



Avaliação da ozonização como pós-tratamento do efluente da bovinocultura tratado biologicamente visando o reuso na fertirrigação

Lorena Gotelip Tostes Costalonga^{1*}
João Monteiro Neto²
Nayara Coury de Rezende¹
Taiza dos Santos Azevedo³
Juliana Palermo Evangelista dos Santos¹
Thamara Costa Rezende⁴
Sue Ellen Costa Bottrel⁵
Renata de Oliveira Pereira⁵
Jonathas Batista Gonçalves Silva⁶
Marcelo Henrique Otênio⁷

1 Graduanda em Engenharia Ambiental e Sanitária pela Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF), Juiz de Fora - MG

2 Graduando em Engenharia Ambiental e Sanitária pela UFJF, Juiz de Fora - MG

3 Mestranda em Engenharia Civil pela Universidade Federal de Viçosa, Viçosa - MG

4 Engenharia Ambiental e Sanitária pela UFJF, Juiz de Fora - MG

5 Professora do departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da UFJF

6 Professor do departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da UFJF

7 Pesquisador A na Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – Gado de Leite

*lorena.gotelip@engenharia.ufjf.br

RESUMO

A pecuária leiteira é uma atividade econômica de grande relevância no estado de Minas Gerais e gera grande volume de efluente de dejetos quando se utiliza sistemas de confinamento dos animais. Esse efluente possui alta carga orgânica e de nutrientes, além da possibilidade de veicular contaminantes. Nesse contexto, torna-se relevante a utilização de tecnologias que possibilitem o adequado tratamento e reuso deste efluente no processo produtivo, reduzindo impactos ambientais e uso insumos no processo de produção. O presente trabalho visa avaliar a ozonização no pós-tratamento do efluente da bovinocultura tratado por biodigestor, visando seu reuso na fertirrigação. O estudo utilizou o efluente do sistema de tratamento da Fazenda Experimental da Embrapa Gado de Leite em Coronel Pacheco - MG, sistema de produção *Genizinha*, com três coletas mensais submetidas à ozonização e caracterização físico-química do efluente bruto, tratado e posterior a ozonização. Mesmo apresentando grande variabilidade dos parâmetros físico-químicos do efluente, os resultados confirmaram a eficiência de clarificação da ozonização em efluentes de matriz orgânica, assim como o aumento da biodegradabilidade do efluente e manutenção de altas concentrações de nutrientes como nitrogênio e fósforo, o que favorece seu uso como biofertilizante.

INTRODUÇÃO

Após a crise do café em Minas Gerais houve o desenvolvimento da pecuária leiteira, principalmente a partir dos anos de 1900, diversificando a economia regional e ganhando importante papel no cenário mineiro (SECTES, 2010). Atualmente, segundo o IBGE (2017), Minas Gerais é o segundo principal produtor de leite no Brasil, responsável por 26,7 % do total, um montante de 70,9 milhões de litros apenas no primeiro trimestre de 2017. Cabendo a mesorregião da Zona da Mata mineira 9,6% da produção do estado, com volume produzido de 776.617 litros no ano (IBGE, 2016).

A fazenda experimental da Embrapa Gado de Leite, em Coronel Pacheco – MG desenvolve pesquisas em agropecuária leiteira. Nesta fazenda, o sistema de produção leiteira “*Genizinha*” opera como uma fazenda tradicional com gado Girolando criado em semi-confinamento. Neste sistema, como caracteristicamente no confinamento bovino, ocorre grande volume de geração de dejetos com alta concentração de matéria orgânica e

nutrientes, tornando-o potencialmente poluidor e veículo de contaminantes (BOND *et al.*, 2014; DOWNEY & MOORE, 1977). Campos *et al.* (2002) relatou que, em média, a quantidade de efluente orgânico gerado no confinamento desses animais varia de 9,0 a 12,0% do peso vivo do rebanho por dia, alternando de acordo com o volume de água utilizado na limpeza e desinfecção de instalações e equipamentos da unidade de produção. O que torna a caracterização desse efluente complexa, uma vez que de acordo com Pohlmann (2000) sua composição é oscilante por fatores como a matéria seca ingerida, concentração de nutrientes e da digestibilidade da dieta.

Como mostram muitos estudos, uma solução economicamente viável ao tratamento desse efluente é o sistema de biodigestão anaeróbia que permite o aproveitamento do esterco animal através da redução da concentração de matéria orgânica e ainda possibilita o aproveitamento energético do biogás gerado no processo de decomposição da mesma (TIETZ, 2004; AL-MARSI, 2001).

Entretanto, processos biológicos convencionais aplicados a efluentes de alta carga orgânica nem sempre demonstram resultados satisfatórios quanto sua degradação e desinfecção em fase aquosa, impedindo, em alguns casos, que o efluente do tratamento seja diretamente lançado em corpos hídricos, conforme dispõe a resolução CONAMA nº 430/2011 e a DN COPAM/CERH-MG nº1/2008, que prevê critérios de padrões de lançamento de efluentes em corpos d'água de acordo com a classe de qualidade na qual o corpo receptor foi enquadrado. Neste contexto, buscam-se soluções específicas no sentido de tratar, dispor ou aproveitar os resíduos, uma vez que a diminuição de disponibilidade e deterioração da qualidade das águas subterrâneas e superficiais são cada vez mais evidentes (HUSSAR *et al.*, 2003; BOTTREL, 2016).

Utilizar esse efluente em áreas agricultáveis torna-se uma alternativa para a solução deste problema, uma vez que a fertirrigação de culturas agrícolas pode possibilitar aumento de produtividade e qualidade dos produtos colhidos, redução da poluição ambiental e dos custos de produção, além de promover melhoria nas características químicas, físicas e biológicas do solo (QUEIROZ *et al.*, 2004). Segundo Matos (2006), a água residuária pode ser aplicada como fertirrigação quando a taxa de aplicação for quantificada de acordo com a disponibilidade de nutrientes no solo, a exigência da cultura e a concentração do nutriente no resíduo. Além disso, o adequado fechamento do ciclo de produção e tratamento pode garantir a atenuação do impacto ambiental gerado, dispondo de técnicas de processos biológicos e químicos combinados, a fim de garantir uma melhor qualidade dos efluentes agroindustriais e manutenção dos mananciais (ERTHAL, 2008).

Em matrizes orgânicas complexas, uma etapa de pós-tratamento proporciona ao efluente características mais satisfatórias para seu reuso na fertirrigação. Dessa forma, a ozonização é utilizada em muitas estações de tratamento devido sua capacidade de inativação de microrganismos e ainda por ser capaz de reagir com moléculas orgânicas, direta ou indiretamente. Em condições ácidas, o ozônio reage diretamente com as moléculas orgânicas, a reação é direta e seletiva, predominante em compostos insaturados, em condições básicas o mecanismo de oxidação é indireto, através de várias reações envolvendo espécies radiculares, principalmente o radical hidroxila, um agente oxidante mais forte do que o próprio ozônio (BOTTREL, 2016; MARCELINO *et al.*, 2017). Apesar de não haver geração de lodo no processo, a aplicação de ozônio se torna cara devido ao alto consumo de energia e devido a isto é indicado que seja acoplado a outros processos (MARCELINO *et al.*, 2017).

Este pós-tratamento tem se mostrado um tratamento eficiente para águas residuárias como o chorume, efluente têxtil e agroindustrial (ZHOU & SMITH, 2000; SILVA, 2002; GENENA, 2009). Além de aumentar a biodegradabilidade e reduzir a toxicidade, o processo oxidativo remove cor e odor (DEZOTTI, 2008 apud TELLES, 2010; SILVEIRA, 2009), adequando o efluente aos requisitos da legislação ambiental, propiciando a proteção dos corpos receptores ou, ainda, retornar ao processo produtivo (HASSEMER & SENS, 2002).

Paździor *et al.* (2016) analisou a redução da toxicidade de águas residuais da indústria têxtil, antes e depois de tratamentos químicos (Ozonização), biológicos (Reatores Sequenciais em Batelada - SBR e Biorreator Horizontal de Fluxo Contínuo - HCFB) e combinação de biológicos e químicos. Constatou que o processo de ozonização aliado a processos biológicos alcançava altas eficiências, 96% para SBR e ozonização e 98% para HCFB aliado a ozonização. Marcelino *et al.* (2017) estudou um sistema de múltiplos estágios para o tratamento de efluente farmacêutico real contendo antibiótico amoxicilina, assim foi avaliada a ozonização individualmente e combinada com biodegradação aeróbia. A ozonização mostrou-se eficaz na degradação da amoxicilina (até 99%, com consumo de 1g de ozônio) porém não foi possível obter a mineralização completa dos compostos do efluente, já no sistema multiestágio alcançou remoção de mais de 98% da amoxicilina, 98% de Demanda Química de Oxigênio (DQO) e 90% de toxicidade inicial, aliado a um melhor custo.

OBJETIVO



- JORDÃO, E.P.; PESSÔA, C.A. *Tratamento de esgotos domésticos*. 7 ed. p. Rio de Janeiro: ABES, 2014.
- LIMA, A. B. B. V. *Pós-tratamento de efluente de reator anaeróbio em sistema sequencial constituído de ozonização em processo biológico aeróbio*. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, 2006.
- MARCELINO, R. B. P.; LEÃO, M. M. D.; LAGO, R. M. AMORIM, C. C. Multistage ozone and biological treatment system for real wastewater containing antibiotics. *Journal Of Environmental Management*, v. 195, p.110-116, 2017.
- MATOS, A. T. *Disposição de águas residuárias no solo*. 142 p. (Caderno Didático n. 38). Viçosa, MG: AEAGRI, 2006.
- MINAS GERAIS. Conselho Estadual de Política Ambiental, *Deliberação normativa nº417*, de 06 de dezembro de 2017. Estabelece critérios para classificação, segundo o porte e potencial poluidor, bem como os critérios locais a serem utilizados para definição das modalidades de licenciamento ambiental de empreendimentos e atividades utilizadores de recursos ambientais no Estado de Minas Gerais e dá outras providências. Publicado no Diário Executivo de Minas Gerais – 08/12/2017.
- MOREIRA, F. M. S.; SIQUEIRA, J. O. *Microbiologia e bioquímica do solo*. UFLA, v.2, p.742, Lavras, 2006.
- NAKAYA, &BUCKS. Water quality in drip/trickle irrigation: A review. *Irrigation science*.v. 12,p.187-192. 1991.
- PÁZDZIOR, K.; WREBIAK, J.; KLEPACZ-SMÓLKA, A.; GMUREK, M.;BILINSKA, L.; KOS, L.; SÓJKA-LEDAKOWICZ, J.; LEDAKOWICZ, S. Influence of ozonation and biodegradation toxicity of industrial textile wastewater. *Journal of Environmental Management*, v.195, p. 166-173, 2017.
- Queiroz, F. M.; Matos, A. T.; Pereira, O. G.; Oliveira, R. A.; Lemos, A. F. *Características químicas do solo e absorção de nutrientes por gramíneas em rampas de tratamento de águas residuárias da suinocultura*. *Revista Engenharia na Agricultura*, Viçosa, MG, v.12, n.2, p.77-90, 2004.
- RODRIGUES, F. S. F.; BILA, D. M.; CAMPOS, J. C.; DEZOTTI, M. A influência da remoção prévia de amônia no tratamento biológico do chorume ozonizado. *23º Congresso Brasileiro de engenharia Ambiental*, ABES, Campo Grande, MS, 2005.
- SILVA, A. C. *Tratamento do Percolado de Aterro Sanitário e Avaliação da Toxicidade do Efluente Bruto e Tratado*. Tese de Mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2002.
- SILVA, I. R.; MENDONÇA, E. S. *Matéria orgânica do solo*. In: Novais, R. F. et al., eds. *Fertilidade do solo*. Viçosa, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, p. 275-374, 2007.
- SILVA, J. B. G. et al. Avaliação da Condutividade Elétrica do pH da Solução do Solo em uma Área Fertirrigada com Água Residuária de Bovinocultura de Leite. *Irriga*, Botucatu, Edição Especial, p. 250 - 263, 2012.
- SECTES, Secretaria de Ciência, Tecnologia e Ensino Superior. *Perfil do Produtor de Leite nas Mesorregiões da Zona da Mata e Campo das Vertentes de Minas Gerais*. Polo de Excelência de Leite e Derivados. Governo do Estado de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2010.
- SOUSA, J. A.; MOREIRA, D. A.; FERREIRA, P. A.; MATOS, A. T. Variação do nitrogênio e fósforo em solo fertirrigado com efluente do tratamento primário da água residuária da suinocultura. *Ambi-Água*, Taubaté, v.4, n. 3, p. 111-122, 2009.
- TELLES, C. A. S. *Processos Combinados para o Tratamento de Lixiviado de Aterro Sanitário*. Dissertação (mestrado), Rio de Janeiro, UFRJ/COPPE, 2010.
- TIETZ, C.M. et al. Influência da temperatura na produção de biogás a partir de dejetos da bovinocultura de leite. *Revista Brasileira de Energias Renováveis*, v. 3, n. 2, 2014.
- ZHOU H.; SMITH, D. W. Ozonation dynamics and its implication for off-gas ozone control in treating pulp mill wastewaters. *Ozone Science & Engineering*, vol. 22, pp. 31–51, 2000.

Assim, o efluente com pós-tratamento por ozonização possui características que permitem e potencializam seu reuso como biofertilizante, contribuindo, portanto, com o uso racional e sustentável de recursos hídricos.

AGRADECIMENTO

Os autores agradecem ao Laboratório de Qualidade Ambiental (LAQUA) da Faculdade de Engenharia da UFJF, ao Laboratório ao Grupo de Pesquisa em Tecnologias Ambientais (GRUTAM) do departamento de Química da UFMG, à Embrapa - Gado de Leite pela viabilização do presente trabalho com o financiamento pelo projeto *Potencialização da produção do biogás e uso do biofertilizante no tratamento de dejetos da pecuária leiteira* e à Pró-reitora de Pós-Graduação e Pesquisa (PROPP) da Universidade Federal de Juiz de Fora.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AL-MASRI, M. R. Changes in biogas production due to different ratios of some animal and agricultural wastes. *Bioresource Technology*, v. 77, n. 1, p. 97-100, 2001.
- American Public Health Association/American Water Works Association/Water Environment Federation. *Standard methods for the examination of water and wastewater*. 22 ed. Washington, DC. 2012.
- ANA. *Atlas Irrigação: uso da água na agricultura irrigada*. Agência Nacional de Águas (Brasil). Brasília: ANA, 2017.
- BILA, D. M. *Aplicação de processos combinados no tratamento do chorume*. Tese de Mestrado, PEQ/COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, 2000.
- BOND, T.; SEAR, D.; SYKES, T. Estimating the contribution of fine-stream cattle faeces deposit to nutrient loading in an English chalk stream. *Agricultural Water management*, v. 131, p. 156- 162, 2014.
- CAMPOS, A. T. *et al.* Tratamento biológico aeróbio e reciclagem de dejetos de bovinos em sistema intensivo de produção de leite. *Ciência e agrotecnologia*, Lavras, v. 26, n. 2, p. 426-438, mar./abr. 2002.
- CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente. *Resolução nº 430, de 13 de maio de 2011*. Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução no 357, de 17 de março de 2005, do Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA. 2011.
- COPAM - Conselho Estadual de Política Ambiental. *Resolução Normativa Conjunta COPAM/CERH-MG nº1, de 05 de maio de 2008*. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. Belo Horizonte, 2008.
- COSTA, H.S. *Estudo do comportamento do processo de ozonização como pós-tratamento de efluentes de sistema de tratamento anaeróbio de águas residuárias domiciliares*. Tese de doutorado. Universidade de São Paulo. São Carlos, SP. 2003.
- DEZOTTI, M. C., 2008, *Processos e técnicas para o controle ambiental de efluentes líquidos*, v. 5, Ed. E-papers.
- DOWNEY, N. E.; MOORE, J. F. Trichostrongylid contamination of pasture fertilized with cattle slurry. *Veterinary Record*, v. 101, n. 24, p. 487-488, 1977.
- GENENA A. K. *Tratamento de Efluente Agroindustrial Contendo Compostos Persistentes por meio dos Processos de Coagulação-Floculação, Fenton, Foto-Fenton, Foto-Peroxidação e Ozonização*. Tese de Pós-Graduação, UFSC, Florianópolis, 2009.
- GUIMARÃES, J. R.; JUNIOR, R. L. A.; MANIERO, M. G.; FADINI, P. S. Ozonização em meio básico para redução de cor do licor negro de indústria de celulose de algodão. *Revista Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 15, n. 1, p. 93-98, 2010.
- HASSEMER, M. E. N.; SENS, M. L. Tratamento do Efluente de uma Indústria Têxtil. Processo Físico-Químico com Ozônio e Coagulação/Floculação. *Engenharia Sanitária e Ambiental*. vol. 7 - nº 1 - jan./mar. 2002 e nº 2 - abr./jun. 2002.
- HUSSAR G. J. *et al.* Efeito de uso de efluente de reator anaeróbio compartimentado na fertirrigação da cenoura. *Revista Ecosistema*, v. 28, n. 1,2, p. 9-15, jan.-dez. 2003.
- IBGE, Estatística da Produção Pecuária, *Indicadores IBGE*. 2017.

Mattos (2007) diz que a aplicação de dejetos pode ser baseada na quantidade de nutrientes referenciais, normalmente nitrogênio e fósforo. Após a passagem pelo biodigestor, verifica-se um aumento da concentração de fósforo do efluente, o que pode ser explicado pelo seu desprendimento da biomassa presente no reator anaeróbio. Esse tratamento também promove a amonificação do nitrogênio (JORDÃO & PESSÔA, 2010). A ozonização, por sua vez, proporciona uma diminuição na concentração desse nutriente, porém em pequenas faixas de 10% para o nitrogênio e 13% para o fósforo, o que mantém seu grande potencial de uso como biofertilizante.

Em relação aos valores de nitrogênio, Lima (2006) destaca que em processos de oxidação por ozonização, não há mudanças significativas na concentração de NTK. Porém, o que se verifica no presente estudo é o aumento significativo nas concentrações de nitrogênio orgânico após a ozonização para as três coletas, onde a o processo propiciou nas duas primeiras coletas 33% e 14% de remoção de SST, acompanhado do aumento na concentração do N. orgânico em 79% e 56%, respectivamente. Fato que pode ser explicado pelo aumento da disponibilidade de nitrogênio orgânico oriundo da degradação de sólidos suspensos pela reação com O_3 , como relata Costa (2003) em seus estudos onde a concentração de 497 mg.L^{-1} de ST resultou em remoção nula de N_{org} no efluente de um sistema de tratamento anaeróbio, enquanto a concentração 44% menor de ST no efluente resultou numa eficiência de 54% na remoção de N_{org} durante a ozonização. Segundo APHA (2012), há também a possibilidade de interferência de sais e sólidos inorgânicos afetarem a análise de NTK utilizada neste trabalho, antes da ozonização diminuindo sua detecção e após aumentando, já que parte dos interferentes são degradados no processo. As concentrações de nitrato, por sua vez, sofreram incrementos de 100% e 62% durante a ozonização das amostras coletadas em novembro e dezembro, respectivamente, enquanto o nitrito se manteve em concentração nula em duas das coletas e remoção de 48% na ozonização de dezembro. De forma geral, o efluente final ainda possui consideráveis concentrações de formas orgânicas de nitrogênio, que no solo serão mineralizadas para serem assimiladas pelas plantas.

Os valores de pH encontrados para o efluente ozonizado, em torno de 8, fogem das condições ótimas, entre 6 e 7, indicadas para mineralização do N orgânico. Porém, o pH mais elevado pode contribuir com um efeito tamponante em uma ampla faixa de pH do solo (Silva e Mendonça, 2007). A qualidade do efluente final, no que se refere a condutividade elétrica, foi satisfatória, visto os valores finais de 4617, 2910 e 4929 $\mu\text{S/cm}$. Considerando que a CE do solo não deve ser superior a $4000 \mu\text{S.m}^{-1}$ (MATOS, 2006), a aplicação do efluente deve ser monitorada e controlada, conforme Silva *et al.* (2012) propõem.

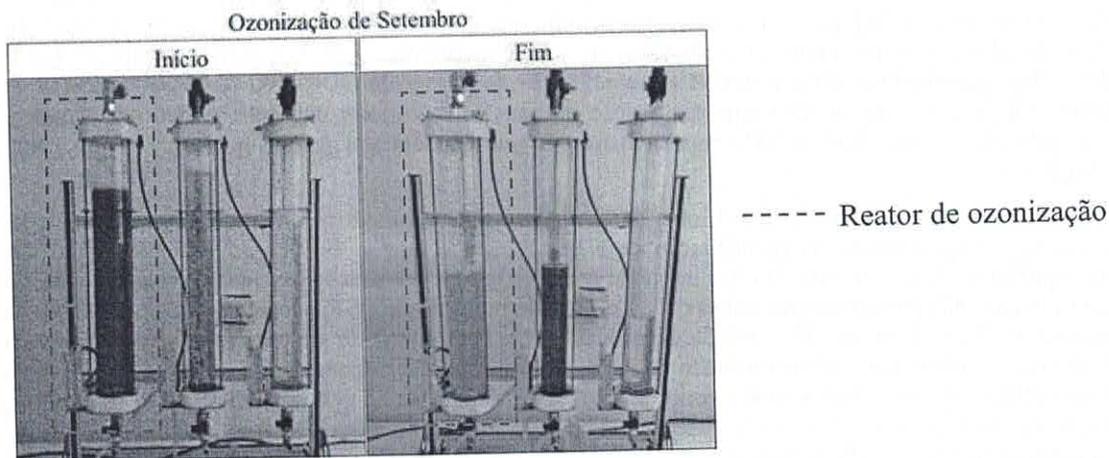
O conhecimento das características físico-hídricas do solo e das alterações ocasionadas pela aplicação da água residuária é importante para indicar os métodos de irrigação e os equipamentos mais adequados na sua disposição. Segundo Nakayama & Bucks (1991), os parâmetros pH, sólidos suspensos, sólidos dissolvidos e ferro permitem uma avaliação de risco de entupimento de gotejadores, o que pode tornar sua utilização inviável como sistema de distribuição do efluente. Seguindo a metodologia proposta, o efluente em estudo apresenta alto risco de entupimento de gotejadores mesmo após a ozonização, devido às concentrações de sólidos e ferro acima do recomendado pelos autores. Os limites propostos são de $100 \text{ mg SST.L}^{-1}$ e $1,5 \text{ g mg Fe.L}^{-1}$, respectivamente.

A disposição de água residuária no solo pode provocar risco de contaminação do solo e das águas superficiais e subterrâneas, porém é sabido que o ozônio é um potente oxidante utilizado na desinfecção. Testes preliminares para detecção de *E. Coli* mostraram a redução significativa da quantidade de colônias das amostras 1 e 2 para a amostra 3, diminuindo o risco na disposição do mesmo. Portanto, recomenda-se a realização de mais estudos visando a desinfecção do efluente assim como das diferentes possibilidades de uso da ozonização neste tipo de efluente.

CONCLUSÕES

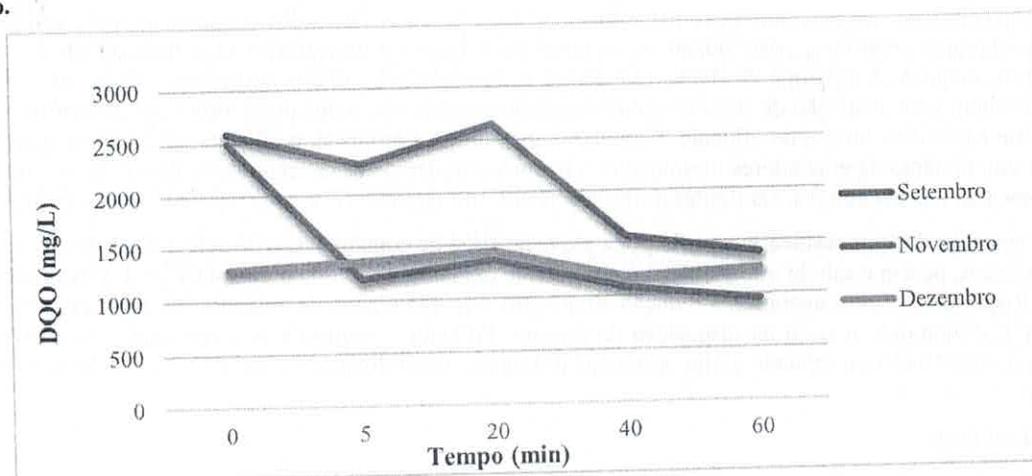
O impacto da pluviosidade e do número de animais em confinamento na qualidade do efluente na lagoa é evidenciado na variabilidade dos dados das três coletas realizadas. O tratamento combinado biodigestor e lagoa se mostra efetivo na redução dos parâmetros analisados, contudo ainda não suficiente para realizar o lançamento em corpos hídricos. A ozonização, porém, apresentou melhorias no efluente tratado. Considerando o processo de ozonização aliado ao biodigestor/lagoa, temos eficiências globais de remoção até > 99% para cor e parâmetros da série de sólidos. Ainda, observa-se que o pós-tratamento por ozonização foi benéfico ao aumentar a sua biodegradabilidade, reduzir a DQO em até 62% e manter os altos patamares de concentração dos nutrientes nitrogênio e fósforo, com remoção máxima na faixa de 15% e 14%, em termos de nitrogênio total e fósforo total, respectivamente.

Figura 3: Comparação do aspecto visual do efluente no início e no fim da ozonização (Coleta de Setembro).



No que diz respeito ao acompanhamento temporal da reação do ozônio com o efluente, a Figura 4 deixa evidente a tendência ao leve incremento de DQO aos 20 minutos de reação com posterior diminuição. Segundo Bila (2000), a rápida alteração na estrutura dos compostos orgânicos devido às reações de formação de compostos intermediários de curta duração que são mais susceptíveis a oxidação pelos reagentes de DQO ocasiona, mesmo que momentaneamente, remoções negativas de DQO. Outra hipótese é a solubilização de compostos que anteriormente estavam como sólidos em suspensão e que não foram previamente oxidados na análise de DQO ocasionando um aumento da mesma. Considerando esta hipótese, a ozonização foi efetiva ao realizar a remoção de sólidos e DQO, inclusive contribuindo para a mineralização dos mesmos com o aumento dos SSF. Observa-se também, que após 40 minutos de reação, não há ganho efetivo em termos de incremento de matéria orgânica no efluente, devido a isso é aconselhável que haja a diminuição do tempo de contato com o O_3 (Figura 4).

Figura 4: Remoção de DQO em função do tempo durante os ensaios de ozonização do efluente pós tratamento biológico.



O incremento de biodegradabilidade no efluente demonstra seu potencial para fertirrigação, visto que a matéria orgânica biodegradável é um importante reservatório de nutrientes fundamentais para o solo como C, H, O, N, S e P. Há muito têm sido observado os efeitos da matéria orgânica sobre algumas características e propriedades do solo. Apesar de sua pequena proporção em relação à massa total de solos minerais tropicais, ela desempenha grande influência sobre várias propriedades físicas, químicas e biológicas do solo. Os principais efeitos potenciais da matéria orgânica no solo (MOS) são, segundo Moreira e Siqueira (2006): aumentar a superfície específica, a Capacidade de Troca Catiônica (CTC) e o efeito tampão, atuar como agente de complexação, de quelação e de retenção de nutrientes e xenobióticos, atuar como reservatórios de N, P, S e micronutrientes, melhorar as condições físicas como: agregação, aeração, retenção de água e permeabilidade.

Nitrato (mg N-NO ₃ . L ⁻¹)	0	5	-	0	>99	-
NTK (mg. L ⁻¹)	380	310	18	303	2	20
N. Amoniacal (mg N-NH ₃ . L ⁻¹)	197	232	-18	183	21	7
Norg (mg. L ⁻¹)	183	77	58	120	-56	34
ST (mg. L ⁻¹)	8747	2990	66	2697	10	69
SST (mg. L ⁻¹)	4220	500	88	430	14	90
SSF (mg. L ⁻¹)	1510	117	92	200	-71	87
SSV (mg. L ⁻¹)	2670	347	87	230	34	91
SDT (mg. L ⁻¹)	4220	2885	32	2560	11	39
Dezembro						
Parâmetro	Am. 1	Am. 2	Remoção (%)	Am. 3	Remoção (%)	Eficiência Global (%)
pH	8	8	0	8	0	0
Condutividade (µs/cm)	6800	5820	14	4929	15	28
Turbidez (NTU)	3100	810	74	616	24	80
Cor (uH)	10587	3843	64	1939	50	82
DQO (mg.L ⁻¹)	6332	1296	80	1245	4	80
DBO (mg.L ⁻¹)	1186	109	91	107	2	91
Fósforo (mgP. L ⁻¹)	39	53	-36	46	13	-18
Ferro (mg Fe. L ⁻¹)	49	17	65	7	59	86
Nitrito (mg N-NO ₂ . L ⁻¹)	19	4	79	2	58	91
Nitrato (mg N-NO ₃ . L ⁻¹)	150	0	100	62	-	59
NTK (mg. L ⁻¹)	556	345	38	450	-30	19
N. Amoniacal (mg N-NH ₃ . L ⁻¹)	310	274	12	267	3	14
Norg (mg. L ⁻¹)	246	70	72	183	-161	26
ST (mg. L ⁻¹)	6086	3933	35	-	-	-
SST (mg. L ⁻¹)	8636	234	97	-	-	-
SSF (mg. L ⁻¹)	3673	122	97	-	-	-
SSV (mg. L ⁻¹)	5562	120	98	-	-	-
SDT (mg. L ⁻¹)	5150	3906	24	-	-	-

Segundo Hassemer & Sens (2002), em efluentes têxteis o ozônio é efetivo na remoção de cor uma vez que ataca os grupos cromóforos dos corantes, mantendo o pH e a condutividade em valores constantes. O mesmo pode ser observado na Figura 3, uma vez que a mudança do aspecto visual no decorrer do tempo de reação do O₃ chega a 99% de remoção. A clarificação do efluente torna-se comprovada ao passo que a remoção de sólidos em suspensão também foi elevada, em média de 90%, considerando apenas a eficiência do processo de ozonização.

De forma geral, o comportamento do Sistema Biodigestor-Lagoa-Ozonizador, mostra uma tendência à diminuição dos valores de DQO e consequente diminuição da relação DQO/DBO após a ozonização, reduzindo em 74% na ozonização da amostra coletada em novembro (de 27 para 7). Confirma-se então a eficácia do sistema no aumento da biodegradabilidade do efluente, influenciado pelo pH alcalino do meio. Segundo Rodrigues (2005), através da oxidação química, moléculas refratárias ao tratamento biológico são transformadas em moléculas menores de mais fácil biodegradação.

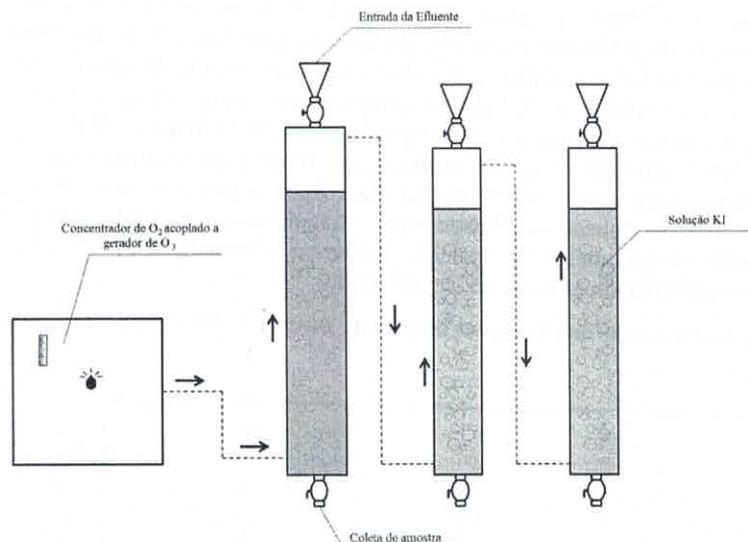
ozonização do efluente coletado no mês de novembro, fato favorável, visto que possivelmente houve a transformação de matéria orgânica recalcitrante a matéria orgânica biodegradável, fato este que pode inclusive ser benéfico quando se considera a inclusão da ozonização no layout do processo. Os valores das concentrações de ferro e pH se adequaram ao limite estabelecido, enquanto SST e $N_{\text{amoniacal}}$ permaneceram fora da faixa. Contudo, ressalta-se o aumento de ambos na remoção global. É visível a necessidade de um tratamento mais eficiente caso o efluente seja destinado a algum corpo hídrico, porém suas características finais em relação à quantidade de nutrientes e biodegradabilidade demonstram seu grande potencial para outros usos como o aproveitamento da água residuária na fertirrigação que será discutida neste trabalho.

Tabela 1: Caracterização físico-química do efluente coletado no ponto 1 e 2 e após ozonização, Amostras 1, 2 e 3 respectivamente, e porcentagens de remoção em relação ao Sistema do Biodigestor, Lagoa e Ozonização.

Parâmetro	Setembro					
	Am. 1	Am. 2	Remoção (%)	Am. 3	Remoção (%) Pós ozonização	Eficiência Global (%)
pH	8	8	0	8	0	0
Condutividade ($\mu\text{s/cm}$)	-	4693	-	4617	2	-
Turbidez (NTU)	1251	673	46	312	54	75
Cor (uH)	14180	5900	58	26	>99	>99
DQO (mg.L^{-1})	5890	2587	56	1396	46	76
DBO (mg.L^{-1})	993	-	-	674	-	32
Fósforo (mgP.L^{-1})	-	-	-	-	-	-
Ferro (mg Fe.L^{-1})	35	17	51	9	47	74
Nitrito ($\text{mg N-NO}_2.L^{-1}$)	0	4	-	0	>99	-
Nitrato ($\text{mg N-NO}_3.L^{-1}$)	0	-	-	0	-	-
NTK (mg.L^{-1})	1280	1055	18	900	15	30
N. Amoniacal ($\text{mg N-NH}_3.L^{-1}$)	478	647	-35	324	50	32
Norg (mg.L^{-1})	802	408	49	732	-79	9
ST (mg.L^{-1})	8862	5543	37	2403	57	73
SST (mg.L^{-1})	2548	840	67	567	33	78
SSF (mg.L^{-1})	646	210	67	293	-40	55
SSV (mg.L^{-1})	1785	573	68	273	52	85
SDT (mg.L^{-1})	6010	4400	27	3894	12	35
Parâmetro	Novembro					
	Am. 1	Am. 2	Remoção (%)	Am. 3	Remoção (%)	Eficiência Global (%)
pH	8	8	0	8	0	0
Condutividade ($\mu\text{s/cm}$)	3993	3496	12	2910	17	27
Turbidez (NTU)	1005	390	61	323	17	68
Cor (uH)	6467	4100	37	65	98	99
DQO (mg.L^{-1})	2439	2497	-2	957	62	61
DBO (mg.L^{-1})	170	92,6	46	132	-43	22
Fósforo (mgP.L^{-1})	40	41	-3	37	10	8
Ferro (mg Fe.L^{-1})	9	9	0	7	22	22
Nitrito ($\text{mg N-NO}_2.L^{-1}$)	0	0	-	0	-	-

(SSF e SSV) e Sólidos Dissolvidos Totais (SDT), sendo todos os ensaios conforme o *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA, 2012).

Figura 2: Esquema representativo do sistema usado nos ensaios de O₃. Fonte: Autoria própria.



RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 1 demonstra os resultados das análises físico-químicas do efluente bruto (Am.1), efluente tratado (Am.2) e efluente ozonizado (Am. 3), além da eficiência de remoção do Sistema do Biodigestor e Lagoa e da Ozonização para cada parâmetro analisado.

Inicialmente, é possível observar grande oscilação dos resultados para o mesmo parâmetro visto as diferenças nos dias de coleta em relação ao ciclo do sistema e a variação da quantidade de animais confinados no sistema de produção, de 71 a 153 animais. Além disso, a diferença de pluviosidade no período anterior a coleta interfere diretamente nas características do efluente da lagoa e, conseqüentemente, nas análises dos parâmetros de qualidade de ambas as amostras. Apesar da alta pluviosidade ter influenciado o resultado da qualidade das amostras 1 e 2 para diferentes meses, isso não é indicativo de que o tratamento empregado não seja eficiente, tornando válido o emprego do O₃ como pós-tratamento.

No que diz respeito ao lançamento do efluente em corpos hídricos e conseqüente adequação à CONAMA nº 430/2011 e à DN COPAM/CERH-MG nº1/2008, a primeira etapa do tratamento avaliada – Biodigestor e Lagoa, não fornece eficiência necessária para enquadramento aos parâmetros estabelecidos. Embora os valores de pH estejam dentro do limite estabelecido, 6 a 9 para a legislação mais restritiva, a DQO que deveria ter eficiência 70% de remoção, apresenta remoção de 56 e 80% em setembro e dezembro, respectivamente, e um aumento de 2% em novembro. Para a DBO, o sistema deveria apresentar 60% de remoção segundo a legislação mais restritiva, enquanto isso alcançou eficiências de 46 e 91% para os meses de novembro e dezembro, respectivamente. Os valores de Ferro em setembro e dezembro se aproximaram do valor máximo permitido (VMP) de 15 mgFe.L⁻¹, enquanto no mês de novembro ficou abaixo deste. Ainda, ficaram acima dos VMP também os resultados analisados de Nitrogênio Amoniacal – VMP de 20 mgN.L⁻¹ e Sólidos Suspensos Totais – VMP de 100 mg.L⁻¹. Destaca-se a grande variação entre os meses possivelmente devido a diferentes formas de manejo do sistema, ou seja, enchimento com água, chuvas no período, manejo dos animais e recirculações do efluente.

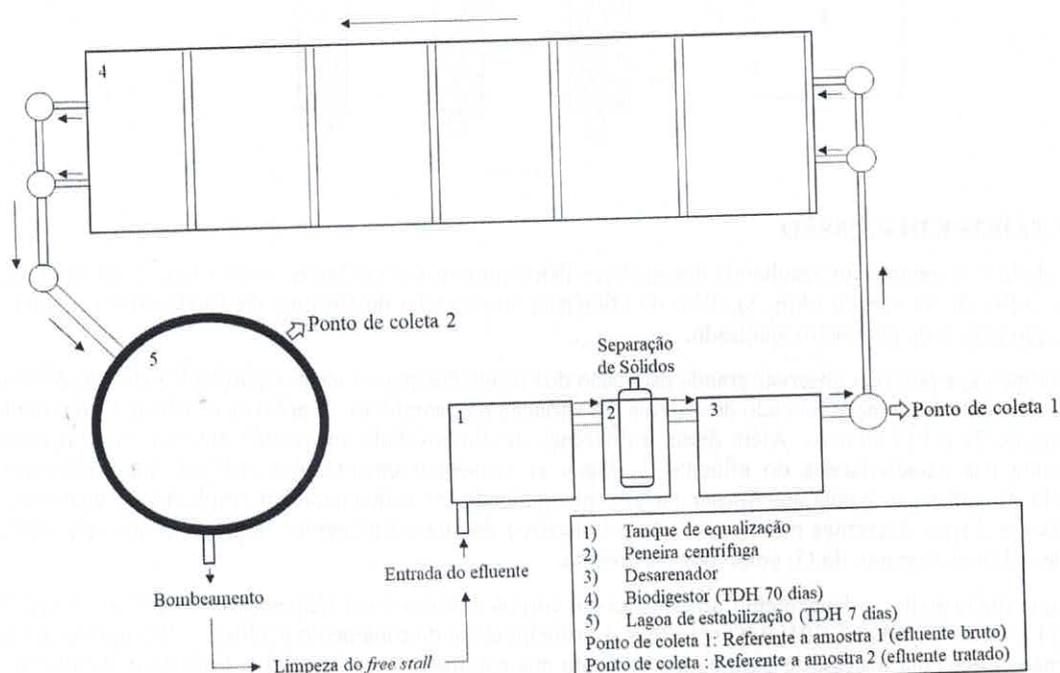
Ao acrescentar como pós-tratamento a ozonização, o tratamento do efluente ganha eficiências globais mais satisfatórias, como demonstrado na Tabela 1, e se torna mais próximos aos padrões de lançamento dependendo do uso estabelecido do corpo receptor de acordo com as legislações Federal e Estadual vigentes. No caso do parâmetro DQO, foram obtidas eficiências globais de 76, 61 e 80% para os ensaios realizados na campanha de amostragem de setembro, novembro e dezembro, respectivamente. Apenas 1 dos ensaios apresentou efluente final em desacordo com a legislação. Embora a DBO ainda apresente baixas remoções globais em alguns meses, 32, 22 e 91% para setembro, novembro e dezembro respectivamente. Observa-se um aumento da DBO após

O objetivo do trabalho é avaliar a utilização da ozonização como alternativa de pós-tratamento do efluente da bovinocultura leiteira, na área experimental *Genizinha* da fazenda experimental da Embrapa Gado de Leite, buscando reduzir seu efeito poluidor ao meio ambiente e visando seu reuso na fertirrigação.

MATERIAIS E MÉTODOS

O complexo de produção leiteiro e sistema de tratamento de efluentes utilizado estão localizados em Coronel Pacheco - MG, no sistema de produção *Genizinha* da fazenda experimental da Embrapa Gado de Leite. O efluente em estudo é gerado na limpeza diária da instalação de confinamento do rebanho, do tipo *freestall*. Após a limpeza, o efluente é submetido a um tratamento composto por tanque de equalização, peneira centrífuga, desarenador, biodigestor modelo canadense com tempo de detenção hidráulica (TDH) de 70 dias e lagoa de estabilização com TDH de 7 dias (Figura 1). O efluente, após o tratamento, é bombeado e reutilizado na limpeza. Esse ciclo de recirculação dura aproximadamente 30 dias. Após o término do ciclo, a lagoa é esvaziada e preenchida com água limpa. As coletas do efluente bruto e tratado foram realizadas nos pontos de coleta 1 e 2, respectivamente, e realizadas nos meses de setembro, novembro e dezembro de 2017, em datas nas quais as amostras representam a qualidade do efluente no fim do ciclo.

Figura 1: Sistema de tratamento do efluente de limpeza do *freestall*. (TDH: Tempo de Detenção Hidráulica).



Fonte: Autoria própria.

Para cada coleta foi realizado um ensaio de ozonização, todos conduzidos no Laboratório de Qualidade Ambiental (LAQUA) da Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF), utilizando três reatores do tipo *bubblecolumn* – o primeiro de 1L e os demais de 500mL – conectados em série a um sistema de gerador de ozônio acoplado a um concentrador de O_2 (*Ozonium Systems*) com fluxo de ozônio de 8 a 12 $mg \cdot min^{-1}$, como mostra a Figura 2. O tubo dos reatores é transparente, o que possibilitou a observação do aspecto visual da solução bem como o aspecto das bolhas. Foi utilizado o volume de 1L de efluente coletado no ponto 2e que foi transferido para o primeiro reator, os demais reatores foram utilizados com “trap” para captura do ozônio residual. Para tanto, foram adicionados 500mL de solução de Iodeto de Potássio (KI) para posterior balanço de massa do ozônio. As alíquotas do efluente ozonizado foram coletadas ao longo de 60 minutos de reação – nos tempos de 5, 20, 40 e 60 minutos, todas acompanhadas pelas análises de DQO, turbidez, cor aparente, pH e condutividade. No tempo de 60 min (amostra 3), a fim de verificar a eficiência final do processo, foi analisado também a Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO), relação DQO/DBO, Nitrogênio Total Kjeldahl (NTK), Nitrogênio Orgânico (N_{org}), Nitrogênio Amoniacal ($N_{amoniacal}$), Ferro (Fe), Nitrito ($N-NO_3^-$), Nitrito ($N-NO_2^-$), Fósforo Total (P_{total}), Sólidos Totais (ST), Sólidos Suspensos Totais (SST), Sólidos Suspensos Fixos e Voláteis