

# CAPÍTULO 14

## TRATAMENTO AERÓBIO E ANAERÓBIO DA BIOMASSA: DO DESPERDÍCIO À OBTENÇÃO DE MATÉRIAS-PRIMAS QUE RECICLAM NUTRIENTES E ENERGIA<sup>10</sup>

Érika Flávia Machado Pinheiro  
Adriana Paulo de Sousa Oliveira  
Camila Ferreira Matos  
Sayonara Costa de Araújo  
Izabela Gouveia Nascimento  
David Villas Boas Campos

### RESUMO

O termo biomassa refere-se ao material orgânico de origem vegetal ou animal, constituída de carbono, hidrogênio, oxigênio, nitrogênio, entre outros elementos químicos. O termo *biomassa* é muito utilizado visando o seu uso na produção de energia. O uso da biomassa para a produção de energia não é recente e, atualmente, um maior destaque tem ocorrido devido às preocupações com o aquecimento global e a contribuição de combustíveis fósseis não-renováveis nas emissões de gases de efeito estufa. Ao considerar o uso da biomassa para a produção de energia, deve considerar se esse fim compete com a produção de alimentos para o consumo humano ou se é para a produção de energia de segunda geração, a qual utiliza material vegetal que não interfere com a cadeia de fornecimento de alimentos (por exemplo, o uso de resíduos de plantas ou produtos residuais). No país é crescente a utilização da palhada da cana-de-açúcar para a produção de energia de segunda geração. Mas, a retirada total da palhada da cana da superfície do solo para a produção de energia também pode comprometer a segurança do solo. O setor de produção de alimentos, fibras e energias, junto com a agroindústria, constitui um dos principais segmentos da economia brasileira. Essas atividades geram resíduos que, se não forem reaproveitados e reconduzidos a cadeia produtiva, representam desperdícios energéticos e econômicos para o setor produtivo e oferecem riscos ecológicos e sociais. Uma utilização direta dos resíduos agrícolas, de forma racional e viável econômica e ambientalmente, é a produção animal visando a alimentação (ração). Na pecuária também são gerados resíduos líquidos e sólidos que devem ser tratados visando à sua reutilização na cadeia agrícola. Um tratamento recomendado para tratar os resíduos da agropecuária é a digestão anaeróbia. Nesse tratamento é obtido como produto final energia (biogás), fertilizante ou substrato. Outra forma de tratamento utilizada visando a estabilização do material orgânico é a digestão aeróbia. Nesse capítulo serão abordadas essas duas formas de tratamento de resíduos agrícolas, com exemplos práticos de aplicação de cada técnica.

**PALAVRAS-CHAVE:** biomassa, economia circular, digestão aeróbia e anaeróbia, energia.

<sup>10</sup> Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola e Ambiental da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro

## INTRODUÇÃO

A agricultura teve início com a recessão do período glacial, em torno de 10.000 anos a.C., quando a população do mundo era de apenas 3 milhões de habitantes (MAZOYER & ROUDART, 2010; STEFFEN, 2015). A atual população mundial, de 7,7 bilhões, está projetada para crescer e alcançar cerca de 10 bilhões em 2050, de acordo com o relatório lançado pelas Nações Unidas (UNITED NATIONS, 2019), que aponta que o crescimento será maior nos países em desenvolvimento. A pergunta que fica, então, é como alimentar uma população crescente, aliado à capacidade de produzir alimentos de forma sustentável, garantindo a segurança alimentar, do solo, hídrica e energética, e ainda mitigar as mudanças do clima?

Nos séculos XVIII e XIX, com a modernização da agricultura e da pecuária, a produção de alimentos ampliou-se para uma escala muito maior. Os sistemas agrícolas ficaram mais intensivos e foi estimulado o uso de tecnologias nos países em desenvolvimento das regiões tropicais, processo conhecido como a Revolução Verde, que teve seu auge nos anos 70 no Brasil. Hoje, o setor de produção primária de alimentos, fibras e energias, junto com a agroindústria, constitui um dos principais segmentos da economia brasileira, com importância tanto no abastecimento interno quanto no externo. Essas atividades geram resíduos sólidos e líquidos (efluentes) que, se não forem reaproveitados e reconduzidos a cadeia produtiva, representam desperdícios para o setor produtivo e oferecem riscos ecológicos e sociais. O termo ‘resíduo agrícola’ é utilizado para se referir as substâncias orgânicas descartadas no processo de produção agrícola. Incluem os resíduos de plantas (folhas, talos, ponteiros, raízes) e de animais (estrupe de aves, bovinos, suínos), os produtos agrícolas deteriorados ou não aproveitados na etapa de pós-processamento, e outros produtos marginalizados pelo processamento industrial.

Uma utilização racional e viável econômica e ambientalmente dos resíduos sólidos gerados no setor agrícola é a produção animal, com o intuito de atender a nutrição animal. Na produção animal também são gerados resíduos que devem ser tratados visando o reuso da água, a obtenção de energia (biogás), produção de fertilizantes orgânicos ou substratos para a produção de mudas. Com relação aos resíduos líquidos, uma rota que deve ser seguida é o tratamento primário (filtros orgânicos), secundário (lagoas de estabilização, alagados construídos) e terciário (osmose reversa), antes do lançamento desses efluentes nos solos (fertirrigação) e corpos hídricos.

A recondução dos resíduos agropecuários na cadeia produtiva do setor primário é o principal objetivo. Enfatizam-se a possibilidade de se produzir energia através da produção de biogás, e biofertilizante a partir do reuso de matéria-prima, que até então era desperdiçada na propriedade, é uma realidade na atualidade em diversas propriedades rurais. O manejo de dejetos animais para aproveitamento do gás metano para a geração de energia é uma atividade com grande potencial, especialmente por já existir metodologia aprovada. Tudo isso visando sempre o ganho energético, econômico e ambiental da atividade agropecuária, objetivando tornar o balanço do ciclo de vida da produção agropecuária positivo.

## **PRODUÇÃO DE BIOMASSA NA AGROPECUÁRIA E POTENCIAL DE GERAÇÃO DE ENERGIA**

Até meados do século 19, o uso da madeira das florestas e resíduos agrícolas foi a fonte dominante de energia usada no mundo para a cocção de alimentos e o aquecimento do ambiente (SILVA & ARBILLA, 2018). Atualmente, o uso da biomassa está se destacando, devido às preocupações com o aquecimento global e a contribuição de combustíveis fósseis não renováveis nas emissões de gases de efeito estufa. O Brasil possui situação privilegiada para a produção de biomassa em larga escala, pois existem extensas áreas cultiváveis e condições climáticas favoráveis ao longo do ano.

A biomassa é a matéria orgânica de origem vegetal (fonte primária) ou animal (fonte secundária) que possui energia solar armazenada e que pode ser usada na produção de energia. Nem toda a produção primária passa a incrementar a biomassa vegetal, pois parte dessa energia acumulada é empregada pelo ecossistema na sua própria manutenção. As plantas, por exemplo, absorvem a energia solar e a transforma em energia química, num processo denominado fotossíntese. Quando a biomassa é queimada, a energia química armazenada é liberada na forma de calor. A biomassa pode ser queimada diretamente, ou convertida em biocombustíveis líquidos ou biogás que podem ser queimados como combustíveis. Suas vantagens são o baixo custo, é renovável, permite o reaproveitamento de resíduos e é menos poluente que outras formas de energias, como aquela obtida a partir de combustíveis fósseis. Como exemplos de biomassa e seus respectivos usos para a produção de energia, destacam-se:

- **Resíduos agrícolas:** podem ser queimados como combustível ou serem convertidos em biocombustíveis líquidos, ou podem ser utilizados para produção de fertilizantes orgânicos;
- **Resíduos de madeira e processamento de madeira (briquetes):** queimados para aquecer edifícios, produzir energia térmica para uso industrial e gerar eletricidade;

- **Restos de alimentos, restos de podas e varrição de quintal:** queimados para gerar eletricidade em usinas elétricas ou convertidos em biogás;
- **Esterco animal e esgoto humano:** convertido em biogás, que pode ser queimado como combustível.
- **Água residuária:** composta por fezes, urina, resíduos de ração, pelos, cama animal, produtos de limpeza e desinfecção. Possui grande potencial poluidor devido a elevada carga orgânica, altas concentrações de microrganismos patogênicos e metais pesados (PEREIRA, DEMARCHI & BUDIÑO, 2009). Pode ser tratada para ser usada como água de reuso para limpeza das baias e produção de fertilizante orgânico. Também pode ser matéria-prima para alimentar os biodigestores aeróbios e anaeróbios, com produção de fertilizantes e biogás.

Entre as diversas opções de utilização da biomassa, a mais interessante, do ponto de vista tecnológico e de maior significado econômico para o Brasil, é a produção de etanol da cana-de-açúcar, que é cultivada no país há quase 500 anos para a produção de açúcar. A matriz energética brasileira utiliza mais fontes renováveis de energia que no resto do mundo. Somando lenha e carvão vegetal, hidráulica, derivados de cana e outras renováveis, totalizam 41,1%, quase metade da nossa matriz energética.

## TRATAMENTO DA BIOMASSA PARA A AGRICULTURA

Os dejetos animais podem ser reciclados e reintegrados a cadeia produtiva após tratamento por processos de estabilização química, tais como: compostagem, vermicompostagem, biodigestão aeróbia e anaeróbia.

O tratamento de água residuária é basicamente dividido em quatro níveis: preliminar (remoção de sólidos grosseiros, gorduras e areia); primário (remoção de sólidos suspensos sedimentáveis); secundário (predomínio de mecanismos biológicos, visa a remoção de demanda de oxigênio) e terciário ou avançado (remoção de nutrientes, organismos patogênicos, metais pesados, sólidos inorgânicos dissolvidos e compostos não biodegradáveis) (VON SPERLING, 2014; VESILIND & MORGAN, 2015).

A seguir será discutido o tratamento de resíduos utilizando digestão anaeróbia e aeróbia, e apresentados alguns estudos desenvolvidos pelos autores.

## DIGESTÃO ANAERÓBIA

A digestão anaeróbia é um processo microbiológico anaeróbio, na qual toda a matéria orgânica é degradada produzindo uma mistura de gases como o metano, o dióxido de carbono, hidrogênio, amônia e o ácido sulfídrico, entre outros produtos (CHERNICHARO, 1997).

A principal vantagem em se adotar sistemas de tratamento anaeróbio de dejetos está relacionada à produção de energia, com a obtenção do biogás. O biogás é composto, principalmente, pelo gás metano e por uma mistura de outros gases (AMARAL et al., 2004), como o dióxido de carbono, hidrogênio, nitrogênio, gás sulfídrico e amônia (PERMINIO, 2013). Outro ponto importante da biodigestão anaeróbia é a estabilização química dos materiais orgânicos. Os resíduos orgânicos não estabilizados, se dispostos de forma inadequada, podem liberar odores atraindo vetores que podem causar doenças (moscas, ratos), emitir gases poluentes para a atmosfera e ainda, contaminar os solos e os aquíferos com organismos patogênicos (SARNIGHAUSEN & NARDI JÚNIOR, 2016). Sendo assim, o ciclo de produção de biogás e biofertilizante representa um sistema integrado de produção de energia renovável, tratamento de resíduos orgânicos, bem como a reciclagem e redistribuição de nutrientes.

Os pontos negativos da digestão anaeróbia consistem, principalmente, nos custos de implantação do sistema. A instalação e a manutenção dos biodigestores, assim como a necessidade de um técnico qualificado demanda um custo inicial elevado. Outro fator é o processo em si, onde os microrganismos metanogênicos, responsáveis pelo processo de digestão anaeróbia, são muito sensíveis às variações de temperatura. Isso demanda um constante monitoramento do sistema de digestão anaeróbia.

Uma variedade de matérias-primas biodegradáveis pode ser utilizada como substratos no processo de digestão anaeróbia, tais como: o esterco animal, os resíduos agrícolas, águas residuárias, os efluentes industriais, os resíduos alimentares, o lodo de esgoto, a vinhaça, o soro de leite, dentre outros (SAWATDEENARUNAT et al., 2015) (Figura 1). Como material base para produção de biofertilizantes utiliza-se o esterco animal, uma vez que se encontra prontamente disponível para uso nas propriedades rurais, além de ser rico em macro e micronutrientes na sua composição e possuir microrganismos que atuaram no processo de digestão (PROBST, 2009).

O manejo adotado na produção animal também influencia na qualidade do biogás e do biofertilizante produzido. Um trabalho que constatou esse efeito foi realizado por Matos et al. (2017a) ao avaliarem a produção de biogás proveniente da digestão anaeróbia de dejetos

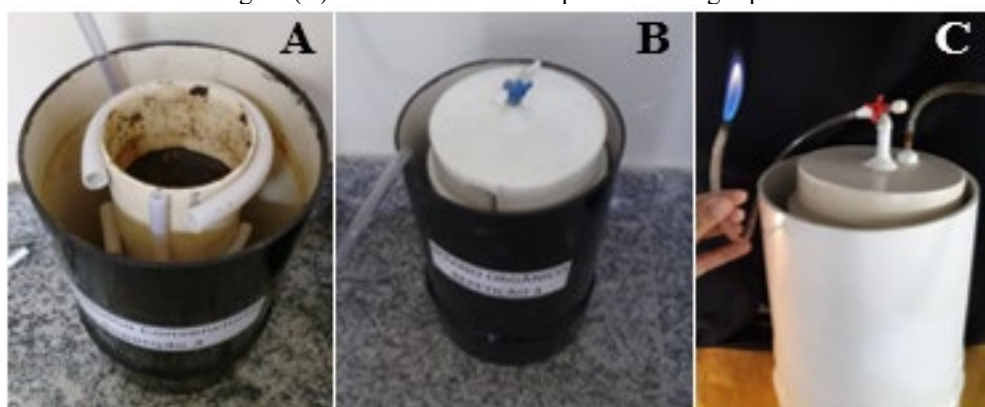
bovinos leiteiros, sob sistema orgânico (DBSO) e convencional (DSBC) de produção (Tabela 1 e Figura 2). Os autores observaram uma produção acumulada de biogás de 6,18 L para os dejetos bovinos provenientes do sistema orgânico e quase o dobro (11,14 L) quando o biodigestor era alimentado com dejetos bovinos oriundos do manejo convencional (Figura 2). O potencial médio de produção de biogás também foi maior quando se utilizava esterco animal sob sistema convencional de produção. Os autores destacaram que a nutrição animal, diferente entre os sistemas de manejo, foi um fator importante na diferença da produção de biogás produzido. No tratamento DBSC, os animais eram alimentados com uma combinação de concentrado e volumoso e no tratamento DBSO, os animais alimentavam-se apenas de volumoso.

**Figura 1:** Detalhamento da biomassa vegetal e animal que pode ser utilizada no processo de biodigestão anaeróbia e, seus respectivos produtos.



Fonte: Adaptado de Tanigawa (2017).

**Figura 2:** Detalhe do interior (A) e do exterior (B) dos protótipos de biodigestores de bancada utilizados. A última figura (C) refere-se ao teste de queima do biogás produzido.



Fonte: Matos (2017).

**Tabela 1:** Potencial médio de produção de biogás (por kg de substrato, de ST e de SV adicionado) de esterco bovino sob manejo orgânico e convencional de produção de leite, com tempo de retenção hidráulica (TRH) de 210 dias.

| Tratamentos | Potencial médio de produção de biogás   |                                       |   |
|-------------|---|---------------------------------------|---|
|             | Substrato<br>(L de biogás/kg substrato) | Sólidos Totais<br>(L de biogás/kg ST) | Sólidos Voláteis<br>(L de biogás/kg SV) |
| DBSO        | 0,1 B                                   | 1,6 B                                 | 1,75 B                                  |
| DBSC        | 0,2 A                                   | 2,6 A                                 | 3,05 A                                  |

\* DSBO - digestão anaeróbia de dejetos bovinos leiteiros, sob sistema orgânico e DSBC - digestão anaeróbia de dejetos bovinos leiteiros, sob sistema convencional de produção. Médias seguidas de mesma letra, nas colunas, não diferem estatisticamente entre si pelo teste t (P=0,05). Fonte: Matos et al. (2017).

Os autores Matos et al. (2017b) também avaliaram se o manejo animal (orgânico e convencional) influenciava na qualidade química do biofertilizante produzido. Tendo em vista os diferentes sistemas de manejos, o material de entrada no biodigestor (afluente) dos diferentes tratamentos já apresentava características distintas entre si. Os autores observaram um aumento nos valores de pH para os dois tratamentos após o processo de digestão anaeróbia, demonstrando poder haver transformação dos ácidos contidos nos afluentes em produtos gasosos (SILVA et al., 2007; SOARES et al., 2017). Observaram, também, uma redução da condutividade elétrica, indicando uma possível diminuição na quantidade de sais dissolvidos durante o processo de digestão anaeróbia. Os biofertilizantes produzidos a partir de DBSO e DBSC não apresentaram elevadas concentrações de metais pesados, não ultrapassando os limites estabelecidos pela Legislação do CONAMA N° 375/06. Porém, com relação ao DECRETO N° 4.954 que diz respeito à máxima concentração de contaminantes permitidas nos fertilizantes orgânicos, o DBSC apresentou teores de Cd acima do permitido pela lei (Tabela 2). O biofertilizante oriundo de DBSO apresentou menores teores dos metais pesados Pb e Cd, o que confere a esse biofertilizante maiores vantagens em relação ao DBSC (Tabela 2).

Os maiores níveis de metais pesados apresentados no DBSC podem ser justificados pelo uso de ração comercial, além da presença de vacinação (prevenção de raiva, carbúnculo assintomático e aftosa) e uso de antibióticos, quando necessário no manejo. Apesar de também receberem as vacinas necessárias na criação animal devido à obrigatoriedade das leis, os animais pertencentes ao sistema orgânico de produção de leite não recebem antibiótico, sendo tratados por homeopatia (FLORIÃO, 2013). Esse tipo de tratamento não elimina resíduos presentes em medicamentos utilizados em sistemas convencionais, favorecendo, assim, como observado nos resultados, uma melhor qualidade nos dejetos de bovinos sob sistema orgânico. Além disso, a alimentação é feita com o uso de pasto orgânico, sem a utilização de rações comerciais, que apresentam elevados teores de metais pesados.

**Tabela 2:** Valores médios de micronutrientes e metais pesados nos biofertilizantes oriundos de dejetos de bovinos, sob sistema orgânico e convencional de produção. E, a concentração máxima permitida pela Legislação do CONAMA N° 375/06 e os limites máximos de contaminantes admitidos em fertilizantes orgânicos pelo DECRETO N° 4.954.

| Metais   | DBSO       | DBSC      | CONAMA 375/06 | DECRETO 4.954 |
|----------|------------|-----------|---------------|---------------|
| (mg/kg)  |            |           |               |               |
| Bário    | 138, 81 A  | 83,56 B   | 1300          | -             |
| Cádmio   | 0,04 B     | 8,22 A    | 39            | 3             |
| Chumbo   | 22,06 B    | 28,40 A   | 300           | 150           |
| Cobre    | 13,83 B    | 50,03 A   | 1500          | -             |
| Níquel   | 4,96 B     | 8,22 A    | 420           | 70            |
| Ferro    | 1.423,73 A | 617,34 B  | -             | -             |
| Manganês | 626,38 B   | 636,16 A  | -             | -             |
| Zinco    | 110, 86 B  | 240, 23 A | 2800          | -             |

\*Médias seguidas de mesma letra, nas colunas, não diferem estatisticamente entre si pelo teste t (P= 0,05).

Fonte: Matos et al. (2017b).

Outros estudos destacam a mudança na composição química do biofertilizante produzido após a digestão anaeróbia, enfatizando sua potencialidade com adubo orgânico. Em um estudo de digestão anaeróbia de dejetos de suínos com e sem separação da fração sólida em diferentes tempos de retenção hidráulica, Orrico Jr. et al. (2009) verificaram um acréscimo na concentração dos macros e micronutrientes no efluente em comparação com o afluente, com exceção dos teores de N, Fe, Zn e Cu para o substrato com separação da fração sólida, demonstrando a eficiência do processo de digestão anaeróbia. Os autores justificam esse fato em função da redução da fração orgânica por meio da produção de biogás, que acarreta a concentração dos constituintes inorgânicos.

Em estudo para verificar a influência da aplicação de biofertilizante bovino sobre a produtividade do capim Mombaça, Simonetti et al. (2016) observaram que os tratamentos que



receberam a maior dosagem de biofertilizante ( $200 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ ) apresentaram maiores valores para a produtividade de matéria seca, matéria verde e no teor de proteína.

Tratando-se da redução de patógenos após a digestão anaeróbia, vários estudos evidenciam a eficiência na sua diminuição. AMARAL et al. (2004) observaram reduções de bactérias dos grupos coliformes totais e fecais (acima de 99,0%), demonstrando a eficiência do processo de digestão anaeróbia de dejetos de aves de postura. Amorim et al. (2004) observaram redução do número de coliformes totais (99,99%) e coliformes fecais (100%) ao avaliarem a digestão anaeróbia de dejetos de caprinos obtidos nas diferentes estações do ano.

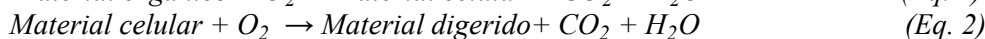
A caracterização do substrato é um passo inicial e fundamental para a digestão anaeróbia. Devido ao crescente interesse nos estudos da digestão anaeróbia, as questões envolvendo o tema constituem um campo importante de desafios a serem solucionados (NEVES, 2014). O futuro do tratamento de resíduos deve, além de atender objetivos de melhorar a qualidade do ar, do solo e da água, da saúde humana e animal, abordar a recuperação de nutrientes, o aproveitamento da energia e a conservação da água (LEITÃO & SILVA, 2018). Os modelos de produção sustentáveis conduzem mudanças nos sistemas tradicionais de produção, além de proporcionarem incrementos de lucro à atividade, através da geração de biogás e biofertilizante (LEITÃO & SILVA, 2018).

Dependendo do objetivo de se utilizar a digestão anaeróbia, ou seja, para a produção de biogás ou biofertilizante, deve-se avaliar a matéria-prima e o manejo em que a mesma foi gerada, pois pode-se encontrar um produto final com características adequadas ou não para aplicação no solo. Sendo assim, estudos que abordem mudanças no manejo animal, condições ambientais e demais fatores externos que possam influenciar são necessários para otimizar o processo de digestão anaeróbia.

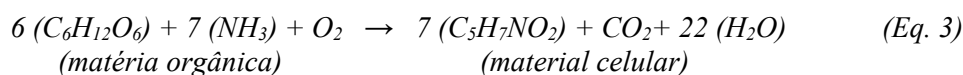
## **DIGESTÃO AERÓBIA**

A digestão aeróbia é um tratamento biológico onde o resíduo é submetido à aeração por um determinado período de tempo até que ocorra a estabilização do material orgânico e a oxidação do material microbiano (WEF, 2007; SHAO et al., 2013). Dessa forma, a digestão aeróbia ocorre em um reator biológico onde o resíduo orgânico é submetido à aeração suficiente para atender a demanda de oxigênio dos microrganismos, já presentes nos resíduos ou inseridos por meio de inóculo. Com elevada fonte de C e nutrientes, fornecidos pelo material orgânico, e oxigênio para a respiração, são criadas condições propícias para a intensificação da atividade microbiana enquanto o material orgânico é consumido. O material orgânico presente na água

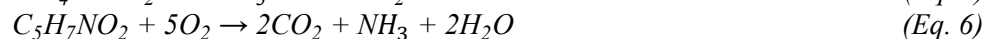
residuária é utilizado como fonte de energia pelos microrganismos. À medida que esse consumo aumenta, ocorre uma redução significativa nos teores de substrato e como consequência, os microrganismos metabolizam o próprio material celular o que promove uma oxidação da biomassa. As Equações 1 e 2 descrevem de forma genérica essas reações (SHAMMAS & WANG, 2007).



A digestão aeróbia pode então ser resumida em duas etapas principais, a primeira é caracterizada por um metabolismo predominante de síntese, onde o material orgânico presente na água residuária é utilizado como fonte de energia pelos microrganismos ocorrendo a estabilização do material biodegradável (Equação 3) (WEF, 2007).



Na etapa seguinte, predomina a respiração endógena. No início dessa fase a população de microrganismos é máxima, porém ocorre uma baixa disponibilidade de substrato. Como consequência, os microrganismos menos resistentes não sobrevivem e liberam polissacarídeos oriundos da membrana plasmática. Esses polissacarídeos são utilizados como matriz onde os microrganismos se aglomeram formando flocos. À medida que o substrato se torna ainda mais escasso, a principal fonte de alimento disponível é o próprio protoplasma celular ocorrendo a oxidação do material microbiano (WEF, 2007). As Equações 4, 5 e 6 descrevem as reações que ocorrem na respiração endógena. Nessa fase ocorre a liberação do íon amônio ( $NH_4^+$ ) que, combinado com o dióxido de carbono ( $CO_2$ ), forma o bicarbonato de amônio ( $NH_4HCO_3$ ) podendo aumentar a alcalinidade (Equação 4). Durante a conversão do  $NH_4^+$  para nitrato ( $NO_3^-$ ), no processo denominado de nitrificação, a reação consome a alcalinidade e pode tornar o meio ácido (Equação 5). No final do processo, o material celular é oxidado a  $CO_2$ ,  $H_2O$  e também  $NH_3$  que pode ser utilizada na nitrificação (Equação 6) (WEF, 2007).



A redução dos teores do substrato e da biomassa verificados no decorrer da digestão aeróbia podem ser inferidos por meio dos teores de sólidos voláteis (SV). A variação na concentração dos SV biodegradáveis em um digestor aeróbio de mistura completa pode ser descrita por uma cinética de primeira ordem, onde a taxa de reação é diretamente proporcional

à concentração de substrato (METCALF & EDDY, 2015). Para um bom desempenho da digestão aeróbia são necessários estudos preliminares para a determinação, por exemplo, dos coeficientes cinéticos e da biodegradabilidade do material a ser tratado. Mas, de forma geral, é recomendado adotar algumas condições (BRASIL, 2006; MATOS, 2014; JORDÃO & PESSÔA, 2014; METCALF & EDDY, 2015):

– **Temperatura:** quanto maior a temperatura, maior é a taxa de conversão do material orgânico. Para garantir as condições mínimas de digestão, a temperatura deve ser da ordem de 20 °C. Em temperaturas inferiores a 10°C o processo de estabilização praticamente cessa.

– **Potencial hidrogeniônico (pH):** deve ser mantido próximo da neutralidade (entre 6,5 e 7,5), pois é nesta faixa que o meio se torna favorável ao crescimento dos microrganismos decompositores da matéria orgânica e favorece as reações químicas e bioquímicas.

– **Idade do lodo:** na digestão aeróbia, sem recirculação de lodo, a idade do lodo é igual ao tempo de detenção, podendo variar de 12 a 60 dias. Quando se objetiva a remoção de organismos patogênicos é recomendado um tempo de detenção maior que 40 dias.

– **Agitação:** a agitação no interior do reator é um fator importante que tem por finalidade a não deposição de sólidos que podem favorecer as condições anaeróbias. No caso de aeração mecânica, sugere-se de 20 a 40 W m<sup>-3</sup> por volume do reator e no caso de ar difuso de 0,02 a 0,04 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup> minuto<sup>-1</sup>.

– **Concentração de oxigênio:** deve estar na faixa de 1 a 2 mg L<sup>-1</sup>, valores maiores que esses indicam uma aeração excessiva e, conseqüentemente, um maior consumo de energia e maior custo de operação. Por outro lado, valores inferiores conferem uma baixa margem de segurança caso o consumo de oxigênio seja intensificado. Além disso, lodos digeridos nessas condições apresentaram melhor desidratabilidade.

– **Potencial de oxirredução:** deve ser positivo para garantir um ambiente oxidante. Valores de potencial de oxirredução próximos de zero favorecem as condições anóxicas e abaixo de zero indicam anaerobiose e pode provocar a emissão de odores desagradáveis.

– **Concentração de sólidos:** a concentração de sólidos totais acima de 3% compromete a transferência do oxigênio, dificultando a assimilação pelos microrganismos. Para sistemas que utilizam o oxigênio puro, a concentração de sólidos pode atingir 5%.

– **Redução dos sólidos voláteis:** é desejada uma eficiência acima de 38%. Também é recomendado que a razão entre os sólidos voláteis e os sólidos totais (SV/ST) seja inferior a 0,7.

A literatura brasileira referente à digestão aeróbia é escassa, provavelmente, devido aos custos de operação do sistema. No entanto, é notável o elevado desempenho da técnica. Os estudos conduzidos por Oliveira (2018) demonstraram que a digestão aeróbia da água residuária da suinocultura (ARS), gerada no Setor de Suinocultura da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ), promoveu a estabilização do material orgânico e reduziu significativamente os teores de coliformes termotolerantes, adequando a fração sólida sedimentada para a aplicação no solo, enquanto que a fração líquida pode ser utilizada na fertirrigação ou como água de limpeza dos ambientes.

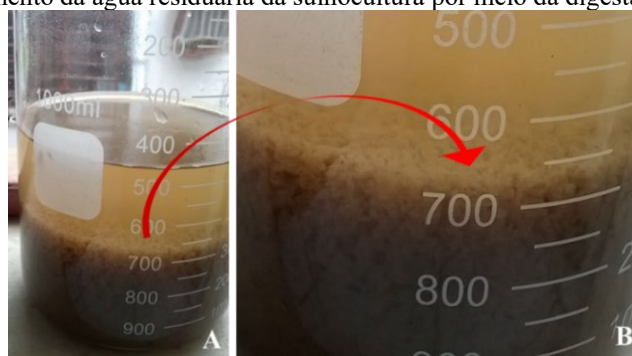
Para alcançar essas características, a ARS foi submetida à aeração por um período de 32 dias. Devido às temperaturas mais elevadas verificadas no decorrer do tratamento (média de 30,2°C), esse período foi inferior aos 40 dias recomendados. Os resultados da pesquisa mostraram a formação de flocos biológicos (Figura 3) e mostram, ainda, uma alteração da coloração do efluente com a possível formação de ácidos fúlvicos (Figura 3 e 4), esse componente das substâncias húmicas apresenta uma elevada capacidade de troca de cátions, o que potencializa a utilização do resíduo tratado na adubação do solo (CARON et al., 2015; OLIVEIRA, 2018). Resultados semelhantes foram reportados por outros autores, sendo verificada a formação de substâncias húmicas no lodo digerido aerobicamente, em alguns casos, em quantidades acima do observado para os processos anaeróbios (SHAO et al., 2013; DU & LI et al., 2017). Também foi verificada uma elevada taxa de evaporação, com valor médio de 0,42 L dia<sup>-1</sup>, o que promoveu uma concentração dos sólidos (Figura 4) (OLIVEIRA, 2018).

Com relação aos flocos observados (Figura 3), Morales et al. (2013) também verificaram flocos granulares após nove dias de tratamento dos dejetos de suínos em sistema aeróbio. Os flocos formam-se após a escassez de substrato, utilizando os polissacarídeos oriundos dos microrganismos menos resistentes como matriz de suporte. Enquanto a matéria nutritiva está disponível, os microrganismos mantem energia para locomoção o que favorece a dispersão dos mesmos. Por esses motivos só foi possível verificar a formação dos flocos decorridos dez dias de tratamento. Nesse estudo conduzido por Oliveira (2018) conclui-se que o período de 32 dias de tratamento foi suficiente para alcançar os resultados almejados. Devido às temperaturas mais elevadas verificadas no decorrer do tratamento, esse período foi inferior aos 40 dias, que é o recomendado na Resolução CONAMA N° 375/2006, reduzindo assim, os custos de operação. A fração líquida, resultado da digestão aeróbia da ARS, apresentou remoção significativa de sólidos suspensos, demanda química de oxigênio, coliformes termotolerantes e

metais, porém a remoção de N total não foi suficiente para adequar o efluente aos padrões estabelecidos para lançamento nos corpos hídricos. Outra alternativa de disposição seria a fertirrigação com a possibilidade de fornecer água e nutrientes para as culturas. Para a fração sólida, foram verificados acréscimos nas concentrações de N total e ST, o que potencializa a utilização do resíduo na adubação do solo. Também foram verificadas remoções significativas de metais, coliformes termotolerantes e redução da relação SV/ST, que indica a estabilização dos compostos orgânicos, adequando a fração sólida aos limites estabelecidos na Resolução CONAMA N° 375/2006 para a aplicação no solo (OLIVEIRA, 2018).

Oliveira (2018) recomendou para a digestão aeróbia o uso de inóculo, a análise de estruvita na fração sólida e a investigação da desidratabilidade utilizando, por exemplo, o geotêxtil. A autora conclui que a utilização da digestão aeróbia como única etapa de tratamento para a ARS deve ser feita com cautela devido aos custos de operação, mas a técnica pode ser utilizada pós-tratamento, dessa forma é possível reduzir o consumo de energia que demandam os dispositivos de aeração e obter um efluente clarificado.

**Figura 3:** Formação de flocos biológicos (A) e um maior detalhamento dos mesmos (B) observados após 10 dias de tratamento da água residuária da suinocultura por meio da digestão aeróbia.



Fonte: Oliveira (2018).

**Figura 4:** Redução do volume e alteração da cor da água residuária da suinocultura durante a digestão aeróbia. No início do processo de digestão aeróbia, o efluente apresentava coloração preta (A), após os 12 dias (B) e 23 dias (C) de tratamento o efluente apresentou coloração mais clara.



Fonte: Oliveira (2018).

Em outro estudo, também conduzido na UFRRJ, foi aplicado o coagulante tanino como um pré-tratamento da ARS. O lodo sedimentado após a coagulação foi submetido aos processos de digestão aeróbia e anaeróbia. Os resultados mostraram que, após 30 dias de tratamento, foi possível observar uma maior redução da condutividade elétrica no processo de digestão aeróbia se comparada com a anaeróbia, com valores médios de  $2,12 \text{ dS cm}^{-1}$  e  $3,19 \text{ dS cm}^{-1}$ , respectivamente. Esses resultados foram atribuídos a volatilização da amônia uma vez que o pH permaneceu básico no decorrer do tratamento aeróbio e a aeração foi constante. A aplicação de resíduos com elevada condutividade elétrica provoca problemas osmóticos às culturas e a salinização do solo, por esses motivos, reduzir os valores desse parâmetro é fundamental para possibilitar o aproveitamento de resíduos agrícolas e efluentes na adubação do solo.

Os resultados desses estudos indicam que a digestão aeróbia é adequada para o tratamento de efluentes para uma posterior aplicação no solo. No entanto, acredita-se que a utilização da digestão aeróbia, como única etapa de tratamento para os efluentes gerados no meio rural, é inviável devido aos custos de operação. A técnica pode ser utilizada em conjunto

com a digestão anaeróbia. Dessa forma, é possível reduzir o consumo de energia que demandam os dispositivos de aeração e, ao mesmo tempo, é possível obter produtos de interesse para o produtor rural como o efluente clarificado e um composto para adubação do solo e, assim, promover arranjos produtivos mais sustentáveis.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este capítulo relata uma apresentação dos sistemas de tratamento de resíduos comumente utilizados. A escolha da técnica de tratamento está relacionada aos objetivos do produtor rural, ou seja, se o produtor almeja reciclar a biomassa visando a produção de energia a ser utilizada na propriedade rural ou se o produtor objetiva a produção de fertilizante orgânico. O sistema de manejo animal influencia as características dos resíduos gerados e, conseqüentemente, o fim a que se destina.

## REFERÊNCIAS

AMARAL, C. M. C. do.; AMARAL, L. A. do; JUNIOR, J. de L; NASCIMENTO, A. A.; FERREIRAS, de S. D.; MACHADO, M. R. F. Biodigestão anaeróbia de dejetos de bovinos leiteiros submetidos a diferentes tempos de retenção hidráulica. **Revista Ciência Rural**, Santa Maria, v. 34, n.6, 2004.

AMORIM, A. C.; LUCAS JÚNIOR, J.; RESENDE, K. T. Efeito da estação do ano sobre a biodigestão anaeróbia de dejetos de caprinos. **Revista Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.24, n.1, p.16-24, 2004.

BRASIL. Conselho Nacional Do Meio Ambiente - CONAMA. Resolução nº 375, de 29 de agosto de 2006. Define critérios e procedimentos, para o uso agrícola de lodos de esgoto gerados em estações de tratamento de esgoto sanitário e seus produtos derivados, e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Brasília-DF, 30 de agosto de 2006.

CARON, V. C.; GRAÇAS, J. P.; CASTRO, P. R. C. **Condicionadores do solo: ácidos húmicos e fúlvicos**. Série Produtor Rural, nº 58. Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 46p. 2015.

CHERNICHARO, C. A. L. **Princípios do tratamento biológico de águas residuárias; reatores anaeróbios**. 1ª ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, UFMG, v. 5, 1997.

DU, H.; LI, F. Characteristics of dissolved organic matter formed in aerobic and anaerobic digestion of excess activated sludge. **Chemosphere**, 168:1022-1031, 2017.

FLORIÃO, M. M. **Boas práticas em bovinocultura leiteira com ênfase em sanidade preventiva**. Niterói: Programa Rio Rural. Manual Técnico; 38, 2013. 50 p.

JORDÃO, E. P; PESSÔA, C. A. **Tratamento de Esgotos Domésticos**. 7ª Edição. Synergia: Rio de Janeiro, 1050p. 2014.

LEITÃO, F. O.; DA SILVA, W. H. Geração de energia e renda a partir do tratamento dos resíduos da suinocultura. **Informe Gepec.**, 22:116-132, 2018.

MATOS, A. T. **Tratamento e aproveitamento agrícola de resíduos sólidos**. 1ª Edição. Universidade Federal de Viçosa: Viçosa, 241p. 2014.

MATOS, C. F.; PAES, J. L.; PINHEIRO, E. F. M.; CAMPOS, D. V. B. Biogas production from dairy cattle manure, under organic and conventional production systems. **Eng. Agríc.**, ;37:1081-1090, 2017a.

MATOS, C. F.; PINHEIRO, E. F. M.; PAES, J. L.; LIMA, E.; CAMPOS, D. V. B. Avaliação do potencial de uso de biofertilizante de esterco bovino resultante do sistema de manejo orgânico e convencional da produção de leite. **Revista Virtual de Química**, 9:1957-1969, 2017b.

MAZOYER, M.; ROUDART, L. **História das agriculturas no mundo: Do neolítico à crise contemporânea**. 1ª.ed., UNESP: São Paulo, 2010.

METCALF, L.; EDDY, H. P. **Tratamento de Efluentes e Recuperação de Recursos**. 5ª Edição. New York: McGraw Hill. 1819 p. 2003.

MORALES, N.; FIGUEROA, M.; FRA-VÁZQUEZ, A.; VAL DEL RÍO, A.; CAMPOS, J. L.; MOSQUERA-CORRAL, A.; MÉNDEZ, R. Operation of an aerobic granular pilot scale SBR plant to treat swine slurry. **Process Biochemistry**, v. 48, p. 1216–1221. 2013.

NEVES, V. T. C. **Digestão anaeróbia da biomassa residual de microalgas pós-extração de lipídios**. 2014. 91p. Dissertação (Mestrado em Meio Ambiente) – Universidade Federal da Bahia, 2014.

OLIVEIRA, A. P. S. **Tratamento da água residuária da suinocultura utilizando filtro orgânico e digestão aeróbia**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola e Ambiental) – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, 2018.

ORRICO JUNIOR, M. A. P.; ORRICO, A. C. A.; LUCAS JUNIOR, J. Biodigestão anaeróbia de dejetos de suínos com e sem separação da fração sólida em diferentes tempos de retenção hidráulica. **Eng. Agríc.**, 29: 474-482, 2009.

PEREIRA, E. R.; DEMARCHI, J. J. A. A.; BUDIÑO, F. E. L. Biodigestores - Tecnologia para o manejo de efluentes da pecuária. **Infobibos - Informações Tecnológicas**, Campinas - SP, v. único, p. 1 - 5, nov. 2009.

PERMINIO, G. B. **Viabilidade do uso de biodigestor como tratamento de efluentes domésticos descentralizado**. 2013. 57 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização em Formas Alternativas de Energia) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2013.

PROBST, R.; QUADROS, S. A. F.; ERPEN, J. G.; VINCENZI, M. L. Produção de mudas de espécies forrageiras no sistema hidropônico de leite flutuante (floating) com solução nutritiva à base de biofertilizante ou adubo solúvel. **Acta Scientiarum Animal Sciences**, v. 31, n. 4, p. 349-355, 2009.



SARNIGHAUSEN, V. C. R.; NARDI JUNIOR, G. Potencial de produção de metano em sistemas de tratamento e de biodigestão anaeróbia de dejetos de bovinos. **Tekhne e Logos**, Botucatu, v.7, n.2, 2016.

SAWATDEENARUNAT, C.; SURENDRA, K. C.; TAKARA, D.; OECHSNER, H.; KHANAL, S. K. Anaerobic digestion of lignocellulosic biomass: challenges and opportunities. **Bioresour. Technol.**, 178:178-186, Feb 2015.

SHAO, L.; WANG, T.; LI, T.; LÜ, F.; HE, P. Comparison of sludge digestion under aerobic and anaerobic conditions with a focus on the degradation of proteins at mesophilic temperature. **Bioresource Technology**, 140:131-137, 2013.

SHAMMAS, N.K.; WANG, L.K. Aerobic Digestion. In: WANG, L. K.; SHAMMAS, N. K.; HUNG, Y. T. (eds) **Biosolids Treatment Processes**. Handbook of Environmental Engineering, vol 6. Humana Press, 2007.

SILVA, W. T. L.; FAUSTINO, A. S.; NOVAES, A. P. **Eficiência do processo de biodigestão em fossa séptica biodigestora inoculada com esterco de ovino**. Documentos Embrapa Instrumentação Agropecuária. 2007.

SILVA, C. M.; ARBILLA, G. Antropoceno: Os Desafios de um Novo Mundo. **Revista Virtual de Química**, 10 (6), 1619-1647, 2018.

SIMONETTI, A.; MARQUES, W. M.; COSTA, L. V. C. Produtividade de Capim-Mombaça (*Panicum Maximum*), com diferentes doses de Biofertilizante. **Brazilian Journal of Biosystems Engineering.**, 10:107-115, 2016.

SOARES, M. T. S.; CALHEIROS, D. F. F.; GALVANI, F.; FEIDEN, A.; CAMPOLIN, A. I.; DA SILVA, W. T. L. Parâmetros físico-químicos e eficiência de fossa séptica biodigestora na redução da carga orgânica de esgoto originado de água doce ou salobra, na Borda Oeste do Pantanal. *Cadernos de Agroecologia*. 2017.

STEFFEN, W.; BROADGATE, W.; DEUTSCH, L.; GAFFNEY, O.; LUDWIG, C. The trajectory of the Anthropocene: The great acceleration. **The Anthropocene Review**, v. 2, n. 81, 2015.

TANIGAWA, S. **Fact Sheet - Biogas: Converting Waste to Energy**. Environmental and Energy Study Institute (EESI), Washington, DC, Oct. 2017.

UNITED NATIONS – Department of Economic and Social Affairs: Population Division. **World Population Prospects 2019: Highlights** (ST/ESA/SER.A/423), 2019.

VESILIND, P. A.; MORGAN, S. M. **Introdução a Engenharia Ambiental**. Tradução da 2ª ed. Norte – Americana. Editora: Cengage Learning Nacional, 2015. 456p.

VON SPERLING, M. **Introdução à Qualidade das Águas e ao Tratamento de Esgotos (Princípios do Tratamento Biológico de Águas Residuárias)**. v. 1., 4ª ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2014. 472p.

WEF – Water Environment Federation: **Operation of Municipal Wastewater Treatment Plants, Manual of Practice**. No. 11, Volume III: Solids Processes, Sixth Edition, Chapter 31 Aerobic Digestion. 2007.