



AVALIAÇÃO DA FERTIRRIGAÇÃO COM VINHAÇA TRATADA EM BIODIGESTORES ANAERÓBIOS

Rubens de Carvalho Filho⁽¹⁾

Engenheiro Agrícola pela Universidade Estadual de Maringá (UEM). Mestrando em Engenharia Química pela Universidade Estadual de Maringá (UEM).

Daniel Tait Vareschini⁽²⁾

Engenheiro Químico pela Universidade Estadual de Maringá (UEM). Mestre em Ciência em Engenharia pelo Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa em Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ). Doutor em Ciências Morfológicas pelo Instituto de Ciências Biomédicas da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ). Professor adjunto do Departamento de Engenharia Química da Universidade Estadual de Maringá (UEM).

Marcelino Luiz Gimenes⁽³⁾

Engenheiro Químico pela Universidade Estadual de Maringá (UEM). Mestre em Engenharia Química pela Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP). Doutor em Engenharia Química pela Universidade de Leeds (Inglaterra). Pós-Doutorado em Engenharia Química pela Universidade de Waterloo (Bélgica) e Ciência em Engenharia pela Universidade de Oxford (Inglaterra). Professor titular do Departamento de Engenharia Química da Universidade Estadual de Maringá (UEM).

Stella Cabral Guimarães⁽⁴⁾

Graduanda em Engenharia Química pela Universidade Estadual de Maringá (UEM).

Bruna Miyazaki Gonçalves⁽⁵⁾

Graduanda em Engenharia Química pela Universidade Estadual de Maringá (UEM).

Endereço⁽¹⁾: Avenida Colombo, Jardim Universitário, 5790 – Departamento de Engenharia Química (Bloco D90), Maringá/PR - CEP: 87020-900–Telefones: (44) 30114778 (secretaria) e (44) 30114770 (portaria) – e-mail: rubinhocfuem@hotmail.com

RESUMO

Na indústria sucroalcooleira, o bagaço e a vinhaça são reconhecidos como resíduos finais de processamento. O bagaço se integra à fonte energética industrial através da queima, já a vinhaça é um efluente potencialmente prejudicial ao meio ambiente se utilizada de maneira incorreta. Quando aplicada sem critérios a vinhaça gera impactos ambientais, devido a sua carga orgânica, acidez, excesso de minerais e odor. Para contornar esses problemas pode-se utilizar biodigestão anaeróbia. A biodigestão não é uma tecnologia nova, entretanto sua aplicação ainda representa um grande campo a ser explorado. A decomposição microbiana da vinhaça consome a matéria orgânica liberando um efluente rico em minerais e biogás (metano e gás carbônico) utilizados na geração de energia. Este trabalho tem como objetivo avaliar a remoção de matéria orgânica da vinhaça em um biorreator anaeróbio de bancada e o potencial da aplicação da vinhaça tratada como fertilizante líquido. Como resultados demonstrou-se que a biodigestão foi capaz de remover até 94 % de remoção de DQO final e a vinhaça tratada manteve os principais nutrientes para a cultura canavieira, removendo apenas 11 % do potássio.

PALAVRAS-CHAVE: Vinhaça, Impactos ambientais, Digestão anaeróbia.

INTRODUÇÃO

O setor sucroalcooleiro brasileiro é uma área da economia que vem expandindo intensamente desde a década de 70, segundo a União das Indústrias de Cana de Açúcar, na safra 2016/2017, foram produzidas 651.841 mil toneladas de cana de açúcar, em que dessa parcela foram gerados 27.254 bilhões de litros de etanol. Para cada litro de etanol produzido ocorre a geração de 10 a 15 litros de vinhaça (CRUZ *et al.*, 2008).

A fertirrigação com vinhaça é a principal prática executada em indústrias sucroalcooleiras. Porém, de acordo com Fuess & Garcia (2014) a aplicação contínua e ao longo prazo, quando associada à falta de conhecimento técnico de algumas empresas desse ramo tendem a causar impactos ambientais. Christofolletti *et al.* (2013) e Navarro *et al.* (2000) afirmam que a aplicação descontrolada traz prejuízos como lixiviação de metais presentes no solo para águas subterrâneas, salinização, desequilíbrio de nutrientes, redução da alcalinidade, perdas nas colheitas, aumento da fitotoxicidade e odor desagradável. Outro ponto negativo dessa prática é a



perda de bioenergia devido à conversão descontrolada de matéria orgânica pelas populações microbianas do solo, o que também aumenta a emissão de gases de efeito estufa, como óxidos de nitrogênio e metano (OLIVEIRA *et al.*, 2013).

Na busca de solucionar tais problemas se desenvolveu por diversos pesquisadores um tratamento biológico através da digestão anaeróbia, um processo que consiste na biodegradação da matéria orgânica por ação de diferentes microrganismos, os quais na ausência de oxigênio molecular promovem a transformação de compostos orgânicos complexos em produtos mais simples, gerando biogás (CHERNICHARO, 2007).

Devido ao aumento esperado da demanda por etanol, as indústrias do setor sucroenergético devem receber informações técnicas e econômicas detalhadas sobre a implementação de sistemas de digestão anaeróbia em larga escala no tratamento da vinhaça em biorrefinarias para a exploração eficiente de vinhaça como fertilizante e matéria-prima para recuperação de bioenergia exigindo, assim, avaliações cuidadosas dos benefícios e desvantagens para determinar sua implementação apropriada nas destilarias (FUESS *et al.*, 2017).

Diante do exposto, esta pesquisa tem como objetivo geral, avaliar a redução do impacto ambiental decorrente da aplicação de vinhaça como fertilizante a partir do tratamento em biorreatores anaeróbios. Em seguida, foi possível atingir os seguintes objetivos específicos:

- Caracterização de propriedades químicas do solo em relação à sua fertilidade da região de Iguatemi-PR;
- Determinação dos parâmetros físico-químicos da vinhaça *in natura* de uma usina sucroalcooleira localizada na região norte do Paraná;
- Avaliação da biodegradação anaeróbia da vinhaça utilizando lodo biológico;
- Testes do solo após aplicação de vinhaça *in natura* e tratada.

MATERIAIS E MÉTODOS

O desenvolvimento desta pesquisa e os experimentos foram conduzidos na Universidade Estadual de Maringá (UEM). O solo foi coletado no dia 05/07/2017 junto à Fazenda Experimental de Iguatemi (FEI) da UEM. A vinhaça, proveniente de mosto misto (caldo e melaço) foi coletada do destilador de álcool de uma usina sucroalcooleira localizada no município de Iguatemi-PR, no dia 24/07/2017, sendo condicionadas em garrafas de vidro devido à sua alta temperatura, resfriada e conservada em refrigeração adequada durante o seu uso. Para realizar a inoculação microbiológica da vinhaça, foi empregado um lodo, retirado de um biodigestor anaeróbio no dia 22/07/2017, em uma empresa de aproveitamento de resíduos orgânicos agroindustriais, situada na região Noroeste do Paraná.

HISTÓRICO E CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA DO SOLO DE IGUATEMI-PR

De acordo com o Sistema Nacional de Classificação de Solos (EMBRAPA, 2006), o solo de Iguatemi-PR é classificado como Latossolo Vermelho Distrófico (LVd). Para a amostragem do mesmo, abriu-se uma trincheira com dimensão aproximada de 1,50m x 0,80m x 0,90 m em uma área na FEI separando em camadas de 0-5, 5-10, 10-20, 20-40, 40-60 e 60-80 cm (Figura 1).

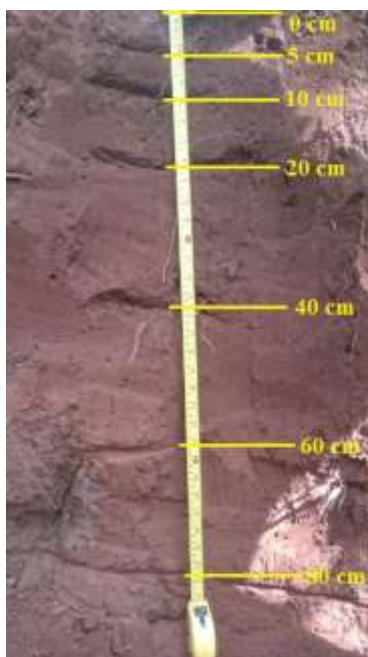


Figura 1: Abertura do perfil do solo com identificação das camadas.

As amostras de solos foram submetidas à fragmentação manual, seguida de secagem ao ar dentro da estufa de crisântemo e depois foi efetuada a separação das frações em peneiras de 20 mm e 2 mm, obtendo Terra Fina Seca ao Ar (TFSA), conforme EMBRAPA (2017). Os atributos químicos do solo em relação à sua fertilidade foram caracterizados com ensaios de pH (potencial hidrogeniônico), Matéria Orgânica (MO) e os íons correspondentes ao complexo sortivo: Cálcio (Ca^{2+}), Magnésio (Mg^{2+}), Potássio (K^+), Sódio (Na^+), Alumínio Trocável (Al^{3+}), Acidez Potencial ($\text{H}^+ + \text{Al}^{3+}$) cujas metodologias estão descritas na Tabela 1.

Tabela 1: Metodologias utilizadas para caracterização dos atributos químicos do solo.

PARÂMETROS	MÉTODO ANALÍTICO	EQUIPAMENTO	UNIDADE
pH	EMBRAPA (2017), Potenciométrico	Peagâmetro Digimed, Modelo DM-20	-----
Ca^{2+} , Mg^{2+} , Al^{3+}	EMBRAPA (2017), Espectroscopia de absorção atômica e titulação com extração do solo em solução de KCl 1 N	Espectrofotômetro de Absorção Atômica Varian SpectrAA – 10 Plus e Bureta Digital Turette 25 mL	cmol_c/L
K^+ , Na^+	EMBRAPA (2017), Espectroscopia de absorção atômica com extração do solo em solução Melich-1 (H_2SO_4 0,025 N e HCl 0,05 N)	Espectrofotômetro de Absorção Atômica Varian SpectrAA – 10 Plus	cmol_c/L
$\text{H}^+ + \text{Al}^{3+}$	EMBRAPA (2017), Titulação	Bureta Digital Turette 25 mL	cmol_c/L
MO	EMBRAPA (2017), Colorimétrico e Titulação	Bureta Digital Turette 25 mL	g/L

DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS FÍSICOS E QUÍMICOS DA VINHAÇA

Os parâmetros físico-químicos da vinhaça *in natura* (VI) foram caracterizados com análises de pH, Turbidez, Cor Aparente, Demanda Bioquímica de Oxigênio (DQO), Sólidos Totais (ST), Sólidos Voláteis (SV), Sólidos Fixos (SF) e Potássio (K), todas em conformidade com a NBR 9898 da ABNT (1987), cujas os métodos analíticos são exibidos na Tabela 2.



Tabela 2: Métodos analíticos para determinação dos parâmetros físico-químicos da vinhaça.

PARÂMETROS	MÉTODO ANALÍTICO	EQUIPAMENTO	UNIDADE
pH	Direto, Potenciométrico	Peagâmetro Digimed Tecnal, DM-20	-----
Turbidez	<i>HACH Company (1996)</i> , Atenuação da Radiação	Espectrofotômetro HACH, DR/2010	FAU
Cor Aparente	<i>HACH Company (1996)</i> , Platina-Cobalto	Espectrofotômetro HACH, DR/2010	mg Pt-Co/L
DQO	<i>Standard Methods (1998)</i> , Refluxo Aberto	Bloco Digestor e Espectrofotômetro HACH, DR/2010	mg O ₂ /L
ST, SV, SF	<i>Standard Methods (1998)</i> , Gravimétrico	Estufa e Mufla	mg/L
K ¹	<i>Standard Methods (1998)</i> , Espectroscopia de Absorção Atômica	Espectrofotômetro de Absorção Atômica Varian SpectrAA – 10 Plus	mg K ₂ O/L

BIODEGRADAÇÃO ANAERÓBIA DA VINHAÇA

A vinhaça foi adicionada ao lodo que contém uma simbiose de microorganismos preparados para a degradação de matéria orgânica. O biorreator anaeróbico de escala de bancada com volume de trabalho de 1 litro foi mantido por 30 dias à 35°C e sob agitação de 60 rpm (Figura 2). Para análise dos efluentes líquidos (vinhaça tratada) e gasosos (biogás) foram adaptados dois orifícios na tampa do biodigestor, o primeiro em altura intermediária para coleta do efluente líquido/sólido com uma ponteira para evitar a passagem de oxigênio mantendo o sistema sem oxigênio e o segundo na cabeça do reator para amostragem do biogás, com uma mangueira instalada e imersa em um béquer com água para manter o sistema anaeróbico.

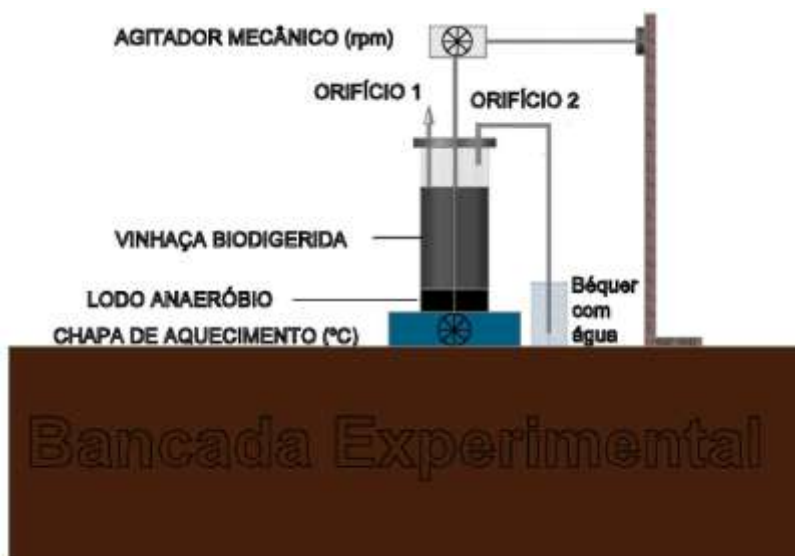


Figura 2: Desenho esquemático do biorreator anaeróbico de bancada.
Orifício 1 – coleta do efluente e adição de vinhaça. Orifício 2 – amostragem do biogás.

A vinhaça biodigerida e lodo no fundo coletados foram centrifugados a 1800 rpm durante 2 minutos, para separação de sua fase líquida, simulando um processo de decantação forçada, obtendo assim a vinhaça tratada (VT). Para supervisionar a estabilização do lodo anaeróbico foram realizados testes semanais (com intervalos de três dias) da neutralização do pH e remoção de Turbidez, Cor Aparente e DQO e, com o balanço de massa levando em conta a DQO do lodo e da vinhaça *in natura* e biodigerida, eram feitas a retirada e adição de vinhaça. O lodo foi analisado previamente obtendo respectivamente: 6,94; 36.400 mg Pt-Co L⁻¹; 11.300 FAU e 49.240 mg O₂ L⁻¹.



TESTE NO SOLO

A fertirrigação no solo foi exercida em uma estufa de crisântemo no Centro Tecnológico de Irrigação (CTI) na UEM, na qual colunas de solo (Figura 3) constituídas de tubos de PVC com 150 mm de diâmetro gerando uma área de base de 0,01767 m² foram dispostas na vertical sobre uma estrutura de apoio (tijolo) de 10 cm de altura. Em suas bases foram adaptadas telas de nylon (malha de 1 mm) e pratos de jardim perfurados, para evitar perdas de solo e com arames foram envolvidos nas colunas para que não ocorresse desmoronamento.



Figura 3: Colunas de solo instaladas na estufa de crisântemo para condução do experimento.

A deposição do solo nas colunas foi exercida de forma gradual, de modo a reproduzir semelhantemente a mesma ordem sequencial dos perfis na condição ambiente, até completar a altura de 0,80 m (última camada). A aplicação dos fertilizantes (vinhaça *in natura* e tratada) foi efetuada manualmente na superfície das colunas, cujo volume dos resíduos líquidos tiveram como alicerce os estudos realizados pela Norma Técnica P4.231 (CETESB, 2015), que estabelecem critérios e procedimentos para aplicação de vinhaça no solo agrícola. Dessa forma, a Equação (1) expressa a dosagem máxima de vinhaça que esta Norma atribuiu com a finalidade de controlar ambientalmente o solo.

$$DMV = \frac{(0,05 \times CTC - K) \times 3744 + 185}{K_2O} \quad \text{Equação (1)}$$

em que:

DMV = dosagem máxima de vinhaça (m³/ha);

CTC = Capacidade de Troca Catiônica total ou potencial, em pH 7,0 (cmol/L);

K = concentração de potássio no solo à profundidade de 0,00 a 0,80 metros (cmol/L);

3744 = constante para transformar os resultados de CTC e K expressos em cmol/L para kg de potássio no solo num volume de 1 hectare por 0,80 metros de profundidade;

185 = massa, em Kg de dióxido de potássio extraído pela cultura por hectare, por metro;

K₂O = concentração de dióxido de potássio na vinhaça (Kg de K₂O/m³).

RESULTADOS E DISCUSSÕES

ATRIBUTOS QUÍMICOS DO SOLO INICIAL

O pH e os atributos químicos do complexo sortivo nas camadas do solo podem ser observados na Tabela 3. Utilizou-se a leitura do pH em cloreto de cálcio (CaCl₂) já que esta é considerada uma determinação mais precisa do que o pH em água e em cloreto de potássio (KCl), representada pela atividade do íon na solução do solo e bastante afetada por pequenas quantidades de sais presentes no solo (SCHOFIELD & TAYLOR, 1955; DAVEY e CONYERS, 1988).



Tabela 3: Caracterização química do solo média nas camadas de 0-80 cm.

CAMADAS (m)	COMPLEXO SORTIVO (cmol/L)								MO (g/L)	pH CaCl ₂
	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	Al ³⁺	H ⁺ + Al ³⁺	SB	CTC		
0,00 – 0,05	0,35	0,21	0,08	0,20	1,00	8,42	0,84	9,26	19,11	3,7
0,05 – 0,10	0,34	0,25	0,06	0,17	0,90	6,64	0,82	7,46	15,27	3,9
0,10 – 0,20	0,23	0,17	0,05	0,23	0,76	6,16	0,62	6,84	13,21	3,9
0,20 – 0,40	0,64	0,30	0,04	0,34	0,33	4,47	1,32	5,79	9,11	4,0
0,40 – 0,60	0,67	0,40	0,04	0,41	0,25	3,94	1,52	5,46	6,80	4,1
0,60 – 0,80	0,53	0,42	0,05	0,22	0,25	4,89	1,22	6,11	5,52	3,9

¹ SB (Soma de Bases Trocáveis) = Ca²⁺ + Mg²⁺ + K⁺ + Na⁺

² CTC (Capacidade de Troca Catiônica potencial ou total em pH 7,0) = SB + (H⁺ + Al³⁺)

Através da Tabela 3 verificou-se que os valores da soma de bases (SB) variaram de 0,68 a 1,52 cmol/L, enquanto que a capacidade de troca catiônica potencial (CTC) variou de 9,26 para 5,46 cmol/L. Com exceção do Al³⁺ não teve nenhum outro cátion que houve gradiente de concentração no sentido da profundidade dos perfis, isto é, o alumínio trocável teve um empobrecimento em termos catiônicos nos horizontes inferiores, e os outros elementos alteraram muito ao longo dos horizontes. A MO também diminuiu ao longo dos horizontes, com uma diferença de 13,6 g/L da primeira para última camada, mostrando que a degradação microbológica do solo é maior nas camadas superiores.

O pH em CaCl₂ houve uma moderada mudança nas profundidades obtendo uma média e desvio padrão, respectivamente, de 3,92 e 0,133. O solo de Iguatemi manifestou elevada acidez com valor máximo de 4,1 e mínimo de 3,7 nas camadas de 40-60 e 0-5 cm, respectivamente.

PARÂMETROS DA VINHAÇA *IN NATURA* E TRATADA

Na avaliação dos parâmetros da vinhaça *in natura* e após 60 dias de biodigestão com fechamento do sistema, mediu-se novamente os mesmos parâmetros para VI, pH, Turbidez, Cor Aparente, DQO, ST, SV, SF, e K. Os resultados e suas respectivas eficiências de remoção (E_{remoção}) encontram-se na Tabela 4.

Tabela 4: Parâmetros físico-químicos da vinhaça *in natura* (VI) e tratada (VT).

PARÂMETROS	VI	VT	E _{remoção} (%)
pH	4,5 ± 0,015	7,4 ± 0,07	-----
Turbidez (FAU)	3.900 ± 100	933 ± 104,083	76
Cor Aparente (mg Pt-Co/L)	29.967 ± 251,661	10.767 ± 101,036	64
DQO (mg O ₂ /L)	33.533 ± 351,188	2.175 ± 163,936	94
ST (mg/L)	34.296 ± 375,194	10.395 ± 342,961	70
SV (mg/L)	24.937 ± 595,362	2.928 ± 82,379	88
SF ¹ (mg/L)	9,359 ± 277,014	7,671 ± 283,739	18
K (mg K ₂ O/L)	3431,2 ± 32,495	3042,62 ± 29,531	11

¹ SF (Sólidos Fixos) = ST – SV

² K₂O (Dióxido de Potássio) = 1,205*K

Por meio da Tabela 4 é possível identificar que a vinhaça é ácida, conforme reportado na literatura, cujo valor obtido foi de 4,5. A Turbidez Cor Aparente da vinhaça *in natura* de 3.900 FAU e 29.967 mg Pt-Co/L, respectivamente, confirmando efluente turvo e cor marrom escura. Costa *et al.* (1986) nos seus experimentos chegou em pH e DQO idênticos aos dessa pesquisa, com valores respectivos de 4,1 e 32.600 mg O₂/L.

Quanto ao teor de SV e SF, estes representam 73 e 27% respectivamente, dos ST, comprovando estudos de Von Sperling (2014), na qual relata que os sólidos volatizados expressam a matéria orgânica contida em um efluente, enquanto que os sólidos não-voláteis representam a parte inorgânica. Valle *et al.* (2010) garante que os teores de SV menores do que 20% indicam resíduos já estabilizados, estando próximo aos sólidos fixos deste meu trabalho.

Investigando a Tabela 4 na coluna da VT, nota-se que o valor do pH ficou bem acima do valor inicial (VI), atuando como um neutralizador. Em resultados obtidos por Oliveira (2009) evidenciaram que o processo de



biodigestão neutraliza o pH, assim como melhora características como turbidez, DQO e sólidos, com exceção à cor verdadeira, que no referido estudo dos autores, não apresentou melhora. A Turbidez, Cor e DQO, tendo 76, 64 e 94% de remoção. Essa extrema remoção de DQO, foi constatado por Chernicharo (2007) que na digestão anaeróbia de um efluente, moléculas mais complexas como carboidratos, proteínas e lipídeos são convertidas para outras mais simples.

É perceptível que o nutriente potássio teve uma remoção de apenas 11% em relação a VI, na qual ELIA NETO (2016) afirma que neste tipo de tratamento somente a matéria orgânica é degradada, possuindo o efluente final biodigerido basicamente as mesmas características nutricionais para a cana de açúcar, com menor quantidade de matéria orgânica para beneficiamento do solo.

TESTE NO SOLO

Combinando os resultado da capacidade de troca catiônica e potássio do solo, bem como o dióxido de potássio da vinhaça contidos na Equação (1) e, considerando a área da base dos tubos, foi possível calcular a dosagem máxima de vinhaça (DMV), consumindo um volume de 628 e 708 mL para vinhaça *in natura* e tratada, respectivamente. Dessa forma, na Tabela 5 estão ordenados a concentração de potássio após aplicação de vinhaça *in natura* e tratada, bem como o pH e a MO. E no gráfico da Figura 4, encontram-se o aumento do teor de potássio no solo para cada efluente.

Tabela 5: Concentração do complexo sortivo do solo após aplicação de VI e VT.

PERFIL (m)	SVI ¹			SVT ¹		
	pH	MO	K	pH	MO	K
0,00 – 0,05	4,9 ± 0,111	20,16 ± 1,778	3,103 ± 0,160	6,2 ± 0,097	22,63 ± 0,388	3,939 ± 0,251
0,05 – 0,10	4,9 ± 0,030	21,95 ± 2,160	1,581 ± 0,098	6,0 ± 0,062	29,35 ± 1,399	2,038 ± 0,063
0,10 – 0,20	4,1 ± 0,150	34,50 ± 1,027	0,458 ± 0,052	4,7 ± 0,035	28,45 ± 0,388	0,722 ± 0,059
0,20 – 0,40	3,9 ± 0,075	34,95 ± 1,344	0,041 ± 0,008	4,0 ± 0,110	26,88 ± 0,672	0,120 ± 0,007
0,40 – 0,60	4,1 ± 0,042	36,07 ± 1,027	0,042 ± 0,012	4,0 ± 0,046	11,65 ± 1,399	0,070 ± 0,004
0,60 – 0,80	4,0 ± 0,129	38,76 ± 1,691	0,055 ± 0,010	3,9 ± 0,131	6,94 ± 1,027	0,057 ± 0,003

¹ Solo após aplicar vinhaça *in natura*

² Solo após aplicar vinhaça tratada

O pH do SVI revelado pela Tabela 5, não houve acidificação no solo, na qual, chegou a ir a 4,9 nas duas primeiras camadas, isso pode ter ocorrido devido ao poder tampão que um solo já acidificado possui com a aplicação de um fertilizante ácido. No entanto, para o SVT, o pH teve um aumento do solo inicial de 3,7 e 3,9 para 6,2 e 6,0 nas camadas de 0-5 e 10-20 cm, respectivamente. Por meio da Tabela 4, vimos que o pH da vinhaça após o tratamento aumento, chegando quase a ficar neutro, podendo comprovar esta tentativa de neutralização do pH do solo e podendo, então, ser substituído por calagem.

Em se tratando da MO vimos que o SVI teve um aumento considerável em relação ao solo inicial, principalmente nas três últimas camadas, alcançando um valor de 38,76 g/L; enquanto que o SVT nas quatro primeiras decaiu bruscamente de 26,88 para 11,65 g/L da camadas de 20-40 para 40-60 cm. A média de MO para SVI e SVT nas 6 camadas do solo foi de 31 e 21 g/L, respectivamente. Essa diferença de 10 g/L, após aplicar VI e VT, pode ser justificada por causa da concentração de 33,533 e 2,175 de DQO, um indicador extremamente ligado com a matéria orgânica.

Por fim, por meio da Tabela 5 foi esboçado um gráfico um gráfico com da concentração de potássio na solo após aplicar vinhaça *in natura* e tratada, sendo denotadas, por SVI e SVT, respectivamente (Figura 4).

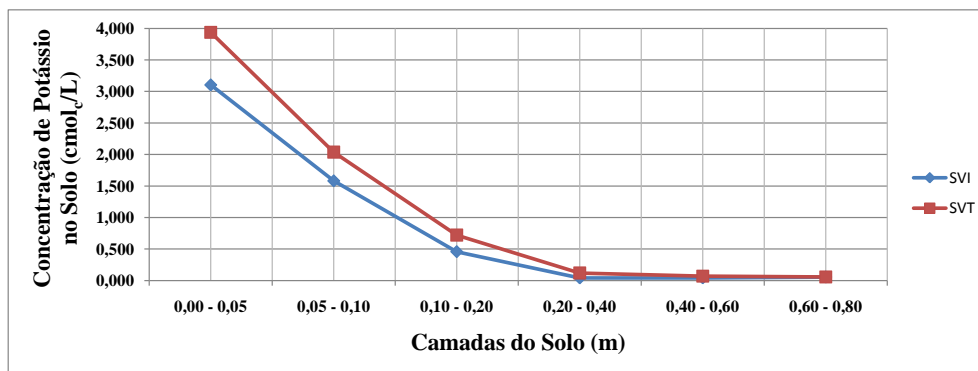


Figura 4: Concentração de potássio no solo após aplicação de vinhaça *in natura* e tratada em função das camadas do solo.

Na Figura 4 fica explícito que tanto o SVI como o SVT geraram um aumento brusco na concentração de potássio no solo, principalmente nas três primeiras camadas (0-5, 5-10 e 10-20 cm). Para o SVI o aumento em relação ao solo inicial nestas camadas foi de 97, 96 e 89% e para SVT 98, 97 e 93%, provando que esses efluentes possuem alto poder de fertilizante. O SVT pode ter tido um aumento um pouco maior, devido ao maior volume aplicado no solo, com a Equação 1, chegando a 80 mL a mais.

CONCLUSÕES

Avaliando-se o processo de biodigestão anaeróbia da vinhaça e a aplicação no solo, pode-se concluir que:

- O processo de biodigestão removeu cor, turbidez e DQO tanto da vinhaça *in natura* como da vinhaça concentrada, melhorando o resíduo a ser descartado;
- Também houve resposta satisfatória quanto ao pH, que após o processo de biodigestão anaeróbia se tornou mais neutro, tanto no tratamento com vinhaça como no caso da vinhaça concentrada;
- A fertirrigação com a vinhaça tratada influenciou positivamente, tendo uma concentração maior no solo e com menor carga orgânica que a vinhaça *in natura*.

RECOMENDAÇÕES PARA PRÓXIMAS PESQUISAS

Para as futuras pesquisas se propões que sejam elaborados:

- Estudos sobre o descarte do lodo utilizado para a biodigestão, sendo que uma das alternativas é a secagem e aplicação no solo como adubo sólido;
- Execução de análises da qualidade ambiental do solo (Antimônio, Arsênio, Bário, Cádmio, Chumbo, Cobalto, Cobre, Cromo, Mercúrio, Molibdênio, Níquel, Selênio e Zinco), estabelecidos também pela CETESB (2006), cujos valores máximos permitidos na legislação federal é tabelado pela Resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) número 420 de N° 420/2009;
- Determinação do odor da vinhaça *in natura* e tratada pelo *Standard Methods* (1998);
- Análises da produção de biogás.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. APHA – American Public Health Association. **Standard methods for the examination of water and wastewater**. 20 ed. USA: APHA, 1998.
2. CETESB. Vinhaça – Critérios e Procedimentos para Aplicação no Solo Agrícola. São Paulo, **Norma Técnica P4.231**, 2015, 12 p.
3. CHERNICHARO, C. A. L. **Biological Wastewater Treatment – Volume Four: Anaerobic Reactors**. Department of Sanitary and Environmental Engineering, Federal University of Minas Gerais, Belo Horizonte, 175 p., 2007.
4. CHRISTOFOLETTI, C. A.; ESCHER, J. P.; CORREIA, J. E.; MARINHO, J. F. U.; FONTANETTI, C. S. Sugarcane vinasse: environmental implications of its use. **Waste Management**, v. 33, p. 2752-2761, 2013.



5. COSTA, F.; ROCHA, B. B. M.; VIANA, C.; TOLEDO, A. Utilization of vinasse effluents from an anaerobic reactor. **Water Science Technologic**, v. 18, p. 135-141, 1986.
6. CRUZ, J. I.; PORTUGAL, R. S.; LUCENDO, M. C. H.; ELIS, V. R.; FACHIN, S. J. S.; USTRA, A. T.; BORGES, W. R. Detecção de contaminação de solo por vinhaça através de análise de dados de eletrorresistividade. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 26, n. 4, p. 481-492, 2008.
7. DAVEY, B. G.; CONYERS, M. K. Observations on some routine methods for soil pH determination. **Soil Science**, v. 1, n. 145, p. 29-36, 1988.
8. ELIA NETO, A. **Estado da Arte da Vinhaça**. União da Indústria de Cana de Açúcar, Piracicaba, SP, 2016.
9. EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Manual de Métodos de Análise de Solo**. 3ª edição revista e ampliada. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2017.
10. EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema Brasileiro de Classificação dos Solos**. Brasília: Embrapa Produção de Informação; Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2006.
11. FUESS, L. T.; ARAÚJO JÚNIOR, M. M.; GARCIA, M. L.; ZAIAT, M. Designing full-scale biodigestion plants for the treatment of vinasse in sugarcane biorefineries: How phase separation and alkalization impact biogas and electricity production costs? **Chemical Engineering Research and Design**, v. 119, p. 209-220, 2017.
12. FUESS, L. T.; GARCIA, M. L. Implications of stillage land disposal: a critical review on the impacts of fertigation. **Journal of Environmental Management**, v. 145, p. 210-229, 2014.
13. Hach Company. Procedures Manual of Spectrophotometer DR/2010. HACH Company, 1996.
14. NAVARRO, A. R.; SEPÚLVEDA, M. del C.; RUBIO, M. C. Bio-concentration of vinasse from the alcoholic fermentation of sugar cane molasses. **Waste Management**, v. 20, p. 581-582, 2000.
15. NBR 9898: 1987 (ABNT, 1987) - Preservação e técnicas de amostragem de efluentes líquidos e corpos receptores.
16. OLIVEIRA, B. G.; CARVALHO, J. L. N.; CERRI, C. E. P.; CERRI, C. C.; FEIGL, B. J. Soil greenhouse gas fluxes from vinasse application in Brazilian sugarcane areas. **Geoderma**, v. 200(201), p. 77-84, 2013.
17. OLIVEIRA, L. M. Qualidade fisiológica de sementes de moringa em função do tipo de embalagem, ambiente e tempo de armazenamento. **Revista Caatinga**, Mossoró, v. 22, n. 4, p. 70-75, 2009.
18. SCHOFIELD, R. K.; TAYLOR, A. W. Measurement of the activities of bases in soils. **Journal of Soil Science**, v. 6, n. 1, p.137-146, 1955.
19. UNICA. UNIÃO DA INDÚSTRIA DA CANA DE AÇÚCAR. **Banco de Dados UNICADATA**. Disponível em: <<http://www.unicadata.com.br>>. Acesso em 06/05/2018.
20. VALLE, G. A.; MELO, E. S. R. L. de; FIRMO, A. L. B.; GUIMARÃES, L. J. N. Avaliação do potencial de geração de biogás a partir de resíduos sólidos urbanos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA QUÍMICA, Foz do Iguaçu, 2010.
21. VON SPERLING, M. Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos. 4. ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2014.