

Tratamento de esgoto por disposição no solo: vegetação suporte de forrageira

Treatment of sewage by soil disposal: forage support vegetation

Camila Aparecida de Menezes*¹; Guilherme Batista Vaz de Carvalho*²;
Bruna Vieira Cabral³; Deusmaque Carneiro Ferreira⁴

* Engenheiro(a) Ambiental, Universidade Federal do Triângulo Mineiro, Uberaba, Minas Gerais, Brasil.

¹E-mail: camilaapmenezes@outlook.com; ²E-mail: guilherme.bcarvalho@hotmail.com

³ Professora do Curso de Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Triângulo Mineiro, Uberaba, Minas Gerais, Brasil. Orcid: 0000-0002-9123-4341. E-mail: bruna.cabral@uftm.edu.br

⁴ Professor do Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia Ambiental, Universidade Federal do Triângulo Mineiro, Uberaba, Minas Gerais, Brasil. Orcid:0000-0001-9338-0863.
E-mail: deusmaque.ferreira@uftm.edu.br

RESUMO: Para mitigar o impacto do despejo indiscriminado de esgoto nos corpos hídricos são necessárias tecnologias de tratamento relativamente simples, eficientes e de baixo custo, destacando-se a disposição no solo (declivoso e vegetado) através do escoamento superficial. Neste trabalho, realizado em escala de bancada, comparou-se as concentrações de nitrogênio e carbono total no esgoto afluente a uma rampa contendo *Brachiaria decumbens*, com o coletado após os processos de escoamento superficial e infiltração na camada subsuperficial do solo. Avaliou-se o desempenho de uma rampa vegetada e contendo solo-exposto e ainda a remoção de fósforo do solo pela braquiária. Os resultados mostraram que a eficiência de remoção de nitrogênio utilizando *B. decumbens* foi próxima às relatadas por estudos realizados em escala real. A concentração de fósforo no sistema vegetado foi 52,8% menor do que a do não vegetado. A disponibilidade de fósforo no solo não foi fator limitante na sorção de nitrogênio pela espécie forrageira. Essa metodologia é viável, portanto, deve-se incentivar o seu uso como meio eficaz de tratamento de esgotos sanitários.

Palavras-chave: *Brachiaria decumbens*, escoamento superficial, rampa de tratamento, solo exposto.

ABSTRACT: In order to mitigate the impact of the indiscriminate dumping of sewage in the water bodies, relatively simple, efficient and low-cost treatment technologies are necessary, emphasizing the disposal in the soil (slope and vegetation) through surface runoff. This work was carried out on a bench scale, comparing the nitrogen and total carbon concentrations in the sewage affluent to a ramp containing *Brachiaria decumbens*, with that collected after the processes of surface runoff and infiltration in the subsurface layer of the soil. The behavior of a ramp vegetated and containing soil-exposed and the removal of phosphorus from the soil by braquiária was evaluated. The results showed that the efficiency of nitrogen removal using *B. decumbens* was close to those reported by studies performed in real scale. The concentration of phosphorus in the vegetated system was 52.8% lower than that of the non-vegetated one. The phosphorus availability was not a limiting factor in the nitrogen sorption by the forage species. This methodology is viable, so its use should be encouraged as an effective means of treating sewage.

Keywords: *Brachiaria decumbens*, synthetic sewage, ramp treatment, bare soil.

INTRODUÇÃO

No Brasil, grande parte dos esgotos em geral não é submetida a nenhum tipo de tratamento, sendo a disposição nos corpos d'água feita *in natura*, o que acarreta uma série de complicações para estes, como eutrofização e contaminação por microrganismos patogênicos. Conseqüentemente pode comprometer gravemente a saúde pública, uma vez que de acordo com Rajasulochana e Preethy (2016) as doenças infecciosas transmitidas pela água são as principais causas de morbidade e mortalidade humanas em todo o mundo. Nava e Lima (2012) afirmam que a população pobre e a rural são as que mais sofrem com esse problema, em virtude da inexistência de conscientização e de investimentos governamentais. Não obstante é crescente a busca por alternativas de tratamento que sejam eficientes, que apresentem baixo custo, vida útil elevada e baixa produção de lodo. A disposição no solo possui as características citadas e quando corretamente realizada pode ser ao mesmo tempo uma técnica de tratamento e reúso. De acordo com Auvinen et al. (2016), esta modalidade de tratamento é descentralizada e pode ser muito eficiente para pequenas comunidades.

São várias as configurações para o sistema de disposição no solo. Kruzic (1997) apresenta quatro tipos: escoamento superficial, infiltração lenta ou fertirrigação, infiltração rápida e infiltração subsuperficial. Destaca-se o escoamento superficial, no qual o efluente é aplicado na parte superior de um terreno vegetado com área e declividade definidas, ficando sujeita ao fluxo do efluente quase que exclusivamente superficial, condição que possibilita sua depuração ao longo da rampa.

Dentre as vantagens em se utilizar esta metodologia de tratamento destacam-se a construção e operação relativamente simples. O tratamento de grandes volumes de efluentes em pequenas áreas possibilita o aproveitamento do potencial fertilizante do efluente aplicado. Este método é apropriado para o tratamento de esgotos de comunidades rurais, e indústrias que geram resíduos orgânicos. O método dispõe de baixo consumo de energia, não geração de lodo e menor restrição em relação às características do meio. No entanto, apresenta como principal desvantagem o fato da qualidade da depuração do efluente sofrer influência de fatores como o clima, a tolerância da vegetação, a declividade do terreno e a temperatura, apresentando resultados mais significativos apenas em épocas mais quentes (CAVINATTO; PAGANINI, 2007).

Ao empregar o escoamento superficial como método de tratamento é fundamental a utilização de forrageiras, uma vez que as mesmas agem na retenção de nutrientes prejudiciais aos corpos hídricos, previnem a erosão e o carreamento das partículas de solo. A cultura ideal a ser cultivada nas rampas de tratamento deve ser perene, resistente às condições de baixa oxigenação e alta salinidade em nível radicular, de elevada capacidade de extração de nutrientes, resistente aos ataques de pragas, e que permita podas sucessivas e frequentes (TONETTI et al., 2009).

Existem centenas de espécies de gramíneas do gênero *Brachiaria*, o qual consiste de herbáceas, perenes ou anuais, eretas ou decumbentes. Originária da Região dos Grandes Lagos em Uganda (África), a braquiária foi introduzida no Brasil em 1960, tendo-se adaptado facilmente às condições climáticas, sendo uma das principais pastagens para a pecuária de corte e leite. Dentre as espécies, a *Brachiaria decumbens* é a mais difundida em áreas de fazendas de bovinos de corte, principalmente na região oeste e norte do Brasil. Essa forrageira tem como característica mais notável a superfície foliar

densa, possui folhas relativamente longas e é medianamente pelosa em relação a outras gramíneas do mesmo gênero (FLORINDO et al., 2014; SANTOS, 2015).

O escoamento superficial, dentre outras tecnologias de disposição de esgoto no solo, é diminutamente utilizado no Brasil. Isso se deve, possivelmente, à carência de informações técnico-científicas acerca do assunto. Por este motivo, é fundamental investir esforços no estudo dessa tecnologia a fim de ampliar os conhecimentos a respeito de suas aplicações no tratamento de esgoto em várias localidades do país (MILEN, 2014).

De acordo com Santos (2015) grande parte do consumo de água é destinado à agricultura, não sendo possível em muitas situações o seu reúso direto por tratar-se de uso consuntivo. Dessa forma, reutilizar águas residuárias no meio agrícola é uma alternativa para suprir a demanda, tornando-se viável em relação à baixa exigência quanto a sua qualidade, desde que não seja utilizada em alimentos de consumo *in natura*.

Milen (2014) ressalta que nas últimas décadas houve aumento significativo do uso de esgotos para irrigação ou recuperação de solos, devido a alguns fatores como o elevado custo de fertilizantes sintéticos, o início da aceitação sociocultural da prática de reúso agrícola, a segurança de que os riscos para a saúde pública e os impactos sobre o solo são mínimos, se precauções e técnicas adequadas forem efetivamente utilizadas. Porém, o avanço enfrenta alguns desafios, como a falta de uma lei federal e padrões reguladores que deem suporte ao uso e faça com que a prática não ocorra apenas de forma pontual (BRITO, 2012).

Cultivar pastagens com aplicação de esgoto proporciona maior produtividade agrícola podendo reduzir ou eliminar a necessidade de emprego de fertilizantes comerciais, além da grande quantidade de biomassa produzida, aplicável na alimentação dos animais. Assim, a *B. decumbens*, tolerante a condições adversas de clima e solo, se aplicada ao tratamento de esgoto por disposição no solo pelo método de escoamento superficial, poderá ampliar a reposição nutricional das áreas de pastagens, depurando o efluente de forma eficiente (TONETTI et al., 2009).

Desse modo o objetivo do presente estudo foi analisar a capacidade da *B. decumbens* no tratamento de esgoto por disposição no solo pelo método de escoamento superficial e verificar, concomitantemente, a aplicabilidade da escala de bancada para o desenvolvimento deste tipo de experimento, diminuindo, assim, a área requerida para os ensaios.

MATERIAL E MÉTODOS

A metodologia do presente trabalho foi descrita em etapas, as quais englobam: o preparo das bandejas, o plantio da braquiária, o preparo do esgoto sintético, o dimensionamento dos parâmetros hidráulicos e os métodos analíticos empregados na caracterização do esgoto.

As rampas de tratamento foram simuladas em bandejas perfuradas, escala de bancada, com comprimento (Z) de 45,5 cm; largura (D) de 27,0 cm e altura (H) de 8,5 cm. Procurou-se manter uniformidade no diâmetro e quantidade de orifícios de cada bandeja. Para determinação do diâmetro dos orifícios considerou-se, através de testes aleatórios, o que fosse suficiente para que houvesse a drenagem do infiltrado, sem a lixiviação do solo.

Selecionaram-se em campo (Uberaba – MG) as mudas de braquiária observando-se o comprimento das folhas, aproximadamente 20 cm, desde que sua área superficial não ultrapasse a área da bandeja (1228,5 cm²). Utilizaram-se 3 bandejas, cada qual com

uma muda de braquiária, buscando-se uniformidade na parte aérea e na raiz dos espécimes.

O solo utilizado foi retirado da área em que as mudas de braquiária estavam plantadas, *campus* 1 do Instituto de Ciências Tecnológicas e Exatas (UFTM, Uberaba), coordenadas 19°43'2.36"S, 47°57'35.04"O. Para que a composição do solo fosse uniforme nas 3 bandejas, realizou-se o revolvimento da camada superficial, inferior a 20 cm, após retirada das mudas. Alocou-se o solo dentro das bandejas até uma altura de 2 cm, posicionaram-se as mudas e completaram-se os volumes destas com o solo remanescente. De 30/11/2015 a 13/12/2015 (tempo de aclimação das mudas), a irrigação das forrageiras e da bandeja contendo solo exposto foi realizada somente com água destilada. Neste período as bandejas foram posicionadas sem declividade, para evitar movimentação de massas do solo pela percolação longitudinal da água no sentido da inclinação.

No dia 14/12/2015 (décimo quinto dia) selecionou-se dentre as 3 mudas a mais vigorosa, sem evolução da massa seca (**Figura 1**), descartando-se as demais. Também no décimo quinto dia inclinou-se a bandeja com braquiária, aplicando-se inicialmente 8% de declividade (**Figura 2a**). Como testemunha da efetividade do tratamento de efluentes pelas espécies forrageiras inclinou-se, com a mesma declividade, a bandeja com solo-exposto. Para a disposição nas rampas de tratamento com solo-exposto e braquiária, preparou-se diariamente 3,6 litros de substrato sintético simulando o esgoto doméstico (PARSEKIAN, 2003). O referido esgoto apresentou pH igual a $8,18 \pm 0,01$, condutividade elétrica de $117,60 \pm 0,81 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$, concentrações de nitrogênio e carbono total, respectivamente, iguais a $53,12 \pm 0,12$ e $82,39 \pm 0,25 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$.

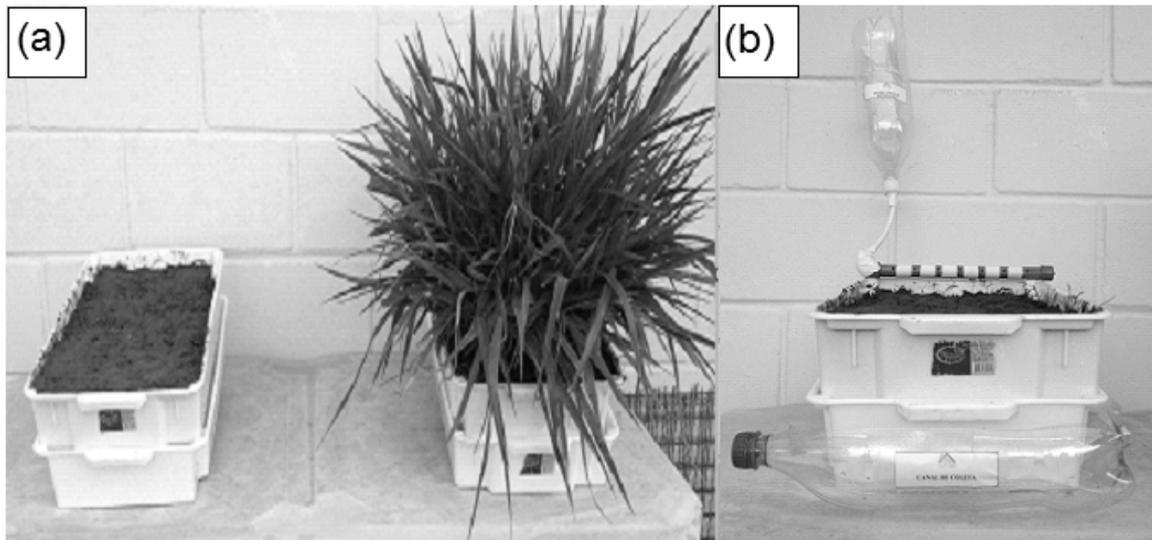
Figura 1. Seleção da muda e rampa de tratamento escolhida.



No dimensionamento dos parâmetros hidráulicos para aplicação do esgoto sintético, adotou-se inicialmente uma taxa de aplicação de $0,2 \text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{m}^{-1}$ e consequentemente vazão teórica de $54 \text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$. Para a aplicação do método de escoamento superficial, vale ressaltar que o solo empregado deve apresentar textura argilosa e carga hidráulica próxima a $10 \text{ cm}\cdot\text{semana}^{-1}$ (ou $1,465 \text{ cm}\cdot\text{dia}^{-1}$). Utilizando os valores adotados para taxa de aplicação e carga hidráulica determinou-se o período de aplicação do esgoto sintético por dia, resultando em 2 minutos. O volume necessário para aplicação em cada bandeja, por aplicação, foi de aproximadamente 1,8 L. Na simulação da distribuição por tubos perfurados, para cada rampa de tratamento, empregou-se uma garrafa PET, uma

mangueira de borracha e um tubo de PVC com 25 mm de diâmetro e 27 cm de comprimento (**Figura 2b**). Fixou-se inicialmente o diâmetro dos furos em 1,1 mm e a distância entre eles de 18 mm. O espaçamento entre as bordas da bandeja e os orifícios foi de 2 centímetros, obtendo-se um total de 13 orifícios. A altura do reservatório de distribuição, ou seja, a garrafa PET, foi calculada pela lei dos orifícios (PORTO, 2006).

Figura 2. (a) Bandejas inclinadas com suporte para coleta do irrigado; (b) Rampa de tratamento acoplada aos sistemas de distribuição e coleta.



A área de cada orifício foi de $9,5 \times 10^{-7} \text{ m}^2$, resultando em uma área total (A) de $1,23 \times 10^{-5} \text{ m}^2$. Visto que a vazão aplicada ($1,5 \times 10^{-5} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) é diminuta em relação aos diâmetros da mangueira e tubulação, desprezaram-se as perdas de carga distribuídas e localizadas. Adotou-se Cd de 0,61, valor proposto por Porto (2006) e aceleração da gravidade $9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$. A diferença de altura entre a borda superior da bandeja e o reservatório foi de 20,4 centímetros. Esse reservatório, durante os períodos de aplicação do esgoto sintético, foi fixado acima da bandeja. A tubulação perfurada foi acoplada à mangueira empregando um conector de 13 mm, a outra extremidade da mangueira foi conectada à garrafa PET utilizando um conector de 21 mm.

Através do lançamento do esgoto sintético sobre as bandejas de braquiária e solo exposto, foram coletadas as amostras do volume que escoou superficialmente, atingindo o canal de coleta, e também da porção que foi infiltrada. A coleta do efluente do canal foi realizada diariamente e por 9 dias, em garrafas PET dispostas na base da rampa (**Figura 2b**), através do escoamento por gravidade. Para determinação da frequência de coleta do infiltrado foram realizados testes preliminares. Para intervalos de tempo superiores a 12 horas não foram observados acréscimos significativos de volume nas bandejas. Então, no período de operação do sistema foram coletados os volumes infiltrados através de suporte acoplado na base das bandejas, 12 horas após os lançamentos. Adotou-se a frequência de 6 dias de lançamento para 1 dia seco por semana, durante as 4 semanas de realização do experimento. O material coletado (canal e infiltrado) foi armazenado em garrafas de água mineral de 500 mL, identificadas com a data da coleta, sob temperatura ambiente.

No décimo nono dia (18/12/2015) lançou-se 3,6 L de esgoto na rampa com 16% de

declividade, visando avaliar aleatoriamente o comportamento do sistema quando submetido à taxa de aplicação e inclinação superiores aos valores descritos anteriormente.

Através das amostras coletadas avaliou-se o comportamento das rampas, da cobertura vegetal e do sistema de lançamento do efluente nas rampas quanto aos parâmetros pH, condutividade elétrica, carbono total, nitrogênio e fósforo. Para as análises de pH utilizou-se o medidor da marca Tecnonon, modelo mPA-210. A condutividade elétrica das amostras foi obtida por meio de um condutivímetro de bancada, de marca ION, modelo DDS-12DW. A caracterização em relação ao nitrogênio, fósforo e carbono total (CT) foi realizada pela técnica de combustão catalítica a alta temperatura, empregando o aparelho analisador TOC-VCPHASI+TNM-1 da Shimadzu, no laboratório da Faculdade de Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia.

Realizaram-se em Laboratório terceirizado as análises do solo retirado das rampas (solo-exposto e braquiária), a fim de averiguar a variação dos teores de macro e micronutrientes, em função das aplicações simultâneas do esgoto sintético nas bandejas contendo solo-exposto e a forrageira respectivamente.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Segundo Von Sperling (2005) os esgotos aplicados no solo conduzem à recarga do lençol subterrâneo e à evapotranspiração. A capacidade do solo em conduzir à assimilação de compostos orgânicos complexos depende de suas propriedades e condições climáticas. A evapotranspiração de referência (ET_o) é utilizada em balanços hídricos e diversos estudos agrometeorológicos. Através do roteiro de cálculo apresentado por Conceição (2006) é possível estimar a ET_o média, nas coordenadas indicadas de realização do experimento, pelo método de Penman-Monteith-FAO (ET_oPMF).

Segundo os dados do Instituto Nacional de Meteorologia para o período de experimentos (14/12/2015 à 03/01/2016), tem-se que a ET_oPMF média foi de aproximadamente 3,93 mm.dia⁻¹. Vale ressaltar que a ET_oPMF obtida está dentro da faixa de valores delimitada por Fernandes, Fraga Júnior e Takay (2011) para Uberaba (3,3 a 4,1 mm.dia⁻¹), em estudo realizado no município no período de 2003 a 2008, na mesma estação do ano.

Considerando a área superficial da rampa de tratamento vegetada (0,1228 m²) tem-se que o volume de saída por evapotranspiração estimado foi em média 0,48 litro de água por dia. Na **Tabela 1** são apresentados os volumes coletados nos canais de coleta e infiltrados. A diferença entre o volume lançado e o coletado corresponde às parcelas retidas no solo e evapotranspiração, já que no período em estudo não houve precipitação.

A rampa vegetada absorveu maior volume de esgoto, corroborando com Feigin, Ravina e Shalhevet (1991) ao afirmarem que a espécie forrageira foi responsável pela maior absorção do esgoto e, conseqüentemente, dos possíveis contaminantes, promovendo maior proteção da água subterrânea.

Tabela 1. Volumes de esgotos coletados após passagem e/ou infiltração no solo exposto e na forrageira durante as etapas de aplicação.

| Dia | Solo exposto | | <i>B. decumbens</i> | |
|----------|-----------------|----------------|---------------------|------------|
| | Infiltrado (mL) | Canal (mL) | Infiltrado (mL) | Canal (mL) |
| 14/12/15 | 74,52 ± 1,14 | 1502,61 ± 1,56 | 171,86 ± 1,82 | 0 |
| 15/12/15 | 84,35 ± 1,32 | 1500,80 ± 1,40 | 1204,86 ± 1,72 | 0 |
| 16/12/15 | 42,28 ± 1,56 | 1604,16 ± 1,60 | 1103,22 ± 1,98 | 0 |
| 18/12/15 | 701,14 ± 1,24 | 2100,26 ± 1,19 | 1502,96 ± 1,74 | 0 |
| 19/12/15 | 192,32 ± 1,58 | 1203,29 ± 1,46 | 1200,90 ± 1,12 | 0 |
| 20/12/15 | 183,56 ± 1,42 | 1301,27 ± 1,54 | 902,81 ± 1,37 | 0 |
| 01/01/16 | 202,20 ± 1,14 | 1002,86 ± 1,64 | 301,90 ± 1,58 | 0 |
| 02/01/16 | 351,43 ± 1,38 | 900,82 ± 1,20 | 200,38 ± 1,59 | 0 |
| 03/01/16 | 250,86 ± 1,52 | 1201,55 ± 1,66 | 653,86 ± 1,13 | 0 |

Observa-se que apesar de o volume aplicado ter sido mensurado conforme a taxa de aplicação atestada como ideal, pelas dimensões da rampa, este não foi suficiente para que houvesse efluente no canal de coleta da rampa vegetada. A gramínea promove a retenção dos sólidos em suspensão e a redução da velocidade do escoamento. O sistema radicular diminui os efeitos adversos da lixiviação e absorve os micro e macro elementos da matéria (TERADA; ZUCCOLO; PAGANINI, 1985). Neste caso, a velocidade foi reduzida tal que os mecanismos predominantes fossem infiltração, sorção e evapotranspiração. Na **Tabela 2** encontram-se os valores obtidos na caracterização química dos solos empregados nos experimentos após o período de operação (03/01/2016). A classificação do solo de acordo com tais características foi realizada conforme Ribeiro, Guimarães e Alvarez (1999) nas recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes no estado de Minas Gerais.

Observa-se na **Tabela 2** que os teores de cálcio e soma de base foram os indicadores que apresentaram diferença entre o solo exposto e o solo da braquiária. O cálcio é um macronutriente secundário catiônico (Ca^{2+}) importante para o desenvolvimento da estrutura da planta, além de auxiliar na disponibilidade de micronutrientes e reduzir a acidez do solo (HUNGRIA; NOGUEIRA; ARAUJO, 2016). A soma de bases trocáveis (SB) de um solo representa a soma dos teores de cátions permutáveis, exceto H^+ e Al^{3+} . Esse parâmetro associado à saturação por bases (V%) é útil para avaliar as condições gerais de fertilidade do solo (RONQUIM, 2010).

Segundo Lopes e Guilherme (2000), a capacidade de troca catiônica variando entre 60 e 250 mmolc.dm^{-3} , condição do solo de ambos os sistemas, indica alta porcentagem de argila e/ou matéria orgânica, maior retenção de nutrientes e maiores retenções de umidade. Observa-se também através da saturação por bases que ambos os sistemas são eutróficos (férteis), conforme classificação de Ronquim (2010).

Tabela 2. Classificação dos indicadores químicos de qualidade de solo de interesse agrícola.

| Parâmetro | Solo exposto | Classificação | <i>B. decumbens</i> | Classificação |
|--|---------------|---------------------------|---------------------|---------------------------|
| Matéria orgânica (g.dm ⁻³) | 21,60 ± 0,15 | Médio ⁽¹⁾ | 29,40 ± 0,13 | Médio ⁽¹⁾ |
| Cálcio (mmolc.dm ⁻³) | 43,70 ± 0,05 | Muito bom ⁽¹⁾ | 39,00 ± 0,04 | Bom ⁽¹⁾ |
| Magnésio (mmolc.dm ⁻³) | 12,00 ± 0,05 | Bom ⁽¹⁾ | 11,80 ± 0,08 | Bom ⁽¹⁾ |
| Acidez potencial (mmolc.dm ⁻³) | 11,00 ± 0,35 | Baixo ⁽¹⁾ | 11,00 ± 0,21 | Baixo ⁽¹⁾ |
| Soma de bases (mmolc.dm ⁻³) | 63,70 ± 0,19 | Muito bom ⁽¹⁾ | 56,90 ± 0,31 | Bom ⁽¹⁾ |
| CTC (mmolc.dm ⁻³) | 74,69 ± 0,25 | Bom ⁽¹⁾ | 67,90 ± 0,23 | Bom ⁽¹⁾ |
| Saturação por bases (%) | 85,27 ± 0,85 | Muito bom ⁽¹⁾ | 83,80 ± 0,55 | Muito bom ⁽¹⁾ |
| Carbono total (mg.dm ⁻³) | 125,10 ± 0,45 | Bom ⁽¹⁾ | 170,50 ± 0,21 | Bom ⁽¹⁾ |
| Ph | 6,30 ± 0,01 | Muito alto ⁽²⁾ | 6,40 ± 0,01 | Muito alto ⁽²⁾ |
| Fósforo (mg.dm ⁻³) | 71,20 ± 0,15 | Muito bom ⁽¹⁾ | 33,60 ± 0,13 | Muito bom ⁽¹⁾ |
| Potássio (mmol.dm ⁻³) | 8,00 ± 0,11 | Muito alto ⁽²⁾ | 6,17 ± 0,12 | Muito alto ⁽²⁾ |

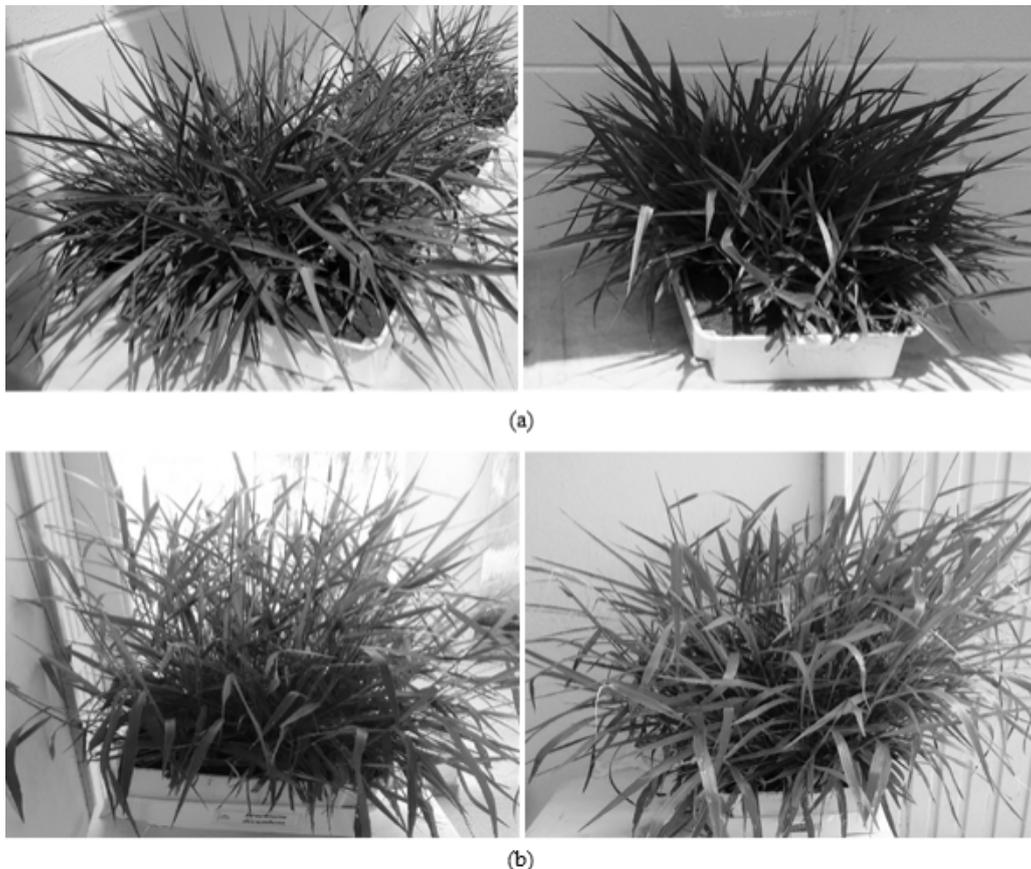
(1) - Ribeiro, Guimarães e Alvarez, 1999.

(2) - Raij et al., 1996 apud Lopes e Guilherme, 2000.

No intuito de verificar a adsorção de fósforo pela vegetação, comparou-se a concentração deste macronutriente no solo do sistema vegetado (33,6 mg.dm⁻³) com a do sistema não vegetado (71,2 mg.dm⁻³). Analisando os dois sistemas, com e sem plantio, foi possível observar uma redução de 52,8% do teor de fósforo no solo com braquiária. Acredita-se que essa redução ocorreu devido à adsorção deste macronutriente pela espécie forrageira. Na solução do solo os nutrientes podem entrar em contato com as superfícies radiculares diluídos no fluxo em massa de água ou por difusão. As raízes das plantas possuem a capacidade de absorver esse nutriente de soluções com baixas concentrações, sendo que para as baixas concentrações o mecanismo de difusão, geralmente, é predominante (SAEED; SUN, 2012).

Observa-se que o solo da rampa vegetada apresentou indicadores químicos adequados, como concentração de carbono total, para o crescimento da gramínea. Esta afirmação pode ser confirmada através da visualização do desenvolvimento da braquiária em 20 dias (**Figura 3**). A **Figura 4** apresenta as concentrações de carbono total do efluente da rampa de tratamento contendo solo exposto (infiltrado e canal de coleta), e do infiltrado na rampa de tratamento contendo a braquiária.

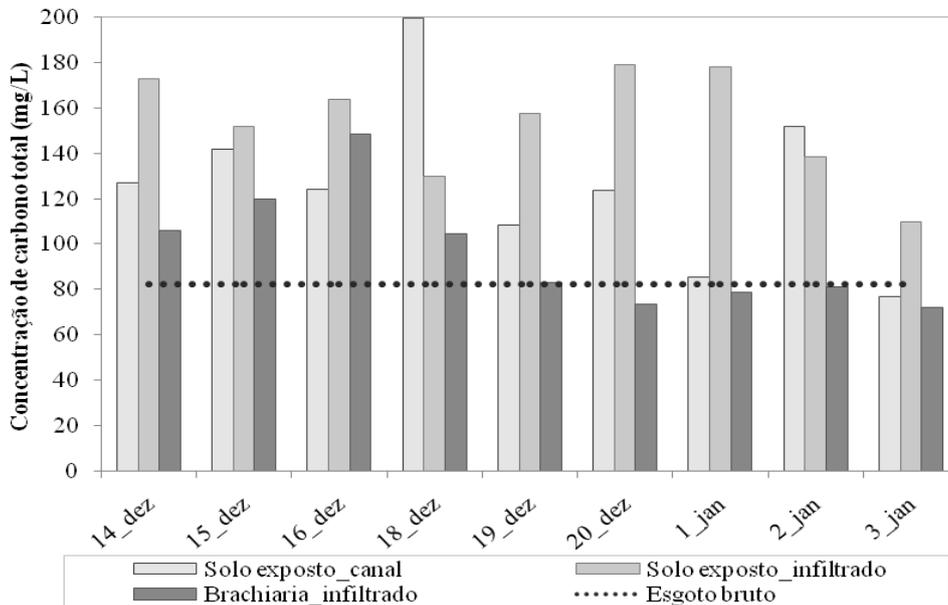
Figura 3. Desenvolvimento da *B. decumbens* de (a) 14/12/2015 à (b) 03/01/2016



O carbono orgânico não é considerado um macronutriente para a braquiária, embora, baixos valores poderiam comprometer o seu desenvolvimento em razão de seu efeito na estrutura, na disponibilidade de água, redução da CTC e no seu poder de tamponamento frente à presença de eletrólitos muitas vezes tóxicos para a referida forrageira (como exemplo o Al^{3+}). As reações microbiológicas de remoção de nitrogênio, por exemplo, são limitadas pela ausência de carbono orgânico (SAEED; SUN, 2012).

Um possível motivo do aumento de matéria orgânica (MO), e conseqüentemente de carbono total, no efluente das rampas no início da etapa de operação, se deve ao desprendimento de MO da composição do solo (**Tabela 2**), ocasionado pelo fluxo tangencial da água. Observa-se que os efeitos adversos do escoamento da água são visualizados com maior intensidade na rampa sem cobertura vegetal. Segundo Barton et al. (2005) a vegetação pode controlar as perdas num sistema pela minimização da percolação.

Figura 4. Concentração de carbono total no canal e infiltrado em relação ao esgoto bruto (sintético).

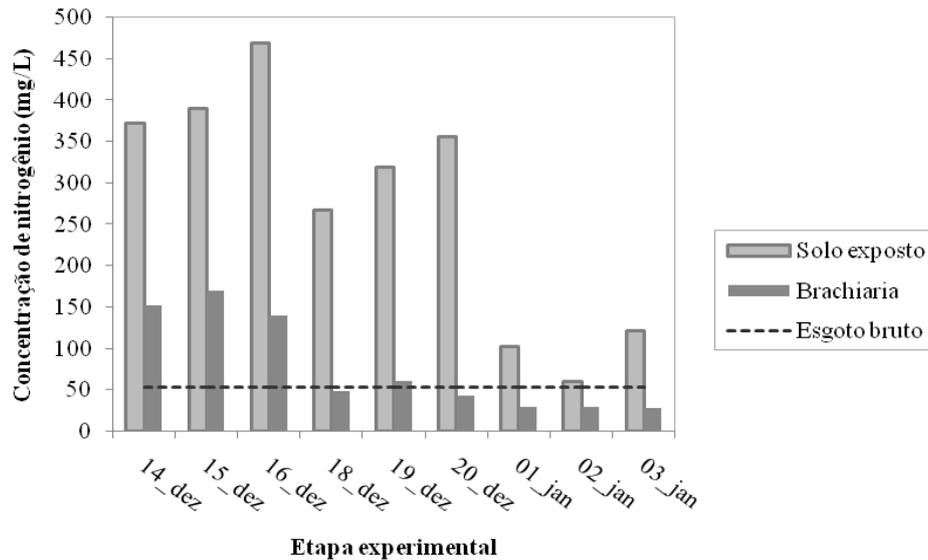


A redução da concentração de carbono no efluente da rampa vegetada, ao longo dos lançamentos, pode ser explicada pelo efeito *priming* do carbono, que se trata da redução do carbono provocada pela aceleração da decomposição da matéria orgânica do solo após a entrada de material orgânico na área de cultivo (LIU et al., 2017). De acordo com Fernandes et al. (2011), a entrada contínua de carbono no solo, neste caso pelo lançamento diário do esgoto sintético, ocasiona uma sequência de processos ao nível de rizosfera, resultando na mineralização da matéria orgânica do solo. A declividade da rampa vegetada também favorece a redução do teor de carbono do solo, uma vez que interfere na taxa de decomposição da matéria orgânica (aumento do número de colisões efetivas).

Feigin, Ravina e Shalhevet (1991), citam ainda que a relação C/N inferior a 5 no esgoto facilitam a decomposição desses elementos no solo, e sua assimilação pelas plantas. Essa observação está em consonância com os resultados obtidos no presente estudo, uma vez que, as concentrações de carbono do solo não vegetado foram relativamente inferiores as concentrações do sistema contendo a forrageira. A decomposição acentua-se ao ponto em que a concentração de carbono do efluente, torna-se inferior ao afluente da rampa vegetada após o sexto dia de lançamento.

A **Figura 5** mostra que as concentrações de nitrogênio nos infiltrados da rampa de tratamento contendo solo exposto encontraram-se superiores à concentração do esgoto bruto (53 mg.L^{-1}). O mesmo ocorreu no sistema composto pela braquiária nos 3 primeiros dias de lançamento. Consoante Denk et al. (2017), um processo fundamental no ciclo do nitrogênio é a fixação do mesmo: a conversão do N_2 a NH_3 por microrganismos fixadores de nitrogênio que oxidam (“queimam”) carboidratos para ganhar energia e, assim, reduzir N_2 para NH_3 (fixação biológica de nitrogênio). Uma vez fixado, o N é transformado em biomassa vegetal (imobilização e captação, respectivamente), eventualmente tornando-se matéria orgânica para o solo após senescência, lixo e decomposição. No caso da disposição da água residuária numa rampa de tratamento, ao passo que os resíduos de poda são retirados do sistema, os nutrientes são incorporados pelo esgoto lançado.

Figura 5. Concentração de nitrogênio nos infiltrados do solo exposto e *B. decumbens*.



Segundo Ribeiro, Guimarães e Alvarez (1999) a utilização do nitrogênio na fertirrigação deve-se à grande demanda desse pelas plantas e sua mobilidade no solo. No sistema proposto, em que a percolação é acelerada pela declividade do talude, o nitrogênio (móbil) encontrado acima da saturação do sistema, na fase inicial, foi lixiviado pela água. Maggi et al. (2011) concluíram em estudo semelhante, que o nitrogênio no percolado aumentou ao longo das coletas em relação ao esgoto bruto.

Após o quarto dia da etapa experimental (18/12/2015) foi observado decaimento na concentração de nitrogênio do efluente da rampa de tratamento vegetada, com eficiência de remoção de nitrogênio de 48%, que se manteve constante até o final da etapa experimental (03/01/2016).

As eficiências de remoção de nitrogênio atingidas pelo sistema de disposição no solo em escala de bancada, utilizando a *B. decumbens*, são similares às encontradas na literatura para sistemas em escala real (**Tabela 3**).

Tabela 3. Comparação entre o sistema em escala de bancada e dados disponíveis na literatura.

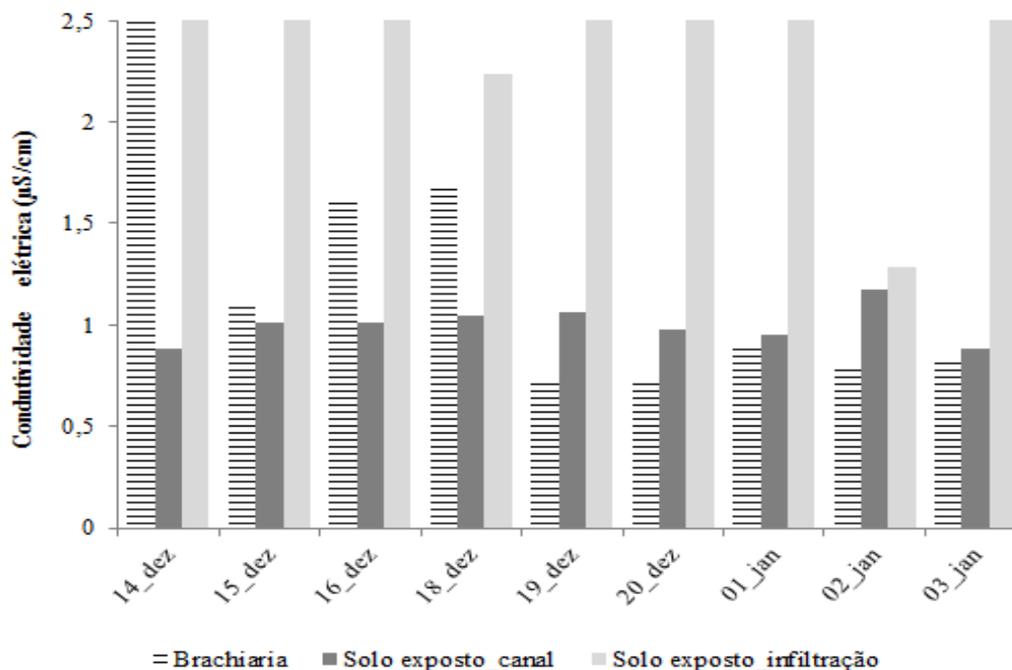
| Parâmetro/ Vegetação | Este trabalho | Paganini (1997) | Araújo (1998) | Klusener Filho (2001) |
|---|---------------------|----------------------|----------------------|-----------------------|
| | <i>B. decumbens</i> | <i>B. humidicola</i> | <i>B. humidicola</i> | Tifton 85 |
| q (m ³ .h ⁻¹ .m ⁻¹) | 0,35 | 0,18 a 0,44 | 0,20 a 0,60 | 0,10 a 0,40 |
| Remoção de N (%) | 48 | 47 | 49 | 66 |

Fonte: Adaptado de Tonetti et al., 2009.

Segundo Ribeiro, Guimarães e Alvarez (1999), as águas podem ser divididas de acordo com sua condutividade elétrica, parâmetro indireto na determinação da concentração total de sais. A condutividade elétrica do substrato sintético bruto (117,6 $\mu\text{S.cm}^{-1}$) indica que sua salinidade é baixa, podendo ser empregado para irrigação na maior parte dos cultivos em quase todos os tipos de solo, com pouca probabilidade de

desenvolver problemas relacionados ao excesso de salinidade nas espécies cultivadas (CORDEIRO, 2001). A **Figura 6** apresenta a condutividade elétrica do efluente coletado no solo exposto e na *B. decumbens*.

Figura 6. Condutividade elétrica ($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$) dos efluentes coletados nas rampas (solo exposto e braquiária).



A concentração de sais detectada no percolado também pode ser explicada pela lixiviação do solo, consoante com Brito et al. (2007), que detectaram um aumento da condutividade elétrica e do teor de sais proporcionais ao acréscimo da aplicação de água residuária. A absorção de sais dissolvidos na solução do solo pela braquiária fez com que o infiltrado da rampa vegetada apresentasse menor condutividade elétrica quando comparado ao infiltrado do sistema solo-exposto, uma vez que, nesse último sistema, sem absorção vegetativa de macro e micronutrientes (eletrólitos responsáveis pela condutividade elétrica da solução do solo), as pequenas variações da condutividade elétrica se devem aos processos de troca, adsorção e dessorção com alteração da força iônica e da mobilidade dos íons livres pela matriz do solo.

Não houve alteração significativa do valor de pH do efluente coletado em relação ao esgoto sintético ($8,18 \pm 0,01$). Isso é explicado, em parte, pelas baixas constantes de acidez e basicidade dos cátions e ânions constituintes do esgoto sintético, ou seja, as reações de hidrólise desses íons são praticamente desprezíveis. Consequentemente, não alteram a concentração molar dos íons H_3O^+ na solução do solo. Outro fator que corrobora para a baixa variação de pH é o eficiente sistema tamponante existente na matriz do solo. Essa capacidade tamponante do solo foi coerente com os valores encontrados para CTC e MO (**Tabela 2**), uma vez que, a capacidade tamponante e a CTC estão diretamente relacionadas ao teor de MO existente no solo (SAEED; SUN, 2012).

Segundo Holford (1997), o fósforo tem um papel importante no crescimento radicular e no perfilhamento das gramíneas, sendo um dos nutrientes com maior efeito

limitante, ficando atrás apenas do nitrogênio, na produtividade das forrageiras. Em solos tropicais, como é o caso do Brasil, a adição deste nutriente ao solo ganha destaque, visto que esses solos possuem baixa disponibilidade natural de fósforo, além de elevada capacidade de adsorção e fixação deste elemento.

Conforme observaram Andreo-Martínez et al. (2017), a redução total do fósforo inclui mecanismos químicos (adsorção, formação de complexos com íons Ca e Mg, precipitação com os íons Fe, Al e Ca), e mecanismos biológicos como o microbiano e assimilação pelas plantas.

Luo et al. (2016), verificaram que a vegetação promoveu elevada eficiência de remoção de fósforo (média de 70,1-89,4%) para todas as taxas de carregamento de esgoto avaliadas através do escoamento superficial em área vegetada alagada, sendo os principais mecanismos de remoção a adsorção e a precipitação. Vale ressaltar ainda, que Nazário (2014) relatou, em seu estudo sobre o acúmulo de nutrientes por forrageiras cultivadas em sistema de escoamento superficial para o tratamento de esgoto doméstico, que o acúmulo de fósforo é proporcional à taxa de esgoto aplicada, devido à maior disponibilidade deste nutriente para a planta, disponibilidade esta, oriunda da maior concentração do elemento na solução do solo, quando utilizadas maiores volumes de efluentes sobre este.

Observou-se que devido à quantidade satisfatória de fósforo no sistema, este elemento não foi limitante ao desenvolvimento da forrageira. A partir da informação levantada por Hungria, Nogueira e Araújo (2016), no estudo em que os autores citam que 180 milhões de hectares no Brasil são ocupados por pastos, e 70% destes estão em degradação requerendo reestabelecimento da fertilidade, reforça-se a ideia de que a aplicação de esgoto no solo pode ser uma forma de suprir a carência nutricional das forrageiras. Valora-se então o esgoto que é atualmente em sua maioria ejetado nos corpos hídricos causando severos impactos ambientais.

CONCLUSÕES

Observou-se que no início da fase experimental tanto as concentrações de nitrogênio como as de carbono total do efluente dos dois sistemas (solo exposto e contendo *B. decumbens*) foram superiores a concentração do esgoto bruto. Porém, notou-se que após 4 dias de operação com esgoto sintético o sistema vegetado passou a apresentar eficiência de remoção para esses parâmetros. A eficiência média de remoção apresentada para os referidos parâmetros no final dos experimentos foi de aproximadamente 48%, resultados similares aos encontrados em estudos realizados em escala real.

A braquiária apresentou capacidade de remover porção de fósforo do solo, uma vez que a concentração do mesmo, no sistema vegetado, foi 52,8% inferior ao do sistema não vegetado, inferindo assim que a disponibilidade de fósforo não foi um fator limitante na assimilação de outros nutrientes pela forrageira. A espécie forrageira obteve um bom desenvolvimento ao longo do experimento, quanto submetida à aplicação do esgoto artificial, apresentando um crescimento ereto e decumbente, se prostrando ao solo e fechando-o por completo. Com isso, o processo de escoamento superficial no solo empregando a *B. decumbens* para o tratamento de esgoto sintético constitui-se como um método promissor de implantação para tratamento de esgoto doméstico, demonstrando ser eficiente na remoção de matéria orgânica, nitrogênio e fósforo. Além de apresentar a

vantagem de ter baixo custo de implantação, instalação, operação e manutenção, o que o torna economicamente viável de ser utilizado em pequenas comunidades que ainda carecem de investimentos para melhorar o sistema de esgotamento sanitário.

REFERÊNCIAS

- ANDREO-MARTÍNEZ, P.; GARCÍA-MARTÍNEZ, N.; QUESADA-MEDINA, J.; ALMELA, L. Domestic wastewaters reuse reclaimed by an improved horizontal subsurface-flow constructed wetland. **Bioresource Technology**, v. 233, p. 236-246, 2017.
- ARAÚJO, G.C. **Avaliação do pós-tratamento de efluentes de reatores UASB através de um sistema de aplicação superficial de esgotos**. 1998. 213 f. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 1998.
- AUVINEN, H.; HAVRAN, I.; HUBAU, L.; VANSEVEREN, L.; GEBHARDT, W.; LINNEMANN, V. *et al.* Removal of pharmaceuticals by a pilot aerated sub-surface flow constructed wetland treating municipal and hospital wastewater. **Ecological Engineering**, v. 100, p. 157-164, 2016.
- BARTON, L.; SCHIPPER, L. A.; BARKLE, G. F.; MCLEOD, M.; SPEIR, T. W.; TAYLOR, M. D. *et al.* Land application of domestic effluent onto four soil types: plant uptake and nutrient leaching. **Journal of Environmental Quality**, v. 34, p. 635-643, 2005.
- BRITO, F. L.; ROLIM, M. M.; SILVA, J. A. A.; PEDROSA, E. M. R. Qualidade do percolado de solos que receberam vinhaça, em diferentes doses e tempo de incubação. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 11, n. 3, p. 318-323, 2007..
- BRITO, L. P. Mercado de reuso de água no Brasil: é possível assegurar um crescimento sem a definição de um arcabouço normativo e legal? **Revista DAE**, v. 188, p. 8., 2012.
- CAVINATTO, A. S.; PAGANINI, W. S. Os microrganismos nas atividades de disposição de esgotos no solo: estudo de caso. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 12, n. 1, 2007, p. 42-51, 2007.
- CONCEIÇÃO, M. A. F. **Roteiro de cálculo da evapotranspiração de referência pelo método de Penman-Monteith-FAO**. Bento Gonçalves: Embrapa Uva e Vinho, 2006. 8 p.
- CORDEIRO, G. G. **Qualidade de água para fins de irrigação (Conceitos básicos e práticas)**. Petrolina: Embrapa Semi-Árido, 2001. 32 p.
- DENK, T. R. A.; MOHN, J.; DECOCK, C.; LEWICKA-SZCZEBAK, D.; HARRIS, E.; BUTTERBACH-BAHL, K. *et al.* The nitrogen cycle: a review of isotope effect and isotope modeling approaches. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 105, p. 121-137, 2017.
- FEIGIN, A.; RAVINA, I.; SHALHEVET, J. **Irrigation with treated sewage effluent: management for environmental protection**. Berlin: Springer-Verlag, 1991. 224p.
- FERNANDES, A. H. B. M.; CARDOSO, M. A.; SOUZA, R. A. C.; FERNANDES, F. A.; SOARES, M. T. S.; CRISPIM, S. M. A. *et al.* **Nitrificação e mineralização de carbono**

em solos tratados com dejetos de suínos biodigeridos. Corumbá: Embrapa Pantanal, 2011. 15 p.

FERNANDES, A. L. T.; FRAGA JÚNIOR, E. F.; TAKAY, B. Y. Avaliação do método Penman-Piche para a estimativa da evapotranspiração de referência em Uberaba, MG. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 15, n. 3, p. 270-276, 2011.

FLORINDO, J. B.; SILVA, N. R.; ROMUALDO, L. M.; SILVA, F. F.; LUZ, P. H. C.; HERLING, V. R. *et al.* Brachiaria species identification using imaging techniques based on fractal descriptors. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 103 p. 48-54, 2014.

HOLFORD, I. C. R. Soil phosphorus: its measurement, and its uptake by plants. **Australian Journal of Soil Research**, v. 35, n. 2, p. 227-239, 1997.

HUNGRIA, M.; NOGUEIRA, M. A.; ARAUJO, R. S. Inoculation of *Brachiaria* sp. with the plant growth-promoting bacterium *Azospirillum brasilense*. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 221, p. 125-131, 2016.

KLUSENER FILHO, L. C. **Pós-tratamento de efluente de filtro anaeróbico utilizando o método de escoamento superficial no solo.** 2001. 73 f. Dissertação (Mestrado em Saneamento e Ambiente) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2001.

KRUZIC, A. P. Natural Treatment and on-site processes. **Water Environment Research**, v. 69, n. 4, p. 522-528, 1997.

LIU, X. J. A.; SUN, J.; MAU, R. L.; FINLEY, B. K.; COMPSON, Z. G.; VAN GESTEL, N. *et al.* Labile carbon input determines the direction and magnitude of the priming effect. **Applied Soil Ecology**, v. 109, p. 7-13, 2017.

LOPES, A. S.; GUILHERME, L. R. G. **Uso eficiente de fertilizantes e corretivos agrícolas: aspectos agronômicos.** 3. ed. rev. e atual. São Paulo: ANDA, 2000, 70 p.

LUO, P.; LIU, F.; LIU, X.; WU, X.; YAO, R.; CHEN, L. *et al.* Phosphorus removal from lagoon-pretreated swine wastewater by pilot-scale surface flow constructed wetlands planted with *Myriophyllum aquaticum*. **Science of the Total Environment**, v. 576, p. 490-497, 2016.

MAGGI, C. F.; FREITAS, P. S. L.; SAMPAIO, S. C.; DIETER, J. Lixiviação de nutrientes em solo cultivado com aplicação de água residuária de suinocultura. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 15, n. 2, p. 170-177, 2011.

MILEN, L. C. Tratamento de esgoto doméstico pelo método de escoamento superficial no solo: uma revisão de literatura. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, v. 9, n. 5, p. 26-33, 2014.

NAVA, L.; LIMA, C. Avaliação da eficiência da Estação de Tratamento de Esgoto por Zona de Raízes (Etezz) instalada no Horto Florestal de Caçador-SC. **Ignis**, v. 1, n. 1, 2012.

NAZÁRIO, A. A.; GARCIA, G. O.; REIS, E. F.; MENDONÇA, E. Sá; MELLINE, B. Acúmulo de nutrientes por forrageiras cultivadas em sistema de escoamento superficial para tratamento de esgoto doméstico. **Revista Ambiente & Água**, v. 9, n. 1, p. 97-108, 2014.

PAGANINI, W. S. **Disposição de esgotos no solo - 12 anos de monitoramento**. In: 19º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, Foz do Iguaçu, p. 920-949, 1997.

PARSEKIAN, M. P. S. **Aplicação de lise celular forçada em sistema de tratamento aeróbia precedido de reator UASB**. 2003. 229 f. Tese (Doutorado em Hidráulica e Saneamento) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.

PORTO, R. M. **Hidráulica Básica**. 4 ed. São Carlos: EESC-USP, 2006, 519 p.

RAJASULOCHANA, P.; PREETHY, V. Comparison on efficiency of various techniques in treatment of waste and sewage water. **Resource-Efficient Technologies**, v. 2, p. 175-184, 2016.

RIBEIRO, A. C.; GUIMARÃES, P. T. G.; ALVAREZ, V. H. **Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais**. Viçosa: CFSEMG, 1999. 359 p.

RONQUIM, C. C. **Conceitos de fertilidade do solo e manejo adequado para as regiões tropicais**. Campinas: Embrapa Monitoramento por Satélite, 2010. 26 p.

SAEED, T.; SUN, G. A review on nitrogen and organics removal mechanisms in subsurface flow constructed wetlands. **Journal of Environmental Management**, v. 112, p. 429-448, 2012.

SANTOS, G. O. **Aplicação de efluente de tratamento de esgoto, via aspersão, no solo e em brachiaria**. 2015. 197 p. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal, 2015.

TERADA, M.; ZUCCOLO, A. C. F.; PAGANINI, W. S. Tratamento de esgotos domésticos por disposição no solo com utilização de gramíneas. **Revista DAE**, v. 45, n. 142, p. 249-254, 1985.

TONETTI, A. L.; CERQUEIRA, R. S.; CORAUCCI FILHO, B; VON SPERLING, M.; FIGUEIREDO, R. F. Tratamento de esgotos de pequenas comunidades pelo método do escoamento superficial no solo. **Teoria e Prática na Engenharia Civil**, v.1, n.13, p. 69-79, 2009.

VON SPERLING, M. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. 3. ed. Belo Horizonte: DESA, UFMG, 2005. 452 p.

Recebido em: 16/09/2019

Aprovado em: 11/02/2020