO, A.; COPAT, C.; FERRANTE, M. Phytoremediation of contaminated soils by heavy metals and PAHs. A brief review. *Environmental Technology & Innovation*, v.8, p.309-326, 2017.
- DE MARIA, I. C.; CHIBA, M. K.; COSTA, A.; BERTON, R. S. Sewage sludge application to agricultural land as soil physical conditioner. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.34, p.967-974, 2010.
- DE MARIA, I. C.; KOCSSI, M. A.; DECHEN, S. C. F. Agregação do solo em área que recebeu lodo de esgoto. *Bragantia*, v.66, p.291-298, 2007.
- DORES-SILVA, P. R.; LANDGRAF, M. D.; ZOZOLOTTO, T. C.; REZENDE, M. O. O. Estudo preliminar do vermicomposto produzido a partir de lodo de esgoto doméstico e solo. *Eclética Química*, v.35, p.61-67, 2010.
- FAUSTINO, R.; KATO, M. T.; FLORÊNCIO, L.; GAVAZZA, S. Lodo de esgoto como substrato para produção de mudas de *Senna siamea* Lam. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.9, supl., p.278-282, 2005.
- FERNANDES, F.; SILVA, S. M. C. P. Manual Prático para a Compostagem de Biossólidos. PROSAB – Programa de Pesquisa em Saneamento Básico: Londrina, 1999.
- FERREIRA, A. C.; ANDREOLI, C. V. Produção e características dos biossólido. In: LARA, A. I.; FERREIRA, A. C.; ANDREOLI, C. V.; PERORINI, E. S.; IHLENFELD, R. G. K. *Uso e Manejo do Lodo de Esgoto na Agricultura*. Curitiba, 1999.
- FLORES, R. A.; URQUIAGA, S.; ALVES, B. J. R.; COLLIER, L. S.; BODDEY, R. M. Yield and quality of elephant grass biomass produced in the cerrados region for bioenergy. *Engenharia Agrícola*, v.32, p.831-839, 2012.
- GANI, K. M.; KAZMI, A. A. Evaluation of three full scale sewage treatment plants for occurrence and removal efficacy of priority phthalates. *Journal of Environment Chemical Engineering*, v.4, p.2628-2636, 2016.
- GAO, M.; LI, B.; YU, A.; LIANG, F.; YANG, L.; SUN, Y. The effect of aeration rate on forced-aeration composting of chicken manure and sawdust. *Bioresource Technology*, v.101, p.1899-1903, 2010.

GODOY, L. C. A logística na destinação do lodo de esgoto. Revista Científica On-line: Tecnologia, Gestão e Humanismo, v.2, 2013.

GOMES, D. R.; CALDEIRA, M. V. W.; DELARMELINA, W. M.; GONÇALVES, E. O.; TRAZZI, P. A. Lodo de esgoto como substrato na produção de mudas de *Tectona grandis* L. Revista Cerne, v.19, p.123-131, 2013.

GUERIN, T. F. Ex-situ bioremediation of chlorobenzenes in soil. Journal of Hazardous Materials, v.154, p.9-20, 2008.

GUO, R.; LI, G.; JIANG, T.; SCHUCHARDT, F.; CHEN, T.; ZHAO, Y.; SHEN, Y. Effect of aeration rate, C/N ratio and moisture content on the stability. Bioresource Technology, v.112, p.171-178, 2012.

HAANDEL, A.; ALEM SOBRINHO, P. Produção, Composição e Constituição de Lodo de Esgoto. In: ANDREOLI, C. V. Usos Alternativos de Lodos de Estações de Tratamento de Água e Estações de Tratamento de Esgoto. Rio de Janeiro: ABES, 2006.

HE, X.; ZHANG, Y.; SHEN, M.; ZENG, G.; ZHOU, M.; LI, M. Effect of vermicomposting on concentration and speciation of heavy metals in sewage sludge with additive materials. Bioresource Technology, v.218, p.867-873, 2016.

HE, Z. L.; YANG, X. E.; STOFFELLA, P. J. Trace elements on agroecosystems and impacts on the environment. Journal of Trace Elements in Medicine and Biology, v.19, p.125-140, 2005.

HOODA, V. Phytoremediation of toxic metals from soil and wastewater. Journal of Environmental Biology, v.28, p.367-376, 2007.

IBGE. Pesquisa Nacional de Saneamento Básico – 2008. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2008. Disponível em: <<https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv45351.pdf>>. Acesso em: 02 Fev. 2018.

IBGE. Projeção da população do Brasil e das Unidades da Federação. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2018. Disponível em: <<https://ww2.ibge.gov.br/apps/populacao/projecao/index.html>>. Acesso em: 02 Fev. 2018.

KANG, D. J.; SEO, Y. J.; SAITO, T.; SUZUKI, H.; ISHII, Y. Uptake and translocation of cesium-133 in napiergrass (*Pennisetum purpureum* Schum.) under hydroponic conditions. Ecotoxicology and Environmental Safety, v.82, p.122-126, 2012.

LIN, H.; TAO, S.; ZUO, Q.; COVENEY, R. M. Uptake of polycyclic aromatic hydrocarbons by maize plants. Environmental Pollution, v.148, p.614-619, 2007.

LINHARES, L. A.; EGREJA FILHO, F. B.; OLIVEIRA, C. V.; DE BELLIS, V. M. Adsorção de cádmio e chumbo em solos tropicais altamente intemperizados. Pesquisa Agropecuária Brasileira, v.44, p.291-299, 2009.

LIU, X.; SHEN, Y.; LOU, L.; DING, C.; CAI, Q. Copper tolerance of the biomass crops Elephant grass (*Pennisetum purpureum* Schumach), Vetiver grass (*Vetiveria zizanioides*) and the upland reed (*Phragmites australis*) in soil culture. Biotechnology Advances, v.27, p.633-640, 2009.

LOTFY, S. M.; MOSTAFA, A. Z. Phytoremediation of contaminated soil with cobalt and chromium. Journal of Geochemical Exploration, v.144, p.367-373, 2014.

MARQUES, M.; AGUIAR, C. R. C.; SILVA, J. J. L. S. Desafios técnicos e barreiras sociais, econômicas e regulatórias na fitorremediação de solos contaminados. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v.35, p.1-11, 2011.

MENG, X. Z.; WANG, Y.; XIANG, N.; CHEN, L.; LIU, Z.; WU, B.; DAI, X.; ZHANG, Y. H.; XIE, Z.; EBINGHAUS, R. Flow of sewage sludge-borne phthalate esters (PAEs) from human release to human intake:

Implication for risk assessment of sludge applied to soil. *Science of the Total Environment*, v.476-477, p.242-249, 2014.

MERLINO, L. C. S.; MELO, W. J.; MACEDO, F. G.; GUEDES, A. C. T. P.; RIBEIRO, M. H.; MELO, V. P.; MELO, G. M. P. Bário, cádmio, cromo e chumbo em plantas de milho e em Latossolo após onze aplicações anuais de lodo de esgoto. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.34, p.2031-2039, 2010.

MORAIS, R. F.; SOUZA, B. J.; LEITE, J. M.; SOARES, L. H. B.; ALVES, B. J. R.; BODDEY, R. M.; URQUIAGA, S. Elephant grass genotypes for bioenergy production by direct biomass combustion. *Pesquisa agropecuária brasileira*, v.44, p.133-140, 2009.

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

NASCIMENTO, A. L.; SAMPAIO, R. A.; FERNANDES, L. A.; ZUBA JUNIO, G. R.; CARNEIRO, J. P.; RODRIGUES, M. N.; ALBUQUERQUE, H. C. Yield and nutrition of sunflower fertilized with sewage sludge stabilized by different processes. *Revista Ceres*, v.60, p.683-689, 2015.

NASCIMENTO, A. L.; SAMPAIO, R. A.; ZUBA JUNIO, G. R.; CARNEIRO, J. P.; FERNANDES, L. A.; RODRIGUES, M. N. Teores de metal pesado no solo e em girassol adubado com lodo de esgoto. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.18, p.294-300, 2014.

OLESZCZUK, P. Persistence of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in sewage sludge-amended soil. *Chemosphere*, v.65, p.1616-1626, 2006.

ORRICO JÚNIOR, M. A. P.; ORRICO, A. C. A.; LUCAS JÚNIOR, J. Compostagem da fração sólida da água residuária de suinocultura. *Engenharia Agrícola*, v.29, p.483-491, 2009.

OURIVES, O. E. A.; SOUZA, G. M.; TIRITAN, C. S.; SANTOS, D. H. Fertilizante orgânico como fonte de fósforo no cultivo inicial de *Brachiaria brizantha* cv. Marandú. *Pesquisa Agropecuária Tropical*, v.40, p.126-132, 2010.

PAIVA, E. C. R.; MATOS, A. T.; AZEVEDO, M. A.; BARROS, R. T. P.; COSTA, T. D. R. Avaliação da compostagem de carcaças de frango pelos métodos da composteira e de leiras estáticas aeradas. *Engenharia Agrícola*, v.32, p.961-970, 2012.

PARAÍBA, L. C.; QUEIROZ, S. C. N.; SOUZA, D. R. C.; SAITO, M. L. Risk simulation of soil contamination by polycyclic aromatic hydrocarbons from sewage sludge used as fertilizers. *Journal of the Brazilian Chemical Society*, v.22, p.1156-1163, 2011.

PILON-SMITS, E. Phytoremediation. *Annual Review of Plant Biology*. v.56, p.15-39, ISSN: 1543-5008, 2005. Disponível em: <<http://www.annualreviews.org/doi/pdf/10.1146/annurev.arplant.56.032604.14421>>. Acesso em: 27 jul. 2016.

RANGEL, O. J. P.; SILVA, C. A.; BETTIOL, W.; DYNIA, J. F. Efeito de aplicações de lodos de esgoto sobre os teores de metais pesados em folhas e grãos de milho. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.30, p.583-594, 2006.

ROCHA, J. H. T.; BACKES, C.; DIOGO, F. A.; PASCOTTO, C. B.; BORELLI, K. Composto de lodo de esgoto como substrato para mudas de eucalipto. *Pesquisa Florestal Brasileira*, v.33, p.27,36, 2013.

SAMPAIO, T. F.; GUERRINI, I. A.; BACKES, C.; HELIODORO, J. C. A.; RONCHI, H. S.; TANGANELLI, K. M.; CARVALHO, N. C.; OLIVEIRA, F. C. Lodo de esgoto na recuperação de áreas degradadas: Efeito nas características físicas do solo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 36, p.1637-1645, 2012.

- SANTOS, A.; BUSTAMANTE, M. A.; TORTOSA, G.; MORAL, R.; BERNAL, M. P. Gaseous emissions and process development during composting of pig slurry: The influence of the proportion of control gin waste. *Journal of Cleaner Production*, v.112, p.81-90, 2016.
- SARAIVA, V. M.; KONIG, A. Produtividade do capim-elefante-roxo irrigado com efluente doméstico tratado no semiárido potiguar e suas utilidades. *HOLOS*, v.1, p.28-46, 2013.
- SCHEER, M. B.; CARNEIRO, C.; SANTOS, K. G. Substratos à base de lodo de esgoto compostado na produção de mudas de *Parapiptadenia rigida* (Benth.) Brenan. *Scientia Forestalis*, v.38, p.637-644, 2010.
- SHEN, Y.; CHEN, T. B.; GAO, D.; ZHENG, G.; LIU, H.; YANG, Q. Online monitoring of volatile organic compound production and emission during sewage sludge composting. *Bioresource Technology*, v.123, p.463-470, 2012.
- SILVA, T. O.; SANTOS, A. R.; SANTOS, J. H. S.; SILVA, J. O. Produção do capim marandu submetido a doses de nitrogênio em um Latossolo Amarelo. *Agropecuária Técnica*, v.26, p.29-35, 2005.
- SOUZA, R. A. S.; BISSANI, C. A.; TEDESCO, M. J.; FONTOURA, R. C. Extração sequencial de zinco e cobre em solos tratados com lodo de esgoto composto de lixo. *Química Nova*, v.35, p.308-314, 2012.
- SPERLING, M. Características das águas residuárias. In: SPERLING, M. *Introdução à Qualidade das Águas e ao Tratamento de Esgoto*. Belo Horizonte: Editora UFMG. 2005. 452p.
- TUCCI, C. E. M. Águas urbanas. *Estudos Avançados*, v.22, n.63, 2008.
- USEPA – United States Environmental Protection Agency. USEPA-530. *Biosolids Generation, Use, and Disposal in The United States*. 1999.
- VALENTE, B. S.; XAVIER, E. G.; MORSELLI, T. B. G. A.; JAHNKE, D. S.; BRUM JÚNIOR, B. S.; CABRERA, B. R.; MORAES, P. O.; LOPES, D. C. N. Fatores que afetam o desenvolvimento da compostagem de resíduos orgânicos. *Revista Archivos de Zootecnia*, v.58, p.59-85, 2009.
- VILLANUEVA, F. C. A.; BOARETTO, A. E.; FIRME, L. P.; MURAOKA, T.; NASCIMENTO FILHO, V. F.; ABREU JUNIOR, C. H. Mudanças químicas e fitodisponibilidade de zinco estimada por método isotópico, em solo tratado com lodo de esgoto. *Química Nova*, v.35, p.1348-1354, 2012.
- YUAN, J.; CHADWICK, D.; ZHANG, D.; LI, G.; CHEN, S.; LUO, W.; DU, L.; HE, S.; PENG, S. Effects of aeration rate on maturity and gaseous emissions during sewage sludge composting. *Waste Management*, v.56, p.403-410. 2016.
- ZELINKOVA, Z.; WENZL, T. The Occurrence of 16 EPA PAHs in Food – A Review. *Polycyclic Aromatic Compounds*, v.35, p.248-284, 2015.
- ZENNEGG, M.; MUNOZ, M.; SCHMID, P.; GERECKE, A. C. Temporal trends of persistent organic pollutants in digested sewage sludge (1993-2012). *Environment International*, v.60, p.202-208, 2013.
- ZHANG, X.; XIA, H.; LI, H.; ZHUANG, P. GAO, B. Potencial of four forage grasses in remediation of Cd and Zn contaminated soils. *Bioresource Technology*, v.101, p.2063-2066, 2010.
- ZHAO, J.; CHEN, X.; BAO, L.; BAO, Z.; HE, Y.; ZHANG, Y.; LI, J. Correlation between microbial diversity and toxicity of sludge treating synthetic wastewater containing 4-chlorophenol in sequencing batch reactors. *Chemosphere*, v.153, p.138-145, 2016.

ZUBA JUNIO, G. R.; SAMPAIO, R. A.; NASCIMENTO, A. L.; CARNEIRO, J. P.; SANTOS, L. D. T.; FERNANDES, L. A. Produtividade de milho adubado com composto de lodo de esgoto e fosfato natural de Gafsa. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.17, p.706-712, 2013.

## CAPÍTULO 2 – ATRIBUTOS QUÍMICOS E MICROBIANOS DE LODO DE ESGOTO CULTIVADO COM *Pennisetum purpureum* E *Urochloa brizantha* NA PRESENÇA E AUSÊNCIA DE AERAÇÃO

**Resumo:** O objetivo deste trabalho foi avaliar a produção de *Urochloa brizantha* e *Pennisetum purpureum* cultivadas em lodo de esgoto, na presença e ausência de aeração, bem como avaliar os atributos químicos e microbianos do lodo de esgoto ao final do cultivo. O estudo foi conduzido em área experimental do ICA/UFMG, no delineamento em blocos ao acaso, com quatro repetições e esquema fatorial 2x2+2. Os fatores consistiram em cultivo de *P. purpureum* e *U. brizantha* (densidade de plantio de 50 plantas/m<sup>2</sup>) em lodo de esgoto, com aeração intermitente (30 min on/off) por 60 dias (vazão de 0,14 m<sup>3</sup> min<sup>-1</sup> m<sup>-3</sup>) ou sem aeração. Os tratamentos adicionais foram sem cultivo com ou sem aeração. Após 90 dias de cultivo das gramíneas, quatro plantas de cada parcela foram retiradas para estimativa de matéria seca da parte aérea, raiz e teor de nutrientes. Posteriormente, o lodo de esgoto foi coletado em camadas e levado para laboratório, onde foram realizadas análises químicas e microbianas. Os dados obtidos foram submetidos à análise de variância com desdobramento dos tratamentos em contrastes ortogonais a 5% de probabilidade pelo teste F. Não houve diferença significativa entre as gramíneas para os atributos de matéria seca. Ambas as gramíneas apresentaram, no geral, teor adequado de nutrientes. Os tratamentos com cultivo das gramíneas apresentaram maior estabilidade e maturação da matéria orgânica do lodo de esgoto. Na ausência de cultivo e na presença da aeração obteve-se menor valor de qCO<sub>2</sub>, indicando menor estresse à comunidade microbiana. No final do cultivo de *U. brizantha* com aeração, obteve-se menor relação C/N e maior relação CTC/C no lodo de esgoto, indicando maior estabilidade do que quando cultivado com *P. purpureum*. O cultivo de *P. purpureum* sem aeração proporcionou maior estabilização do lodo de esgoto do que quando foi aerado.

**Palavras-chave:** adubo orgânico, biodegradação, bio sólido, reciclagem de resíduos.

### 1 Introdução

Com o avanço da crise hídrica, provocada pela escassez e má distribuição de chuvas e uso inadequado da água, há uma pressão da sociedade e, principalmente, dos órgãos ambientais, no uso de técnicas que visam à despoluição de rios e tratamento de águas residuárias e esgotos. Contudo o tratamento do esgoto gera um subproduto orgânico denominado de lodo de esgoto,

que, quando disposto de forma incorreta, acarreta problemas ao meio ambiente (MERLINO *et al.*, 2010).

Portanto tem-se a necessidade de uma destinação correta do lodo de esgoto. Uma alternativa adequada e ambientalmente correta é a sua utilização em áreas agrícolas e florestais, como condicionador do solo e/ou adubo orgânico, visto que o lodo apresenta consideráveis teores de macro e micronutrientes, além de alta concentração de matéria orgânica. Porém a matéria orgânica do lodo de esgoto não é estabilizada, necessitando de algum processo para sua maturação. Além disso, o lodo pode apresentar em sua constituição alguns contaminantes, como metais pesados (OLIVEIRA *et al.*, 2018) e compostos orgânicos persistentes (ALVARENGA *et al.*, 2017).

O cultivo de plantas em lodo de esgoto pode proporcionar rápida estabilização da matéria orgânica desse resíduo. O *Pennisetum purpureum* e a *Urochloa brizantha* apresentam sistema radicular fasciculado, com grande área superficial e eficientes na fixação de CO<sub>2</sub> da atmosfera (SILVA *et al.*, 2005; FLORES *et al.*, 2012). Além disso, alguns trabalhos reportam seu elevado potencial para fitorremediação. O *P. purpureum* apresenta capacidade fitoextratora de zinco e cádmio (ZHANG *et al.*, 2010) e alta acumulação de céσιο na biomassa (KANG *et al.*, 2012). A *U. brizantha* apresenta potencial fitorremediador do herbicida picloran, sendo mais eficiente em solos com baixo pH (BRAGA *et al.* 2016).

O objetivo deste trabalho foi avaliar a produção de *U. brizantha* e *P. purpureum* cultivadas em lodo de esgoto, na presença ou ausência de aeração, bem como os atributos químicos e microbianos do lodo de esgoto ao final do cultivo.

## **2 Material e Métodos**

### **2.1 Local e Instalação do Experimento**

O experimento foi conduzido na fazenda experimental Professor Hamilton de Abreu Navarro do Instituto de Ciências Agrárias (ICA) da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), campus regional de Montes Claros, latitude 16°51'38'' S e longitude 44°55'00'' W, com 652 m de altitude, no período de 02 de novembro de 2016 a 31 de janeiro de 2017. Conforme a classificação de Köppen, o clima predominante na região é o Aw – tropical de savana, com verão chuvoso e inverno seco. Os dados meteorológicos do período do experimento são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Dados meteorológicos durante a realização do experimento (nov./2016 – jan./2017)

Mês	Precipitação -- mm --	Temp. Máx. ----- °C -----	Temp. Mín. ----- °C -----	Temp. Méd.	Insolação -- horas --
Nov/2016	105,1	30,8	20,9	25,8	180,6
Dez/2016	81,7	31,7	20,5	26,1	215,6
Jan/2017	66,1	34,0	20,8	27,4	279,2

Fonte: INMET, 2017.

As parcelas foram construídas de madeirite nas dimensões de 0,70 x 0,70 x 0,55 m e recobertas com plástico, com o intuito de evitar perdas de lodo e água. As parcelas foram preenchidas com lodo de esgoto até a altura de 0,50 m, assim, cada parcela foi preenchida com 0,25 m<sup>3</sup> de lodo e 0,50 m<sup>2</sup> de área de plantio.

Figura 1 – Vista dos caixotes de madeirite recoberto com plástico (esquerda). Vista dos caixotes preenchidos com lodo de esgoto (direita).



Fonte: Do autor, 2017.

O sistema de aeração foi formado por motor com 1,5 cv de potência, rotação de 1.150 rpm e um ventilador tipo sirocco, com vazão de 2,7 m<sup>3</sup> min<sup>-1</sup>. A saída do ventilador foi adaptada para diâmetro de 50 mm, o qual acoplou-se a um tubo de PVC de 50 mm, ramificado em tubos de PVC de 25 mm, em forma de garfo, nas dimensões de 0,50 x 0,35 m com 12 furos de 10 mm de diâmetro espaçados de 0,08 m, dispostos no fundo das parcelas experimentais e cobertos por uma tela de sombrite para evitar o entupimento dos furos. As unidades experimentais com aeração receberam, de modo intermitente (30 min on/off), vazão de ar de 0,14 m<sup>3</sup> min<sup>-1</sup> m<sup>-3</sup> de lodo de esgoto. Essa vazão foi regulada com o auxílio de um anemômetro e um registro de esfera na entrada de ar das unidades experimentais.

Figura 2 – Tubo de PVC perfurado em forma de garfo (esquerda). Ventilador tipo sirocco (direita).



Fonte: Do autor, 2017.

O lodo de esgoto foi coletado no mês de julho de 2016 (Precipitação: 0mm; Temperatura Máxima: 29,7 °C; Temperatura Mínima: 15,7 °C (INMET, 2017)), na Estação de Tratamento de Esgoto de Montes Claros (ETE Vieira), operada pela COPASA. Na referida estação há reatores em que é realizado o tratamento biológico anaeróbico do esgoto. A seguir, a água residuária desses reatores segue para filtros biológicos aeróbios. Na etapa final do tratamento de esgoto ocorre o processo de decantação, com a água podendo ser lançada ao curso d'água. O lodo de esgoto, produzido nos reatores anaeróbios, passa pelos processos de centrifugação e secagem térmica a 350 °C, por 30 minutos. A produção diária da ETE Vieira é de, aproximadamente, 10 m<sup>3</sup> por dia de lodo de esgoto seco (6-8% de umidade).

Como a composição do lodo de esgoto pode variar em função de diferentes fatores, foram feitas análises de caracterização do resíduo antes da montagem do experimento, apresentados na Tabela 2. Foram determinados: pH em H<sub>2</sub>O e CaCl<sub>2</sub> 0,01 mol L<sup>-1</sup>, matéria orgânica total, resíduos mineral total, solúvel e insolúvel, C orgânico, capacidade de troca catiônica (CTC), N total e cálculos de C/N, CTC/C, segundo Alcarde (2009); teores totais de nutrientes e metais pesados, segundo Malavolta (2006); atividade microbiana pelo método da taxa respirométrica (EMBRAPA, 2007a), o carbono da biomassa microbiana (CBM) (EMBRAPA, 2007b), com valor de K<sub>c</sub> proposto por Sparling e West (1988) e, ainda, foram calculados os quocientes metabólicos e microbianos (EMBRAPA, 2007a).

Tabela 2 – Caracterização química e microbiana do lodo de esgoto utilizado para realização do experimento

Atributo	Resultado	Atributo	Resultado
pH H <sub>2</sub> O	6,03	Mg (g kg <sup>-1</sup> )	1,61
pH CaCl <sub>2</sub>	5,91	Fe (mg kg <sup>-1</sup> )	3.074,75
MO (g kg <sup>-1</sup> )	572,30	Na (mg kg <sup>-1</sup> )	617,76
RMT (g kg <sup>-1</sup> )	427,70	Zn (mg kg <sup>-1</sup> )	282,91
RMI (g kg <sup>-1</sup> )	202,29	Cu (mg kg <sup>-1</sup> )	111,82
RMS (g kg <sup>-1</sup> )	255,41	Mn (mg kg <sup>-1</sup> )	119,86
C org. (g kg <sup>-1</sup> )	322,81	Ni (mg kg <sup>-1</sup> )	23,43
N total (g kg <sup>-1</sup> )	32,24	Pb (mg kg <sup>-1</sup> )	30,77
C/N	10,01	RB (mg kg <sup>-1</sup> h <sup>-1</sup> )	3,79
CTC (mmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup> )	916,01	RAc (mg kg <sup>-1</sup> )	67,92
CTC/C	28,38	CBM (mg kg <sup>-1</sup> )	10.715,53
P (g kg <sup>-1</sup> )	7,77	qMIC (%)	3,32
K (g kg <sup>-1</sup> )	4,05	qCO <sub>2</sub> (mg g <sup>-1</sup> CBM h <sup>-1</sup> )	0,35
Ca (g kg <sup>-1</sup> )	10,31		

Nota: MO – Matéria orgânica; RMT – Resíduo mineral total; RMI – Resíduo mineral insolúvel; RMS – Resíduo mineral solúvel; C org. – C orgânico; CTC – Capacidade de troca catiônica; RB – Respiração basal; h – Hora; RAc – Respiração acumulada; CBM – C da biomassa microbiana; qMIC – Quociente microbiano; qCO<sub>2</sub> – Quociente metabólico; Cr foi apenas detectado (<1,25 mg L<sup>-1</sup>); Ba, Cd e Mo não foram detectados.

Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

## 2.2 Delineamento Experimental e Tratamentos

O experimento foi conduzido em blocos casualizados (DBC), com quatro repetições, em esquema fatorial 2 x 2, com 2 tratamentos adicionais. Os fatores foram os cultivos de duas espécies de gramíneas (*Pennisetum purpureum* Schum. ou *Urochloa brizantha* cv. Marandu) combinados com a presença ou ausência de aeração do lodo de esgoto, e os tratamentos adicionais corresponderam à presença ou ausência de aeração do lodo de esgoto não cultivado, totalizando seis tratamentos e 24 unidades experimentais.

O plantio da gramínea *Pennisetum purpureum* Schum. foi por estacas de 10 cm de comprimento com a gema no meio do tolete. Deu-se preferência às gemas do 2/3 superior da gramínea, as quais foram coletadas no canteiro de forragem do ICA/UFMG. O plantio da gramínea *Urochloa brizantha* cv. Marandu foi por mudas produzidas em substrato comercial, em bandejas de poliestireno expandido, visto que as sementes não apresentaram boa germinação e uniformidade em lodo de esgoto, em teste realizado anteriormente. Ambas as gramíneas foram espaçadas de 0,14 x 0,14 m, com plantio a 0,05 m de profundidade, apresentando densidade de 50 plantas por m<sup>2</sup>, totalizando 25 plantas por parcela.

Figura 3 – Toletes do *P. purpureum* (esquerda) e mudas de *U. brizantha* (direita) recém-plantadas no lodo de esgoto.



Fonte: Do autor, 2017.

Durante o cultivo, as parcelas foram irrigadas de forma a manter a umidade próxima à capacidade de campo, com o intuito de disponibilizar água para as plantas e para os microrganismos, porém evitando-se encharcamento e, conseqüentemente, perdas por escoamento de lixiviado.

### 2.3 Coleta e Análises das Amostras

Após 90 dias de cultivo das gramíneas, período em que a *U. brizantha* começou a emitir florescência, foram coletadas amostras de lodo de esgoto de todas as unidades experimentais nas camadas de 0-10, 10-20, 20-30, 30-40 e >40 cm e posterior cálculo da média das profundidades (0-50 cm). Para coleta do lodo foi utilizada uma lâmina de ferro, 30 cm de comprimento e 60 cm de altura, para a realização de quatro cortes na parte central da parcela, contendo quatro plantas, possibilitando a retirada do lodo, puxando-o pelo capim, facilitando a coleta do lodo nas referidas profundidades, após limpeza das laterais. Estas 4 plantas, ainda, foram separadas em parte aérea e raízes, a fim de se estimar a produção de matéria seca e teor de nutrientes.

Figura 4 – Lâmina de ferro utilizada para cortar o lodo e bloco de lodo de esgoto retirado para as coletas das amostras.



Fonte: Do autor, 2017.

As amostras de lodo foram armazenadas em frascos de vidro e condicionadas em geladeira a 4 °C até o momento das análises. Já as amostras das plantas foram coletadas, lavadas em água de torneira, seguido por água destilada, condicionadas em sacos de papel para secagem em estufa de circulação forçada de ar até peso constante a 65 °C e armazenadas em sacos plásticos até o momento da análise de nutrientes.

Nas amostras de lodo coletadas foram realizadas as seguintes análises: pH em H<sub>2</sub>O e CaCl<sub>2</sub> 0,01 mol L<sup>-1</sup>, matéria orgânica, resíduo mineral total, solúvel e insolúvel, C orgânico, N total, capacidade de troca catiônica (CTC) e cálculos das relações C/N e CTC/C, segundo Alcarde (2009); atividade microbiana pelo método da taxa respirométrica (EMBRAPA, 2007a); carbono da biomassa microbiana (CBM), segundo Embrapa (2007b), com valor de K<sub>c</sub>, proposto por Sparling e West (1988); e cálculo dos quocientes metabólico e microbiano, segundo Embrapa (2007a).

#### 2.4 Análises Estatísticas

Os dados obtidos com as análises das gramíneas foram submetidos ao teste de intervalo de confiança a 5% de probabilidade. Os dados obtidos nas análises do lodo de esgoto foram submetidos à análise de variância, com desdobramentos dos tratamentos em contrastes

ortogonais, aplicando-se o teste F a 5% de probabilidade pelo *software* RStudio *version* 1.0.153.

Os contrastes foram:

Quadro 1 – Contrastes ortogonais utilizados na análise estatística do experimento e suas finalidades

Contraste ortogonal	Finalidade
$C1 = 2 \times \text{CASC} + 2 \times \text{SASC} - \text{CAUB} - \text{SAUB} - \text{CAPP} - \text{SAPP}$	Comparar os tratamentos com e sem cultivo
$C2 = \text{CASC} - \text{SASC}$	Comparar a presença e ausência de aeração no lodo sem cultivo
$C3 = \text{CAUB} + \text{SAUB} - \text{CAPP} - \text{SAPP}$	Comparar o cultivo de <i>U. brizantha</i> com o de <i>P. purpureum</i> em lodo de esgoto
$C4 = \text{CAUB} - \text{SAUB}$	Comparar a presença e ausência de aeração de lodo de esgoto cultivado com <i>U. brizantha</i>
$C5 = \text{CAPP} - \text{SAPP}$	Comparar a presença e ausência de aeração de lodo de esgoto cultivado com <i>P. purpureum</i>

Nota: CASC – Lodo com aeração e sem cultivo; SASC – Lodo sem aeração e sem cultivo; CAPP – Lodo com aeração e cultivo de *P. purpureum*; SAPP – Lodo sem aeração e com cultivo de *P. purpureum*; CAUB – Lodo com aeração e cultivo de *U. brizantha*; SAUB – lodo sem aeração e cultivo de *U. brizantha*.

Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

### 3 Resultados e Discussão

#### 3.1 Produção de *P. purpureum* e *U. brizantha* cultivadas em lodo de esgoto

Não houve diferença estatística significativa entre os tratamentos, por intervalo de confiança, para matéria seca da parte aérea (MSPA), sistema radicular (MSR) e total (MST) de *P. purpureum* e *U. brizantha* cultivadas em lodo de esgoto por 90 dias (TABELA 3). No entanto pode-se perceber que a MSR média do *P. purpureum* foi, aproximadamente, 52,6% maior que a da *U. brizantha*, mesmo que essa tenha sido cultivada a partir de mudas, o que poderia ocasionar maior desenvolvimento à planta.

Tabela 3 – Matéria seca da parte aérea (MSPA), sistema radicular (MSR) e total (MST) (g por planta) de *P. purpureum* e *U. brizantha* cultivado em lodo de esgoto com ou sem aeração

Trat.	MSPA	MSR	MST
CAPP	49,32 ± 22,74	22,21 ± 12,39	71,53 ± 20,68
SAPP	43,59 ± 33,60	20,09 ± 10,43	63,69 ± 26,92
CAUB	35,63 ± 37,26	9,52 ± 4,51	45,14 ± 24,94
SAUB	51,74 ± 30,23	10,51 ± 5,22	62,26 ± 21,05

Médias seguidas de intervalo de confiança a 5% de probabilidade.

Trat. – Tratamentos; CAPP – Lodo com aeração e cultivo de *P. purpureum*; SAPP – Lodo sem aeração e com cultivo de *P. purpureum*; CAUB – Lodo com aeração e cultivo de *U. brizantha*; SAUB – lodo sem aeração e cultivo de *U. brizantha*.

Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

Paula *et al.* (2007) observaram decréscimo na biomassa de *U. brizantha* à medida que aumentava o teor de creosoto de 0 a 3 g kg<sup>-1</sup> no solo. Ainda, o maior volume de raízes do *P. purpureum* pode representar uma maior tolerância da gramínea aos contaminantes do lodo de esgoto e à elevação da temperatura do substrato na fase inicial do cultivo. Alvarenga (2015) observou biomassa total de 150 g por planta de *P. purpureum*, aos 90 dias de cultivo em lodo de esgoto com densidade de plantio de 25 plantas por m<sup>2</sup>, enquanto, neste estudo foi de 50 plantas por m<sup>2</sup>, com biomassa total média de 67,6 g por planta.

Os teores de N e P foram semelhantes entre os tratamentos e partes das plantas, exceto o teor de P que foi maior na parte aérea (PA) de *U. brizantha* do que em *P. purpureum*, cultivadas em lodo com aeração. Para o K e Mg, os teores foram maiores na PA do que no sistema radicular e para o Mg, houve maior teor na *U. brizantha* do que em *P. purpureum* (TABELA 4).

Tabela 4 – Teor de nutrientes e metais pesados nos tecidos orgânicos de *P. purpureum* e *U. brizantha* cultivado em lodo de esgoto com ou sem aeração

Trat.	Parte da Planta	N	P	K	Ca	Mg	Fe
		g kg <sup>-1</sup>					
CAPP	PA	18,69 ± 1,85	4,92 ± 0,59	4,97 ± 0,63	0,54 ± 0,11	4,50 ± 0,53	123,68 ± 35,22
SAPP	PA	25,70 ± 7,74	5,75 ± 1,44	5,44 ± 1,02	0,58 ± 0,09	4,05 ± 0,50	142,22 ± 37,37
CAUB	PA	22,00 ± 3,96	6,53 ± 0,27	5,12 ± 0,78	1,11 ± 0,11	5,93 ± 0,51	167,03 ± 63,56
SAUB	PA	19,72 ± 0,76	5,96 ± 2,11	4,96 ± 1,07	1,19 ± 0,20	5,62 ± 0,55	174,60 ± 15,95
CAPP	SR	23,24 ± 1,89	7,55 ± 3,95	2,05 ± 0,40	1,85 ± 0,43	1,18 ± 0,27	4.372,27 ± 1.835,56
SAPP	SR	24,71 ± 1,48	5,69 ± 0,95	2,44 ± 0,67	1,67 ± 0,31	1,32 ± 0,26	3.901,05 ± 1.817,90
CAUB	SR	21,62 ± 2,69	7,04 ± 2,62	2,04 ± 0,18	1,84 ± 0,40	1,62 ± 0,08	3.053,65 ± 1.077,90
SAUB	SR	20,52 ± 0,90	5,63 ± 0,21	2,35 ± 0,39	1,52 ± 0,07	1,98 ± 0,83	3.132,44 ± 444,19

  

Trat.	Parte da Planta	Na	Zn	Cu	Mn	Pb
		mg kg <sup>-1</sup>				
CAPP	PA	359,64 ± 37,81	36,35 ± 1,60	6,03 ± 1,46	75,60 ± 14,52	7,75 ± 0,48
SAPP	PA	369,22 ± 46,35	37,05 ± 3,65	6,24 ± 0,91	87,11 ± 22,27	7,89 ± 0,51
CAUB	PA	837,03 ± 302,99	50,00 ± 8,58	6,54 ± 1,85	203,61 ± 77,99	9,20 ± 1,16
SAUB	PA	1.123,77 ± 393,92	48,99 ± 3,78	5,02 ± 2,03	272,13 ± 49,00	8,82 ± 0,94
CAPP	SR	809,43 ± 154,73	170,43 ± 33,39	82,31 ± 11,17	100,80 ± 20,46	31,32 ± 1,53
SAPP	SR	1.108,79 ± 350,05	223,64 ± 47,66	78,43 ± 16,01	95,17 ± 21,76	33,68 ± 1,72
CAUB	SR	1.844,27 ± 296,72	175,10 ± 14,16	67,33 ± 15,11	161,62 ± 24,42	31,44 ± 2,68
SAUB	SR	2.793,33 ± 431,73	141,67 ± 20,13	70,60 ± 16,71	176,12 ± 26,48	30,64 ± 1,10

Nota: Médias seguidas de intervalo de confiança a 5% de probabilidade; Trat. – Tratamentos; CAPP – Lodo com aeração e cultivo de *P. purpureum*; SAPP – Lodo sem aeração e com cultivo de *P. purpureum*; CAUB – Lodo com aeração e cultivo de *U. brizantha*; SAUB – lodo sem aeração e cultivo de *U. brizantha*; PA – Parte aérea; SR – Sistema radicular; Cr, Ba, Cd, Co e Mo não foram detectados.

Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

Para os teores de Ca, Fe, Na, Zn, Cu e Pb, houve maior acúmulo no sistema radicular do que na PA; sendo que para o Ca, Na, Zn e Mn houve maior teor na PA da *U. brizantha* do que no *P. purpureum* (TABELA 4). Esses resultados podem estar relacionados à difusão desses elementos do lodo, que os contém em alto teor, para os tecidos das raízes das gramíneas.

De acordo com Souza e Lobato (2004), os teores dos micronutrientes Cu, Zn, Fe e Mn estão dentro da faixa ideal de balanço nutricional para ambas as gramíneas, sendo de 4 a 12; 20 a 50; 50 a 250 e 40 a 250 mg kg<sup>-1</sup>, respectivamente, para *U. brizantha*; 4 a 17; 20 a 50; 50 a 200 e 40 a 200 mg kg<sup>-1</sup>, respectivamente, para *P. purpureum*. Os teores de N, P e Mg ficaram dentro da faixa de consumo de luxo ou excesso, sendo superiores a 20; 3 e 4 g kg<sup>-1</sup>, respectivamente, para ambas as gramíneas. Os teores de K e Ca foram considerados como baixos (deficientes), sendo o limite mínimo para balanço nutricional de 12 e 17 g kg<sup>-1</sup> de K para *U. brizantha* e *P. purpureum*, respectivamente, e de 3 g kg<sup>-1</sup> de Ca para ambas as gramíneas. O baixo teor foliar de K pode ser explicado pelo seu baixo teor no lodo (TABELA 2). Além disso, Bastista e Monteiro (2010) observaram redução no teor de K na PA de *U. brizantha* a partir da aplicação de 400 mg kg<sup>-1</sup> de N, o teor de N disponível no lodo de esgoto utilizado é de 9,84 g kg<sup>-1</sup>.

Quanto ao Na, as plantas C4, como as gramíneas, apresentam comprovada tolerância a áreas salinas (BROMHAM; BENNETT, 2014). Ainda, o Na desempenha importante papel nas plantas C4, fazendo parte da síntese da clorofila, além de participar da conversão de piruvato em fosfoenolpiruvato no fotossistema II (WAKEEL *et al.*, 2011), explicando os elevados teores desse elemento na parte aérea das gramíneas.

Para o Pb, ambas as gramíneas apresentam potencial para descontaminação do lodo, em razão de acumularem, principalmente no SR, teores consideráveis desses elementos. Esse resultado corrobora com Das *et al.* (2017), que citam o *P. purpureum* como um potencial fitoextrator de Pb por acumular, em sua biomassa, tanto na PA quanto no SR, aproximadamente, 20 mg kg<sup>-1</sup>, cultivado em solo contaminado com 50 mg kg<sup>-1</sup> de Pb.

### 3.2 Atributos químicos de lodo de esgoto cultivado com *P. purpureum* e *U. brizantha* na presença ou ausência de aeração

Houve efeito significativo para o contraste 1 (C1) nas camadas de 0-10 e 0-50 cm para o pH em H<sub>2</sub>O e nas camadas de 0-10; 10-20 e 0-50 cm para o pH em CaCl<sub>2</sub> 0,01 mol L<sup>-1</sup> (TABELA 5). Esses resultados indicam menor valor de pH nos tratamentos com cultivo, podendo estar relacionados à liberação de ácidos orgânicos pelas plantas e pelos microrganismos associados à sua rizosfera, acidificando o meio.

Tabela 5 – Médias e significância dos contrastes para pH em H<sub>2</sub>O e CaCl<sub>2</sub> 0,01 mol L<sup>-1</sup> de lodo de esgoto cultivado com *P. purpureum* e *U. brizantha* com ou sem aeração

pH em H <sub>2</sub> O						
Tratamentos / Contrastes	0-10	10-20	20-30	30-40	>40	0-50
CASC	6,77	6,52	6,69	6,66	6,49	6,63
SASC	6,62	6,50	6,39	6,41	6,33	6,45
CAPP	6,20	6,40	6,37	6,36	6,08	6,28
SAPP	6,55	6,36	6,15	6,15	6,50	6,34
CAUB	6,28	6,13	6,41	6,34	6,33	6,30
SAUB	6,63	6,36	6,39	6,21	6,26	6,37
Média	6,51	6,38	6,40	6,36	6,33	6,40
C <sub>1</sub> = SC – CC	1,12**	ns	ns	ns	ns	0,87**
C <sub>2</sub> = CASC – SASC	ns	ns	ns	ns	ns	ns
C <sub>3</sub> = PP – UB	ns	ns	ns	ns	ns	ns
C <sub>4</sub> = CAPP – SAPP	-0,35*	ns	ns	ns	ns	ns
C <sub>5</sub> = CAUB - SAUB	-0,35*	ns	ns	ns	0,07**	ns
CV (%)	3,38	3,53	3,68	4,95	2,81	2,10
pH em CaCl <sub>2</sub> 0,01 mol L <sup>-1</sup>						
CASC	6,32	6,31	6,32	6,29	6,13	6,28
SASC	6,19	6,20	6,17	6,21	6,12	6,18
CAPP	5,84	5,91	5,94	6,11	6,15	5,97
SAPP	6,19	6,11	6,08	6,11	6,17	6,13
CAUB	6,10	6,04	6,29	6,35	6,32	6,22
SAUB	6,19	6,18	6,13	6,16	6,08	6,15
Média	6,14	6,13	6,16	6,21	6,16	6,16
C <sub>1</sub> = SC – CC	0,70*	0,78*	ns	ns	ns	0,45*
C <sub>2</sub> = CASC – SASC	ns	ns	ns	ns	ns	ns
C <sub>3</sub> = PP – UB	ns	ns	-0,40*	ns	ns	-0,27*
C <sub>4</sub> = CAPP – SAPP	ns	ns	ns	ns	ns	ns
C <sub>5</sub> = CAUB - SAUB	-0,09*	ns	ns	ns	ns	ns
CV (%)	2,85	3,06	2,78	3,70	4,24	1,85

Nota: C<sub>1</sub>, C<sub>2</sub>, C<sub>3</sub>, C<sub>4</sub> e C<sub>5</sub> – Contrastes 1, 2, 3, 4 e 5, respectivamente; SC – Lodo sem cultivo (CASC; SASC); CC – Lodo com cultivo (CAPP; SAPP; CAUB; SAUB); CASC – Lodo com aeração e sem cultivo; SASC – Lodo sem aeração e sem cultivo; PP – Cultivo de *P. purpureum* (CAPP; SAPP); UB – Cultivo de *U. brizantha* (CAUB; SAUB); CAPP – Lodo com aeração e cultivo de *P. purpureum*; SAPP – Lodo sem aeração e com cultivo de *P. purpureum*; CAUB – Lodo com aeração e cultivo de *U. brizantha*; SAUB – lodo sem aeração e cultivo de *U. brizantha*; ns – Não significativo a 5% de probabilidade pelo teste F; \*, \*\*, \*\*\* - Significativo a 5, 1 e 0,1% de probabilidade pelo teste F, respectivamente.

Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

Na camada de 0-10 cm houve efeito significativo para os contrastes 4 (C<sub>4</sub>) e 5 (C<sub>5</sub>) para pH em H<sub>2</sub>O e para o C<sub>5</sub> para pH em CaCl<sub>2</sub> 0,01 mol L<sup>-1</sup> (TABELA 5), evidenciando maiores valores de pH nos tratamentos com cultivo de ambas as gramíneas sem aeração. Isso pode ser explicado pela maior taxa de decomposição da matéria orgânica do lodo, quando os tratamentos foram aerados, proporcionando a liberação de íons H<sup>+</sup> durante o processo de decomposição do lodo (ANTONIADIS *et al.*, 2008; SOUZA *et al.*, 2012; VILLANUEVA *et al.*, 2012).

No contraste 3 (C<sub>3</sub>) para pH em CaCl<sub>2</sub> 0,01 mol L<sup>-1</sup>, houve efeito significativo nas camadas de 20-30 e 0-50 cm, mostrando que o cultivo de *P. purpureum* proporcionou maiores reduções no pH do lodo em relação ao cultivo de *U. brizantha*. Para o C<sub>5</sub>, também, houve efeito significativo na camada >40 cm, evidenciando maior valor de pH no tratamento de cultivo de *U. brizantha* com aeração (TABELA 5).

Para os teores de matéria orgânica (MO) e resíduo mineral total (RMT) de lodo de esgoto, após cultivo com *P. purpureum* e *U. brizantha*, pode-se perceber que houve significância para o C1 na camada >40 cm (TABELA 6), com maior teor de MO e menor de RMT nos tratamentos cultivados, em relação aos sem cultivo. Isso pode ter ocorrido pelo aporte de material orgânico das plantas no lodo, como raízes que entram em senescência (COSTA *et al.*, 2009).

Tabela 6 – Médias e significância dos contrastes para matéria orgânica (MO) e resíduo mineral total (RMT) de lodo de esgoto cultivado com *P. purpureum* e *U. brizantha* com ou sem aeração

Tratamentos / Contrastes	MATÉRIA ORGÂNICA (g kg <sup>-1</sup> )					
	0-10	10-20	20-30	30-40	>40	0-50
CASC	531,70	522,32	553,00	545,87	541,97	538,97
SASC	533,25	529,08	522,40	531,87	532,73	529,87
CAPP	505,91	512,39	501,63	522,33	543,20	517,09
SAPP	540,80	538,24	543,95	555,65	567,47	549,22
CAUB	523,67	530,71	528,87	560,25	567,01	542,10
SAUB	534,53	530,66	543,59	554,84	548,06	542,33
Média	528,31	527,23	532,24	545,14	550,07	536,60
C <sub>1</sub> = SC – CC	ns	ns	ns	ns	-76,34**	ns
C <sub>2</sub> = CASC – SASC	ns	ns	ns	ns	ns	ns
C <sub>3</sub> = PP – UB	ns	ns	ns	-37,11*	ns	ns
C <sub>4</sub> = CAPP – SAPP	ns	ns	ns	ns	ns	ns
C <sub>5</sub> = CAUB - SAUB	-10,86**	0,05*	-14,72*	5,41**	18,95*	-0,23**
CV (%)	2,65	2,42	4,93	2,35	2,53	2,17
Tratamentos / Contrastes	RESÍDUO MINERAL TOTAL (g kg <sup>-1</sup> )					
	0-10	10-20	20-30	30-40	>40	0-50
CASC	468,30	477,68	447,00	454,13	458,03	461,03
SASC	466,75	470,92	477,60	468,13	467,27	470,13
CAPP	494,09	487,62	498,38	477,68	456,81	482,91
SAPP	459,20	461,76	456,06	444,36	432,53	450,78
CAUB	476,34	469,29	471,13	439,75	432,99	457,90
SAUB	465,48	469,34	456,42	445,17	451,94	457,67
Média	471,69	472,77	467,77	454,87	449,93	463,40
C <sub>1</sub> = SC – CC	ns	ns	ns	ns	76,33**	ns
C <sub>2</sub> = CASC – SASC	ns	ns	ns	ns	ns	ns
C <sub>3</sub> = PP – UB	ns	ns	ns	37,12*	ns	ns
C <sub>4</sub> = CAPP – SAPP	ns	ns	ns	ns	ns	ns
C <sub>5</sub> = CAUB - SAUB	10,86**	-0,05*	14,71*	-5,42**	-18,95*	0,23**
CV (%)	2,97	2,70	5,61	2,82	3,10	2,51

Nota: C<sub>1</sub>, C<sub>2</sub>, C<sub>3</sub>, C<sub>4</sub> e C<sub>5</sub> – Contrastes 1, 2, 3, 4 e 5, respectivamente; SC – Lodo sem cultivo (CASC; SASC); CC – Lodo com cultivo (CAPP; SAPP; CAUB; SAUB); CASC – Lodo com aeração e sem cultivo; SASC – Lodo sem aeração e sem cultivo; PP – Cultivo de *P. purpureum* (CAPP; SAPP); UB – Cultivo de *U. brizantha* (CAUB; SAUB); CAPP – Lodo com aeração e cultivo de *P. purpureum*; SAPP – Lodo sem aeração e com cultivo de *P. purpureum*; CAUB – Lodo com aeração e cultivo de *U. brizantha*; SAUB – lodo sem aeração e cultivo de *U. brizantha*; ns – Não significativo a 5% de probabilidade pelo teste F; \*, \*\* - Significativo a 5 e 1% de probabilidade pelo teste F, respectivamente.

Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

O C3 apresentou efeito significativo, na camada de 30-40 cm, com maior teor de MO e menor de RMT nos tratamentos com cultivo de *U. brizantha*, em comparação aos cultivados com *P. purpureum* (TABELA 6), evidenciando que o cultivo dessa gramínea pode propiciar maior decomposição da MO do lodo, possivelmente porque proporciona maior atividade microbiana no

substrato. Para o C5, houve significância em todas as camadas, no entanto, na camada de 0-50, obteve-se maior teor de MO e menor RMT no tratamento com cultivo de *U. brizantha* sem aeração (TABELA 6), evidenciando que a aeração do sistema proporcionou maior decomposição da MO. Ao final do cultivo, houve redução média de 6,2% de MO e incremento médio de 8,3% de RMT, em relação à amostra de caracterização do lodo de esgoto (TABELA 2). A redução de MO e o aumento de RMT, ao final do cultivo, foram atribuídos aos processos de degradação e decomposição da própria MO do lodo.

Houve efeito significativo para o teor de resíduo mineral insolúvel (RMI) apenas para o C1, na camada >40 cm, obtendo-se maior teor nos tratamentos sem cultivo, em comparação aos com cultivo. Para o resíduo mineral solúvel (RMS), houve efeito significativo para o C1, nas camadas de 0-10 e 10-20 cm, apresentando maior teor de RMS nos tratamentos com cultivo, em detrimento aos sem cultivo (TABELA 7). Esse resultado indica que o cultivo das gramíneas propiciou, além do aumento da mineralização da MO, o teor de resíduo solúvel, sendo o RMS a fração composta por minerais disponíveis às plantas.

Tabela 7 – Médias e significância dos contrastes para resíduo mineral insolúvel (RMI) e solúvel (RMS) de lodo de esgoto cultivado com *P. purpureum* e *U. brizantha* com ou sem aeração

Tratamentos / Contrastes	RESÍDUO MINERAL INSOLÚVEL (g kg <sup>-1</sup> )					
	0-10	10-20	20-30	30-40	>40	0-50
CASC	258,50	261,88	224,12	239,93	237,92	244,47
SASC	257,23	256,79	255,01	249,61	246,39	253,01
CAPP	256,22	254,99	274,57	239,06	229,72	250,91
SAPP	244,45	242,65	241,98	232,02	223,40	236,90
CAUB	266,42	247,05	242,10	226,26	220,33	240,43
SAUB	250,75	251,94	239,38	230,13	235,95	241,63
Média	255,60	252,55	246,19	236,17	232,29	244,56
C <sub>1</sub> = SC – CC	ns	ns	ns	ns	59,22*	ns
C <sub>2</sub> = CASC – SASC	ns	ns	ns	ns	ns	ns
C <sub>3</sub> = PP – UB	ns	ns	ns	ns	ns	ns
C <sub>4</sub> = CAPP – SAPP	ns	ns	ns	ns	ns	ns
C <sub>5</sub> = CAUB – SAUB	ns	ns	ns	ns	ns	ns
CV (%)	6,56	5,31	13,47	7,17	6,62	6,33
Tratamentos / Contrastes	RESÍDUO MINERAL SOLÚVEL (g kg <sup>-1</sup> )					
	0-10	10-20	20-30	30-40	>40	0-50
CASC	209,81	215,80	222,88	214,20	220,10	216,56
SASC	209,52	214,13	222,59	218,52	220,88	217,13
CAPP	237,87	232,63	223,80	238,62	227,09	232,00
SAPP	214,75	219,12	214,08	212,34	209,13	213,89
CAUB	209,91	222,25	229,03	213,49	212,66	217,47
SAUB	214,73	217,41	217,04	215,04	216,00	216,05
Média	216,10	220,22	221,57	218,70	217,64	218,85
C <sub>1</sub> = SC – CC	-38,60***	-31,55**	ns	ns	ns	ns
C <sub>2</sub> = CASC – SASC	ns	ns	ns	ns	ns	ns
C <sub>3</sub> = PP – UB	27,98***	12,09*	ns	ns	ns	12,37*
C <sub>4</sub> = CAPP – SAPP	ns	ns	ns	ns	ns	ns
C <sub>5</sub> = CAUB – SAUB	-4,82***	4,84**	ns	-1,55**	-3,34**	1,42*
CV (%)	2,41	2,44	4,42	4,93	3,91	2,29

Nota: C<sub>1</sub>, C<sub>2</sub>, C<sub>3</sub>, C<sub>4</sub> e C<sub>5</sub> – Contrastes 1, 2, 3, 4 e 5, respectivamente; SC – Lodo sem cultivo (CASC; SASC); CC – Lodo com cultivo (CAPP; SAPP; CAUB; SAUB); CASC – Lodo com aeração e sem cultivo; SASC – Lodo sem aeração e sem cultivo; PP – Cultivo de *P. purpureum* (CAPP; SAPP); UB – Cultivo de *U. brizantha* (CAUB; SAUB); CAPP – Lodo com aeração e cultivo de *P. purpureum*; SAPP – Lodo sem aeração e com cultivo de *P. purpureum*; CAUB – Lodo com aeração e cultivo de *U. brizantha*; SAUB – lodo sem aeração e cultivo de *U. brizantha*; ns – Não significativo a 5% de probabilidade pelo teste F; \* - Significativo a 5% de probabilidade pelo teste F.

Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

Para o C<sub>3</sub>, houve efeito significativo nas camadas de 0-10; 10-20 e 0-50 cm, com maior teor de RMS nos tratamentos com cultivo de *P. purpureum*, em comparação aos com cultivo de *U. brizantha*. Também houve efeito significativo para o C<sub>5</sub>, em todas as camadas, exceto na de 20-30 cm; na camada de 0-50 cm, houve maior teor de RMS no tratamento com cultivo de *U. brizantha* com aeração, mostrando que o cultivo associado à aeração proporcionou aumento do teor de nutrientes disponíveis (TABELA 7).

Houve incremento médio de 20,5% de RMI e redução média de 4,2% de RMS, ao final do cultivo, em relação à amostra de caracterização do lodo de esgoto (TABELA 2). Isso pode ter ocorrido pela precipitação pluviométrica que aconteceu, no período de cultivo (TABELA 1), perdendo-se parte desses nutrientes no lixiviado ou por absorção desses pelas plantas.

A Tabela 8 apresenta os resultados obtidos para C orgânico (C org.), N total (Nt) e capacidade de troca catiônica (CTC) em lodo de esgoto cultivado com *P. purpureum* e *U. brizantha*. Houve efeito significativo para o C1 na camada de 0-50 cm para o teor de C org., mostrando maior teor nos tratamentos com cultivo das gramíneas. Para o C3 e o C4, houve efeito significativo na camada >40 cm e nas camadas de 30-40 e 0-50 cm, respectivamente, evidenciando maior teor de C org. nos tratamentos com cultivo de *P. purpureum* (C3), sendo ainda maior quando o lodo de esgoto foi aerado (C4). O C5 apresentou significância nas camadas de 30-40 e >40 cm, evidenciando, na primeira camada, maior teor de C org. no tratamento com cultivo de *U. brizantha* com aeração, enquanto na segunda camada menor teor. Ainda, houve redução média de 7,3% no teor de C org., ao final do cultivo, em relação à amostra de caracterização do lodo de esgoto (TABELA 2). No entanto esse valor está acima do limite mínimo de 150 g kg<sup>-1</sup>, estabelecido para produção e comercialização de composto orgânico pelo Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA) na Instrução Normativa (IN) nº 25 (BRASIL, 2009).

Tabela 8 – Médias e significância dos contrastes para C orgânico (C org.), N total (Nt) e capacidade de troca catiônica (CTC) de lodo de esgoto cultivado com *P. purpureum* e *U. brizantha* com ou sem aeração

CARBONO ORGÂNICO (g kg <sup>-1</sup> )						
Tratamentos / Contrastes	0-10	10-20	20-30	30-40	>40	0-50
CASC	297,94	305,20	274,03	282,83	321,89	296,38
SASC	270,74	293,27	290,97	298,27	289,95	288,64
CAPP	304,01	319,55	313,96	321,68	290,54	309,95
SAPP	293,45	301,64	276,17	296,06	342,48	301,96
CAUB	288,23	285,02	310,68	287,65	279,67	290,25
SAUB	314,08	305,09	305,35	313,95	302,10	308,11
Média	294,74	301,63	295,19	300,07	304,44	299,22
C <sub>1</sub> = SC – CC	ns	ns	ns	ns	ns	-40,23*
C <sub>2</sub> = CASC – SASC	ns	ns	ns	ns	ns	ns
C <sub>3</sub> = PP – UB	ns	ns	ns	ns	51,25*	ns
C <sub>4</sub> = CAPP – SAPP	ns	ns	ns	25,62*	ns	7,99**
C <sub>5</sub> = CAUB - SAUB	ns	ns	5,33*	ns	-22,43**	ns
CV (%)	8,38	6,32	7,73	5,70	7,81	2,75
NITROGÊNIO TOTAL (g kg <sup>-1</sup> )						
CASC	29,53	29,40	29,16	29,18	28,41	29,13
SASC	28,73	28,64	28,03	28,69	27,66	28,34
CAPP	29,08	29,22	29,04	31,51	32,16	30,20
SAPP	30,06	29,59	29,90	30,32	31,55	30,28
CAUB	29,73	29,91	30,24	30,93	30,66	30,29
SAUB	30,31	29,76	30,34	32,89	30,96	30,85
Média	29,57	29,42	29,45	30,59	30,23	29,85
C <sub>1</sub> = SC – CC	ns	ns	ns	-9,91*	-13,19*	-6,68*
C <sub>2</sub> = CASC – SASC	ns	ns	ns	ns	ns	ns
C <sub>3</sub> = PP – UB	ns	ns	ns	ns	ns	ns
C <sub>4</sub> = CAPP – SAPP	ns	ns	ns	ns	ns	ns
C <sub>5</sub> = CAUB - SAUB	ns	ns	ns	ns	ns	ns
CV (%)	4,29	4,44	6,18	8,69	10,19	5,52
CAPACIDADE DE TROCA CATIÔNICA (mmolc kg <sup>-1</sup> )						
CASC	917,81	909,07	869,93	886,22	860,15	888,64
SASC	873,03	878,38	857,63	831,40	841,73	856,43
CAPP	911,57	925,01	920,59	877,44	871,72	901,27
SAPP	945,54	911,73	849,99	865,09	889,11	892,29
CAUB	931,58	918,23	885,41	904,36	912,26	910,37
SAUB	946,13	883,55	918,26	900,16	915,10	912,64
Média	920,94	904,33	883,64	877,45	881,68	893,61
C <sub>1</sub> = SC – CC	ns	ns	ns	ns	-184,43*	-126,43*
C <sub>2</sub> = CASC – SASC	ns	ns	ns	ns	ns	ns
C <sub>3</sub> = PP – UB	ns	ns	ns	ns	ns	ns
C <sub>4</sub> = CAPP – SAPP	ns	ns	ns	ns	ns	ns
C <sub>5</sub> = CAUB - SAUB	ns	ns	ns	ns	ns	ns
CV (%)	6,00	4,23	5,77	4,96	4,81	3,81

Nota: C<sub>1</sub>, C<sub>2</sub>, C<sub>3</sub>, C<sub>4</sub> e C<sub>5</sub> – Contrastes 1, 2, 3, 4 e 5, respectivamente; SC – Lodo sem cultivo (CASC; SASC); CC – Lodo com cultivo (CAPP; SAPP; CAUB; SAUB); CASC – Lodo com aeração e sem cultivo; SASC – Lodo sem aeração e sem cultivo; PP – Cultivo de *P. purpureum* (CAPP; SAPP); UB – Cultivo de *U. brizantha* (CAUB; SAUB); CAPP – Lodo com aeração e cultivo de *P. purpureum*; SAPP – Lodo sem aeração e com cultivo de *P. purpureum*; CAUB – Lodo com aeração e cultivo de *U. brizantha*; SAUB – lodo sem aeração e cultivo de *U. brizantha*; ns – Não significativo a 5% de probabilidade pelo teste F; \*, \*\* - Significativo a 5 e 1% de probabilidade pelo teste F, respectivamente.

Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

Houve efeito significativo para o teor de Nt no C1 nas camadas de 30-40; >40 e 0-50 cm (TABELA 8), evidenciando maior teor nos tratamentos com cultivo das gramíneas, mostrando

que essas foram capazes de manter o teor de Nt no lodo, mesmo absorvendo-o para o seu desenvolvimento (TABELA 4). Outra possibilidade é a associação das gramíneas com bactérias capazes de absorver N da atmosfera e incorporá-lo no lodo de esgoto, como observado por Silva *et al.* (2013) para *U. brizantha* e por Morais *et al.* (2012) para *P. purpureum*. A IN 25 estabelece que o teor mínimo de Nt presente em composto orgânico é de 5 g kg<sup>-1</sup> (BRASIL, 2009), sendo obtido, ao final do cultivo, teor médio de 29,85 g kg<sup>-1</sup>, com redução média de 7,4% em comparação à amostra de caracterização do lodo de esgoto (TABELA 2).

Para a CTC, houve efeito significativo no C1 nas camadas >40 e 0-50 cm, evidenciando maior CTC nos tratamentos com cultivo das gramíneas. A maior CTC nesses tratamentos representam maior estabilidade da matéria orgânica do lodo, formação de novos grupos funcionais e aumento da sua capacidade de reter cátions (ZHANG; SUN, 2016).

As relações C/N e CTC/C expressam o grau de maturação e estabilidade do composto produzido. Quanto menor a relação C/N maior a maturação do composto. Para o C1, houve efeito significativo na camada de 20-30 cm, com maior relação C/N nos tratamentos cultivados, pelos maiores teores de C org. e Nt (TABELA 8) nesses tratamentos. Para o C3, houve efeito significativo na camada >40 cm, mostrando maior relação nos tratamentos com cultivo de *P. purpureum* em relação ao com *U. brizantha*, evidenciando maior estabilidade do lodo quando cultivado com essa gramínea. Para o C5, houve efeito significativo nas camadas de 20-30; 30-40 e >40 cm, ora com maior relação no tratamento com cultivo de *U. brizantha* com aeração, ora no tratamento sem aeração (TABELA 9).

Tabela 9 – Médias e significância dos contrastes para as relações C/N e CTC/C de lodo de esgoto cultivado com *P. purpureum* e *U. brizantha* com ou sem aeração

RELAÇÃO C/N						
Tratamentos / Contrastes	0-10	10-20	20-30	30-40	>40	0-50
CASC	10,34	10,77	9,23	9,60	10,98	10,22
SASC	9,39	10,50	9,54	10,40	10,13	10,30
CAPP	10,25	10,97	11,05	11,11	10,01	10,71
SAPP	10,04	10,26	9,10	9,84	11,64	10,13
CAUB	9,58	9,65	10,87	9,70	9,39	9,66
SAUB	10,75	10,45	10,54	10,44	10,18	10,20
Média	10,06	10,43	10,06	10,18	10,39	10,20
C <sub>1</sub> = SC – CC	ns	ns	-4,02*	ns	ns	ns
C <sub>2</sub> = CASC – SASC	ns	ns	ns	ns	ns	ns
C <sub>3</sub> = PP – UB	ns	ns	ns	ns	2,08*	ns
C <sub>4</sub> = CAPP – SAPP	ns	ns	ns	ns	ns	ns
C <sub>5</sub> = CAUB - SAUB	ns	ns	0,33*	-0,74*	-0,79*	ns
CV (%)	9,00	7,49	9,68	7,45	8,11	6,51
RELAÇÃO CTC/C						
CASC	31,86	29,79	32,29	30,48	26,83	30,08
SASC	32,46	30,31	29,77	27,90	29,13	29,75
CAPP	30,12	29,27	29,45	27,34	30,21	29,22
SAPP	32,34	30,35	31,06	29,34	25,97	29,60
CAUB	32,39	32,31	28,66	30,49	32,96	31,43
SAUB	30,08	29,08	30,23	28,68	30,29	29,62
Média	31,54	30,19	30,24	29,04	29,23	29,95
C <sub>1</sub> = SC – CC	ns	ns	ns	ns	ns	ns
C <sub>2</sub> = CASC – SASC	ns	ns	ns	ns	ns	ns
C <sub>3</sub> = PP – UB	ns	ns	ns	ns	-7,07**	ns
C <sub>4</sub> = CAPP – SAPP	ns	-1,08*	ns	ns	ns	-0,38*
C <sub>5</sub> = CAUB - SAUB	ns	ns	ns	ns	2,67*	ns
CV (%)	11,33	5,7	9,73	5,91	7,25	3,91

Nota: C<sub>1</sub>, C<sub>2</sub>, C<sub>3</sub>, C<sub>4</sub> e C<sub>5</sub> – Contrastes 1, 2, 3, 4 e 5, respectivamente; SC – Lodo sem cultivo (CASC; SASC); CC – Lodo com cultivo (CAPP; SAPP; CAUB; SAUB); CASC – Lodo com aeração e sem cultivo; SASC – Lodo sem aeração e sem cultivo; PP – Cultivo de *P. purpureum* (CAPP; SAPP); UB – Cultivo de *U. brizantha* (CAUB; SAUB); CAPP – Lodo com aeração e cultivo de *P. purpureum*; SAPP – Lodo sem aeração e com cultivo de *P. purpureum*; CAUB – Lodo com aeração e cultivo de *U. brizantha*; SAUB – lodo sem aeração e cultivo de *U. brizantha*; ns – Não significativo a 5% de probabilidade pelo teste F; \* - Significativo a 5% de probabilidade pelo teste F.

Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

Quanto maior a relação CTC/C maior a maturação do composto. Houve efeito significativo para o C3 e o C5, na camada >40 cm, evidenciando que houve maior relação nos tratamentos com cultivo de *U. brizantha* (C3), em relação ao cultivo de *P. purpureum*, sendo maior, quando o sistema foi aerado (C5), evidenciando que, para este atributo, o cultivo de *U. brizantha* foi mais eficaz na estabilização da MO do lodo. Para o cultivo de *P. purpureum*, houve efeito significativo para o C4 nas camadas de 10-20 e 0-50 cm, ou seja, maior relação CTC/C quando o sistema não foi aerado (TABELA 9).

Houve incremento de 1,9 e 5,5% das relações C/N e CTC/C, respectivamente, da amostra inicial de lodo de esgoto (TABELA 2) ao final do cultivo. A IN 25 estabelece que a relação C/N máxima de um composto orgânico, após estabilização, seja de 20 (BRASIL, 2009), sendo obtida, neste trabalho, média de 10,2, inferior ao limite máximo estabelecido. Já para a relação CTC/C,

Lima *et al.* (2009) estabelecem relação mínima de 17 para o composto ser considerado maturado, sendo obtido, neste trabalho, média de 29,95, valor esse 76,2% superior ao recomendado.

### 3.3 Atributos microbianos de lodo de esgoto cultivado com *P. purpureum* e *U. brizantha* na presença ou ausência de aeração

A Tabela 10 apresenta que houve efeito significativo para o C1 para o C da biomassa microbiana (CBM), na camada de 0-10 cm, mostrando maior CBM nos tratamentos com o cultivo das gramíneas, possivelmente, proporcionado pela liberação de exsudatos pelas plantas, favorecendo o desenvolvimento microbiano (TIAN *et al.*, 2017). Para o C3, houve efeito significativo na camada de 10-20 cm, ou seja, maior CBM nos tratamentos com cultivo de *P. purpureum* em comparação ao com *U. brizantha*, evidenciando maior contribuição daquela gramínea para a atividade microbiana e, conseqüentemente, para a decomposição da MO. Para o C5, houve efeito significativo na camada de 10-20 cm, evidenciando maior CBM no tratamento com cultivo de *U. brizantha* sem aeração. Ainda, houve redução de 82,1% do CBM da amostra de caracterização do lodo (TABELA 2), ao final do cultivo, possivelmente, em virtude da seleção de microrganismos pela menor disponibilidade de substrato de fácil decomposição, ou seja, aumento da concentração de matéria orgânica mais humificada (ALVES *et al.*, 2011).

Tabela 10 – Médias e significância dos contrastes para C-biomassa microbiana (CBM) de lodo de esgoto cultivado com *P. purpureum* e *U. brizantha* com ou sem aeração

Tratamentos / Contrastes	C-BIOMASSA MICROBIANA (mg kg <sup>-1</sup> )					
	0-10	10-20	20-30	30-40	>40	0-50
CASC	1.432,11	1.074,75	1.947,24	1.818,05	2.829,93	1.820,42
SASC	1.515,24	1.661,18	2.011,78	1.201,54	1.699,55	1.617,86
CAPP	2.603,87	2.657,12	2.340,54	1.746,73	1.973,10	2.264,28
SAPP	2.482,43	1.431,86	969,28	956,52	2.936,32	1.755,28
CAUB	1.734,34	899,63	2.105,74	2.546,06	2.733,25	2.003,81
SAUB	2.079,51	1.754,40	2.883,95	1.202,74	2.194,37	2.023,00
Média	1.974,58	1.579,82	2.043,09	1.578,61	2.394,42	1.914,11
C <sub>1</sub> = SC – CC	-3.005,45*	ns	ns	ns	ns	ns
C <sub>2</sub> = CASC – SASC	ns	ns	ns	ns	ns	ns
C <sub>3</sub> = PP – UB	ns	1.434,95*	ns	ns	ns	ns
C <sub>4</sub> = CAPP – SAPP	ns	ns	ns	ns	ns	ns
C <sub>5</sub> = CAUB - SAUB	ns	-854,77*	ns	ns	ns	ns
CV (%)	35,76	41,40	85,72	57,84	38,58	41,00

Nota: C<sub>1</sub>, C<sub>2</sub>, C<sub>3</sub>, C<sub>4</sub> e C<sub>5</sub> – Contrastes 1, 2, 3, 4 e 5, respectivamente; SC – Lodo sem cultivo (CASC; SASC); CC – Lodo com cultivo (CAPP; SAPP; CAUB; SAUB); CASC – Lodo com aeração e sem cultivo; SASC – Lodo sem aeração e sem cultivo; PP – Cultivo de *P. purpureum* (CAPP; SAPP); UB – Cultivo de *U. brizantha* (CAUB; SAUB); CAPP – Lodo com aeração e cultivo de *P. purpureum*; SAPP – Lodo sem aeração e com cultivo de *P. purpureum*; CAUB – Lodo com aeração e cultivo de *U. brizantha*; SAUB – lodo sem aeração e cultivo de *U. brizantha*; ns – Não significativo a 5% de probabilidade pelo teste F; \*, \*\*, \*\*\* - Significativo a 5, 1 e 0,1% de probabilidade pelo teste F, respectivamente.

Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

Não houve efeito significativo para nenhum dos contrastes para a RB e RAc, no entanto houve redução de 48,3 e 56,7% (TABELA 11), respectivamente, da amostra de caracterização do lodo de esgoto (TABELA 2) ao final do cultivo. Esse resultado revela que houve elevada maturação da MO do lodo, uma vez que quanto menor a atividade microbiana, demonstrada pela redução da evolução de CO<sub>2</sub>, maior a estabilidade do composto produzido (NIKAEEN *et al.*, 2015).

Tabela 11 – Médias e significância dos contrastes para respiração basal (RB) (mg CO<sub>2</sub> kg<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup> lodo, base seca) e acumulada (RAc) (mg CO<sub>2</sub> kg<sup>-1</sup> lodo, base seca) e quociente metabólico (qCO<sub>2</sub>) (mg C-CO<sub>2</sub> g<sup>-1</sup> CBM h<sup>-1</sup>, base seca) de lodo de esgoto cultivado com *P. purpureum* e *U. brizantha* com ou sem aeração

Tratamentos / Contrastes	RB	RAc	qCO <sub>2</sub>					
	0-50	0-50	0-10	10-20	20-30	30-40	>40	0-50
CASC	1,70	23,00	0,93	1,69	0,79	0,81	0,70	1,03
SASC	2,38	32,30	1,25	1,26	1,50	1,39	1,17	1,51
CAPP	1,68	28,54	0,81	0,64	0,74	0,95	0,99	0,75
SAPP	1,72	25,40	0,88	1,50	1,30	1,13	0,64	1,04
CAUB	2,42	35,83	1,07	1,97	1,47	0,87	0,90	1,27
SAUB	1,86	31,32	0,87	1,00	1,43	1,29	0,84	1,01
Média	1,96	29,40	0,97	1,34	1,21	1,07	0,87	1,10
C <sub>1</sub> = SC – CC	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
C <sub>2</sub> = CASC – SASC	ns	ns	ns	ns	ns	-0,58**	ns	ns
C <sub>3</sub> = PP – UB	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
C <sub>4</sub> = CAPP – SAPP	ns	ns	ns	-0,86*	ns	-0,18*	ns	ns
C <sub>5</sub> = CAUB - SAUB	ns	ns	ns	0,97*	ns	ns	ns	ns
CV (%)	40,12	33,93	36,88	36,90	56,27	22,31	38,96	41,01

Nota: C<sub>1</sub>, C<sub>2</sub>, C<sub>3</sub>, C<sub>4</sub> e C<sub>5</sub> – Contrastes 1, 2, 3, 4 e 5, respectivamente; SC – Lodo sem cultivo (CASC; SASC); CC – Lodo com cultivo (CAPP; SAPP; CAUB; SAUB); CASC – Lodo com aeração e sem cultivo; SASC – Lodo sem aeração e sem cultivo; PP – Cultivo de *P. purpureum* (CAPP; SAPP); UB – Cultivo de *U. brizantha* (CAUB; SAUB); CAPP – Lodo com aeração e cultivo de *P. purpureum*; SAPP – Lodo sem aeração e com cultivo de *P. purpureum*; CAUB – Lodo com aeração e cultivo de *U. brizantha*; SAUB – lodo sem aeração e cultivo de *U. brizantha*; ns – Não significativo a 5% de probabilidade pelo teste F; \*, \*\*, \*\*\* - Significativo a 5, 1 e 0,1% de probabilidade pelo teste F, respectivamente.

Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

O qCO<sub>2</sub> é um índice que infere sobre a eficiência dos microrganismos na utilização do C org., ou seja, quanto de C é perdido na forma de CO<sub>2</sub> por C incorporado em sua biomassa (CBM) (VIEIRA *et al.*, 2011), assim, quanto menores os valores de qCO<sub>2</sub>, maior a eficiência. Houve efeito significativo para o contraste 2 (C<sub>2</sub>), na camada de 30-40 cm, ou seja, maior qCO<sub>2</sub> no tratamento sem cultivo sem aeração, em relação ao com aeração. Houve efeito significativo no C<sub>4</sub>, nas camadas de 10-20 e 30-40 cm, evidenciando maior qCO<sub>2</sub> no tratamento com cultivo de *P. purpureum* sem aeração, em relação ao com aeração. Para o C<sub>5</sub>, houve efeito significativo na camada de 10-20 cm, mostrando maior qCO<sub>2</sub> no tratamento com cultivo de *U. brizantha* com aeração, em relação ao sem aeração. Assim, os microrganismos apresentaram-se mais eficazes na utilização do C nos tratamentos com aeração, exceto o com cultivo de *U. brizantha*.

Para o quociente microbiano (qMIC), houve efeito significativo para o C1, na camada de 0-10 cm, ou seja, maior qMIC nos tratamentos com cultivo das gramíneas. Para o C5, houve efeito significativo, na camada de 10-20 cm, ou seja, maior qMIC no tratamento com cultivo de *U. brizantha* sem aeração (TABELA 12). O índice qMIC é utilizado para inferir sobre a qualidade da MO, visto que quanto maior seu valor maior a labilidade do C, favorecendo um ambiente adequado ao crescimento microbiano (VIEIRA; PAZIANOTTO, 2016). Os tratamentos com cultivo (C1) e o com cultivo de *U. brizantha* sem aeração (C5) apresentaram maiores valores de qMIC, proporcionando, assim, ambientes mais favoráveis ao desenvolvimento microbiano. Houve redução de 80,7% da amostra inicial de lodo de esgoto (TABELA 2), ao final do cultivo, que pode ter ocorrido pelo aumento de material orgânico de maior dificuldade de degradação, mais humificado, demonstrado, também, pela redução do CBM (TABELA 10), diminuindo a labilidade do C.

Tabela 12 – Médias e significância dos contrastes para quociente microbiano (qMIC) de lodo de esgoto cultivado com *P. purpureum* e *U. brizantha* com ou sem aeração

Tratamentos / Contrastes	QUOCIENTE MICROBIANO (%)					
	0-10	10-20	20-30	30-40	>40	0-50
CASC	0,49	0,35	0,70	0,67	0,88	0,62
SASC	0,57	0,58	0,67	0,41	0,60	0,57
CAPP	0,87	0,85	0,76	0,55	0,71	0,74
SAPP	0,86	0,49	0,33	0,33	0,87	0,59
CAUB	0,59	0,31	0,66	0,87	0,98	0,68
SAUB	0,67	0,59	0,96	0,39	0,74	0,66
Média	0,68	0,53	0,68	0,54	0,80	0,64
C <sub>1</sub> = SC – CC	-0,87*	ns	ns	ns	ns	ns
C <sub>2</sub> = CASC – SASC	ns	ns	ns	ns	ns	ns
C <sub>3</sub> = PP – UB	ns	ns	ns	ns	ns	ns
C <sub>4</sub> = CAPP – SAPP	ns	ns	ns	ns	ns	ns
C <sub>5</sub> = CAUB - SAUB	ns	-0,28*	ns	ns	ns	ns
CV (%)	34,54	44,38	82,32	59,90	38,64	29,70

Nota: C<sub>1</sub>, C<sub>2</sub>, C<sub>3</sub>, C<sub>4</sub> e C<sub>5</sub> – Contrastes 1, 2, 3, 4 e 5, respectivamente; SC – Lodo sem cultivo (CASC; SASC); CC – Lodo com cultivo (CAPP; SAPP; CAUB; SAUB); CASC – Lodo com aeração e sem cultivo; SASC – Lodo sem aeração e sem cultivo; PP – Cultivo de *Pennisetum purpureum* (CAPP; SAPP); UB – Cultivo de *Urochloa brizantha* (CAUB; SAUB); CAPP – Lodo com aeração e cultivo de *Pennisetum purpureum*; SAPP – Lodo sem aeração e com cultivo de *Pennisetum purpureum*; CAUB – Lodo com aeração e cultivo de *Urochloa brizantha*; SAUB – lodo sem aeração e cultivo de *Urochloa brizantha*; ns – Não significativo a 5% de probabilidade pelo teste F; \* - Significativo a 5% de probabilidade pelo teste F.

Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

#### 4 Conclusões

As espécies *U. brizantha* e *P. purpureum* apresentam potencialidade para cultivo em lodo de esgoto, a fim de ser utilizada sua biomassa para compostagem ou produção de energia.

O cultivo das gramíneas *U. brizantha* e *P. purpureum* proporcionam maior estabilidade e maturação da matéria orgânica do lodo de esgoto.

A aeração do lodo de esgoto sem cultivo proporciona menor estresse à comunidade microbiana.

O lodo de esgoto cultivado com *U. brizantha*, principalmente, na presença de aeração, torna-se mais estabilizado do que quando cultivado com *P. purpureum*.

O cultivo de *P. purpureum* sem aeração proporciona maior estabilização do lodo de esgoto do que quando aerado.

## Referências

- ALCARDE, J. C. Manual de Análise de Fertilizantes. Piracicaba: FEALQ. 2009. 259p.
- ALVARENGA, A. C. Fitorremediação de metais pesados e clorobenzenos em lodo de esgoto cultivado com *Pennisetum purpureum*. Montes Claros: UFMG, 2015. 96p. Dissertação Mestrado.
- ALVARENGA, A. C.; SAMPAIO, R. A.; PINHO, G. P.; CARDOSO, P. H. S.; SOUSA, I. P.; BARBOSA, M. H. C. Phytoremediation of chlorobenzenes in sewage sludge cultivated with *Pennisetum purpureum* at different times. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.21, p.573-578, 2017.
- ALVES, T. S.; CAMPOS, L. L.; ELIAS NETO, N.; MATSUOKA, M.; LOUREIRO, M. F. Biomassa e atividade microbiana de solo sob vegetação nativa e diferentes sistemas de manejos. Acta Scientiarum Agronomy, v.33, p.341-347, 2011.
- ANTONIADIS, V.; ROBINSON, J. S.; ALLOWAY, B. J. Effects of short-term pH fluctuations on cadmium, nickel, lead and zinc availability to ryegrass in a sewage sludge-amended field. Chemosphere, v.71, p.759-764, 2008.
- BATISTA, K.; MONTEIRO, F. A. Variações nos teores de potássio, cálcio e magnésio em capim-marandu adubado com doses de nitrogênio e de enxofre. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v.34, p.151-161, 2010.
- BRAGA, R. R.; SANTOS, J. B.; ZANUNCIO, J. C.; BIBIANO, C. S.; FERREIRA, E. A.; OLIVEIRA, M. C.; SILVA, D. V.; SERRÃO, J. E. Effect of growing *Brachiria brizantha* on phytoremediation of picloram under different pH environments. Ecological Engineering, v.94, p.102-106, 2016.
- BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Secretaria de Defesa Agropecuária. Instrução Normativa n.25, de 23 de julho de 2009. Disponível em: <<http://www.dpv24.iciag.ufu.br/new/dpv24/Apostilas/IN%20MAPA%2025%202009.pdf>>. Acesso em: 24 Nov. 2017.
- BROMHAM, L. BENNETT, T. H. Salt tolerance evolves more frequently in C4 grass lineages. Journal of Evolutionary Biology, v.27, p.653-659, 2014.
- COSTA, O. V.; CANTARUTTI, R. B.; FONTES, L. E. F.; COSTA, L. M.; NACIF, P. G. S.; FARIA, J. C. Estoque de carbono do solo sob pastagem em área de tabuleiro costeiro no sul da Bahia. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v.33, p.1137-1145, 2009.
- DAS, A.; BELGAONKAR, P.; RAMAN, A. S.; BANU, S.; OSBORNE, J. W. Bioremoval of lead using *Pennisetum purpureum* augmented with *Enterobacter cloacae*-VITPASJ1: A pot culture approach. Environmental Science and Pollution Research, v.24, p.15444-15453, 2017.

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Comunicado técnico 98 – Determinação do Carbono da Biomassa Microbiana do Solo (BMS-C). Seropédica – RJ, 2007b. 6p.

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Comunicado técnico 99 – Determinação da Respiração Basal (RBS) e Quociente metabólico do Solo ( $qCO_2$ ). Seropédica – RJ, 2007a. 4p.

FLORES, R. A.; URQUIAGA, S.; ALVES, B. J. R.; COLLIER, L. S.; BODDEY, R. M. Yield and quality of elephant grass biomass produced in the cerrados region for bioenergy. *Engenharia Agrícola*, v.32, p.831-839, 2012.

INMET – Instituto Nacional de Meteorologia. BDMEP – Banco de dados históricos. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/porta/>>. Acesso em: 01 Ago. 2017.

KANG, D. J.; SEO, Y. J.; SAITO, T.; SUZUKI, H.; ISHII, Y. Uptake and translocation of cesium-133 in napiergrass (*Pennisetum purpureum* Schum.) under hydroponic conditions. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, v.82, p.122-126, 2012.

LIMA, C. C.; MENDONÇA, E. S.; SILVA, I. R.; SILVA, L. H. M.; ROIG, A. Caracterização química de resíduos da produção de biodiesel compostados com adição mineral. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.13, p.334-340, 2009.

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

MERLINO, L. C. S.; MELO, W. J.; MACEDO, F. G.; GUEDES, A. C. T. P.; RIBEIRO, M. H.; MELO, V. P.; MELO, G. M. P. Bário, cádmio, cromo e chumbo em plantas de milho e em latossolo após onze aplicações anuais de lodo de esgoto. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.34, p.2031-2039, 2010.

MORAIS, R. F.; QUESADA, D. M.; REIS, V. M.; URQUIAGA, S.; ALVES, B. J. R.; BODDEY, R. M. Contribution of biological nitrogen fixation to Elephant grass (*Pennisetum purpureum* Schum.). *Plant and Soil*, v.356, p.23-24, 2012.

NIKAEEN, M.; NAFEZ, A. H.; BINA, B.; NABAVI, B. F.; HASSANZADEH, A. Respiration and enzymatic activities as indicators of stabilization of sewage sludge composting. *Waste Management*, v.39, p.104-110, 2015.

OLIVEIRA, E. S. A.; CARDOSO, P. H. S.; SOUSA, I. P.; ALVARENGA, A. C.; RODRIGUES, M. N.; SAMPAIO, R. A. Copper and zinc fractionation in biosolid cultivated with *Pennisetum purpureum* in different periods. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.22, p.3-9, 2018.

PAULA, A. M.; SIQUEIRA, J. O.; SOARES, C. R. F. S. Contaminação do solo com antraceno e creosoto e o crescimento vegetal e a colonização micorrízica pelo *Glomus etunicatum*. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.31, p.805-811, 2007.

SILVA, M. C. P.; FIGUEIREDO, A. F.; ANDREOTE, F. D.; CARDOSO, E. J. B. N. Plant growth promoting bactéria in *Brachiaria brizantha*. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, v.29, p.163-171, 2013.

SILVA, T. O.; SANTOS, A. R.; SANTOS, J. H. S.; SILVA, J. O. Produção do capim marandu submetido a doses de nitrogênio em um Latossolo Amarelo. *Agropecuária Técnica*, v.26, p.29-35, 2005.

SOUZA, D. M. G.; LOBATO, E. Cerrado: Correção do solo e adubação. 2ª ed. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2004. 416p.

SOUZA, R. A. S.; BISSANI, C. A.; TEDESCO, M. J.; FONTOURA, R. C. Extração sequencial de zinco e cobre em solos tratados com lodo de esgoto composto de lixo. *Química Nova*, v.35, p.308-314, 2012.

- SPARLING, G. P.; WEST, A. W. A Direct Extraction method to estimate soil microbial C: calibration *in situ* using microbial respiration and <sup>14</sup>C labelled cells. *Soil Biology and Biochemistry*, v.20, p.337-343, 1988.
- TIAN, W.; ZHAO, J.; ZHOU, Y.; QIAO, K.; JIN, X.; LIU, Q. Effects of root exudates on gel-beads/reeds combination remediation of high molecular weight polycyclic aromatic hydrocarbons. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, v.135, p.158-164, 2017.
- VIEIRA, G. D.; CASTILHOS, D. D.; CASTILHOS, R. M. V. Atributos microbianos do solo após a adição de lodo anaeróbico da estação de tratamento de efluentes de parboilização de arroz. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.35, p.543-550, 2011.
- VIEIRA, R. F.; PAZIANOTTO, R. A. A. Microbial Activities in soil cultivated with corn and amended with sewage sludge. *SpringerPlus*, v.5, p.1844-1860, 2016.
- VILLANUEVA, F. C. A.; BOARETTO, A. E.; FIRME, L. P.; MURAOKA, T.; NASCIMENTO FILHO, V. F.; ABREU JUNIOR, C. H. Mudanças químicas e fitodisponibilidade de zinco estimada por método isotópico, em solo tratado com lodo de esgoto. *Química Nova*, v.35, p.1348-1354, 2012.
- WAKEEL, A.; FAROOQ, M.; QADIR, M.; SCHUBERT, S. Potassium substitution by sodium in plants. *Critical Reviews in Plant Sciences*, v.30, p.401-413, 2011.
- ZHANG, L.; SUN, X. Influence Of bulking agentes on physical, chemical, and microbiological properties during the two-stage composting of green waste. *Waste Management*, v.48, p.115-126, 2016.
- ZHANG, X.; XIA, H.; LI, H.; ZHUANG, P. GAO, B. Potencial of four forage grasses in remediation of Cd and Zn contaminated soils. *Bioresource Technology*, v.101, p.2063-2066, 2010.

### **CAPÍTULO 3 – CARACTERIZAÇÃO DE LODO DE ESGOTO CULTIVADO COM *Pennisetum purpureum* E *Urochloa brizantha*, NA PRESENÇA E AUSÊNCIA DE AERAÇÃO, E COMPOSTADO**

**Resumo:** O objetivo deste trabalho foi avaliar os atributos físicos, químicos e microbianos de lodo de esgoto cultivado com *Pennisetum purpureum* e *Urochloa brizantha* na presença ou ausência de aeração e, posteriormente, compostado. O estudo foi conduzido em área experimental do ICA/UFMG, em delineamento em blocos casualizados, com 4 repetições e esquema fatorial 2x2+2. Os fatores consistiram em cultivo de *P. purpureum* ou *U. brizantha* (densidade de plantio de 50 plantas/m<sup>2</sup>) em lodo de esgoto, com aeração intermitente (30 min on/off) por 60 dias (vazão de 0,14 m<sup>3</sup> min<sup>-1</sup> m<sup>-3</sup>) ou sem aeração. Os tratamentos adicionais foram sem cultivo, com ou sem aeração. Após 90 dias de cultivo, a gramínea foi cortada, triturada e incorporada ao lodo de esgoto para a realização da compostagem. Durante 60 dias, o material foi compostado. Após esse período, foram coletadas amostras e levadas para laboratório, onde foram realizadas as análises físicas, químicas e microbianas. Os dados obtidos foram submetidos à análise de variância e desdobramento dos tratamentos em contrastes ortogonais a 5% de probabilidade pelo teste F. Os resultados obtidos para granulometria, densidade aparente e de partícula, porosidade e capacidade de retenção de água caracterizaram a aptidão dos compostos como substrato para produção de mudas. O processo da compostagem aumentou a CTC, relação CTC/C e teores totais de P e Ca e reduziu a relação C/N, os teores de C org., Nt, K e Mg totais, em comparação a amostra inicial de lodo de esgoto. Os teores dos metais pesados Zn, Cu, Pb e Ni ficaram abaixo do limite máximo estabelecido pela resolução CONAMA nº 375. A atividade microbiana, o C da biomassa microbiana e os quocientes metabólico e o microbiano demonstraram que os compostos produzidos apresentaram-se estáveis. Em virtude dos resultados obtidos, considerou-se que a compostagem de lodo de esgoto com os resíduos das gramíneas foi eficaz para a produção de adubo orgânico com menores riscos de contaminação do meio.

**Palavras-chave:** adubo orgânico, biodegradação, biossólido, compostagem, reciclagem de resíduos.

#### **1 Introdução**

Estudos da ONU relatam que, em 2050, a população mundial atingirá 9,6 bilhões de pessoas (ONU, 2013), aumentando, como consequência, a produção de resíduos gerados, como o

lodo de esgoto. São necessários, portanto estudos que visam estabelecer uma destinação correta e consciente a esse resíduo.

Alguns estudos já relatam a utilização do lodo de esgoto na agricultura como um importante método para a destinação do lodo, por seu alto teor de matéria orgânica e elementos essenciais às plantas, obtendo aumento de produtividade em cultivo de diversas culturas, como milho (ZUBA JUNIO *et al.*, 2013), cana-de-açúcar (NOGUEIRA *et al.*, 2013) e aumento de volume de madeira (ABREU-JUNIOR *et al.*, 2017). Entretanto o lodo de esgoto precisa ser estabilizado antes da sua aplicação em solos agrícolas, mesmo aqueles classificados como Classe A, segundo a resolução CONAMA nº 375 (BRASIL, 2006), evitando, assim, emissão de odores e propagação de vetores e insetos.

Dos métodos de estabilização de lodo de esgoto destaca-se a compostagem, processo de decomposição biológica controlada pelos resíduos orgânicos, efetuado por uma população diversificada de organismos, em condições aeróbias, resultando em material estabilizado (BRASIL, 2017). No entanto, para a compostagem de lodo de esgoto, necessita-se de material carbonáceo para ser atingida a relação C/N inicial ideal de 15 a 30 (COTTA *et al.*, 2015), sendo a relação C/N do lodo de esgoto, normalmente, menor que 10 (ZHANG *et al.*, 2018). Todavia, muitas vezes, a obtenção do material carbonáceo é difícil por causa da fonte e, principalmente, pelos custos de transporte, inviabilizando o processo nas estações de tratamento de esgoto (ETEs) ou nas empresas gestoras do lodo de esgoto.

Dessa forma, este trabalho propõe o cultivo de gramíneas no próprio lodo de esgoto, para obtenção de material carbonáceo para posterior compostagem, objetivando avaliar os atributos físicos, químicos e microbianos de lodo de esgoto cultivado com *Pennisetum purpureum* e *Urochloa brizantha* na presença ou ausência de aeração e, posteriormente, compostado, para verificar a estabilidade do composto de lodo de esgoto produzido.

## **2 Material e Métodos**

### **2.1 Instalação, Delineamento e Tratamentos do Experimento**

O experimento foi conduzido na fazenda experimental Professor Hamilton de Abreu Navarro do Instituto de Ciências Agrárias (ICA) da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), campus regional de Montes Claros, latitude 16°51'38'' S e longitude 44°55'00'' W, com 652 m de altitude, no período de 02 de novembro de 2016 a 31 de janeiro de 2017 para o cultivo das gramíneas e de 17 de fevereiro a 14 de abril de 2017, para a compostagem. Conforme

a classificação de Köppen, o clima predominante na região é o Aw – tropical de savana, com verão chuvoso e inverno seco.

O experimento apresentou delineamento em blocos casualizados (DBC), em esquema fatorial 2 x 2 com 2 tratamentos adicionais, em que os fatores foram os cultivos *Pennisetum purpureum* Schum. e *Urochloa brizantha* cv. Marandu (densidade de plantio de 50 plantas por m<sup>2</sup>), combinados com a presença ou ausência de aeração (0,14 m<sup>3</sup> min<sup>-1</sup> m<sup>-3</sup>) do lodo de esgoto, e os tratamentos adicionais corresponderam à presença ou ausência de aeração do lodo de esgoto não cultivado, com 4 repetições, totalizando 24 unidades experimentais, formadas por um caixote de madeirite nas dimensões de 70 x 70 x 55 cm de comprimento, largura e altura, preenchidas até 50 cm de altura com lodo de esgoto seco termicamente a 350 °C por 30 min da ETE-Vieira de Montes Claros-MG.

Durante o cultivo, as parcelas foram irrigadas de forma a manter a umidade próxima à capacidade de campo, com o intuito de disponibilizar água para as plantas e para os microrganismos, porém evitando-se encharcamento e, conseqüentemente, perdas por escoamento de lixiviado.

Após 90 dias de cultivo das gramíneas, foi realizada a coleta de lodo (0-50 cm) e de quatro plantas (parte aérea e raiz) de cada unidade experimental, para determinação dos teores de C org. e Nt do lodo, para obtenção da relação C/N e da matéria fresca, para obtenção da relação biomassa/substrato. A parte aérea das plantas restantes foi coletada e triturada em triturador forrageiro. O material triturado foi, então, adicionado à sua unidade experimental correspondente e, juntamente com o sistema radicular, homogeneizado manualmente, para a realização da compostagem. O material foi revolvido a cada 15 dias, durante 2 meses e foi realizado o umedecimento do substrato conforme as recomendações de Kiehl (2012).

As médias da relação da biomassa fresca das gramíneas por massa de lodo de esgoto, em kg kg<sup>-1</sup>, foram de 0,06±0,02 (CAPP); 0,05±0,03 (SAPP); 0,04±0,03 (CAUB) e 0,04±0,02 (SAUB), enquanto as relações C/N iniciais foram de: 11,34±1,62 (CAPP); 10,81±1,18 (SAPP); 10,17±0,80 (CAUB) e 10,62±1,05 (SAUB).

## 2.2 Coleta e Análises das Amostras

Após o período de compostagem, as amostras de lodo de esgoto foram coletadas, passadas em peneira de 4 mm, armazenadas em frascos de vidro e condicionadas em geladeira a 4 °C até o momento das análises, descritas a seguir.

### 2.2.1 Caracterização Física

Para análise granulométrica, foram pesados 100 g do material seco a 65 °C em estufa de circulação forçada de ar e passados por conjunto de peneira com malhas de 2, 1, 0,5 e 0,25 mm, em agitador automático de peneiras por 15 minutos. Posteriormente, o material retido em cada peneira foi pesado para obtenção da proporção de cada classe de tamanho de partícula (EMBRAPA, 1997).

Para densidade aparente, foi utilizado método da autocompactação da amostra em proveta de 100 cm<sup>3</sup>, deixando-se cair a 10 cm de altura por 10 vezes e posterior pesagem material (EMBRAPA, 1997). Para a densidade de partícula, foi utilizado método de preenchimento dos espaços vazios do composto de peso conhecido com água destilada quente, adaptado de Zorzeto *et al.* (2014).

A porosidade total foi obtida a partir de cálculo da relação da diferença da densidade de partícula pela aparente, dividido pela densidade de partícula. A capacidade de retenção de água foi obtida a partir da umidade volumétrica do composto, na pressão de 0,1 bar em extrator de Richards (EMBRAPA, 1997).

### 2.2.2 Caracterização Química

Para determinação do pH em H<sub>2</sub>O e em CaCl<sub>2</sub> 0,01 mol L<sup>-1</sup> e da condutividade elétrica foi utilizada proporção 1:5. Para determinação da matéria orgânica, resíduo mineral total, solúvel e insolúvel, C orgânico e capacidade de troca catiônica foi utilizado método proposto por Alcarde (2009).

Para determinação de N total e mineral, foram utilizadas metodologias de acordo com Tedesco *et al.* (1995). Para a determinação do teor de P, K, Ca, Mg, Fe, Na, Cu, Zn, Pb, Ni, Cd, Ba, Cr e Mn totais, foi realizada digestão aberta com solução nítrico-perclórica 3:1 em bloco digestor. A quantificação de P foi feita por espectrofotômetro UV/VIS, enquanto o K e o Na foram determinados por fotômetro de chama. Os demais elementos foram analisados por espectrometria de absorção atômica, de acordo com Malavolta (2006). Ainda foram calculadas as relações C/N e CTC/C.

O cálculo de N disp. foi realizado de acordo com o sugerido pelo Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA), resolução nº 375 (BRASIL, 2006), que leva em consideração frações de mineralização (FM) de N, propostas pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (USEPA), sendo de 20% para lodo de esgoto digerido anaerobiamente e de 10% para lodo compostado (USEPA, 1996).

### 2.2.3 Caracterização Microbiana

A atividade microbiana foi medida pelo método da taxa respirométrica pela evolução de C-CO<sub>2</sub> (EMBRAPA, 2007a). O carbono da biomassa microbiana foi obtido, segundo metodologia da Embrapa (2007b), com valor de Kc proposto por Sparling e West (1988) para material orgânico. Ainda foram calculados os quocientes metabólicos e microbianos, segundo Embrapa (2007a).

As análises descritas acima foram realizadas na amostra de caracterização do lodo de esgoto utilizado para realização do experimento e os resultados são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Caracterização física, química e microbiana do lodo de esgoto utilizado para realização do experimento

Atributo	Resultado	Atributo	Resultado
2-4 mm (%)	68,89	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> (g kg <sup>-1</sup> )	4,15
1-2 mm (%)	21,61	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (g kg <sup>-1</sup> )	0,08
0,5-1 mm (%)	6,05	N min. (g kg <sup>-1</sup> )	4,23
0,25-0,5 mm (%)	2,4	N org. (g kg <sup>-1</sup> )	28,01
<0,25 mm (%)	1,05	N disp. (g kg <sup>-1</sup> )	9,84
DAP (g cm <sup>-3</sup> )	0,50	P (g kg <sup>-1</sup> )	7,77
DP (g cm <sup>-3</sup> )	1,42	K (g kg <sup>-1</sup> )	4,05
Porosidade (%)	65,15	Ca (g kg <sup>-1</sup> )	10,31
CRA (% vol.)	26,10	Mg (g kg <sup>-1</sup> )	1,61
pH H <sub>2</sub> O	6,03	Fe (mg kg <sup>-1</sup> )	3.074,75
pH CaCl <sub>2</sub> 0,01 mol L <sup>-1</sup>	5,91	Na (mg kg <sup>-1</sup> )	617,76
CE (dS m <sup>-1</sup> )	2,72	Zn (mg kg <sup>-1</sup> )	282,91
MO (g kg <sup>-1</sup> )	572,30	Cu (mg kg <sup>-1</sup> )	111,82
RMT (g kg <sup>-1</sup> )	427,70	Mn (mg kg <sup>-1</sup> )	119,86
RMI (g kg <sup>-1</sup> )	202,29	Ni (mg kg <sup>-1</sup> )	23,43
RMS (g kg <sup>-1</sup> )	255,41	Pb (mg kg <sup>-1</sup> )	30,77
C org. (g kg <sup>-1</sup> )	322,81	RB (mg kg <sup>-1</sup> h <sup>-1</sup> )	3,79
N total (g kg <sup>-1</sup> )	32,24	RAC (mg kg <sup>-1</sup> )	67,92
C/N	10,01	CBM (mg kg <sup>-1</sup> )	10.715,53
CTC (mmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup> )	916,01	qMIC (%)	3,32
CTC/C	28,38	qCO <sub>2</sub> (mg g <sup>-1</sup> CBM h <sup>-1</sup> )	0,35

Nota: DAP – Densidade aparente; DP – Densidade de partículas; % vol. – Umidade volumétrica; CRA – Capacidade de retenção de água; CE – Condutividade elétrica; MO – Matéria orgânica; RMT – Resíduo mineral total; RMI – Resíduo mineral insolúvel; RMS – Resíduo mineral solúvel; C org. – C orgânico; CTC – Capacidade de troca catiônica; N min. – N mineral; N org. – N orgânico; N disp. – N disponível; RB – Respiração basal; h – Hora; RAC – Respiração acumulada; CBM – C da biomassa microbiana; qMIC – Quociente microbiano; qCO<sub>2</sub> – Quociente metabólico; Cr foi apenas detectado (<1,25 mg L<sup>-1</sup>); Ba, Cd e Mo não foram detectados.

Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

## 2.3 Análises Estatísticas

Os dados obtidos da relação biomassa/substrato foram submetidos ao teste de intervalo de confiança pelo teste t a 5% de probabilidade. Os dados obtidos nas análises do lodo de esgoto foram submetidos à análise de variância, com desdobramentos dos tratamentos em contrastes ortogonais, aplicando-se o teste F a 5% de probabilidade pelo *software* RStudio *version* 1.0.153. Os contrastes foram:

Quadro 1 – Contrastes ortogonais utilizados nas análises estatísticas do experimento e suas finalidades

Contraste ortogonal	Finalidade
$C1 = 2 \times \text{CASC} + 2 \times \text{SASC} - \text{CAUB} - \text{SAUB} - \text{CAPP} - \text{SAPP}$	Comparar os tratamentos com e sem cultivo
$C2 = \text{CASC} - \text{SASC}$	Comparar a presença e ausência de aeração no lodo sem cultivo
$C3 = \text{CAUB} + \text{SAUB} - \text{CAPP} - \text{SAPP}$	Comparar o cultivo de <i>U. brizantha</i> com o de <i>P. purpureum</i> em lodo de esgoto
$C4 = \text{CAUB} - \text{SAUB}$	Comparar a presença e ausência de aeração de lodo de esgoto cultivado com <i>U. brizantha</i>
$C5 = \text{CAPP} - \text{SAPP}$	Comparar a presença e ausência de aeração de lodo de esgoto cultivado com <i>P. purpureum</i>

Nota: CASC – Lodo com aeração e sem cultivo; SASC – Lodo sem aeração e sem cultivo; CAPP – Lodo com aeração e cultivo de *Pennisetum purpureum*; SAPP – Lodo sem aeração e com cultivo de *Pennisetum purpureum*; CAUB – Lodo com aeração e cultivo de *Urochloa brizantha*; SAUB – lodo sem aeração e cultivo de *Urochloa brizantha*.

Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

## 3 Resultados e Discussão

### 3.1 Caracterização Física

A granulometria do composto não foi influenciada pelos tratamentos após a compostagem (TABELA 2). Entretanto obteve-se redução de 48,9% da proporção de partículas de 2-4 mm e aumento de 58; 196; 313 e 167% da proporção das partículas de 1-2; 0,5-1; 0,25-0,5 e <0,25 mm, respectivamente, em comparação à amostra de lodo de esgoto inicial (TABELA 1).

Tabela 2 – Médias e significância dos contrastes para granulometria de lodo de esgoto cultivado com *P. purpureum* e *U. brizantha*, com ou sem aeração, e compostado

Tratamentos / Contrastes	4-2 mm	2-1 mm	1-0,5 mm	0,5-0,25 mm	<0,25 mm
	----- % -----				
CASC	31,87	38,31	18,01	9,08	2,75
SASC	37,72	34,71	16,85	8,83	1,90
CAPP	37,52	31,53	18,36	10,03	2,57
SAPP	35,14	33,69	17,91	10,15	3,12
CAUB	33,81	31,39	19,00	12,14	3,67
SAUB	35,24	35,27	17,32	9,40	2,78
Média	35,22	34,15	17,91	9,94	2,80
C <sub>1</sub> = SC – CC	ns	ns	ns	ns	ns
C <sub>2</sub> = CASC – SASC	ns	ns	ns	ns	ns
C <sub>3</sub> = PP – UB	ns	ns	ns	ns	ns
C <sub>4</sub> = CAPP – SAPP	ns	ns	ns	ns	ns
C <sub>5</sub> = CAUB - SAUB	ns	ns	ns	ns	ns
CV (%)	14,37	14,71	10,13	28,47	52,26

Nota: C<sub>1</sub>, C<sub>2</sub>, C<sub>3</sub>, C<sub>4</sub> e C<sub>5</sub> – Contrastes 1, 2, 3, 4 e 5, respectivamente; SC – Lodo sem cultivo (CASC; SASC); CC – Lodo com cultivo (CAPP; SAPP; CAUB; SAUB); CASC – Lodo com aeração e sem cultivo; SASC – Lodo sem aeração e sem cultivo; PP – Cultivo de *P. purpureum* (CAPP; SAPP); UB – Cultivo de *U. brizantha* (CAUB; SAUB); CAPP – Lodo com aeração e cultivo de *P. purpureum*; SAPP – Lodo sem aeração e com cultivo de *P. purpureum*; CAUB – Lodo com aeração e cultivo de *U. brizantha*; SAUB – lodo sem aeração e cultivo de *U. brizantha*; ns – Não significativo a 5% de probabilidade pelo teste F.

Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

A redução das partículas de maior tamanho e o aumento das de menor tamanho foram associados à degradação e à decomposição do substrato no processo da compostagem, como afirmam Fornes *et al.* (2012). Zhang e Sun (2016) enfatizam que, quanto maior a proporção de partículas entre 0,25 e 2 mm melhor é a granulometria do composto, interferindo diretamente na sua porosidade, capacidade de retenção de água e densidade aparente. Foi observada, neste trabalho, proporção de 62% de partículas de 0,25 a 2 mm, enquadrando-se como um composto de boa granulometria.

Obteve-se efeito significativo para o contraste 3 (C3) para a densidade aparente (DAp), evidenciando que o lodo de esgoto com cultivo e compostagem com *P. purpureum* apresentou DAp menor que o com *U. brizantha* (TABELA 3). Pampuro *et al.* (2017) reportam que quanto maior a proporção de partículas maiores de um composto menor é a sua DAp. Com isso, se analisarmos a porcentagem das partículas de 2-4 mm dos tratamentos com cultivo, percebemos que houve proporção de 34,53 e 36,33% das partículas desse tamanho para os tratamentos com *U. brizantha* e *P. purpureum*, respectivamente, explicando a menor DAp nos tratamentos com *P. purpureum*. Costa *et al.* (2017) recomendam que a DAp seja de 0,4 a 0,5 g cm<sup>-3</sup> para substrato de plantas, sendo obtida, neste trabalho, média de 0,55 g cm<sup>-3</sup>.

Tabela 3 – Médias e significância dos contrastes para densidade aparente (D<sub>ap</sub>) e de partículas (DP), porosidade total (PT) e capacidade de retenção de água (CRA) de lodo de esgoto cultivado com *P. purpureum* e *U. brizantha*, com ou sem aeração, e compostado

Tratamentos / Contrastes	D <sub>ap</sub> ----- g cm <sup>-3</sup> -----	DP	PT % v/v	CRA % vol.
CASC	0,56	1,65	66,21	23,61
SASC	0,55	1,63	66,15	23,28
CAPP	0,55	1,65	67,06	23,34
SAPP	0,52	1,60	67,22	20,68
CAUB	0,56	1,62	65,52	24,35
SAUB	0,55	1,62	66,17	24,02
Média	0,55	1,63	66,39	23,21
C <sub>1</sub> = SC – CC	ns	ns	ns	ns
C <sub>2</sub> = CASC – SASC	ns	ns	ns	ns
C <sub>3</sub> = PP – UB	-0,04*	ns	ns	-4,35*
C <sub>4</sub> = CAPP – SAPP	ns	ns	ns	ns
C <sub>5</sub> = CAUB - SAUB	ns	ns	ns	0,33*
CV (%)	3,08	2,16	1,58	7,11

Nota: C<sub>1</sub>, C<sub>2</sub>, C<sub>3</sub>, C<sub>4</sub> e C<sub>5</sub> – Contrastes 1, 2, 3, 4 e 5, respectivamente; SC – Lodo sem cultivo (CASC; SASC); CC – Lodo com cultivo (CAPP; SAPP; CAUB; SAUB); CASC – Lodo com aeração e sem cultivo; SASC – Lodo sem aeração e sem cultivo; PP – Cultivo de *P. purpureum* (CAPP; SAPP); UB – Cultivo de *U. brizantha* (CAUB; SAUB); CAPP – Lodo com aeração e cultivo de *P. purpureum*; SAPP – Lodo sem aeração e com cultivo de *P. purpureum*; CAUB – Lodo com aeração e cultivo de *U. brizantha*; SAUB – lodo sem aeração e cultivo de *U. brizantha*. ns – Não significativo a 5% de probabilidade pelo teste F; \* - Significativo a 5% de probabilidade pelo teste F.

Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

Não foi observado efeito significativo para os contrastes em relação à densidade de partícula (DP) e porosidade total (PT) (TABELA 3). Houve aumento de 15,8 e 1,9% para DP e PT, respectivamente, em relação à amostra de caracterização do lodo de esgoto (TABELA 1). Esse incremento da DP é em razão do menor teor de matéria orgânica e maior teor de minerais, ao final da compostagem, formando um material mais denso, como sugere Zorzeto *et al.* (2014), sendo obtida DP média de 1,63 g cm<sup>-3</sup>. Em relação à PT, houve acréscimo de 1,9%, entretanto foi inferior ao recomendado por Lopes *et al.* (2008) de, no mínimo, 85%, sendo obtida porosidade média de 66,39% v/v (TABELA 3).

Para a capacidade de retenção de água (CRA) do composto, houve efeito significativo para o C<sub>3</sub> e o contraste 5 (C<sub>5</sub>). Nesses contrastes, o cultivo de *U. brizantha* na presença da aeração e posterior compostagem proporcionaram maior CRA ao lodo (TABELA 3). Zhang *et al.* (2013) afirmam que quanto maior a proporção de partículas menores que 0,5 mm maior é a capacidade de um composto reter água. Assim, os tratamentos com *U. brizantha* e *P. purpureum* apresentaram, respectivamente, 14,00 e 12,94% de partículas <0,5mm. E, para os tratamentos com *U. brizantha* com e sem aeração, apresentaram, respectivamente, 15,78 e 12,18% de partículas <0,5mm, proporcionando maior CRA desses compostos.

A avaliação desses atributos no substrato é de suma importância, pois traz benefícios ao desenvolvimento da planta, principalmente, do seu sistema radicular, quando utilizado como

substrato para produção de mudas e plantas. O mesmo ocorre, para as melhorias dos atributos do solo, principalmente, os físicos, quando utilizado como condicionador ou adubo orgânico.

### 3.2 Caracterização Química

O pH em H<sub>2</sub>O e CaCl<sub>2</sub> 0,01 mol L<sup>-1</sup> do composto foram influenciados pelos tratamentos, apresentando efeito significativo no contraste 1 (C1) e o C5 para pH em H<sub>2</sub>O e para o C5 para pH em CaCl<sub>2</sub> 0,01 mol L<sup>-1</sup> (TABELA 4). Pode-se notar, também, que houve redução de 8,1 e 9,8% da média dos tratamentos, em relação ao pH em H<sub>2</sub>O e CaCl<sub>2</sub> 0,01 mol L<sup>-1</sup>, respectivamente, da amostra inicial de lodo de esgoto (TABELA 1). A redução do pH e a significância dos contrastes citados foram em decorrência do próprio processo de decomposição da MO, em que há a liberação de íons H<sup>+</sup> durante a nitrificação e oxidação de sulfetos do composto (ANTONIADIS *et al.*, 2008; SOUZA *et al.*, 2012; VILLANUEVA *et al.*, 2012). A redução mais acentuada foi nos tratamentos com cultivo pela liberação de substâncias orgânicas (exsudatos) pelas plantas e microrganismos associados à sua rizosfera, além da decomposição dos resíduos das gramíneas. O pH médio em H<sub>2</sub>O obtido neste trabalho foi 5,54, dentro da faixa ideal de 5,5 a 6,5 recomendada por Amir *et al.* (2005) para produção de substrato para as plantas.

Tabela 4 – Médias e significância dos contrastes para pH em H<sub>2</sub>O e CaCl<sub>2</sub> 0,01 mol L<sup>-1</sup>, condutividade elétrica (CE), matéria orgânica (MO) e resíduo mineral total (RMT), insolúvel (RMI) e solúvel (RMS) de lodo de esgoto cultivado com *P. purpureum* e *U. brizantha*, com ou sem aeração, e compostado

Tratamentos / Contrastes	pH	pH	CE	MO	RMT	RMI	RMS
	H <sub>2</sub> O	CaCl <sub>2</sub> 0,01M					
CASC	5,61	5,36	2,60	532,89	467,12	259,47	207,65
SASC	5,69	5,45	2,27	530,45	469,55	257,22	212,33
CAPP	5,66	5,43	2,56	542,21	457,79	249,06	208,73
SAPP	5,36	5,21	3,06	534,01	465,99	262,13	203,86
CAUB	5,47	5,24	2,08	544,38	455,62	246,47	209,15
SAUB	5,46	5,31	3,09	544,49	455,51	247,10	208,41
Média	5,54	5,33	2,61	538,07	461,93	253,58	208,36
C <sub>1</sub> = SC – CC	0,65*	ns	ns	ns	ns	ns	ns
C <sub>2</sub> = CASC – SASC	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
C <sub>3</sub> = PP – UB	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
C <sub>4</sub> = CAPP – SAPP	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
C <sub>5</sub> = CAUB - SAUB	0,01*	-0,07*	ns	ns	ns	ns	ns
CV (%)	2,86	2,50	34,88	3,83	4,46	8,42	3,62

Nota: C<sub>1</sub>, C<sub>2</sub>, C<sub>3</sub>, C<sub>4</sub> e C<sub>5</sub> – Contrastes 1, 2, 3, 4 e 5, respectivamente; SC – Lodo sem cultivo (CASC; SASC); CC – Lodo com cultivo (CAPP; SAPP; CAUB; SAUB); CASC – Lodo com aeração e sem cultivo; SASC – Lodo sem aeração e sem cultivo; PP – Cultivo de *P. purpureum* (CAPP; SAPP); UB – Cultivo de *U. brizantha* (CAUB; SAUB); CAPP – Lodo com aeração e cultivo de *P. purpureum*; SAPP – Lodo sem aeração e com cultivo de *P. purpureum*; CAUB – Lodo com aeração e cultivo de *U. brizantha*; SAUB – lodo sem aeração e cultivo de *U. brizantha*; ns – Não significativo a 5% de probabilidade pelo teste F; \* - Significativo a 5% de probabilidade pelo teste F.

Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

Não houve efeito significativo dos contrastes para condutividade elétrica (CE), a matéria orgânica (MO) e os resíduos mineral total (RMT), insolúvel (RMI) e solúvel (RMS) (TABELA 4). Quanto à CE, houve redução de 4% da amostra inicial de lodo de esgoto (TABELA 1), com valor médio de 2,61 dS m<sup>-1</sup> ao final da compostagem. Zhang e Sun (2016) recomendam que a CE seja de, no máximo, 4 dS m<sup>-1</sup>, valor esse superior ao encontrado neste trabalho, reduzindo riscos de efeitos negativos sobre a atividade microbiana, durante o processo da compostagem e no desenvolvimento de plantas em substrato ou em solo adubado com o composto produzido. A redução da CE é explicada pelas perdas de íons solúveis, principalmente, K e Na, por sua lixiviação e precipitação nas formas de sais não solúveis (FORNES *et al.*, 2012).

Houve redução de 5,98 e 7,45% para MO e RMS e incremento de 8,0 e 25,3% para RMT e RMI, respectivamente, da média dos tratamentos em relação à amostra inicial de lodo de esgoto (TABELA 1). A redução de MO e aumento de RMT, ao final da compostagem, foram atribuídos aos processos de degradação e decomposição da própria MO do lodo. No entanto a redução no teor de RMS pode ter ocorrido em virtude da precipitação pluviométrica que ocorreu no período de cultivo das gramíneas (252,9 mm), perdendo-se parte dos nutrientes via lixiviado, ou pela sua absorção pelas plantas durante o período de cultivo.

A Tabela 5 evidencia que não houve efeito significativo dos contrastes para os teores de C orgânico (C org.) e N total (Nt), capacidade de troca catiônica (CTC) e das relações C/N e CTC/C. Assim como a MO, houve redução média de 22,5% do teor de C org., ao final da compostagem, em relação à amostra inicial de lodo de esgoto (TABELA 1), justificada pelo processo de degradação e decomposição da MO. Segundo a Instrução Normativa 25/2009 (IN nº25), publicada pelo Ministério da Agricultura e Pecuária (MAPA), o valor mínimo para comercialização de um fertilizante orgânico quanto ao C org. deve ser de 150,0 g kg<sup>-1</sup> (BRASIL, 2009). O teor médio de C org. obtido dos tratamentos, ao final da compostagem foi de 250,12 g kg<sup>-1</sup>, valor superior ao mínimo estabelecido.

Tabela 5 – Médias e significância dos contrastes para os teores de C orgânico (C org.) e N total (Nt), capacidade de troca catiônica (CTC) e das relações C/N e CTC/C de lodo de esgoto cultivado com *P. purpureum* e *U. brizantha*, com ou sem aeração, e compostado

Tratamentos / Contrastes	C org. ----- g kg <sup>-1</sup> -----	Nt -----	CTC mmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup>	Relação C/N -	Relação CTC/C -
CASC	246,94	30,55	947,90	8,57	40,69
SASC	253,46	30,45	915,38	8,84	36,73
CAPP	240,04	30,24	960,60	7,70	40,06
SAPP	255,03	31,04	944,05	8,66	38,16
CAUB	256,34	30,67	962,16	8,26	38,89
SAUB	248,89	30,36	952,07	7,67	38,46
Média	250,12	30,55	947,03	8,28	38,83
C <sub>1</sub> = SC – CC	ns	ns	ns	ns	ns
C <sub>2</sub> = CASC – SASC	ns	ns	ns	ns	ns
C <sub>3</sub> = PP – UB	ns	ns	ns	ns	ns
C <sub>4</sub> = CAPP – SAPP	ns	ns	ns	ns	ns
C <sub>5</sub> = CAUB - SAUB	ns	ns	ns	ns	ns
CV (%)	14,92	2,76	5,55	18,61	17,02

Nota: C<sub>1</sub>, C<sub>2</sub>, C<sub>3</sub>, C<sub>4</sub> e C<sub>5</sub> – Contrastes 1, 2, 3, 4 e 5, respectivamente; SC – Lodo sem cultivo (CASC; SASC); CC – Lodo com cultivo (CAPP; SAPP; CAUB; SAUB); CASC – Lodo com aeração e sem cultivo; SASC – Lodo sem aeração e sem cultivo; PP – Cultivo de *P. purpureum* (CAPP; SAPP); UB – Cultivo de *U. brizantha* (CAUB; SAUB); CAPP – Lodo com aeração e cultivo de *P. purpureum*; SAPP – Lodo sem aeração e com cultivo de *P. purpureum*; CAUB – Lodo com aeração e cultivo de *U. brizantha*; SAUB – lodo sem aeração e cultivo de *U. brizantha*; ns – Não significativo a 5% de probabilidade pelo teste F.

Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

Em relação ao Nt, houve redução de 5,2% em relação à amostra inicial de lodo de esgoto (TABELA 1), atingindo valor médio de 30,55 g kg<sup>-1</sup> (TABELA 5). A IN n° 25 estabelece valor mínimo de 5g kg<sup>-1</sup> para N (BRASIL, 2009), sendo o valor obtido, neste trabalho, aproximadamente, seis vezes superior. A redução no teor de Nt, no processo de compostagem, foi atribuída a perdas de N por volatilização durante a mineralização do lodo. Yuan *et al.* (2016) relatam que, com o aumento da taxa de aeração, pode ocorrer aumento da volatilização de amônia (NH<sub>3</sub>) na compostagem de lodo de esgoto.

Ao final da compostagem, a CTC apresentou valor médio de 947,03 mmol<sub>c</sub> kg<sup>-1</sup> (TABELA 5), aumentando 3,4% em comparação à amostra inicial de lodo de esgoto (TABELA 1). O incremento da CTC ocorre pela formação de grupos funcionais, como carboxilas e fenólicos, derivados da quebra de compostos maiores durante a humificação da MO, caracterizando, assim, um composto estável e maturado (FORNES *et al.*, 2012; ZHANG; SUN, 2016).

As relações C/N e CTC/C expressam o grau de maturação e estabilidade do composto produzido. Observaram-se, no final da compostagem, médias de 8,28 e 38,83 para as relações C/N e CTC/C, respectivamente (TABELA 5). A IN n° 25 estabelece que o limite máximo permitido, para a relação C/N, é de 20 (BRASIL, 2009), sendo então superior ao encontrado neste trabalho. Zhang *et al.* (2013) declaram que, quando a relação C/N for menor que 12, o composto apresenta-se maturado, valor este também superior ao obtido ao final da compostagem

desta pesquisa. Entretanto a relação CTC/C é mais indicada que a C/N para caracterizar a maturação do composto. Assim, Lima *et al.* (2009) estabelecem relação CTC/C superior a 17, para o composto maturado, sendo que o encontrado neste trabalho apresenta média 2,3 vezes maior ao mínimo estabelecido.

Os teores de N amoniacal (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>), nitrato e nitrito (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>), mineral (N min.), orgânico (N org.) e disponível (N disp.) não foram influenciados pelos tratamentos ao final da compostagem (TABELA 6). No entanto, em comparação à amostra inicial de lodo de esgoto (TABELA 1), houve redução de 98,4% no teor de NH<sub>4</sub><sup>+</sup> e incremento de 9,8 vezes no teor de NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, obtendo teores de 0,067 e 0,786 g kg<sup>-1</sup>, respectivamente. Esse resultado, ao final da compostagem, foi atribuído ao processo de nitrificação do NH<sub>4</sub><sup>+</sup> em NO<sub>3</sub><sup>-</sup>. Porém, quando se analisa o teor de N min., percebe-se que houve redução média de 79,6% da amostra inicial (TABELA 1), evidenciando perdas de N do composto por volatilização da amônia (NH<sub>3</sub>), pela elevação da temperatura e pH durante a compostagem e início do cultivo, por lixiviação e pela absorção de N min. pelas gramíneas durante o cultivo. Parte do N min. absorvido pela planta, também, pode ser reincorporada ao composto na forma de N org., pois obteve-se aumento de 6% no teor de N org., no final da compostagem, incorporado ao sistema pela adição das gramíneas no substrato, corroborando com observado por Awasthi *et al.* (2016).

Tabela 6 – Médias e significância dos contrastes para os teores de N amoniacal (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>), nitrato e nitrito (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>), mineral (N min.), orgânico (N org.) e disponível (N disp.) de lodo de esgoto cultivado com *P. purpureum* e *U. brizantha*, com ou sem aeração, e compostado

Tratamentos / Contrastes	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	N min.	N org.	N disp.
	----- g kg <sup>-1</sup> -----				
CASC	0,088	0,785	0,87	29,67	3,92
SASC	0,048	0,440	0,49	29,96	3,53
CAPP	0,065	0,685	0,75	29,49	3,77
SAPP	0,050	0,905	1,02	30,02	4,11
CAUB	0,058	1,133	1,19	29,48	4,25
SAUB	0,090	0,770	0,86	29,49	3,89
Média	0,067	0,786	0,86	29,69	3,91
C <sub>1</sub> = SC – CC	ns	ns	ns	ns	ns
C <sub>2</sub> = CASC – SASC	ns	ns	ns	ns	ns
C <sub>3</sub> = PP – UB	ns	ns	ns	ns	ns
C <sub>4</sub> = CAPP – SAPP	ns	ns	ns	ns	ns
C <sub>5</sub> = CAUB - SAUB	ns	ns	ns	ns	ns
CV (%)	41,51	53,06	52,82	3,18	11,83

Nota: C<sub>1</sub>, C<sub>2</sub>, C<sub>3</sub>, C<sub>4</sub> e C<sub>5</sub> – Contrastes 1, 2, 3, 4 e 5, respectivamente; SC – Lodo sem cultivo (CASC; SASC); CC – Lodo com cultivo (CAPP; SAPP; CAUB; SAUB); CASC – Lodo com aeração e sem cultivo; SASC – Lodo sem aeração e sem cultivo; PP – Cultivo de *P. purpureum* (CAPP; SAPP); UB – Cultivo de *U. brizantha* (CAUB; SAUB); CAPP – Lodo com aeração e cultivo de *P. purpureum*; SAPP – Lodo sem aeração e com cultivo de *P. purpureum*; CAUB – Lodo com aeração e cultivo de *U. brizantha*; SAUB – lodo sem aeração e cultivo de *U. brizantha*. ns – Não significativo a 5% de probabilidade pelo teste F.

Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

Foi obtido teor de N disp. de 9,84 g kg<sup>-1</sup> para o lodo de esgoto utilizado no experimento (TABELA 1) e de 3,91 g kg<sup>-1</sup> para a média ao final da compostagem (TABELA 6), cada qual com a sua FM correspondente. Portanto, se considerarmos a necessidade de uma cultura de 100 kg ha<sup>-1</sup> de N, seria aplicada dose média de 25,6 t ha<sup>-1</sup> do lodo de esgoto compostado. Apesar de a dose ser considerada normal para adubação orgânica, ainda, poderia ser menor, se as FMs fossem mais adequadas, por causa das variações nas condições climáticas e de solo existentes, diminuindo, assim, riscos de contaminação do solo por substâncias orgânicas e inorgânicas do lodo e aplicação excessiva de N.

Não houve efeito significativo dos contrastes para os teores de P, Ca, Mg e Fe (TABELA 7). No entanto houve incremento de 26,4; 24,2 e 122,9% no teor de P, Ca e Fe, respectivamente e redução de 30,4% no teor de Mg em relação à amostra de lodo inicial. O aumento no teor desses elementos pode ser explicado por sua concentração durante o processo de decomposição da matéria orgânica (COTTA *et al.*, 2015). Para o Mg, podem ter ocorrido perdas por lixiviação por ser um elemento solúvel (SARZI *et al.*, 2008).

Tabela 7 – Médias e significância dos contrastes para os teores de P, K, Ca, Mg, Fe e Na de lodo de esgoto cultivado com *P. purpureum* e *U. brizantha*, com ou sem aeração, e compostado

Tratamentos / Contrastes	P	K	Ca	Mg	Fe	Na
	g kg <sup>-1</sup>				mg kg <sup>-1</sup>	
CASC	9,87	2,43	12,97	0,97	8.479,48	140,17
SASC	10,02	3,21	13,10	1,28	6.293,55	172,77
CAPP	9,56	3,13	12,74	1,10	6.456,34	204,36
SAPP	9,76	3,12	12,86	1,13	7.296,14	182,47
CAUB	9,89	3,04	12,86	1,02	5.723,34	203,67
SAUB	9,81	2,97	12,33	1,20	6.865,35	225,01
Média	9,82	2,98	12,81	1,12	6.852,37	188,08
C <sub>1</sub> = SC – CC	ns	ns	ns	ns	ns	-189,63*
C <sub>2</sub> = CASC – SASC	ns	-0,78*	ns	ns	ns	ns
C <sub>3</sub> = PP – UB	ns	ns	ns	ns	ns	ns
C <sub>4</sub> = CAPP – SAPP	ns	ns	ns	ns	ns	ns
C <sub>5</sub> = CAUB - SAUB	ns	ns	ns	ns	ns	ns
CV (%)	5,65	13,93	9,84	18,52	22,52	59,24

Nota: C<sub>1</sub>, C<sub>2</sub>, C<sub>3</sub>, C<sub>4</sub> e C<sub>5</sub> – Contrastes 1, 2, 3, 4 e 5, respectivamente; SC – Lodo sem cultivo (CASC; SASC); CC – Lodo com cultivo (CAPP; SAPP; CAUB; SAUB); CASC – Lodo com aeração e sem cultivo; SASC – Lodo sem aeração e sem cultivo; PP – Cultivo de *P. purpureum* (CAPP; SAPP); UB – Cultivo de *U. brizantha* (CAUB; SAUB); CAPP – Lodo com aeração e cultivo de *P. purpureum*; SAPP – Lodo sem aeração e com cultivo de *P. purpureum*; CAUB – Lodo com aeração e cultivo de *U. brizantha*; SAUB – lodo sem aeração e cultivo de *U. brizantha*; ns – Não significativo a 5% de probabilidade pelo teste F; \* - Significativo a 5% de probabilidade pelo teste F.

Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

Quanto ao K e Na, houve efeito significativo para o contraste 2 (C2) e o C1. Para o K, o tratamento sem cultivo e sem aeração apresentou maior teor em relação ao com aeração. Para o Na, os tratamentos com cultivo apresentaram-se maior em relação ao sem cultivo (TABELA 7). Ainda houve redução de 26,4 e 69,6%, em relação à amostra inicial de lodo (TABELA 1),

respectivamente, pela alta mobilidade desses elementos. Ignatowicz (2017) enfatiza a importância na determinação dos nutrientes no lodo de esgoto, principalmente, de P, pela reinserção dos nutrientes na agricultura pelo uso agrícola desse resíduo.

A Tabela 8 evidencia que não houve efeito significativo dos contrastes para os teores totais de Zn, Ni e Pb, no entanto houve incremento médio de 31,8 e 7,7% nos teores de Zn e Pb, respectivamente, e redução de 8,8% no teor de Ni, em relação ao lodo de esgoto inicial (TABELA 1). O incremento dos elementos pode ser justificado pela perda de material orgânico pela decomposição (COTTA *et al.*, 2015). Já para o Ni, a redução pode ter ocorrido pela absorção do elemento pela planta e sua acumulação no sistema radicular, o qual apresentou baixa decomposição, ao final da compostagem, em razão de maior teor de lignina nas raízes, principalmente, nas mais velhas (BATISTA; MONTEIRO, 2006).

Tabela 8 – Médias e significância dos contrastes para os teores de Zn, Cu, Mn, Ni e Pb de lodo de esgoto cultivado com *P. purpureum* e *U. brizantha*, com ou sem aeração, e compostado

Tratamentos / Contrastes	Zn	Cu	Mn	Ni	Pb
	mg kg <sup>-1</sup>				
CASC	375,47	124,27	146,78	21,08	32,82
SASC	369,82	137,21	148,71	21,49	32,49
CAPP	371,90	127,95	139,30	21,49	33,06
SAPP	371,11	127,02	128,52	21,42	33,54
CAUB	379,51	137,69	143,87	21,50	32,60
SAUB	368,87	128,18	148,66	21,26	34,31
Média	372,78	130,39	142,64	21,37	33,14
C <sub>1</sub> = SC – CC	ns	ns	ns	ns	ns
C <sub>2</sub> = CASC – SASC	ns	-12,94**	ns	ns	ns
C <sub>3</sub> = PP – UB	ns	ns	-24,71*	ns	ns
C <sub>4</sub> = CAPP – SAPP	ns	0,93*	ns	ns	ns
C <sub>5</sub> = CAUB - SAUB	ns	ns	ns	ns	ns
CV (%)	3,64	4,69	6,79	6,53	5,49

Nota: C<sub>1</sub>, C<sub>2</sub>, C<sub>3</sub>, C<sub>4</sub> e C<sub>5</sub> – Contrastes 1, 2, 3, 4 e 5, respectivamente; SC – Lodo sem cultivo (CASC; SASC); CC – Lodo com cultivo (CAPP; SAPP; CAUB; SAUB); CASC – Lodo com aeração e sem cultivo; SASC – Lodo sem aeração e sem cultivo; PP – Cultivo de *P. purpureum* (CAPP; SAPP); UB – Cultivo de *U. brizantha* (CAUB; SAUB); CAPP – Lodo com aeração e cultivo de *P. purpureum*; SAPP – Lodo sem aeração e com cultivo de *P. purpureum*; CAUB – Lodo com aeração e cultivo de *U. brizantha*; SAUB – lodo sem aeração e cultivo de *U. brizantha*; ns – Não significativo a 5% de probabilidade pelo teste F; \*, \*\* - Significativo a 5 e 1% de probabilidade pelo teste F, respectivamente.

Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

Para o Cu, houve incremento de 16,6% em comparação à amostra inicial de lodo (TABELA 1). Houve significância para o C<sub>2</sub> e o contraste 4 (C<sub>4</sub>), com maiores teores para o tratamento sem cultivo e sem aeração, em comparação ao com aeração e, para o tratamento com aeração e cultivo do *P. purpureum*, em comparação ao sem aeração. Para o Mn, também houve incremento de 19% em comparação à amostra inicial de lodo (TABELA 1). Houve efeito significativo para o C<sub>3</sub>, com maior teor nos tratamentos com *U. brizantha* em comparação ao com *P. purpureum* (TABELA 8).

A resolução Conama nº 375 estabelece que o limite máximo de Zn, Cu, Ni e Pb, em lodo de esgoto, é de 2.800; 1.500; 420 e 300 mg kg<sup>-1</sup> (BRASIL, 2006), respectivamente. Pode-se observar que o teor desses elementos no lodo de esgoto inicial (TABELA 1) e após a compostagem (TABELA 8) estão abaixo do máximo permitido pela legislação.

A resolução nº 375, também, estabelece que a carga acumulada máxima permitida, ou seja, a quantidade de metais pesados aplicados, via lodo de esgoto no solo, seja de 445; 137; 74 e 41 kg ha<sup>-1</sup> para Zn, Cu, Ni e Pb, respectivamente (BRASIL, 2006). Assim, se consideramos a aplicação de 25,6 t ha<sup>-1</sup>, obtida anteriormente, seriam adicionados 9,58; 3,34; 0,55 e 0,85 kg ha<sup>-1</sup> de Zn, Cu, Ni e Pb, respectivamente, ao solo. Esses valores encontram-se inferiores ao máximo estabelecido e, ainda, seriam necessários 46,5; 41; 134,5 e 48 aplicações de lodo de esgoto, sem que houvesse perdas (por lixiviação e exportação pelas culturas), para atingir ao limite estabelecido para Zn, Cu, Ni e Pb, respectivamente.

### 3.3 Caracterização Microbiana

Houve efeito significativo do C1 para a respiração basal (RB) e acumulada (RAc), ao final da compostagem (TABELA 9), mostrando que, independente da gramínea, houve melhor estabilidade do lodo de esgoto quando cultivado em comparação ao sem cultivo. Ainda, houve redução média de 76,0 e 85,5%, respectivamente, em relação à amostra inicial de lodo (TABELA 1). Essa redução demonstra a diminuição da atividade microbiana pela evolução de CO<sub>2</sub> e, conseqüentemente, aumento da estabilidade do lodo de esgoto (NIKAEEN *et al.*, 2015). Vieira *et al.* (2011) apontam a comunidade microbiana como o componente mais sensível do meio ambiente, podendo, então, a atividade microbiana ser considerada um atributo mais sensível para se verificar a estabilidade de um composto.

Tabela 9 – Médias e significância dos contrastes para respiração basal (RB) e acumulada (RAc), C da biomassa microbiana (CBM) e quocientes microbiano (qMIC) e metabólico (qCO<sub>2</sub>) de lodo de esgoto ao final do cultivo de *P. purpureum* e *U. brizantha*, com ou sem aeração, e da compostagem

Tratamentos / Contrastes	RB mg kg <sup>-1</sup> h <sup>-1</sup>	RAc mg CO <sub>2</sub> kg <sup>-1</sup>	CBM mg kg <sup>-1</sup>	qMIC --- % ---	qCO <sub>2</sub> mg g <sup>-1</sup> h <sup>-1</sup>
CASC	0,97	10,43	2.366,92	0,95	0,44
SASC	1,00	11,08	1.521,43	0,58	0,77
CAPP	0,86	9,44	1.763,65	0,75	0,55
SAPP	0,90	9,74	2.495,61	0,99	0,61
CAUB	0,79	8,68	1.772,07	0,77	0,89
SAUB	0,93	9,91	1.854,14	0,78	0,57
Média	0,91	9,88	1.962,30	0,80	0,64
C <sub>1</sub> = SC – CC	0,46*	5,25*	ns	ns	ns
C <sub>2</sub> = CASC – SASC	ns	ns	ns	ns	ns
C <sub>3</sub> = PP – UB	ns	ns	ns	ns	ns
C <sub>4</sub> = CAPP – SAPP	ns	ns	ns	ns	ns
C <sub>5</sub> = CAUB - SAUB	ns	ns	ns	ns	ns
CV (%)	10,96	10,59	53,91	49,99	77,48

Nota: C<sub>1</sub>, C<sub>2</sub>, C<sub>3</sub>, C<sub>4</sub> e C<sub>5</sub> – Contrastes 1, 2, 3, 4 e 5, respectivamente; SC – Lodo sem cultivo (CASC; SASC); CC – Lodo com cultivo (CAPP; SAPP; CAUB; SAUB); CASC – Lodo com aeração e sem cultivo; SASC – Lodo sem aeração e sem cultivo; PP – Cultivo de *P. purpureum* (CAPP; SAPP); UB – Cultivo de *U. brizantha* (CAUB; SAUB); CAPP – Lodo com aeração e cultivo de *P. purpureum*; SAPP – Lodo sem aeração e com cultivo de *P. purpureum*; CAUB – Lodo com aeração e cultivo de *U. brizantha*; SAUB – lodo sem aeração e cultivo de *U. brizantha*; ns – Não significativo a 5% de probabilidade pelo teste F; \* - Significativo a 5% de probabilidade pelo teste F.

Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

A Tabela 9 demonstra que não houve efeito significativo dos contrastes para C da biomassa microbiana (CBM) e quociente microbiano (qMIC) e metabólico (qCO<sub>2</sub>). Para o CBM, houve redução média de 81,7% em relação ao lodo de esgoto inicial (TABELA 1). Por outro lado, Awasthi *et al.* (2017) encontraram incremento do CBM durante compostagem de lodo de esgoto. O resultado deste trabalho pode ser explicado pela maior estabilização do lodo, resultando em um material mais humificado, podendo assim, selecionar microrganismos e diminuir, conseqüentemente, sua biomassa. Ainda pode ter ocorrido inibição do crescimento microbiano por causa do maior teor de metais pesados ao final da compostagem (TABELA 8) (ALVES *et al.*, 2011).

Quanto ao qMIC, índice que infere sobre a qualidade nutricional da matéria orgânica, houve redução média de 75,9% da amostra inicial de lodo (TABELA 1), por diminuição do C org. e CBM ao final da compostagem. Maiores valores de qMIC expressam a maior labilidade do C, favorecendo um ambiente adequado ao crescimento microbiano (VIEIRA; PAZIANOTTO, 2016). Os valores encontrados neste trabalho foram semelhantes aos dos autores citados.

O qCO<sub>2</sub> é um índice que infere na eficiência dos microrganismos na utilização do C; quanto menor o valor encontrado menor a perda de C pela respiração e maior a imobilização em sua biomassa (VIEIRA; PAZIANOTTO, 2016). Houve incremento médio de 82,9% do qCO<sub>2</sub>, em relação ao lodo utilizado inicialmente, o que pode ser explicado pela maior RB e CBM na

amostra inicial, em comparação à média dos tratamentos (TABELAS 1 e 9). No entanto a elevação do índice pode estar relacionada ao incremento da atividade microbiana durante o processo de decomposição da matéria orgânica, do que a situações de estresse, como reportam Vieira e Pazianotto (2016).

#### 4 Conclusões

Os atributos físicos, químicos e microbianos do composto produzido a partir da mistura de *P. purpureum* ou de *U. brizantha* com o lodo de esgoto, no qual foram cultivados, apresentam-se dentro dos níveis considerados adequados para produção de um adubo orgânico e, ou, substrato para o cultivo de plantas.

O cultivo de *P. purpureum* e *U. brizantha* em lodo de esgoto, seguido pela compostagem, promovem melhor estabilização da matéria orgânica do lodo de esgoto quando comparado ao lodo não cultivado.

A aeração do lodo de esgoto cultivado com *P. purpureum* e *U. brizantha* não influencia a qualidade final do composto orgânico produzido.

O composto de lodo de esgoto produzido pode ser utilizado de forma mais segura em áreas agrícolas, diminuindo-se os riscos de contaminação do meio e melhorando as propriedades físicas, químicas e microbianas do solo.

#### Referências

ABREU-JUNIOR, C. H.; FIRME, L. P.; MALDONADO, C. A. B.; MORAES NETO, S. P.; ALVES, M. C.; MURAOKA, T.; BOARETTO, A. E.; GAVA, J. L.; HE, Z.; NOGUEIRA, T. A. R.; CAPRA, G. F. Fertilization using sewage sludge in unfertile tropical soils increases wood production in Eucalyptus plantations. *Journal of Environmental Management*, v.203, p.51-58, 2017.

ALCARDE, J. C. Manual de Análise de Fertilizantes. Piracicaba: FEALQ. 2009. 259p.

ALVES, T. S.; CAMPOS, L. L.; ELIAS NETO, N.; MATSUOKA, M.; LOUREIRO, M. F. Biomassa e atividade microbiana de solo sob vegetação nativa e diferentes sistemas de manejos. *Acta Scientiarum Agronomy*, v.33, p.341-347, 2011.

AMIR, S.; HAFIDI, M.; MERLINA, G.; REVEL, J. C. Sequential Extraction of heavy metals during composting of sewage sludge. *Chemosphere*, v.59, p.801-810, 2005.

ANTONIADIS, V.; ROBINSON, J. S.; ALLOWAY, B. J. Effects of short-term pH fluctuations on cadmium, nickel, lead and zinc availability to ryegrass in a sewage sludge-amended field. *Chemosphere*, v.71, p.759-764, 2008.

AWASTHI, M. K.; PANDEY, A. K.; BUNDELA, P. S.; WONG, J. W. C.; LI, R.; ZHANG, Z. Co-composting of gelatin industry sludge combined with organic fraction of municipal solid waste and poultry waste employing zeolite mixed with enriched nitrifying bacterial consortium. *Bioresource Technology*, v.213, p.181-189, 2016.

AWASTHI, M. K.; WANG, Q.; CHEN, H.; WANG, M.; AWASTHI, S.K.; REN, X.; CAI, H.; LI, R.; ZHANG, Z. In-vessel co-composting of biosolid: Focusing on mitigation of greenhouse gases emissions and nutrients conservation. *Renewable Energy*, In Press, p.1-10, 2017.

BATISTA, K.; MONTEIRO, F. A. Sistema radicular do capim-marandu, considerando as combinações de doses de nitrogênio e de enxofre. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.30, p.821-828, 2006.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Secretaria de Defesa Agropecuária. Instrução Normativa n.25, de 23 de julho de 2009. Disponível em: <<http://www.dpv24.iciag.ufu.br/new/dpv24/Apostilas/IN%20MAPA%2025%202009.pdf>>. Acesso em: 24 Nov. 2017.

BRASIL. Conselho Nacional de Meio Ambiente - CONAMA. Resolução nº 375, de 29 de Agosto de 2006b. *Diário Oficial da União*, Brasília, DF, 30 de ago. de 2006. Seção 1. p.141-146. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/legiano1.cfm?ano=todos&codlegitipo=3>>. Acesso em: 27 jul. 2016.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional de Meio Ambiente. Resolução n.481, de 03 de outubro de 2017. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=728>>. Acesso em: 15 Dez. 2017.

COSTA, J. C. F.; MENDONÇA, R. M. N.; FERNANDES, L. F.; OLIVEIRA, F. P. SANTOS, D. Caracterização física de substratos orgânicos para enraizamento de estacas de goiabeira. *Revista Brasileira de Agropecuária Sustentável*, v.7, p.16-23, 2017.

COTTA, J. A. O.; CARVALHO, N. L. C.; BRUM, T. S.; REZENDE, M. O. O. Compostagem *versus* vermicompostagem: Comparação das técnicas utilizando resíduos vegetais, esterco bovino e serragem. *Revista Engenharia Sanitária e Ambiental*, v.20, p.65-78, 2015.

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Centro Nacional de Pesquisa em Solo. Manual de Métodos de Análise de Solo. Rio de Janeiro. 1997. 212p.

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Comunicado técnico 98 – Determinação do Carbono da Biomassa Microbiana do Solo (BMS-C). Seropédica – RJ, 2007b. 6p.

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Comunicado técnico 99 – Determinação da Respiração Basal (RBS) e Quociente metabólico do Solo (qCO<sub>2</sub>). Seropédica – RJ, 2007a. 4p.

FORNES, F.; MENDOZA-HERNÁNDEZ, D.; GARCIA-DE-LA-FUENTE, R.; ABAD, M.; BELDA, R. M. Composting versus vermicomposting: A comparative study of organic matter evolution through straight and combined process. *Bioresource Technology*, v.118, p.296-305, 2012.

IGNATOWICZ, K. The impact of sewage sludge treatment on the content of selected heavy metals and their fractions. *Environmental Research*, v.156, p.19-22, 2017.

KIEHL, E. J. Manual de compostagem: maturação e qualidade do composto. 6.ed. Piracicaba: E.J., 2012. 171p.

LIMA, C. C.; MENDONÇA, E. S.; SILVA, I. R.; SILVA, L. H. M.; ROIG, A. Caracterização química de resíduos da produção de biodiesel compostados com adição mineral. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.13, p.334-340, 2009.

LOPES, J. L. W.; GUERRINI, I. A.; SAAD, J. C. C.; SILVA, M. R. Atributos químicos e físicos de dois substratos para produção de mudas de eucalipto. *Cerne*, v.14, p.358-367, 2008.

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

NIKAEEN, M.; NAFEZ, A. H.; BINA, B.; NABAVI, B. F.; HASSANZADEH, A. Respiration and enzymatic activities as indicators of stabilization of sewage sludge composting. *Waste Management*, v.39, p.104-110, 2015.

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

ONU. UNITED NATIONS ORGANIZATION. Nova York, 2013. Disponível em: <<https://nacoesunidas.org/populacao-mundial-deve-atingir-96-bilhoes-em-2050-diz-novo-relatorio-da-onu/>>. Acesso em: 4 Dez. 2017.

PAMPURO, N.; BAGAGIOLO, G.; PRIARONE, P. C.; CAVALLO, E. Effects of pelletizing pressure and the addition of woody bulking agents on the physical and mechanical properties of pellets made from composted pig solid fraction. *Powder Technology*, v.311, p.112-119, 2017.

SARZI, I.; BÔAS, L. V.; SILVA, M. R. Composição química e aspectos morfológicos de mudas de *Tabebuia chrysotricha* (Standl.) produzidas em diferentes substratos e soluções de fertirrigação. *Scientia Forestalis*, v.36, p.53-62, 2008.

SOUZA, R. A. S.; BISSANI, C. A.; TEDESCO, M. J.; FONTOURA, R. C. Extração sequencial de zinco e cobre em solos tratados com lodo de esgoto composto de lixo. *Química Nova*, v.35, p.308-314, 2012.

SPARLING, G. P.; WEST, A. W. A Direct Extraction method to estimate soil microbial C: calibration *in situ* using microbial respiration and <sup>14</sup>C labelled cells. *Soil Biology and Biochemistry*, v.20, p.337-343, 1988.

TEDESCO, M. J.; GIANELLO, C.; BISSANI, C. A.; BOHNEN, H.; VOLKWEISS, S. J. Análise de solo, plantas e outros materiais. 2ª ed. Porto Alegre: UFRGS, 1995. 174p. (Boletim Técnico, 5).

USEPA – United States Environmental Protection Agency. Standards for the use and disposal of sewage sludge. Washington, 1996. (Code of Federal Regulations 40 Part 503). Disponível em: <<https://www.epa.gov/sites/production/files/documents/handbook1.pdf>>. Acesso em: 02 Dez. 2017.

VIEIRA, G. D.; CASTILHOS, D. D.; CASTILHOS, R. M. V. Atributos microbianos do solo após a adição de lodo anaeróbico da estação de tratamento de efluentes de parboilização de arroz. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.35, p.543-550, 2011.

VIEIRA, R. F.; PAZIANOTTO, R. A. A. Microbial Activities in soil cultivated with corn and amended with sewage sludge. *SpringerPlus*, v.5, p.1844-1860, 2016.

VILLANUEVA, F. C. A.; BOARETTO, A. E.; FIRME, L. P.; MURAOKA, T.; NASCIMENTO FILHO, V. F.; ABREU JUNIOR, C. H. Mudanças químicas e fitodisponibilidade de zinco estimada por método isotópico, em solo tratado com lodo de esgoto. *Química Nova*, v.35, p.1348-1354, 2012.

YUAN, J.; CHADWICK, D.; ZHANG, D.; LI, G.; CHEN, S.; LUO, W.; DU, L.; HE, S.; PENG, S. Effects of aeration rate on maturity and gaseous emissions during sewage sludge composting. *Waste Management*, v.56, p.403-410, 2016.

ZHANG, D.; LUO, W.; LI, Y.; WANG, G.; LI, G. Performance of co-composting sewage sludge and organic fraction of municipal solid waste at different proportions. *Bioresource Technology*, v.250, p.853-859, 2018.

ZHANG, L.; SUN, X. Influence Of bulking agentes on physical, chemical, and microbiological properties during the two-stage composting of green waste. *Waste Management*, v.48, p.115-126, 2016.

ZHANG, L.; SUN, X.; TIAN, Y.; GONG, X. Effects of brown sugar and calcium superphosphate on the secondary fermentation of green waste. *Bioresource Technology*, v.131, p.68-75, 2013.

ZORZETO, T. Q.; DECHEN, S. C. F.; ABREU, M. F.; FERNANDES JÚNIOR, F. Caracterização física de substratos para plantas. *Bragantia*, v.73, p.300-311, 2014.

ZUBA JUNIO, G. R.; SAMPAIO, R. A.; NASCIMENTO, A. L.; SANTOS, G. B.; SANTOS, L. D. T.; FERNANDES, L. A. Produtividade de milho adubado com composto de lodo de esgoto e fosfato natural Gafsa. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.17, p.706-712, 2013.

## **CAPÍTULO 4 – FITORREMEDIAÇÃO DE HPAs EM LODO DE ESGOTO CULTIVADO COM *Pennisetum purpureum* E *Urochloa brizantha*, NA PRESENÇA E AUSÊNCIA DE AERAÇÃO, E COMPOSTADO**

**Resumo:** Este trabalho teve como objetivo avaliar os teores de hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (HPAs) em lodo de esgoto cultivado com *Pennisetum purpureum* e *Urochloa brizantha* na presença ou ausência de aeração e, posteriormente, compostado. O experimento foi conduzido em área experimental do ICA/UFMG, utilizando-se o delineamento em blocos ao acaso, com 4 repetições, em esquema fatorial 2x2+2. Os fatores consistiram em cultivo de *P. purpureum* ou *U. brizantha* (densidade de plantio de 50 plantas/m<sup>2</sup>) em lodo de esgoto, com aeração intermitente (30 min on/off) por 60 dias (vazão de 0,14 m<sup>3</sup> min<sup>-1</sup> m<sup>-3</sup>) ou sem aeração. Os tratamentos adicionais foram sem cultivo com ou sem aeração. Após 90 dias de cultivo, a gramínea foi cortada, triturada e incorporada ao lodo de esgoto. Durante 60 dias, o material foi compostado. Após esse período, as amostras foram coletadas e levadas para laboratório, onde foram realizadas análises dos HPAs por CG-EM. Os dados obtidos foram submetidos à análise de variância com desdobramento dos tratamentos em contrastes ortogonais a 5% de probabilidade pelo teste F. O lodo de esgoto utilizado apresentou baixos teores de HPAs, sendo inferior ao limite máximo estabelecido por resolução europeia. Obteve-se menor teor dos HPAs nos tratamentos com cultivo, demonstrando a contribuição das gramíneas, principalmente, pelo sistema radicular, para a degradação desses compostos e o cultivo de *U. brizantha* apresentou-se mais eficaz que o *P. purpureum*. Quando sem cultivo, houve menor teor de HPAs nos sistemas com aeração, indicando sua eficácia na degradação dos HPAs. O cultivo de *U. brizantha* sem aeração apresentou menor teor de HPAs, em comparação ao que foi aerado. Já no cultivo de *P. purpureum* em lodo de esgoto aerado apresentou menor teor de HPAs, revelando a associação desses dois fatores de importante relevância na degradação dos HPAs em lodo de esgoto. A compostagem com lodo de esgoto e os resíduos das gramíneas proporcionaram redução do teor dos HPAs, tornando o composto de lodo de esgoto produzido mais seguro para ser utilizado em áreas agrícolas, diminuindo-se os riscos de contaminação do meio.

**Palavras-chave:** biodegradação, biossólido, compostagem, reciclagem de resíduos.

### **1 Introdução**

O lodo de esgoto é um subproduto orgânico das estações de tratamento de esgoto (ETEs) que apresenta constituição altamente complexa, constituída por elementos inorgânicos (OLESZCZUK, 2008) e compostos orgânicos tóxicos (CAI *et al.*, 2012). Em virtude da presença

desses contaminantes, a destinação correta do lodo de esgoto é de suma importância, para que não haja riscos de contaminação de solo, água e ar.

Uma alternativa que vem sendo estudada e já utilizada, em alguns países, é a utilização do lodo de esgoto como adubo orgânico em áreas agrícolas, florestais e na recuperação de áreas degradadas, pelo seu elevado teor de matéria orgânica e de nutrientes, proporcionando aumento da qualidade física, química e microbiológica do solo e, por consequência, aumento da produtividade das culturas (SUCIU *et al.*, 2015). No entanto a presença de contaminantes, como os metais tóxicos e compostos orgânicos persistentes, pode inviabilizar a utilização do lodo na agricultura.

Dentre os principais compostos orgânicos tóxicos presentes no lodo de esgoto destacam-se os hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (HPAs), os quais são constituídos por átomos de C e H, arranjados em dois ou mais anéis benzênicos, sendo reconhecidos mais de 100 diferentes compostos. Apesar disso, apenas 16 compostos são listados pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (USEPA) como prioridade para monitoramento ambiental (ZELINKOVA; WENZL, 2015). Os HPAs são compostos de alta hidrofobicidade e baixa solubilidade, caracterizando-se pela baixa degradabilidade, alta persistência e ubiquidade no meio ambiente, podendo ser bioacumulados na cadeia trófica e causar sérios danos à saúde animal e humana, em razão de serem mutagênicos, carcinogênicos e teratogênicos (PARAÍBA *et al.*, 2011).

Apesar de sua resistência à degradação, alguns estudos têm demonstrado a capacidade de plantas de diferentes espécies, associados ou não com bactérias ou fungos, proporcionar condições favoráveis à atividade microbiana, para decomposição dos compostos ou a sua liberação no meio para serem absorvidos e acumulados nos tecidos das plantas, essa técnica é denominada de fitorremediação (SHI *et al.*, 2017; TIAN *et al.*, 2017; GARCÍA-SÁNCHEZ *et al.*, 2018).

Assim, o objetivo deste trabalho é avaliar os teores de HPAs em lodo de esgoto cultivado com *Pennisetum purpureum* e *Urochloa brizantha* na presença ou ausência de aeração e, posteriormente, compostado.

## **2 Material e Métodos**

### **2.1 Instalação, Delineamento e Tratamentos do Experimento**

O experimento foi conduzido na fazenda experimental Professor Hamilton de Abreu Navarro do Instituto de Ciências Agrárias (ICA) da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), campus regional de Montes Claros, latitude 16°51'38'' S e longitude 44°55'00'' W,

com 652 m de altitude, no período de 02 de novembro de 2016 a 31 de janeiro de 2017 para o cultivo das gramíneas e de 17 de fevereiro a 14 de abril de 2017 para a compostagem. Conforme a classificação de Köppen, o clima predominante na região é o Aw – tropical de savana, com verão chuvoso e inverno seco.

O experimento foi conduzido no delineamento em blocos casualizados (DBC), com 4 repetições, em esquema fatorial 2 x 2, com 2 tratamentos adicionais. Os fatores são os cultivos de *Pennisetum purpureum* Schum. ou *Urochloa brizantha* cv. Marandu (densidade de plantio de 50 plantas por m<sup>2</sup>), combinados com aeração intermitente (30 min on/off) por 60 dias (vazão de 0,14 m<sup>3</sup> min<sup>-1</sup> m<sup>-3</sup>) ou sem aeração do lodo de esgoto. Os tratamentos adicionais corresponderam à presença e ausência de aeração do lodo de esgoto não cultivado. Ao todo, foram totalizadas 24 unidades experimentais, cada uma formada por um caixote de madeirite com as dimensões de 0,7 x 0,7 x 0,55 m de comprimento, largura e altura, preenchido até 0,5 m de altura com lodo de esgoto seco termicamente a 350 °C por 30 min da ETE-Vieira de Montes Claros-MG.

Para caracterização dos compostos orgânicos tóxicos, propostos pela Resolução CONAMA nº 375 (BRASIL, 2006), presentes no lodo de esgoto utilizado, foram utilizadas as metodologias: clorobenzenos (CBs) (PINHO *et al.*, 2014), hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (HPAs) (SANTOS *et al.*, 2017), ftalatos (FTs) (PEREIRA, 2017), clorofenóis (CFs) e cresóis (CRs) (WILD *et al.*, 1993), bifenilas policloradas (PCBs) (MAIA *et al.*, 2017), poluentes orgânicos persistentes (POPs) (SANTOS, 2015), dioxina e furano (ANDRADE *et al.*, 2017). Os HPAs foram escolhidos para o estudo de fitorremediação.

Após 90 dias de cultivo das gramíneas, a parte aérea das plantas foi coletada e triturada em triturador forrageiro. O material triturado foi, então, adicionado à sua unidade experimental correspondente e, juntamente com o sistema radicular, homogeneizado manualmente. O material foi revolvido quizenalmente durante 2 meses, totalizando 60 dias de compostagem.

Durante o cultivo, as parcelas foram irrigadas de forma a manter a umidade próxima à capacidade de campo, com o intuito de disponibilizar água para as plantas e para os microrganismos, porém evitando-se encharcamento e, conseqüentemente, perdas por escoamento de lixiviado. Durante a compostagem, foi realizado o umedecimento do substrato conforme as recomendações de Kiehl (2012).

## 2.2 Coleta das Amostras

Aos 20, 40 e 60 dias de cultivo das gramíneas foram coletadas amostras de lodo de esgoto na superfície de todas as unidades experimentais, a fim de se avaliar os teores dos HPAs no lodo no decorrer desse período. Aos 90 dias de cultivo das gramíneas foram coletadas amostras de

lodo de esgoto de todas as unidades experimentais, nas camadas de 0-10, 10-20, 20-30, 30-40 e >40 cm e posterior cálculo da média das profundidades (0-50 cm). Após os 60 dias de compostagem do lodo de esgoto, as amostras foram coletadas e armazenadas em frascos de vidro e condicionadas em geladeira a 4 °C até o momento da análise de HPAs, segundo Santos *et al.* (2017).

### 2.3 Extração dos HPAs e Condições Cromatográficas

A extração utilizada é denominada de extração sólido-líquido com purificação em baixa temperatura (ESL-PBT), otimizada por Santos *et al.* (2017), com procedimento descrito: pesaram-se 4,00 g de lodo de esgoto em vial de preparo de 22 mL e, em seguida, adicionaram-se 4 mL de solução salina com 0,1 g de NaCl e pH 11, ajustado com solução de NaOH 2 mol L<sup>-1</sup>; 7 mL de acetonitrila e 1 mL de acetato de etila, ambos os graus UV-HPLC. Posteriormente, homogeneizou-se a mistura em vórtex por 5 min e, então, foi levada para congelador a -4 °C por 1 h. Após esse período, retirou-se uma alíquota de 2 mL da fase orgânica sobrenadante e adicionou-a em tubo falcon 15 mL, contendo 375 mg de Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> e 65 mg de sílica 230-400 mesh. O sistema foi homogeneizado em vórtex por 1 min e centrifugado a 4000 rpm por 10 min. Retirou-se uma alíquota de 1 mL do sobrenadante e adicionou-a em vial de injeção de 2 mL e injetado em CG-EM.

As análises cromatográficas foram realizadas em um cromatógrafo a gás da Agilent Technologies (GC 7890A), acoplado a um detector espectrômetro de massas (MS 5975C) e coluna capilar DB-5 MS (Agilent Technologies). O volume da amostra injetado foi de 1 µL no modo de injeção com divisão de fluxo (split) a uma razão de 1:5, utilizando um injetor CombiPAL e liner com lã, mantidos a 320 °C. A coluna apresentou fase estacionária 5% fenil e 95% metilpolisiloxano (30 m comprimento x 250 µm diâmetro interno x 0,25 µm espessura do filme interno). O gás hélio 6.0 (99,9999% de pureza) foi utilizado como gás de arraste a uma taxa de 2,0 mL min<sup>-1</sup>. A programação da temperatura do forno foi: 100 °C durante 1,0 min; 10 °C min<sup>-1</sup> até 200 °C; 7 °C min<sup>-1</sup> até 250 °C durante 5,86 min; 20 °C min<sup>-1</sup> até 300 °C durante 3,5 min, totalizando 30 min de corrida por amostra. O espectrômetro de massas foi operado com ionização por impacto de elétrons a 70 eV, com a interface mantida a 280 °C e a fonte de íons a 230 °C. O controle do instrumento e a aquisição de dados foram feitos com o software ChemStation (E.02.02.1431 copyright © 1989-2011) da Agilent Technology. As análises foram realizadas no modo monitoramento de íons seletivo (MIS) e os íons utilizados para os HPAs quantificados foram, com tempo de retenção entre parênteses: FEN (10,92 min) – 176,1; 178,1;

179,1; FLUO (13,90 min) e PIR (14,50 min) – 200,1; 202,1; 203,1; BaA (18,22 min) e CRI (18,29 min) – 226,1; 228,1; 229,1; IND (27,60 min) – 274,1; 276,1; 277,1.

Os padrões analíticos dos HPAs naftaleno, acenaftileno, acenafteno, fluoreno, fenantreno, antraceno, fluoranteno, pireno, benzo(a)antraceno, criseno, benzo(k)fluoranteno, benzo(b)fluoranteno, benzo(a)pireno, benzo(g,h,i)perileno, dibenzo(a,h)antraceno e indeno(1,2,3-cd)pireno foram obtidos da Sigma-Aldrich. A partir dos padrões de cada HPA, foi preparada solução estoque de 500 mg L<sup>-1</sup>, da qual foi preparada solução de trabalho contendo os 16 HPAs na concentração de 25 mg L<sup>-1</sup> em acetonitrila. Essa solução foi utilizada para preparo da curva analítica e os pontos da curva corresponderam entre 1 a 60 µg L<sup>-1</sup>.

## 2.4 Análises Estatísticas

Os dados obtidos nas análises do lodo de esgoto foram submetidos à análise de variância (ANOVA), com desdobramentos dos tratamentos em contrastes ortogonais, aplicando-se o teste F a 5% de probabilidade pelo *software* RStudio *version* 1.0.153. Os contrastes foram:

Quadro 1 – Contrastes ortogonais utilizados na análise estatística do experimento e suas finalidades

Contraste ortogonal	Finalidade
C1 = 2 x CASC + 2 x SASC – CAUB – SAUB – CAPP – SAPP	Comparar os tratamentos com e sem cultivo
C2 = CASC – SASC	Comparar a presença e ausência de aeração no lodo sem cultivo
C3 = CAUB + SAUB – CAPP – SAPP	Comparar o cultivo de <i>U. brizantha</i> com o de <i>P. purpureum</i> em lodo de esgoto
C4 = CAUB – SAUB	Comparar a presença e ausência de aeração de lodo de esgoto cultivado com <i>U. brizantha</i>
C5 = CAPP – SAPP	Comparar a presença e ausência de aeração de lodo de esgoto cultivado com <i>P. purpureum</i>

Nota: CASC – Lodo com aeração e sem cultivo; SASC – Lodo sem aeração e sem cultivo; CAPP – Lodo com aeração e cultivo de *P. purpureum*; SAPP – Lodo sem aeração e com cultivo de *P. purpureum*; CAUB – Lodo com aeração e cultivo de *U. brizantha*; SAUB – lodo sem aeração e cultivo de *U. brizantha*.

Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

## 3 Resultados e Discussão

Dos compostos orgânicos tóxicos analisados no lodo de esgoto não foram detectados os clorobenzenos, as bifenilas policloradas, dioxina e furano, os clorofenóis e os poluentes orgânicos persistentes, exceto o mirex, que foi apenas detectado (<4 µg L<sup>-1</sup>). Esses resultados já evidenciam os menores riscos da utilização do lodo de esgoto na agricultura. No entanto a Tabela 1 apresenta os teores iniciais de FTs, CRs e HPAs no lodo de esgoto.

Tabela 1 – Teor de Hidrocarbonetos Policíclicos Aromáticos (HPAs), Ftalatos (FTs) e Cresóis (CRs) presente no lodo de esgoto utilizado para realização do experimento (mg kg<sup>-1</sup>, base seca)

Composto	Abreviação	Resultado	Composto	Abreviação	Resultado
Ftalato de dimetila	DMP	0,563±0,228	Fenantreno	FEN	0,791±0,022
Dibutilftalato	DBP	0,073±0,059	Fluoranteno	FLUO	0,584±0,084
di(2-etilhexil) ftalato	DEHP	13,29±6,18	Pireno	PIR	0,888±0,073
Somatório dos FTs	ΣFTs	13,93±6,10	Benzo(a)antraceno	BaA	0,075±0,015
o-cresol	-	0,352±0,167	Criseno	CRI	0,068±0,056
m-cresol	-	0,559±0,250	Indeno[1,2,3-cd]pireno	IND	0,988±0,168
p-cresol	-	0,345±0,157	Somatório dos HPAs	Σ6HPAs	3,394±0,325

Nota: Médias seguidas do intervalo de confiança.

Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

Os ésteres de ftalato ou apenas ftalatos são compostos utilizados na indústria como amaciantes para facilitar a maleabilidade de produtos. Também podem ser encontrados em embalagens, dispositivos médicos, tintas, adesivos, produtos de higiene entre outros. Os ftalatos são tóxicos aos humanos por serem carcinogênicos, teratogênicos e mutagênicos (MENG *et al.*, 2014). Apesar do ftalato de metila (DMP) e o dibutilftalato (DBP) apresentarem baixos teores no lodo de esgoto, o di(2-etilhexil) ftalato (DEHP) apresentou elevado teor, representado 95,4% do teor total dos ftalatos. Seu elevado teor é por causa de sua larga escala de utilização, principalmente, em materiais de PVC e pela dificuldade de biodegradação no meio ambiente (GANI *et al.*, 2016).

Os cresóis são compostos fenólicos com um grupo metil substituído nas posições orto, meta e para (PADILLA-SANCHEZ *et al.*, 2010). Os cresóis são utilizados como matéria-prima para síntese de desinfetantes, conservantes, explosivos, herbicidas, lubrificantes, resina sintética, produção de antioxidantes e corantes, aditivos de plásticos e lubrificantes (WANG *et al.*, 2018). A absorção desses compostos por animais ocorre por ingestão, inalação ou contato, podendo gerar irritação gastrointestinal, irritação do nariz e garganta e, em altas concentrações, ocasiona graves danos à pele, podendo levar à morte e, quando depositado no solo, pode lixiviar para águas subterrâneas contaminando lençol freático (CHEN *et al.*, 2016).

Dos 16 HPAs citados pela USEPA como prioridade para monitoramento ambiental (ZELINKOVA; WENZL, 2015), apenas 6 foram detectados e quantificados. Além disso, segundo a resolução Europeia, o somatório do teor de 11 HPAs no lodo de esgoto deve estar abaixo de 6 mg kg<sup>-1</sup>, para ser utilizado na agricultura (CEC, 2000). O somatório de HPAs encontrado no lodo de esgoto do estudo é igual a 3,394 mg kg<sup>-1</sup>, 56,6% menor do que o limite máximo permitido.

### 3.1 Fenantreno (FEN)

A Tabela 2 revela que houve efeito significativo para o contraste 1 (C1), aos 20 e 60 dias de aeração (DA) e, para o contraste 2 (C2), aos 20 DA para o fenantreno (FEN). Para o C1, em ambos os tempos, houve maior teor do FEN nos tratamentos sem cultivo, mostrando a importância das gramíneas, em especial, do seu sistema radicular sobre a redução do teor do composto. Estudos em variados sistemas apontam uma maior degradação de FEN em tratamentos com cultivo em detrimento dos não cultivados, sendo explicado pela maior atividade microbiana próximo à rizosfera, à liberação de exsudatos e à absorção do FEN pelas plantas (CHEEMA *et al.*, 2010; SHAHSAVARI *et al.*, 2015; JIA *et al.*, 2016b). Já para o C2, houve maior teor de FEN nas parcelas sem cultivo e sem aeração, mostrando o efeito positivo da aeração do lodo quando não cultivado. Cai *et al.* (2007, 2012) observaram redução de 94,5 e 99,5% no teor de FEN, ao final da compostagem de lodo de esgoto, em sistema de pilha estática aerada com aeração intermitente, como utilizado neste estudo.

Tabela 2 – Médias e significância dos contrastes para Fenantreno (mg kg<sup>-1</sup>, base seca) em lodo de esgoto cultivado com *P. purpureum* e *U. brizantha* com ou sem aeração

Tratamentos / Contrastes	20 DC	40 DC	60 DC	90 DC					
				0-10	10-20	20-30	30-40	>40	0-50
CASC	0,049	0,024	0,052	0,072	0,063	0,067	0,201	0,458	0,172
SASC	0,091	0,029	0,061	0,051	0,056	0,047	0,092	0,377	0,124
CAPP	0,040	0,020	0,038	0,040	0,036	0,048	0,461	0,588	0,235
SAPP	0,059	0,034	0,051	0,063	0,122	0,253	0,558	0,761	0,351
CAUB	0,035	0,019	0,033	0,052	0,116	0,545	0,461	0,696	0,374
SAUB	0,039	0,012	0,029	0,060	0,052	0,124	0,538	0,334	0,221
Média	0,052	0,023	0,044	0,056	0,074	0,181	0,385	0,536	0,246
C <sub>1</sub> = SC – CC	0,109**	ns	0,074*	ns	ns	-0,741*	-1,430*	ns	ns
C <sub>2</sub> = CASC – SASC	-0,042**	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
C <sub>3</sub> = PP – UB	ns	ns	ns	ns	ns	-0,367*	ns	ns	ns
C <sub>4</sub> = CAPP – SAPP	ns	ns	ns	ns	-0,086*	-0,204**	ns	ns	ns
C <sub>5</sub> = CAUB – SAUB	ns	ns	ns	ns	0,064*	ns	ns	ns	ns
CV (%)	31,82	55,41	35,37	39,85	56,93	82,62	83,91	78,15	68,67

Nota: DC – Dias de cultivo; C<sub>1</sub>, C<sub>2</sub>, C<sub>3</sub>, C<sub>4</sub> e C<sub>5</sub> – Contrastes 1, 2, 3, 4 e 5, respectivamente; SC – Lodo sem cultivo (CASC; SASC); CC – Lodo com cultivo (CAPP; SAPP; CAUB; SAUB); CASC – Lodo com aeração e sem cultivo; SASC – Lodo sem aeração e sem cultivo; PP – Cultivo de *P. purpureum* (CAPP; SAPP); UB – Cultivo de *U. brizantha* (CAUB; SAUB); CAPP – Lodo com aeração e cultivo de *P. purpureum*; SAPP – Lodo sem aeração e com cultivo de *P. purpureum*; CAUB – Lodo com aeração e cultivo de *U. brizantha*; SAUB – lodo sem aeração e cultivo de *U. brizantha*; ns – Não significativo a 5% de probabilidade pelo teste F; \*, \*\* - Significativo a 5 e 1% de probabilidade pelo teste F, respectivamente.

Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

Em profundidade, houve efeito significativo para o C1 a 20-30 e 30-40 cm, para o contraste 3 (C3) a 20-30 cm, para o contraste 4 (C4) a 10-20 e 20-30 cm e para o contraste 5 (C5) a 10-20 cm. O C1 evidencia que houve maior teor de FEN nos tratamentos com cultivo, em comparação ao sem cultivo. O menor teor de FEN ocorreu nos tratamentos com cultivo de *P. purpureum* em detrimento ao com *U. brizantha* (C3), visto que foi ainda menor quando o lodo de

esgoto foi aerado (C4) (TABELA 2). O *P. purpureum* é reportado na literatura como fitorremediador tanto de substâncias inorgânicas (ZHANG *et al.*, 2010; KANG *et al.*, 2012) quanto de orgânicas (SOJINU *et al.*, 2010; ALVARENGA *et al.*, 2017). Sojinu *et al.* (2010) observaram teor de FEN em *P. purpureum* variando de 51 a 255  $\mu\text{g kg}^{-1}$ , sendo que quanto maior a idade do capim maior o teor do composto em seu tecido. Em relação à *U. brizantha*, ainda não são reportados, na literatura, trabalhos que relatam o potencial da gramínea em fitorremediar HPAs. No entanto há trabalhos que descrevem algumas espécies do gênero *Brachiaria* como potenciais fitorremediadoras de áreas contaminadas com petróleo e derivados (graxas, óleos, hidrocarbonetos) (MERKL *et al.*, 2005, 2006; GASKIN *et al.*, 2010).

Para o C5, houve maior teor de FEN para o tratamento com cultivo de *U. brizantha* com aeração, em relação ao sem aeração. No entanto, quando se é analisada a média das profundidades (0-50 cm), não foi observado efeito significativo para nenhum dos contrastes (TABELA 2).

A elevação da temperatura do lodo de esgoto, principalmente, nos primeiros dias do cultivo, pode ter favorecido a dessorção do FEN do lodo (PING *et al.*, 2006), aumentando a sua solubilidade (ZHAN *et al.*, 2018) e liberando-o ao meio para absorção pelas plantas e/ou degradação pelos microrganismos. Além disso, as maiores temperaturas do lodo, no período de cultivo, pode ter causado alterações morfológicas na raiz, como área de superfície, respiração e transpiração e difusão de solutos, aumentando a capacidade da gramínea em absorver o FEN. Esse processo foi observado por Zhan *et al.* (2018) na absorção de FEN por raízes de trigo. Ainda, a liberação de exsudatos produzidos pelas plantas, como os ácidos cítrico, oxálico e acético, pode ter inibido a adsorção de FEN, o aumento de sua dessorção e mobilidade, como exposto por Jia *et al.* (2016a). Os processos citados acima podem explicar a maior redução do teor de FEN nos tratamentos cultivados e aerados.

O FEN é um composto que apresenta três anéis benzênicos, sendo o menor HPA encontrado no lodo de esgoto deste estudo. Isso confere ao composto maior facilidade de volatilização e degradação microbiana, por sua menor massa molar (CHEEMA *et al.*, 2010; CAI *et al.*, 2012; JIA *et al.*, 2016b).

### 3.2 Fluoranteno (FLUO)

Assim como para o FEN, houve efeito significativo para o C1 aos 20 e 60 DA para o fluoranteno (FLUO) (TABELA 3). Houve efeito significativo para o C3 aos 20 e 40 DA, evidenciando maior teor de FLUO nos tratamentos com cultivo de *P. purpureum*, em comparação com cultivo de *U. brizantha*. Ainda, aos 20 DA, houve efeito significativo para os

C2 e C5, mostrando que houve maior teor de FLUO nos tratamentos sem cultivo sem aeração e com cultivo de *U. brizantha* sem aeração, respectivamente. Esses resultados expressam a relevância do cultivo das gramíneas e da aeração do lodo na redução do teor de FLUO. Em compostagem de lodo de esgoto, Cai *et al.* (2007, 2012) observaram redução de 93,2 e 83,4% no teor de FLUO em sistema de pilhas estáticas aeradas.

Tabela 3 – Médias e significância dos contrastes para Fluoranteno (mg kg<sup>-1</sup>, base seca) em lodo de esgoto cultivado com *P. purpureum* e *U. brizantha* com ou sem aeração

Tratamentos / Contrastes	20 DC	40 DC	60 DC	90 DC					
				0-10	10-20	20-30	30-40	>40	0-50
CASC	0,224	0,199	0,387	0,176	0,164	0,251	0,358	0,627	0,315
SASC	0,301	0,197	0,411	0,121	0,111	0,107	0,241	0,458	0,208
CAPP	0,189	0,224	0,201	0,124	0,176	0,110	0,477	0,525	0,282
SAPP	0,245	0,235	0,315	0,199	0,254	0,537	0,507	0,571	0,414
CAUB	0,158	0,149	0,209	0,163	0,235	0,371	0,426	0,600	0,359
SAUB	0,172	0,134	0,182	0,103	0,105	0,290	0,547	0,379	0,285
Média	0,215	0,190	0,284	0,148	0,174	0,278	0,426	0,527	0,310
C <sub>1</sub> = SC – CC	0,287***	ns	0,688**	ns	ns	ns	-0,760*	ns	ns
C <sub>2</sub> = CASC – SASC	-0,077***	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
C <sub>3</sub> = PP – UB	0,104**	0,176**	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
C <sub>4</sub> = CAPP – SAPP	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
C <sub>5</sub> = CAUB - SAUB	-0,014**	ns	ns	ns	ns	0,081**	ns	ns	ns
CV (%)	12,18	23,87	36,88	52,32	81,85	71,92	38,39	46,18	41,87

Nota: DC – Dias de cultivo; C<sub>1</sub>, C<sub>2</sub>, C<sub>3</sub>, C<sub>4</sub> e C<sub>5</sub> – Contrastes 1, 2, 3, 4 e 5, respectivamente; SC – Lodo sem cultivo (CASC; SASC); CC – Lodo com cultivo (CAPP; SAPP; CAUB; SAUB); CASC – Lodo com aeração e sem cultivo; SASC – Lodo sem aeração e sem cultivo; PP – Cultivo de *P. purpureum* (CAPP; SAPP); UB – Cultivo de *U. brizantha* (CAUB; SAUB); CAPP – Lodo com aeração e cultivo de *P. purpureum*; SAPP – Lodo sem aeração e com cultivo de *P. purpureum*; CAUB – Lodo com aeração e cultivo de *U. brizantha*; SAUB – lodo sem aeração e cultivo de *U. brizantha*; ns – Não significativo a 5% de probabilidade pelo teste F; \*, \*\*, \*\*\* - Significativo a 5, 1 e 0,1% de probabilidade pelo teste F, respectivamente.

Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

Houve efeito significativo para o C1 na camada de 30-40 cm e para o C5 na camada de 20-30 cm. No C1, houve maior teor de FLUO nos tratamentos com cultivo. Para o C5, houve maior teor para o tratamento com cultivo de *U. brizantha* com aeração. No entanto, quando se é analisada a média das profundidades (0-50 cm), também, não foi observado efeito significativo para nenhum dos contrastes.

García-Sánchez *et al.* (2018) encontraram maiores porcentagens de degradação de FLUO em sistema de cultivo de milho associado com o fungo *Crucibulum laeve*, obtendo redução de 63,6% no teor do composto. Os autores sugerem uma condição de sinergismo entre o milho e o fungo, contribuindo para o aumento da área específica de adsorção pelas hifas do fungo e alteração de exsudatos pela raiz da planta, aumentando a biodisponibilidade e biodegradação do FLUO. Ainda, Liu *et al.* (2014) observaram maior redução de FLUO, aos 120 dias de cultivo de *Echinacea purpurea* (L.), com redução no teor de, aproximadamente, 95 e 45% em solo cultivado e não cultivado, respectivamente. Adicionalmente, os autores correlacionaram a



sistema de compostagem em pilha estática aerada de lodo de esgoto (CAI *et al.*, 2007, 2012). Ni *et al.* (2017) ainda observaram maior capacidade de biochar reduzir a biodisponibilidade de PIR por imobilização em solos em condição aeróbia que em anaeróbia.

Aos 40 DA, houve efeito significativo no C3, evidenciando maior teor de PIR nos tratamentos com cultivo de *P. purpureum*, em relação ao cultivo de *U. brizantha*. Esse ainda foi maior no tratamento com cultivo de *P. purpureum* sem aeração na camada de 10-20 cm, em relação ao com aeração (C4). E maior teor no cultivo com *U. brizantha* com aeração, em comparação ao sem aeração, nas camadas de 0-10 e 20-30 cm (C5). Ma *et al.* (2013) isolaram uma bactéria do gênero *Pseudomonas* sp. de lodo de esgoto e comprovaram que ela é capaz de degradar PIR, utilizado como fonte de energia. Em adição, este gênero de bactéria pode associar-se a gramíneas, como *Testuca arundinacea* L. e aumentar a eficiência da remoção de DDT em solo (WANG *et al.*, 2017). Esses resultados demonstram que a associação de *Pseudomonas* com gramíneas é possível e que, em conjunto, podem ser eficientes na degradação de HPAs na fitorremediação de lodo de esgoto.

### 3.4 Benzo(a)antraceno (BaA)

Houve efeito significativo para todos os contrastes aos 20 DA, com maiores teores de benzo(a)antraceno (BaA) nos tratamentos sem cultivo (C1), sem cultivo sem aeração (C2), com cultivo de *P. purpureum* (C3), cultivo de *P. purpureum* sem aeração (C4) e com cultivo de *U. brizantha* com aeração (C5). Houve efeito significativo para o C3, aos 40 e 60 DA, mostrando maior teor de BaA nos tratamentos com cultivo de *P. purpureum*. E no C1, aos 60 DA, houve maior teor nos tratamentos sem cultivo, em relação aos com cultivo (TABELA 5). Esses resultados assemelham-se aos demais HPAs já discutidos. Por exemplo, García-Sánchez *et al.* (2018) observaram redução de 63,5% no teor de BaA, em solo cultivado com milho e consorciado com *C. laeve*, enquanto em solo sem cultivo e com inoculação do fungo a redução foi de 40,3%. Constataram ainda, que a associação foi mais eficiente na remoção de HPAs com 4 a 6 anéis benzênicos, como o BaA, do que quando o solo foi apenas inoculado ou cultivado com o milho. Ainda, Cai *et al.* (2007, 2012) observaram redução de 78,3 e 97,2% do teor de BaA em compostagem em leira estática aerada de lodo de esgoto, reforçando a importância da aeração nos processos de estabilização da matéria orgânica e descontaminação dos compostos pelos poluentes orgânicos.

Tabela 5 – Médias e significância dos contrastes para Benzo(a)antraceno ( $\text{mg kg}^{-1}$ , base seca) em lodo de esgoto cultivado com *P. purpureum* e *U. brizantha* com ou sem aeração

Tratamentos / Contrastes	20 DC	40 DC	60 DC	90 DC					
				0-10	10-20	20-30	30-40	>40	0-50
CASC	0,008	0,012	0,033	0,053	0,054	0,060	0,076	0,110	0,071
SASC	0,020	0,009	0,039	0,039	0,036	0,036	0,058	0,082	0,050
CAPP	0,009	0,013	0,031	0,045	0,039	0,037	0,092	0,093	0,061
SAPP	0,015	0,016	0,034	0,052	0,057	0,092	0,096	0,096	0,078
CAUB	0,010	0,008	0,016	0,049	0,056	0,083	0,077	0,097	0,072
SAUB	0,004	0,007	0,013	0,042	0,039	0,062	0,093	0,092	0,062
Média	0,011	0,011	0,028	0,047	0,047	0,062	0,082	0,095	0,066
C <sub>1</sub> = SC – CC	0,017*	ns	0,049*	ns	ns	ns	-0,089*	ns	ns
C <sub>2</sub> = CASC – SASC	-0,011***	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
C <sub>3</sub> = PP – UB	0,011*	0,015***	0,035*	ns	ns	ns	ns	ns	ns
C <sub>4</sub> = CAPP – SAPP	-0,006*	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
C <sub>5</sub> = CAUB - SAUB	0,006*	ns	ns	ns	ns	0,022*	ns	ns	ns
CV (%)	28,33	28,10	44,62	33,78	46,68	46,24	23,97	32,25	24,36

Nota: DC – Dias de cultivo; C<sub>1</sub>, C<sub>2</sub>, C<sub>3</sub>, C<sub>4</sub> e C<sub>5</sub> – Contrastes 1, 2, 3, 4 e 5, respectivamente; SC – Lodo sem cultivo (CASC; SASC); CC – Lodo com cultivo (CAPP; SAPP; CAUB; SAUB); CASC – Lodo com aeração e sem cultivo; SASC – Lodo sem aeração e sem cultivo; PP – Cultivo de *P. purpureum* (CAPP; SAPP); UB – Cultivo de *U. brizantha* (CAUB; SAUB); CAPP – Lodo com aeração e cultivo de *P. purpureum*; SAPP – Lodo sem aeração e com cultivo de *P. purpureum*; CAUB – Lodo com aeração e cultivo de *U. brizantha*; SAUB – lodo sem aeração e cultivo de *U. brizantha*; ns – Não significativo a 5% de probabilidade pelo teste F; \*, \*\*\* - Significativo a 5 e 0,1% de probabilidade pelo teste F, respectivamente.

Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

Em profundidade, houve efeito significativo para o C<sub>5</sub>, na camada de 20-30 cm, indicando maior teor de BaA no tratamento com cultivo de *U. brizantha* com aeração, em relação ao sem aeração. Na camada de 30-40 cm, houve efeito significativo para o C<sub>1</sub> com maior teor nos tratamentos com cultivo, em relação aos sem cultivo. Entretanto, quando é analisada a média das profundidades (0-50 cm), não foi observado efeito significativo para nenhum dos contrastes (TABELA 5).

### 3.5 Criseno (CRI)

Os teores obtidos para criseno (CRI), após o cultivo, apresentaram-se superiores (TABELA 6) ao teor inicial no lodo de esgoto (TABELA 1). Constatou-se que houve efeito significativo para o C<sub>1</sub>, aos 60 DA e a 0-10, 20-30 e 0-50 cm de profundidade, mostrando que houve um maior teor de CRI nos tratamentos sem cultivo, quando comparado aos com cultivo. Liu *et al.* (2014) observaram que houve redução de, aproximadamente, 90 e 45% no teor de CRI em solo, após 120 dias de cultivo de *Echinacea purpurea* (L.) e não cultivado, respectivamente, correlacionando a degradação do CRI com atividades enzimáticas no solo.

Tabela 6 – Médias e significância dos contrastes para Criseno (mg kg<sup>-1</sup>, base seca) em lodo de esgoto cultivado com *P. purpureum* e *U. brizantha* com ou sem aeração

Tratamentos / Contrastes	20 DC	40 DC	60 DC	90 DC					
				0-10	10-20	20-30	30-40	>40	0-50
CASC	0,027	0,030	0,090	0,164	0,136	0,134	0,113	0,146	0,139
SASC	0,039	0,018	0,098	0,155	0,098	0,115	0,143	0,158	0,134
CAPP	0,020	0,030	0,070	0,076	0,081	0,082	0,103	0,105	0,090
SAPP	0,026	0,024	0,074	0,113	0,084	0,096	0,095	0,119	0,102
CAUB	0,014	0,017	0,061	0,111	0,119	0,100	0,101	0,121	0,110
SAUB	0,019	0,018	0,085	0,108	0,095	0,083	0,143	0,108	0,108
Média	0,024	0,023	0,080	0,121	0,102	0,102	0,116	0,126	0,114
C <sub>1</sub> = SC – CC	ns	ns	0,086*	0,230***	ns	0,136*	ns	ns	0,136**
C <sub>2</sub> = CASC – SASC	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
C <sub>3</sub> = PP – UB	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
C <sub>4</sub> = CAPP – SAPP	ns	ns	ns	ns	ns	ns	0,008*	ns	ns
C <sub>5</sub> = CAUB - SAUB	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
CV (%)	64,23	42,69	27,92	22,64	33,87	26,43	23,92	35,91	19,84

Nota: DC – Dias de cultivo; C<sub>1</sub>, C<sub>2</sub>, C<sub>3</sub>, C<sub>4</sub> e C<sub>5</sub> – Contrastes 1, 2, 3, 4 e 5, respectivamente; SC – Lodo sem cultivo (CASC; SASC); CC – Lodo com cultivo (CAPP; SAPP; CAUB; SAUB); CASC – Lodo com aeração e sem cultivo; SASC – Lodo sem aeração e sem cultivo; PP – Cultivo de *P. purpureum* (CAPP; SAPP); UB – Cultivo de *U. brizantha* (CAUB; SAUB); CAPP – Lodo com aeração e cultivo de *P. purpureum*; SAPP – Lodo sem aeração e com cultivo de *P. purpureum*; CAUB – Lodo com aeração e cultivo de *U. brizantha*; SAUB – lodo sem aeração e cultivo de *U. brizantha*; ns – Não significativo a 5% de probabilidade pelo teste F; \*, \*\*, \*\*\* - Significativo a 5, 1 e 0,1% de probabilidade pelo teste F, respectivamente.

Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

Ainda houve efeito significativo na camada de 30-40 cm para o C<sub>4</sub> com maior teor de CRI no tratamento com cultivo de *P. purpureum* com aeração, em relação ao sem aeração. Esses resultados podem ter ocorrido pela resistência do CRI à degradação, visto que o composto ficou mais concentrado nesses tratamentos pela maior decomposição da matéria orgânica em decorrência da aeração do lodo.

### 3.6 Indeno[1,2,3-cd]pireno (IND)

Para o indeno[1,2,3-cd]pireno (IND), a Tabela 7 revela que houve efeito significativo para o C<sub>1</sub>, aos 20 e 60 DA, sendo encontrado maior teor de IND nos tratamentos sem cultivo em relação aos com cultivo. Nesses mesmos períodos houve efeito significativo para o C<sub>5</sub>, mostrando maior teor de IND no tratamento com cultivo de *U. brizantha* sem aeração. Para o C<sub>2</sub>, houve efeito significativo aos 20 DA, com maior teor de IND no tratamento sem cultivo e sem aeração, em relação ao com aeração. E aos 20 e 40 DA, houve efeito significativo para o C<sub>3</sub>, indicando maior teor nos tratamentos com cultivo de *P. purpureum*, em relação ao cultivado com *U. brizantha*. Ainda houve efeito significativo para o C<sub>5</sub> na camada de 0-50 cm. Esse resultado representa que, ao final do cultivo, havia um maior teor de IND no tratamento com cultivo de *U. brizantha* com aeração.

Tabela 7 – Médias e significância dos contrastes para Indeno[1,2,3-cd]pireno (mg kg<sup>-1</sup>, base seca) em lodo de esgoto cultivado com *P. purpureum* e *U. brizantha* com ou sem aeração

Tratamentos / Contrastes	20 DC	40 DC	60 DC	90 DC					
				0-10	10-20	20-30	30-40	>40	0-50
CASC	0,197	0,065	0,270	0,412	0,381	0,340	0,392	0,683	0,442
SASC	0,308	0,064	0,297	0,357	0,411	0,367	0,553	0,929	0,523
CAPP	0,159	0,087	0,160	0,248	0,284	0,375	0,514	0,450	0,374
SAPP	0,232	0,095	0,285	0,427	0,353	0,482	0,568	0,873	0,541
CAUB	0,108	0,043	0,167	0,287	0,378	0,470	0,313	0,874	0,465
SAUB	0,133	0,049	0,190	0,336	0,405	0,415	0,594	0,474	0,445
Média	0,189	0,067	0,228	0,345	0,369	0,408	0,489	0,714	0,465
C <sub>1</sub> = SC – CC	0,378***	ns	0,332*	ns	ns	ns	ns	ns	ns
C <sub>2</sub> = CASC – SASC	-0,111**	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
C <sub>3</sub> = PP – UB	0,149**	0,090*	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
C <sub>4</sub> = CAPP – SAPP	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
C <sub>5</sub> = CAUB - SAUB	-0,025*	ns	-0,023*	ns	ns	ns	ns	ns	0,020*
CV (%)	23,17	44,17	30,65	38,14	23,38	30,52	48,74	54,15	21,87

Nota: DC – Dias de cultivo; C<sub>1</sub>, C<sub>2</sub>, C<sub>3</sub>, C<sub>4</sub> e C<sub>5</sub> – Contrastes 1, 2, 3, 4 e 5, respectivamente; SC – Lodo sem cultivo (CASC; SASC); CC – Lodo com cultivo (CAPP; SAPP; CAUB; SAUB); CASC – Lodo com aeração e sem cultivo; SASC – Lodo sem aeração e sem cultivo; PP – Cultivo de *P. purpureum* (CAPP; SAPP); UB – Cultivo de *U. brizantha* (CAUB; SAUB); CAPP – Lodo com aeração e cultivo de *P. purpureum*; SAPP – Lodo sem aeração e com cultivo de *P. purpureum*; CAUB – Lodo com aeração e cultivo de *U. brizantha*; SAUB – lodo sem aeração e cultivo de *U. brizantha*; ns – Não significativo a 5% de probabilidade pelo teste F; \*, \*\*, \*\*\* - Significativo a 5, 1 e 0,1% de probabilidade pelo teste F, respectivamente.

Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

Em vista dos resultados apresentados acima, podemos novamente perceber a relevância do cultivo das gramíneas e da aeração para o sistema na remoção de IND do lodo de esgoto, apesar do IND ser um composto de 6 anéis benzênicos, caracterizando-se como de maior massa molar, maior hidrofobicidade e, conseqüentemente, maior dificuldade de degradação no meio. No entanto alguns estudos já ressaltaram que sua degradação, em processos de fitorremediação com gramíneas, é possível, com reduções em torno de 37,5 a 76,7% reportados na literatura, podendo atingir 50 a 86% quando houver associação com bactérias (SHI *et al.*, 2017; TIAN *et al.*, 2017). Esses autores reforçam a importância das gramíneas pela liberação de exsudatos, que podem promover incremento da atividade microbiana na rizosfera e a dessorção dos HPAs das partículas do solo e/ou matéria orgânica, deixando-os biodisponíveis. Ambos os processos facilitam a degradação microbiana dos HPAs, envolvendo, principalmente, enzimas oxidases, que utilizam o O<sub>2</sub> como receptor de elétrons nos processos de degradação.

### 3.7 Somatório HPAs (Σ6HPAs)

Para o somatório dos 6 HPAs quantificados (Σ6HPAs), houve efeito significativo para o C<sub>1</sub>, aos 20 e 60 DA, evidenciando maior teor de HPAs nos tratamentos sem cultivo, em comparação aos com cultivo. Aos 20 e 40 DA, houve efeito significativo para o C<sub>3</sub>, sendo os tratamentos com cultivo de *P. purpureum* com maior teor de HPAs em relação aos com cultivo

de *U. brizantha*. Ainda houve efeito significativo para o C2 e C5 aos 20 DA, mostrando maior teor nos tratamentos sem cultivo e sem aeração e com cultivo de *U. brizantha* sem aeração, respectivamente. Nas camadas de 0-10 e 20-30, houve efeito significativo para o C5, indicando maior teor de HPAs no tratamento com cultivo de *U. brizantha* com aeração (TABELA 8).

Tabela 8 – Médias e significância dos contrastes para o  $\Sigma$ 6HPAs (mg kg<sup>-1</sup>, base seca) em lodo de esgoto cultivado com *P. purpureum* e *U. brizantha* com ou sem aeração

Tratamentos / Contrastes	20 DC	40 DC	60 DC	90 DC					
				0-10	10-20	20-30	30-40	>40	0-50
CASC	0,941	0,748	1,767	1,692	1,609	1,691	2,104	3,213	2,062
SASC	1,271	0,716	1,871	1,237	0,986	0,952	1,655	2,871	1,520
CAPP	0,800	0,809	1,116	0,855	1,051	1,165	2,574	2,751	1,679
SAPP	1,008	0,896	1,571	1,532	1,559	2,465	2,673	3,363	2,319
CAUB	0,663	0,610	1,326	1,291	1,742	2,474	2,294	3,413	2,243
SAUB	0,736	0,569	1,238	1,122	1,044	1,599	2,941	2,130	1,767
Média	0,903	0,725	1,481	1,288	1,332	1,724	2,373	2,957	1,932
C <sub>1</sub> = SC – CC	1,218***	ns	2,026*	ns	ns	ns	ns	ns	ns
C <sub>2</sub> = CASC – SASC	-0,330***	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
C <sub>3</sub> = PP – UB	0,409**	0,526**	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
C <sub>4</sub> = CAPP – SAPP	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
C <sub>5</sub> = CAUB - SAUB	-0,074*	ns	ns	0,169*	ns	0,875*	ns	ns	ns
CV (%)	11,20	19,80	26,88	34,73	41,53	41,67	34,52	38,10	30,44

Nota: DC – Dias de cultivo; C<sub>1</sub>, C<sub>2</sub>, C<sub>3</sub>, C<sub>4</sub> e C<sub>5</sub> – Contrastes 1, 2, 3, 4 e 5, respectivamente; SC – Lodo sem cultivo (CASC; SASC); CC – Lodo com cultivo (CAPP; SAPP; CAUB; SAUB); CASC – Lodo com aeração e sem cultivo; SASC – Lodo sem aeração e sem cultivo; PP – Cultivo de *P. purpureum* (CAPP; SAPP); UB – Cultivo de *U. brizantha* (CAUB; SAUB); CAPP – Lodo com aeração e cultivo de *P. purpureum*; SAPP – Lodo sem aeração e com cultivo de *P. purpureum*; CAUB – Lodo com aeração e cultivo de *U. brizantha*; SAUB – lodo sem aeração e cultivo de *U. brizantha*; ns – Não significativo a 5% de probabilidade pelo teste F; \*, \*\*, \*\*\* - Significativo a 5, 1 e 0,1% de probabilidade pelo teste F, respectivamente.

Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

### 3.8 HPAs após a compostagem

Ao final da compostagem, houve efeito significativo para o C1 para o FEN e FLUO (TABELA 9). Assim, houve maior teor desses compostos nos tratamentos com cultivo, em comparação ao sem cultivo, mantendo o observado em profundidade (TABELAS 2 e 3). Ainda, para o FEN, houve efeito significativo no C4 (TABELA 9), evidenciando maior teor no tratamento com cultivo de *P. purpureum* sem aeração, em comparação ao com aeração, mantendo o observado em profundidade (TABELA 2). Para o FLUO, também, houve significância para o C5, demonstrando maior teor no tratamento com cultivo de *U. brizantha* com aeração, em comparação ao sem aeração. Ainda, percebe-se que houve uma redução média de 71 e 48,7% do teor de FEN e FLUO, respectivamente, do final do cultivo (0-50 cm) (TABELAS 2 e 3) ao final da compostagem (TABELA 9).

Tabela 9 – Médias e significância dos contrastes para os teores de HPAs (mg kg<sup>-1</sup>, base seca) em lodo de esgoto cultivado com *P. purpureum* e *U. brizantha*, com ou sem aeração, e compostado

Tratamentos / Contrastes	FEN	FLUO	PIR	BaA	CRI	IND	Σ6HPAs
	----- mg kg <sup>-1</sup> -----						
CASC	0,041	0,051	0,626	0,012±0,016	0,141	0,068	0,940
SASC	0,030	0,033	0,331	0,005±0,058	0,086	0,072	0,557
CAPP	0,034	0,069	0,386	0,022±0,023	0,109	0,058	0,678
SAPP	0,113	0,382	0,892	0,049±0,057	0,104	0,106	1,645
CAUB	0,154	0,327	0,779	0,042±0,039	0,087	0,069	1,458
SAUB	0,054	0,090	0,582	0,019±0,015	0,095	0,095	1,645
Média	0,071	0,159	0,599	0,025±0,011	0,104	0,078	1,154
C <sub>1</sub> = SC – CC	-0,213*	-0,698*	ns	-	ns	ns	ns
C <sub>2</sub> = CASC – SASC	ns	ns	ns	-	0,056*	ns	ns
C <sub>3</sub> = PP – UB	ns	ns	ns	-	ns	ns	ns
C <sub>4</sub> = CAPP – SAPP	-0,079*	ns	ns	-	ns	ns	ns
C <sub>5</sub> = CAUB - SAUB	ns	0,238*	0,197*	-	ns	-0,027*	-0,188*
CV (%)	80,48	116,98	53,40	-	31,38	31,20	54,43

Nota: FEN – Fenantreno; FLUO – Fluoranteno; PIR – Pireno; BaA – Benzo(a)antraceno; CRI – Criseno; IND – Ideno[1,2,3-cd]pireno; Σ6HPAs – Somatório dos 6 HPAs; C<sub>1</sub>, C<sub>2</sub>, C<sub>3</sub>, C<sub>4</sub> e C<sub>5</sub> – Contrastes 1, 2, 3, 4 e 5, respectivamente; SC – Lodo sem cultivo (CASC; SASC); CC – Lodo com cultivo (CAPP; SAPP; CAUB; SAUB); CASC – Lodo com aeração e sem cultivo; SASC – Lodo sem aeração e sem cultivo; PP – Cultivo de *P. purpureum* (CAPP; SAPP); UB – Cultivo de *U. brizantha* (CAUB; SAUB); CAPP – Lodo com aeração e cultivo de *P. purpureum*; SAPP – Lodo sem aeração e com cultivo de *P. purpureum*; CAUB – Lodo com aeração e cultivo de *U. brizantha*; SAUB – lodo sem aeração e cultivo de *U. brizantha*; ns – Não significativo a 5% de probabilidade pelo teste F; \*, \*\*, \*\*\* - Significativo a 5, 1 e 0,1% de probabilidade pelo teste F, respectivamente.

Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

Cai *et al.* (2012) observaram redução de 98,4 e 93,2% do teor de FEN e FLUO, respectivamente, em compostagem de lodo em sistema de revolvimento manual, a cada 5 dias; enquanto que o revolvimento das pilhas deste trabalho ocorreram a cada 15 dias.

Para o PIR, houve efeito significativo para o C<sub>5</sub>, indicando maior teor no tratamento com cultivo de *U. brizantha* com aeração, em comparação ao sem aeração, após a compostagem. Ainda, houve redução de 18% do teor do composto do final do cultivo (TABELA 4) ao final da compostagem (TABELA 9). Porcentagem esta muito inferior ao de Cai *et al.* (2007, 2012) que observaram taxa de degradação de PIR de 86 e 90,3% em compostagem de lodo de esgoto em leiras de revolvimento manual.

Quanto ao BaA, não foi possível a realização da ANOVA por, em 33% das amostras (n = 24), não ter sido detectado o composto nas amostras do lodo após a compostagem, realizando-se, então, intervalo de confiança a 5% de probabilidade pelo teste t. Entretanto esse resultado é muito satisfatório, por ter ocorrido perda significativa de BaA no composto de lodo de esgoto, sendo evidenciado pela redução de 62%, quando se compara o teor do final do cultivo (TABELA 5) ao final da compostagem (TABELA 9). Essa redução encontra-se em situação intermediária, comparando-se a trabalhos de compostagem de lodo de esgoto, uma vez que Cai *et al.* (2007, 2012) observaram redução de 94,8 e 95%, enquanto Poluszyńska *et al.* (2017) observaram redução entre 10,8 e 37,5% no teor de BaA.

Houve efeito significativo do C2, após a compostagem para o CRI, mostrando maior teor no tratamento sem cultivo com aeração, comparando-se ao sem aeração. Diferente dos outros compostos, a redução de CRI foi baixa, atingindo porcentagem de apenas 8,8% do final do cultivo (TABELA 6) ao final da compostagem (TABELA 9), mostrando-se um composto mais resistente à degradação neste sistema. Oleszczuk (2008) obteve redução de 0,46 a 44,8% do teor de CRI ao final da compostagem de três lodos de esgoto de diferentes localidades da Polônia e incremento de 1,7% em lodo de outra região. Em concordância, Cai *et al.* (2012) observaram concentração de 13,6% de CRI. No entanto Cai *et al.* (2007) obtiveram redução de 96,8% no teor de CRI.

Ao final da compostagem, houve efeito significativo do C5 para o IND, indicando maior teor no tratamento com cultivo de *U. brizantha* sem aeração, havendo ainda redução média de 83,2% de IND entre o final do cultivo (TABELA 7) e final da compostagem (TABELA 9). Oleszczuk (2008) observou redução de 15,6 a 71,6% no teor de IND, enquanto, em estudo de Cai *et al.* (2007), foi encontrada redução de 99% no teor de IND em compostagem de lodo de esgoto em leiras de revolvimento manual.

Após a compostagem, houve efeito para o C5, apresentando maior teor do  $\Sigma$ 6HPAs no tratamento com cultivo de *U. brizantha* sem aeração. O  $\Sigma$ 6HPAs apresentou redução de 40,3% do final do cultivo (TABELA 8) ao final da compostagem (TABELA 9). No geral, esses resultados vão de encontro aos observados para os HPAs analisados individualmente, corroborando com as discussões já apresentadas.

Ainda deve ser enfatizado que houve redução média de 91, 73, 32, 67, 92 e 66% no teor de FEN, FLU, PIR, BaA, IND e  $\Sigma$ 6HPAs, respectivamente, da amostra inicial de lodo de esgoto (TABELA 1) ao final da compostagem (TABELA 9). O CRI mostrou-se, novamente, resistente à degradação neste sistema devido o incremento de 52% no teor (TABELAS 1 e 9). Além disso, dos 8 HPAs classificados pela Agência Internacional de Pesquisa em Câncer (IARC) como carcinogênico aos humanos, apenas 3 foram quantificados no lodo de esgoto do estudo, o BaA, CRI e IND, porém não foi detectado o composto que apresenta maior risco, o benzo(a)pireno (BaP) (IARC, 2010). Estes compostos correspondem a 33,3% dos HPAs, na amostra inicial de lodo (TABELA 1), com redução para 17,9% na média das amostras de lodo, ao final da compostagem (TABELA 9), diminuindo-se os riscos à saúde humana.

Em adição, o Brasil dispõe da resolução CONAMA nº 375, que estabelece limites máximos de alguns HPAs para solos adubados com lodo de esgoto, sendo de 3,30, 0,025 e 0,031 mg kg<sup>-1</sup> para FEN, BaA e IND, respectivamente (BRASIL, 2006). Para isso, se considerarmos a dose de 25,6 t ha<sup>-1</sup> do lodo de esgoto compostado, visando à aplicação de 100 kg ha<sup>-1</sup> de N

disponível, à profundidade de 20 cm de aplicação, o teor desses HPAs no solo seria de 0,91, 0,32 e 1,00  $\mu\text{g kg}^{-1}$ , respectivamente, ficando na ordem de 1.000 vezes abaixo do limite máximo estabelecido. Esses valores ainda podem ser reduzidos após a aplicação do composto de lodo de esgoto ao solo, em virtude de perdas por volatilização, degradação microbiana e absorção pelas culturas, como observado por Feng *et al.* (2014). Esses autores constaram que houve volatilização de HPAs de baixo peso molecular, como o FEN e que houve redução de 49,4 e 55,1% no teor de HPAs de alto peso molecular em solo adubado com composto de lodo de esgoto sem cultivo e cultivado com *Festuca arundinacea*, respectivamente.

#### 4 Conclusões

O lodo de esgoto utilizado apresenta baixos teores de ftalatos, cresóis e HPAs, mas os HPAs estavam abaixo do limite máximo estabelecido por normas estrangeiras.

No geral, há maior teor dos HPAs nos tratamentos sem cultivo, mostrando a contribuição das gramíneas para a degradação dos compostos.

Quando sem cultivo, a presença da aeração apresenta-se mais eficaz na degradação dos HPAs.

O cultivo de *Urochloa brizantha* apresenta-se mais eficaz que o *Pennisetum purpureum* na degradação dos HPAs.

O cultivo de *Pennisetum purpureum* em lodo de esgoto, quando aerado, reduz o teor de HPAs.

O cultivo de *Urochloa brizantha* em lodo de esgoto sem aeração proporciona menor teor de HPAs.

A compostagem por revolvimento do lodo de esgoto com a própria biomassa das espécies cultivadas reduz, consideravelmente, o teor dos HPAs no composto final.

#### Referências

ALVARENGA, A. C.; SAMPAIO, R. A.; PINHO, G. P.; CARDOSO, P. H. S.; SOUSA, I. P.; BARBOSA, M. H. C. Phytoremediation of chlorobenzenes in sewage sludge cultivated with *Pennisetum purpureum* at different times. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.21, p.573-578, 2017.

ANDRADE, V. F.; DURÃES, A. F. S.; CASSIMIRO, D. L.; PINHO, G. P.; SILVERIO, F. O. Fast extraction of polychlorinated dibenzo-p-dioxin and polychlorinated dibenzofuran in sewage sludge and soil samples. Journal of Environmental Science and Health. Part. B, Pesticides, Food Contaminants, and Agricultural Wastes, v.52, p.267-273, 2017.

BRASIL. Conselho Nacional de Meio Ambiente - CONAMA. Resolução n° 375, de 29 de Agosto de 2006. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 30 de ago. de 2006. Seção 1. p.141-146. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/legiano1.cfm?ano=todos&codlegitipo=3>>. Acesso em: 27 jul. 2016.

- CAI, Q. Y.; MO, C. H.; WU, Q. T.; ZENG, Q. Y.; KATSOYIANNIS, A.; FÉRARD, J. F. Bioremediation of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs)-contaminated sewage sludge by different composting processes. *Journal of Hazardous Materials*, v.142, p.535-542, 2007.
- CAI, Q. Y.; MO, C. H.; LÜ, H.; ZENG, Q. Y.; WU, Q. T.; LI, Y. W. Effect of composting on the removal of semivolatile organic chemicals (SVOCs) from sewage sludge. *Bioresource Technology*, v.126, p.463-467, 2012.
- CEC – COUNCIL OF THE EUROPEAN COMMUNITY. Working document on Sludge, 3rd Draft, Brussels, 20p., 27 April, 2000. Disponível em: <<http://ec.europa.eu/environment/waste/sludge/>>. Acesso em: 18 Dez. 2017.
- CHEN, Y.; LV, R.; WANG, F.; LI, L. Determination and modeling of liquid-liquid equilibrium for ternary mixtures of methyl isopropyl ketone, cresol isomers and water. *Fluid Phase Equilibria*, v.429, p.107-112, 2016.
- CHEEMA, S. A.; KHAN, M. I.; SHEN, C.; TANG, X.; FAROOQ, M.; CHEN, L.; ZHANG, C.; CHEN, Y. Degradation of phenanthrene and pyrene in spiked soils by single and combined plants cultivation. *Journal of Hazardous Materials*, v.177, p.384-389, 2010.
- FENG, L.; ZHANG, L.; FENG, L. Dissipation of polycyclic aromatic hydrocarbons in soil amended with sewage sludge compost. *International Biodeterioration & Biodegradation*, v.95, p.200-207, 2014.
- GANI, K. M.; KAZMI, A. A. Evaluation of three full scale sewage treatment plants for occurrence and removal efficacy of priority phthalates. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, v.4, p.2628-2636, 2016.
- GARCÍA-SÁNCHEZ, M.; KOSNAR, Z.; MERCL, F.; ARANDA, E.; TLUSTOS, P. A comparative study to evaluate natural attenuation, mycoaugmentation, phytoremediation, and microbial-assisted phytoremediation strategies for the bioremediation of an aged PAH-polluted soil. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, v.147, p.165-174, 2018.
- GASKIN, S. E.; BENTHAM, R. H. Rhizoremediation of hydrocarbon contaminated soil using Australian native grasses. *Science of the Total Environment*, v.408, p.3683-3688, 2010.
- IARC – International Agency for Research on Cancer. Some non-heterocyclic polycyclic aromatic hydrocarbons and some related exposures. *IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans*, v.92, p.1–853, 2010. Disponível em: <https://monographs.iarc.fr/ENG/Monographs/vol92/mono92.pdf>. Acesso em: 16 abr. 2018.
- JIA, H.; LU, H.; DAI, M.; HONG, H.; LIU, J.; YAN, C. Effect of root exudates on sorption, desorption, and transport of phenanthrene in mangrove sediments. *Marine Pollution Bulletin*, v.109, p.171-177, 2016a.
- JIA, H.; WANG, H.; LU, H.; JIANG, S.; DAI, M.; LIU, J.; YAN, C. Rhizodegradation potential and tolerance of *Avicennia marina* (Forsk.) Vierh in phenanthrene and pyrene contaminated sediments. *Marine Pollution Bulletin*, v.110, p.112-118, 2016b.
- KANG, D. J.; SEO, Y. J.; SAITO, T.; SUZUKI, H.; ISHII, Y. Uptake and translocation of cesium-133 in napiergrass (*Pennisetum purpureum* Schum.) under hydroponic conditions. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, v.82, p.122-126, 2012.
- KIEHL, E. J. Manual de compostagem: maturação e qualidade do composto. 6.ed. Piracicaba: E.J., 2012. 171p.
- KRUSTZ, L. J.; BEYROUTY, C. A.; GENTRY, T. J.; WOLF, D. C.; REYNOLDS, C. M. Selective enrichment of a pyrene degrader population and enhanced pyrene degradation in Bermuda grass rhizosphere. *Biology and Fertility of Soils*, v.41, p.359-365, 2005.
- LIU, R.; ZHAO, L.; JIN, C.; XIAO, N.; JADEJA, R. N.; SUN, T. Enzyme responses to phytoremediation of pah-contaminated soil using *Echinacea purpurea* (L.). *Water, Air, and Soil Pollution*, v.225, p.2230-2241, 2014.

MA, J.; XU, L.; JIA, L. Characterization of pyrene degradation by *Pseudomonas* sp. strain Jpyr-1 isolated from active sewage sludge. *Bioresource Technology*, v.140, p.15-21, 2013.

MAIA, M. R.; ARCANJO, A. L. P.; PINHO, G. P.; SILVÉRIO, F. O. Solid-liquid extraction with low temperature purification coupled with gas chromatography and mass spectrometry for determination of polychlorinated biphenyls in sewage sludge. *Journal of the Brazilian Chemical Society*, v.28, p.179-186, 2017

MENG, X. Z.; WANG, Y.; XIANG, N.; CHEN, L.; LIU, Z.; WU, B.; DAI, X.; ZHANG, Y. H.; XIE, Z.; EBINGHAUS, R. Flow of sewage sludge-borne phthalate esters (PAEs) from human release to human intake: Implication for risk assessment of sewage applied to soil. *Science of the Total Environment*, v.476-477, p.242-249, 2014.

MERKL, N.; KRAFT, R. S.; ARIAS, M. Effect of the tropical grass *Brachiaria brizantha* (Hochst. ex A. Rich.) Stapf on microbial population and activity in petroleum-contaminated soil. *Microbiological Research*, v.161, p.80-91, 2006.

MERKL, N.; KRAFT, R. S.; INFANTE, C. Assessment of tropical grasses and legumes for phytoremediation of petroleum-contaminated soils. *Water, Air, and Soil Pollution*, v.165, p.195-209, 2005.

NI, N.; SHI, R.; LIU, Z.; BIAN, Y.; WANG, F.; SONG, Y.; JIANG, X. Effects of biochars on the bioaccessibility of phenanthrene/pyrene/zinc/lead and microbial community structure in a soil under aerobic and anaerobic conditions. *Journal of Environmental Sciences*, 2017. DOI:10.1016/j.jes.2017.05.023

OLESZCZUK, P. Phytotoxicity of municipal sewage sludge composts related to physico-chemical properties, PAHs and heavy metals. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, v.69, p.496-505, 2008.

PADILLA-SÁNCHEZ, J. A.; BOLAÑOS, P. P.; GONZÁLEZ, R. R.; FRENICH, A. G.; VIDAL, J. L. M. Application of a quick, easy, cheap, effective, rugged and safe-based method for the simultaneous extraction of chlorophenols, alkylphenols, nitrophenols and cresols in agricultural soils, analyzed by using gas chromatography–triple quadrupole-mass spectrometry/mass spectrometry. *Journal of Chromatography A*, v.1217, p.5724-5731, 2010.

PARAÍBA, L. C.; QUEIROZ, S. C. N.; SOUZA, D. R. C.; SAITO, M. L. Risk simulation of soil contamination by polycyclic aromatic hydrocarbons from sewage sludge used as fertilizers. *Journal of the Brazilian Chemical Society*, v.22, p.1156-1163, 2011.

PEREIRA, N. G. F. Determinação simultânea de ftalatos em lodo de esgoto utilizando a extração sólido-líquido com purificação em baixa temperatura. Montes Claros: UFMG, 2017. 87p. Dissertação Mestrado.

PING, L.; LUO, Y.; WU, L.; QIAN, W.; SONG, J.; CHRISTIE, P. Phenanthrene adsorption by soils treated with humic substances under different pH and temperature conditions. *Environmental Geochemistry and Health*, v.28, p.189-195, 2006.

PINHO, G. P.; SILVÉRIO, F. O.; EVANGELISTA, G. F.; MESQUITA, L. V.; BARBOSA, E. S. Determination of chlorobenzenes in sewage sludge by solid-liquid extraction with purification at low temperature and gas chromatography mass spectrometry. *Journal of the Brazilian Chemical Society*, v.25, p.1292-1301, 2014.

POLUSZYŃSKA, J.; KRZEMIŃSKA, E. J.; RYBICKA, E. H. Studying the effects of two various methods of composting on the degradation levels of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in sewage sludge. *Water, Air, and Soil Pollution*, v.228, p.305-315, 2017.

ROSTAMI, S.; AZHDARPOOR, A.; ROSTAMI, M.; SAMAEI, M. R. The effects of simultaneous application of plant growth regulators and bioaugmentation on improvement of phytoremediation of pyrene contaminated soils. *Chemosphere*, v.161, p.219-223, 2016.

SANTOS, N. A.; CACIQUE, A. P.; BARBOSA, E. S.; SILVÉRIO, F. O.; PINHO, G. P. Validation Of a method for extraxtion of polycyclic aromatic hydrocarbons from sewage sludge and analysis by GC-MS. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, v.97, p.1393-1404, 2017.

SANTOS, R. R. Eextração sólido-líquido com purificação em baixa temperatura: uma técnica eficiente para a extração de dez organoclorados em lodo de esgoto. Montes Claros: UFMG, 2015. 112p. Dissertação Mestrado.

SHAHSAVARI, E.; ADETUTU, R. M.; TAHA, M.; BALL, A. S. Rhizoremediation of phenanthrene and pyrene contaminated soil using wheat. *Journal of Environmental Management*, v.155, p.171-176, 2015.

SHI, W.; ZHANG, X.; JIA, H.; FENG, S.; YANG, Z.; ZHAO, O.; LI, Y. Effective remediation of aged HMW-PAHs polluted agricultural soil by the combination of *Fusarium* sp. and smooth bromegrass (*Bromus inermis* Leyss.). *Journal of Integrative Agriculture*, v.16, p.199-209, 2017.

SOJINU, O. S.; SONIBARE, O. O.; EKUNDAYO, O.; ZENG, E. Y. Biomonitoring potentials of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) by higher plants from na oil exploration site, Nigeria. *Journal of Hazardous Materials*, v.184, p.750-764, 2010.

SUCIU, N. A.; LAMASTRA, L.; TREVISAN, M. PAHs content of sewage sludge in Europe and its use as soil fertilizer. *Waste Management*, v.41, p.119-127, 2015.

SUN, B.; LING, W.; WANG, Y. Can root exudate components influence the availability of pyrene in soil? *Journal of Soils and Sediments*, v.13, p.1161-1169, 2013.

TIAN, W.; ZHAO, J.; ZHOU, Y.; QIAO, K.; JIN, X.; LIU, Q. Effects of root exudates on gel-beads/reeds combination remediation of high molecular weight polycyclic aromatic hydrocarbons. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, v.135, p.158-164, 2017.

WANG, B.; WANG, Q.; LIU, W.; LIU, X.; HOU, J.; TENG, Y.; CHRISTIE, P. Biosurfactant-producing microorganism *Pseudomonas* sp. SB assists the phytoremediation of DDT-contaminated soil by two grass species. *Chemosphere*, v.182, p.137-142, 2017.

WANG, J.; OU, J.; SUN, X.; HUANG, C.; SUN, J.; SHAO, H.; LENG, Y. Measurement and correlation of isobaric vapour-liquid equilibrium for systems of o-cresol, m-cresol and 2, 6-dimethylphenol at 20.0 kPa. *Fluid Phase Equilibria*, v.459, p.44-50, 2018.

WANG, M. C.; CHEN, Y. T.; CHEN, S. H.; CHANG CHIEN, S. W.; SUNKARA, S. V. Phytoremediation of pyrene contaminated soils amended with compost and planted with ryegrass and alfalfa. *Chemosphere*, v.87, p.217-225, 2012.

WILD, S. R.; HARRAD, S. J.; JONES, K. C. Chlorophenols in digested U.K. sewage sludge. *Water Research*, v.27, p.1527-1534, 1993.

ZELINKOVA, Z.; WENZL, T. The Occurrence of 16 EPA PAHs in Food – A Review. *Polycyclic Aromatic Compounds*, v.35, p.248-284, 2015.

ZHAN, X.; ZHU, M.; SHEN, Y.; YUE, L.; LI, J.; TORRESDEY, J. L. G.; XU, G. Apoplastic and symplastic uptake of phenanthrene in wheat roots. *Environmental Pollution*, v.293, p.331-339, 2018.

ZHANG, X.; XIA, H.; LI, H.; ZHUANG, P. GAO, B. Potencial of four forage grasses in remediation of Cd and Zn contaminated soils. *Bioresource Technology*, v.101, p.2063-2066, 2010.