Produtividade em diferentes tipos de leitos de secagem

Productivity of different types of sludge drying beds

▮ **Data de entrada:**
18/06/2020

▮ **Data de aprovação:**
10/11/2020

Adrianus van Haandel^{1*} | Silvânia Lucas dos Santos²

DOI: <https://doi.org/10.36659/dae.2021.025>

ORCID ID

Haandel A <https://orcid.org/0000-0002-9937-6715>

Santos SL <https://orcid.org/0000-0002-6905-3966>

Resumo

O reator UASB produz um lodo concentrado que já sai do reator estabilizado, contudo precisa passar por um processo de secagem para seu uso posterior. Neste trabalho, descreve-se uma investigação experimental em escala piloto que visa estabelecer o desempenho de leitos de secagem de lodo anaeróbico. Três tipos de leito foram pesquisados: (1) leitos ao ar livre; (2) leitos cobertos (coberturas opaca e transparente); e (3) leitos com revolvimento de lodo ao ar livre. Desenvolveu-se um método experimental para determinar a produtividade de leitos de secagem. A produtividade é a massa de lodo seco que pode ser produzida em um leito por unidade de área e por unidade de tempo. Estabeleceu-se que a produtividade depende, além do tipo de leito, de três fatores: (1) a taxa de evaporação de água; (2) a carga de sólidos aplicada; e (3) a umidade final desejada. Foi desenvolvida uma expressão que permite calcular a produtividade de leitos em função dessas três variáveis. Os resultados mostraram que a produtividade de leitos cobertos com material transparente é muito parecida com a de leitos sem a cobertura, mas a produtividade de leitos com cobertura opaca é muito menor. Em contraste, o revolvimento do lodo resulta num aumento significativo da produtividade de leitos. Também foi analisada a influência da água de chuva sobre a produtividade de leitos de secagem. Estabeleceu-se que a água fica incorporada quantitativamente no lodo enquanto a umidade do lodo é maior que 65%. Para umidades menores, a água de chuva em grande parte percola e tem relativamente pouca influência sobre a produtividade dos leitos.

Palavras-chave: Secagem de lodo. Tipos de leitos. Produtividade. Carga de sólidos.

Abstract

The UASB reactor produces a concentrated sludge that leaves the reactor stabilized, however it needs to go through a drying process for its later use. This paper describes an experimental investigation on a pilot scale that aims to establish the performance of anaerobic sludge drying beds. Three types of beds were researched: (1) outdoor beds; (2) covered beds (opaque and transparent coverings); and (3) beds with sludge tilling in the open air. An experimental method was developed to determine the productivity of drying beds. The productivity is the dry sludge mass that can be produced in a bed per unit area and per unit. It was established that the productivity depends along with the type of bed, on three factors: (1) the rate of water evaporation; (2) the applied solids loading rate and (3) the desired final humidity. An expression was developed that allows calculating the productivity of beds according to these three variables. The results of the experimental investigation show that the productivity of beds covered with transparent material is very similar to that of beds without coverage, but the productivity of beds with opaque coverage

¹ Universidade Federal de Campina Grande - UFCG - Campina Grande - Paraíba - Brasil.

² Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN - Natal - Rio Grande do Norte - Brasil.

* **Autor correspondente:** adrianusvh@gmail.com.

is much lower. In contrast, sludge tilling results in a significant increase of bed productivity. The influence of rain on the productivity of drying beds was also analyzed. It was established that the water is incorporated quantitatively in the sludge when the sludge humidity is greater than 65%. For lower humidity, rainwater largely percolates and has relatively little influence on bed productivity.

Keywords: Sludge drying. Drying bed types. Bed productivity. Solids load.

1 INTRODUÇÃO

O lodo produzido em sistemas de tratamento anaeróbio de esgoto tem dois aspectos indesejáveis: o baixo teor de sólidos e o alto teor de organismos patogênicos. O lodo gerado em um reator UASB tratando esgoto se apresenta como um fluido mais viscoso que a água com uma concentração de 50 a 100 g STS.L⁻¹, isto é, uma umidade de 90 a 95%. Antes de transportar o lodo do sistema de tratamento para seu destino final, convém aumentar a fração de sólidos, transformando-o num sólido mais facilmente manejável e ao mesmo tempo diminuindo sua massa e seu volume (USEPA, 2003; VAN HAANDEL e VAN DER LUBBE, 2019). No caso de sistemas anaeróbios, a estabilização do lodo ocorre no próprio sistema de tratamento, de modo que o processamento se resume à secagem eficiente do lodo de excesso (VAN HAANDEL e VAN DER LUBBE, 2019).

Quanto à secagem, distinguem-se basicamente dois tipos: secagem mecânica e secagem natural. Na secagem mecânica há uma unidade que separa os sólidos (o lodo de excesso) da água para produzir uma torta semissólida com um teor de água de 20%, aproximadamente. Exemplos de unidades de secagem mecânica são: o filtro prensa, o filtro de esteira e a centrífuga. A secagem mecânica pode ser seguida por secagem natural para a redução adicional da umidade da torta, reduzindo-se, assim, os custos com transporte e eventualmente abrindo-se a possibilidade de usar a energia química do lodo para geração de energia elétrica (ANDREOLI et al., 2014; SANTOS et al., 2017; LOBATO et al., 2018).

A remoção de água do lodo se dá por meio de dois mecanismos distintos em leitos de secagem: percolação e evaporação. Normalmente a maior parte da água é removida por percolação, um processo que cessa quando o lodo atinge uma umidade de 80% aproximadamente. Para atingir uma umidade menor é necessário que água evapore. Em leitos de secagem, a umidade de lodo pode ficar muito baixa, menor do que 10%, mas para isso é necessário um tempo considerável para evaporação de água, sendo, portanto, o tempo de evaporação maior do que o de percolação. Na prática, é importante que se reduza ao máximo o teor de água no lodo, porque a presença de água aumenta o custo de transporte e da consequente disposição final do lodo (GONÇALVES et al., 2001; SOARES et al., 2001; XIAO, BRAUN, HORN, 2020).

No leito de secagem, o lodo é colocado acima de um meio drenante composto por brita no fundo e areia no topo. O sistema de drenagem se compõe de tubos perfurados de PVC no fundo do leito, que é ligeiramente inclinado para facilitar a coleta da água. Na parte superior da camada de areia colocam-se tijolos maciços sem serem rejuntados para facilitar a retirada do lodo depois de seco e evitar a perda de areia (GONÇALVES et al., 2001; ABNT 12.209/2011).

Quanto aos tipos de leitos de secagem, distinguem-se três tipos: leitos ao ar livre, leitos cobertos e com revolvimento. Os leitos ao ar livre foram as primeiras unidades a serem empregadas para produzir o lodo seco. Fisicamente não diferem substancialmente dos tradicionais fil-

tros de areia numa área confinada de alvenaria ou concreto. Posteriormente à aplicação de leitos ao ar livre, foram introduzidos leitos cobertos para evitar a interferência da água de chuva. Essa pode ser uma alternativa interessante para regiões com alta taxa de precipitação. Quando a cobertura é transparente, a taxa de evaporação nos leitos cobertos normalmente é igual àquela nos leitos ao ar livre quando não chove. No caso de cobertura com material opaco, o leito não recebe a irradiação solar e se antecipa que haverá menos evaporação. Para avaliar a possibilidade de aplicar leitos cobertos, deve-se comparar o custo da cobertura com o ganho que se tem, evitando a entrada de água de chuva.

Um terceiro tipo de leito de secagem leva em consideração que sempre se desenvolve uma estratificação: a camada superior de lodo no leito tem acesso à energia solar e esquenta antes das camadas mais baixas. Por outro lado, quanto mais perto a água fica da superfície, mas fácil é a evaporação. Desse modo, desenvolve-se uma estratificação térmica com uma temperatura média mais alta no topo e mais baixa no fundo da camada de lodo e uma estratificação material, havendo uma umidade menor no topo e maior no fundo. O resultado dessa estratificação é que a taxa de evaporação num leito com lodo é muito menor do que a taxa num leito só com água por três razões principais: (1) a temperatura relativamente elevada da camada de lodo superior faz com que uma parte da energia solar absorvida seja transferida de volta para o ar acima do lodo e, portanto não é usada para evaporação de água; (2) a dificuldade de difusão de água das camadas inferiores até a superfície em si é outra razão da diminuição da taxa de evaporação; e (3) há também uma perda de difusividade térmica do lodo: na medida em que ele perde água, as camadas superiores, mais secas, transformam-se em isolantes térmicos.

Na otimização de leitos de secagem, sempre se ponderam o custo de investimento e os custos

operacionais. O custo de investimento é determinado principalmente pela área a ser implementada, enquanto os custos operacionais dependem em grande parte dos custos de transporte do produto final, que por sua vez dependem da umidade residual que se deseja.

Neste trabalho, apresentam-se os dados de uma investigação experimental que teve como objetivo desenvolver um método para dimensionar racionalmente leitos de secagem de lodo. Na investigação foram pesquisados três tipos de leitos: (1) leitos ao ar livre, (2) leitos cobertos e (3) leitos com revolvimento de lodo. Desenvolveu-se um procedimento que permite calcular a produtividade de um leito de secagem em função de três variáveis: (1) a carga de sólidos aplicadas nos leitos, (2) a taxa de evaporação de água e (3) a umidade residual desejada. A produtividade do leito é a quantidade de lodo seco com umidade residual desejada por unidade de área e por unidade de tempo. De posse da produtividade do leito, pode-se determinar a área necessária para qualquer produção de lodo que se tenha.

2 METODOLOGIA

2.1 Área de estudo

Os protótipos de leitos de secagem utilizados na presente pesquisa foram instalados e monitorados na Estação Experimental de Tratamento Biológico de Esgotos Sanitários (Extrabes), localizada na cidade de Campina Grande, Paraíba. O lodo utilizado no experimento foi proveniente de reatores UASB instalados na própria estação.

2.2 Aparato experimental

A pesquisa foi desenvolvida em três tipos diferentes de leitos: (1) leitos ao ar livre, (2) leitos cobertos e (3) leitos com revolvimento de lodo. O primeiro representa um leito convencional,

onde o lodo foi colocado sobre o leito e mantido exposto às condições ambientais. O segundo tipo de leito foi coberto para analisar a influência da chuva, usando-se tanto coberturas transparentes como opacos. No terceiro experimento, o lodo foi revolvido com o objetivo de expor as camadas inferiores do leito à superfície, para acelerar a evaporação e, portanto, a secagem. A Fig. 1 mostra o protótipo dos leitos de secagem utilizados na pesquisa. Os protótipos foram confeccionados em PVC, com diâmetro de

25 cm (Fig. 1A), com fundo totalmente impermeável (Fig. 1B). As paredes laterais eram do tipo encaixe formados por segmentos de 10 cm de altura (Fig. 1C), e cada segmento era removido quando não havia mais lodo, diminuindo, assim, o efeito do sombreamento sobre a massa de lodo. Pesquisaram-se protótipos de leitos com altura inicial de 10 a 50 cm, o que representava cargas de sólidos entre 10 e 50 kg/m² aproximadamente para lodo percolado com umidade de 80 % (20 % sólidos).

Figura 1 - Representação esquemática e o modelo dos leitos de secagem utilizados nos ensaios.

2.3 Procedimento para o cálculo da produtividade

Para dimensionar a área de um leito de secagem, é necessário saber a produtividade do leito, isto é, a massa de lodo seco que pode ser produzida por unidade de área e por unidade de tempo, tendo-se como produto final um lodo com uma determinada umidade. Essa produtividade é definida como a razão entre a carga de sólidos aplicada e o tempo necessário para um ciclo total de secagem.

$$P_r = C_s / T_c = ME_s / A_l \quad (1)$$

Em que:

P_r = produtividade do leito (kgSTS/m²/d)

C_s = carga de sólidos aplicada (kgSTS/m²)

T_c = tempo de um ciclo de secagem (d)

ME_s = massa de lodo produzida diariamente (kgSTS/d)

A_l = área dos leitos de secagem (m²)

O tempo total de secagem, T_c , compõe-se de quatro períodos distintos: T_1 - período de preparação do leito e descarga de lodo; T_2 - período de percolação; T_3 - período de evaporação; T_4 - período de retirada do lodo seco e limpeza do leito.

$$T_c = T_1 + T_2 + T_3 + T_4 \quad (2)$$

Os períodos T_1 e T_4 dependerão principalmente de fatores relacionados com a disponibilidade de equipamentos e mão-de-obra para operar os leitos. Em contraste, os períodos T_2 e T_3 dependem principalmente de fatores sobre os quais não se tem muita influência: a natureza do lodo a ser seco e o clima (umidade do ar, temperatura, vento e irradiação solar). Uma variável operacional fundamental é a carga de sólidos aplicada, que é a massa de sólidos por unidade de área de leito. Tendo-se em vista que há vários fatores en-

volidos, sendo alguns variáveis e imprevisíveis, não é possível derivar uma equação geral para dimensionar e otimizar um leito de secagem. Assim, é possível encontrar uma solução empírica mediante uma investigação experimental que permita determinar a influência da carga de sólidos sobre o tempo necessário de percolação e de evaporação até alcançar uma determinada umidade final desejada. Nessa investigação, que pode se realizar em escala piloto, determina-se o tempo necessário para percolação e evaporação em função da carga orgânica aplicada para um determinado lodo e um conjunto de condições climáticas usando modelos dos diferentes tipos de leitos. Os resultados podem ser usados para dimensionar leitos de secagem, como apresentado a seguir.

2.4 Tempo de descarga de lodo e de retirada de lodo após secagem ($T_1 + T_4$).

Esse tempo é relativamente curto, se comparado com os tempos para percolação e evaporação, e normalmente se conclui em poucos dias. Na impossibilidade de obtenção de dados experimentais, pode-se estimar um tempo de 2 a 4 dias para as duas operações juntas.

2.5 Tempo de percolação (T_2)

O tempo de percolação em função da carga de sólidos foi determinado com o auxílio de um aparato simples que reproduz o leito de secagem, composto de tubos de PVC, uma camada de brita e de areia, sobre a qual se aplica o lodo e se determina o volume da água percolada em função do tempo até que não haja mais percolação. A Fig. 2 é uma foto de um conjunto de 6 tubos usados para determinar a taxa de percolação, aplicando-se diferentes cargas. Um aspecto importante que foi observado é que a resistência do

meio de filtração (areia) é pequena em comparação à resistência da camada de lodo percolado que se forma sobre o leito, o que está de acordo com a lei de Darcy sobre filtração de suspensões. Como a resistência da filtração se concentra na camada já percolada, a área disponível do meio filtrante não influi sobre a taxa de percolação que se obtém. A Fig. 2a mostra um equipamento simples para verificar que a superfície do meio filtrante não influi sobre a taxa de percolação.

Figura 2 - Equipamento para determinar a taxa de percolação de lodo em função da carga aplicada e da concentração de lodo.

Figura 2a - Cobertura de parte da superfície e do meio filtrante.

Na Fig. 3, observam-se os resultados experimentais no qual o tempo de percolação de lodo anaeróbio de um reator UASB tratando esgoto bruto foi relacionado com a carga de sólidos aplicada no tubo. Numa tentativa de correla-

cionar os dois parâmetros sugere-se a seguinte equação empírica:

$$T_2 = C_s^2/320 + 0,5 \quad (3)$$

Em que:

C_s = carga de sólidos (kg STS.m^{-2}) ($15 < C_s < 50$)

Figura 3 - Resultados experimentais do tempo de percolação de bateladas de lodo anaeróbio em função da carga de sólidos aplicada para diferentes valores da concentração inicial.

É notável que a concentração do lodo a ser percolado não influi sobre o tempo de percolação que é necessário para drenar a água do lodo. Portanto, não há necessidade de aplicar métodos para adensar o lodo antes de lançar em leitos de secagem: pode-se lançar uma camada mais alta de uma suspensão diluída e a percolação se realizará no mesmo tempo de uma camada (mais fina) de lodo mais concentrada, desde que a carga aplicada dos sólidos seja igual.

2.6 Tempo de evaporação (T_3)

Para o projeto racional da área do leito de secagem, é necessário conhecer a taxa de evaporação da água contida no lodo, uma vez que esse processo é lento e influencia significativamente o tempo do ciclo completo de secagem. Após a conclusão da percolação, a taxa de evaporação

pode ser determinada pela perda de peso de um protótipo de leito de secagem contendo uma batelada de lodo percolado, como mostrado na Fig. 4. Pesando diariamente o protótipo, o volume (= massa) de água evaporada é igual à perda do peso do dia. Sabendo a área de evaporação, pode-se calcular a taxa de evaporação. Para um diâmetro de 0,25 m (usado nos protótipos apresentados na Fig. 4), a área do protótipo utilizado para a secagem é 0,049 m². Portanto, uma perda de peso de, por exemplo, 200 g ou 200 mL significa que 200 cm³ foram evaporados em um dia de uma área de 0,049 m² ou 490 cm², ou seja, $200/490 = 0,41$ cm ou 4,1 mm de água evaporou durante o dia, tendo-se então uma taxa de evaporação de 4,1 mm/d. Experimentalmente é possível observar que na medida em que o peso do lodo e, portanto, a umidade diminui, aparecem fendas na superfície que se tornam mais profundas com o tempo.

A taxa de evaporação em uma batelada de lodo pode ser comparada com a taxa de evaporação num protótipo de leito com fundo preto, para máxima absorção de energia solar, quando contém somente água. A taxa de evaporação relativa é a razão entre a taxa de evaporação da água das bateladas de lodo no protótipo de leito e a taxa de evaporação da água em um leito idêntico, contendo somente água. Assim, é possível estabelecer a taxa de evaporação relativa, na qual a influência do clima sobre a evaporação (determinando a taxa de evaporação da água) é

separada da influência da batelada de lodo sobre a taxa de evaporação, visando estabelecer a influência da carga aplicada de sólidos e a umidade do lodo enquanto o lodo seca. Uma vez que a taxa de evaporação da água é geralmente conhecida, com a ajuda da taxa de evaporação relativa, a taxa de evaporação da batelada de lodo pode ser calculada para qualquer carga de sólidos aplicada e umidade residual desejada, e isso permite dimensionar os leitos de secagem, como será demonstrado mais adiante.

Figura 4 - Protótipos de leitos de secagem de lodo (anéis de plástico de 25 cm diâmetro) e representação esquemática da sua operação. Na frente observam-se os leitos que operavam ao ar livre; atrás, os leitos cobertos com e sem revolvimento de lodo.

3 RESULTADOS

Um exemplo numérico do roteiro de cálculo para obter a taxa relativa de evaporação se encontra na Tabela 1. Nessa tabela, encontram-se os dados básicos para calcular a taxa de evaporação de água em um leito não coberto com área de 0,049 m². Operaram-se dois protótipos de leito, sendo que no primeiro foi colocada uma batelada de lodo percolado e, no segundo, uma quantidade de água. A batelada de lodo percolado de 7,37 kg (peso úmido) tinha uma umidade inicial de 86% e, portanto, um peso seco de $(1-0,86)*7,37 = 1,03$ kgSTS. Calcula-se então

que a carga de sólidos aplicada foi de $1,03/0,049 = 20,5$ kgSTS/m².

Tendo-se os valores da massa de lodo durante o experimento e supondo-se que a massa de sólidos não varie durante a evaporação (isso foi verificado comparando a massa de lodo seco antes e depois do experimento), é possível determinar a umidade do lodo em função do tempo. Para tanto, divide-se a massa de água nas amostras de lodo (coluna 2) pelo peso total:

$$U = P_a / (P_s + P_a) = (P_t - P_s) / P_t \quad (4)$$

Em que:

U = umidade média da amostra em evaporação

P_t = massa total da amostra (kg)

P_a = massa da água (kg)

P_s = massa dos sólidos (1,03 kg)

A partir da variação da massa da batelada de lodo (coluna 2 da Tabela 1) com o tempo (coluna 1) e sabendo-se a massa de sólidos aplicados (1,03 kgSTS), calculou-se a variação da massa de água (coluna 3) e da umidade (coluna 4) e a

evaporação de água no leito com lodo, nos dias consecutivos de secagem (coluna 5). Também foi determinada experimentalmente a evaporação em um leito apenas com água (coluna 6). Finalmente (coluna 7), calculou-se a taxa relativa de evaporação como a razão entre os dados da coluna 5 e coluna 6. Nas Fig. 5 e 6 se apresentam a variação da umidade e a taxa relativa de evaporação em função do tempo e da umidade residual respectivamente. Os dados evidenciam as seguintes tendências:

Tabela 1 - Perda de peso num modelo de leito de secagem com área de 0,049 m² e uma carga de sólidos aplicada de 20,5 kgSTS/m²

1	2	3	4	5	6	7
Tempo de evaporação (d)	Massa de lodo úmido (kg)	Massa de água (kg ou L)	Umidade (-)	Com lodo Massa Evaporada A (kg)	Com água Massa Evaporada B (kg)	Razão A/B
0	7,36	6,33	86			
1	7,01	5,98	85,3	0,35	0,492	0,71
2	6,56	5,53	84,3	0,446	0,403	1,11
3	5,99	4,96	82,8	0,572	0,409	1,4
4	5,39	4,36	80,9	0,596	0,456	1,31
5	4,79	3,76	78,5	0,602	0,554	1,09
6	4,20	3,17	75,5	0,587	0,506	1,16
7	3,81	2,78	73	0,389	0,53	0,73
8	3,45	2,42	66,6	0,365	0,405	0,9
9	3,03	2	58,9	0,42	0,488	0,86
10	2,68	1,65	47,7	0,35	0,409	0,68
11	2,37	1,34	27,4	0,31	0,453	0,42
12	2,12	1,09	12,8	0,25	0,522	0,48
13	1,85	0,82	6,3	0,27	0,502	0,32
14	1,58	0,55	5,9	0,27	0,506	0,25
15	1,43	0,4	2,8	0,15	0,478	0,31
16	1,35	0,32	2,4	0,08	0,45	0,11

Figura 5 - Variação da umidade média do lodo em função do tempo de evaporação.

Figura 6 - Variação da taxa relativa de evaporação de água no modelo com lodo.

(1) Até uma umidade de 80%, a taxa relativa de evaporação no modelo com lodo tende a ser maior que a taxa de evaporação no leito com água apenas. Uma explicação é que pela estratificação térmica a temperatura aumenta inicialmente na superfície, e tendo uma temperatura mais alta a taxa de evaporação é mais elevada.

(2) Para umidades menores que 80%, a taxa relativa de evaporação se reduz com a umidade residual até chegar a zero para umidade zero. Essa redução se explica não somente porque há uma estratificação térmica com uma temperatura mais baixa na parte inferior que tem maior umidade, mas também pelo fato de que se forma uma crosta superficial no leito com lodo, tornando-se mais difícil o desprendimento de água da superfície. Essa dificuldade aumenta na medida em que a umidade residual diminui, porque a água tende a se difundir por uma camada de lodo cada vez maior.

(3) Quando se usam vários modelos de leitos com diferentes cargas de sólidos aplicadas, pode-se observar a mesma tendência: inicialmente a evaporação ocorre a uma taxa igual ou superior à taxa de evaporação num modelo sem lodo, mas depois de a umidade do lodo se tornar menor que 80%, a taxa no modelo com lodo diminui com a umidade até atingir o valor zero para umidade zero.

(4) Supreendentemente, a taxa de evaporação relativa não depende acentuadamente da carga de sólidos aplicada como mostram os diagramas da Fig. 7: a taxa relativa de evaporação de água para diferentes cargas aplicadas é aproximadamente igual e varia com a umidade da mesma maneira.

Para umidades menores que $< 0,8$ a taxa relativa de evaporação de água nos leitos com lodo é

menor do que nos leitos sem lodo e pode ser expressa como:

$$R_{rel} = (1/0,8).U_e = 1,25.U_e$$

ou

$$R_{lo} = 1,25.R_{H_2O}.U_e \quad (5)$$

Em que:

R_{H_2O} = taxa de evaporação de água em leitos sem lodo (mm/d)

R_{lo} = taxa de evaporação no modelo com lodo (mm/d)

R_{rel} = razão entre R_{lo} e R_{H_2O}

U_e = umidade residual

Por outro lado, em qualquer momento a taxa de evaporação é igual à taxa de perda de água na batelada de lodo. Assim, para qualquer umidade abaixo de 0,8 a taxa de evaporação é dada por:

$$(dP_a/dt) = R_{lo} = 1,25.R_{H_2O}.U_e = 1,25.R_{H_2O}.P_a/(P_a + P_s) \quad (6)$$

Em que:

dP_a/dt = taxa de variação do peso de água na amostra com lodo

Portanto, a taxa de evaporação na batelada com lodo apresenta uma relação linear com a umidade residual e sempre menor que a taxa de evaporação no modelo sem lodo. Para calcular o tempo de evaporação é necessário integrar a equação diferencial da Eq.6:

$$\int [(P_a + P_s)/P_a].dp_a = \int 1,25.R_{H_2O}.dt$$

Em que:

P_a = peso da água na amostra com lodo

Ou

$$\int [1 + P_s/p_a].dp_a = p_a + P_s.\ln(p_a) = 1,25.R_{H_2O}.T_3 \quad (7)$$

Figura 7 - Taxa de evaporação relativa de água (Rrel) em função da umidade residual para diferentes cargas de sólidos aplicadas em modelos de leitos operados ao ar livre.

Para a evaporação de água do leito de $U_i = 0,8$ até um valor qualquer U_e , a solução da equação diferencial é:

$$P_{ai} - P_{ae} + P_s \ln(P_{ai}/P_{ae}) = R_{H_2O} \cdot T_3 / (1 - U_i) \quad (8)$$

Em que:

P_{ai} = peso inicial de água na amostra com lodo

P_{ae} = peso final de água na amostra com lodo

U_i = Umidade inicial

e

$$T_3 = C_s \cdot [(U_i - U_e) / ((1 - U_i)(1 - U_e)) + \ln((1 - U_e)U_i / ((1 - U_i)U_e))] / (R_{H_2O} / U_i) \quad (9)$$

Em que:

T_3 = tempo necessário para reduzir a umidade média do lodo de 0,8 até o valor desejada U_e

C_s = carga de sólidos sobre o leito

U_i = umidade de lodo no fim da percolação (= 0,8)

U_e = umidade final desejada

Na Fig. 8, pode-se observar o tempo necessário de evaporação em função da umidade residual que se deseja para o caso de leitos ao ar livre a taxas adotadas de evaporação de água de 2,5 e 5 mm/d.

Figura 8 - Tempo de evaporação em função da umidade residual em leitos ao ar livre para diferentes cargas aplicadas de sólidos (em kgST/m².d) e taxas de evaporação de água.

3.1 Secagem em Leitos ao ar livre

Para calcular a produtividade dos leitos ao ar livre (Eq. 1), é preciso saber os valores dos quatro componentes que perfazem um ciclo de secagem (Eq. 2). Os tempos para preparar o leito e descarregar o lodo (T_1) e retirar o lodo seco (T_4) dependem da situação local, e os tempos de percolação (T_2) e

de evaporação (T_3) podem ser calculados usando as Eq. 3 e 9.

Na Fig. 9, pode-se observar a produtividade de leitos de secagem ao ar livre para diferentes valores da umidade final em função da carga aplicada no leito de secagem e taxas de evaporação de água de 2,5 e 5 mm/d. A partir da Fig. 7 chega-se às seguintes conclusões:

Figura 9 - Produtividade de leitos de secagem ao ar livre em função da carga aplicada para diferentes valores da umidade residual e taxas de evaporação de água de 2,5 e 5 mm/d.

- (1) O valor da produtividade de leitos de secagem ao ar livre depende acentuadamente da umidade residual que se deseja;
- (2) Em contraste, a produtividade varia pouco com a carga de sólidos aplicada, na faixa de 10 a 50 kg/m², que é a faixa que normalmente se usa na prática;
- (3) O tempo de evaporação é inversamente proporcional à taxa de evaporação de água (Eq. 8a), e como esse tempo constitui a maior parte do tempo do ciclo completo de secagem, pode-se inferir que a produtividade é inversamente proporcional à taxa de evaporação de água;
- (4) A vantagem de um lodo com baixa umidade residual deve ser considerada frente à desvantagem de menor produtividade, o que implica numa maior área necessária para o leito.

3.2 Secagem em leitos cobertos

Os testes da secagem nos protótipos de leitos cobertos foram tratados da mesma maneira que os de leitos ao ar livre. Na Fig. 10 se observam os re-

sultados da taxa de evaporação relativa de água nos leitos cobertos. Os resultados foram calculados com auxílio de dados obtidos nos protótipos de leitos cobertos por plástico transparente. É importante notar que os leitos foram cobertos com plástico transparente de modo a permitir a penetração da radiação solar. Nota-se que, em boa aproximação, os valores se igualam aos de leitos ao ar livre, de modo que os procedimentos de cálculos descritos anteriormente também se aplicam para os leitos com cobertura transparente: a expressão para o tempo de evaporação é a mesma que aquela para leitos ao ar livre (Eq. 8a). Portanto, a produtividade de leitos cobertos com cobertura transparente também pode ser considerada a mesma que a de leitos ao ar livre, de modo que os dados apresentados na Fig. 9 valem tanto para leitos ao ar livre como para leitos cobertos com material transparente. É importante que se dê conta que o material transparente na prática será rapidamente coberto por sujeira, algas e musgo. Assim, na realidade ela se torna opaca, dificultando a penetração da irradiação solar no leito coberto.

Figura 10 - Taxa de evaporação relativa de água em função da umidade residual para diferentes cargas de sólidos aplicadas em leitos cobertos com material transparente.

Quando se repetiram os experimentos em ambiente coberto com material não transparente, observou-se que o fato de a irradiação solar não

chegar até os leitos resultou numa considerável diminuição da taxa de evaporação nos modelos tanto nas unidades com lodo como nas sem lodo.

A taxa de evaporação de água nos modelos com água foi aproximadamente a metade da taxa ob-

servada nos modelos colocados ao ar livre, como mostra a Fig. 11.

Figura 11 - Taxa de evaporação relativa de água em função da umidade residual para diferentes cargas de sólidos aplicadas em leitos cobertos com material opaco.

A taxa relativa de evaporação em leitos com água ainda é descrita com a mesma equação básica: Eq. 6, sendo que R_{H_2O} é a metade do valor que tem ao ar livre. Portanto, para leitos cobertos com material que não permite a irradiação solar direto do lodo tem-se um tempo de evaporação de:

$$T_3 = C_s \cdot [U_i / (1 - U_i) - U_e / (1 - U_e) + \ln(U_i / (1 - U_i) \cdot (1 - U_e) / U_e)] / (0,5 \cdot R_{H_2O} / (1 - U_i)) \quad (11)$$

A Fig. 12 mostra a produtividade de leitos cobertos com material opaco. Pode-se observar que a produtividade é bem menor do que a aquela de leitos ao ar livre. Para avaliar a viabilidade econômica de cobertura de leitos com material opaco, é preciso comparar os custos de cobrir o leito com os custos do leito ao ar livre, mas com área aumentada para poder absorver as chuvas.

Figura 12 - Taxa de evaporação relativa de água em função da umidade residual para diferentes cargas de sólidos aplicadas em leitos cobertos com material não transparente.

3.3 Secagem em leitos ao ar livre e com revolvimento de lodo

A taxa de evaporação em modelos de leitos com revolvimento de lodo operados ao ar livre acelerou bastante a taxa de evaporação, como mostra a Fig. 13. O lodo era revolvido manualmente todos os dias quando a umidade era suficientemente baixa para o lodo não grudar na espátula, o que acontecia quando a umidade se tornava menor do que 70%. Os resultados indicam que a taxa de evaporação tendia a ser maior ou igual à taxa de evaporação de água no protótipo sem lodo até atingir

uma umidade de 0,4. Depois desse valor, a taxa de evaporação diminuía gradualmente até atingir um valor de 0 para umidade 0. Por essa razão, o tempo de evaporação era bem mais curto quando comparado com o tempo sem revolvimento e, portanto, a produtividade do leito era muito maior. Para efeito de cálculo, pode-se igualar a taxa de evaporação no leito com revolvimento à taxa de evaporação de água no modelo sem lodo e, portanto:

$$\text{Para umidades entre 0,8 e 0,4: } R_{\text{rel}} = R_{\text{H}_2\text{O}} \quad (12a)$$

$$\text{Para umidades } < 0,4: R_{\text{rel}} = 2,5 \cdot R_{\text{H}_2\text{O}} \cdot U_e \quad (12b)$$

Figura 13 - Taxa de evaporação relativa de água em função da umidade residual para diferentes cargas de sólidos aplicadas em modelos de leitos ao ar livre com revolvimento de lodo.

Figura 14 - Tempo de evaporação em leitos de secagem com revolvimento de lodo em função da umidade residual para diferentes cargas aplicadas de sólidos e taxas de evaporação de água de 2,5 e 5 mm.

Na Fig. 14, observa-se o tempo calculado de evaporação em leitos com revolvimento de lodo em função da umidade residual para diferentes cargas aplicadas de sólidos e taxas de evaporação de água de 2,5 e 5 mm/d. Ao comparar a Fig. 14 com a Fig. 8, pode-se notar que no caso dos leitos com revolvimento de lodo o tempo de evaporação é bem menor, especialmente quando se deseja uma

umidade residual baixa. Naturalmente isso repercute numa produtividade maior do leito com revolvimento, como mostra a Fig. 15. Comparada com a produtividade de leitos sem revolvimento de lodo, na Fig. 9, a produtividade para um leito com revolvimento (Fig. 15) é em torno de 20 a 25% maior do que a de um leito sem revolvimento para qualquer umidade residual e taxa de evaporação de água.

Figura 15 - Produtividade de leito ao ar livre com revolvimento de lodo em função da carga de sólidos aplicada para diferentes valores da umidade residual.

4 DISCUSSÃO

4.1 Dimensionamento e otimização de leitos de secagem

Tendo-se estabelecido expressões para calcular a produtividade de um leito de secagem, o dimensionamento e a otimização do mesmo são relativamente simples e podem ser resumidos como se segue:

(1) Determinar a massa de lodo produzida diariamente no sistema de tratamento. A produção diária depende da carga orgânica aplicada no sistema, da natureza do sistema de tratamento (aeróbio ou anaeróbio), das condições operacionais, notadamente a idade de lodo e das características de esgoto do sistema de tratamento: composição do

material orgânico e temperatura do lodo. Para sistemas de tratamento aeróbio com digestor de lodo, espera-se em torno de 0,2 a 0,25 kgSTS/kgD-QO aplicados e uma fração volátil de 75 a 80 %; enquanto em sistemas anaeróbios se antecipa na faixa de 0,15 a 0,2 kgSTS/kgDQO para sistemas de baixa e alta carga, respectivamente, com uma fração volátil de 60 a 70 %.

(2) Estimar a descarga máxima que se pode retirar do reator UASB ou do digestor de lodo. Essa quantidade depende das condições operacionais, mas pode ser estimada em 30 a 50%, sem prejudicar a eficiência e estabilidade operacional das unidades de tratamento biológica.

(3) Estimar a área mínima necessária para o leito de secagem. A área mínima necessária de leitos de secagem é estimada como a razão entre a produção diária de lodo e a produtividade esperada para a umidade residual desejada e a carga de sólidos a ser aplicada.

(4) Com o auxílio da taxa de produção e descarga máxima, determinar a frequência de descargas de lodo e o número ideal de leitos de secagem.

Como exemplo, discute-se a seguir o dimensionamento de leitos ao ar livre para secar o lodo produzido em um reator UASB de 1500 m³, onde 6000 m³/d de águas residuárias de são tratadas com uma carga orgânica de 4500 kgDQO.d⁻¹. Adotar uma produção de lodo de 0,15 kgSTS/kgDQO aplicada e uma concentração de excesso de lodo de 60 g/L, enquanto a concentração média no UASB é de 20 gL⁻¹, ou seja, o reator detém uma massa de 1500 * 20 = 30 t de lodo. A taxa de evaporação da água é de 5 mm por dia. Para garantir um desempenho estável das descargas do reator UASB, não se admitem descargas de lodo maiores que 50% da massa de lodo disponível. Estimar o tempo de enchimento e remoção de lodo seco como $T_1 + T_4 = 2$ d. A umidade final desejada é de 30%. Levando em consideração a chuva e outras condições adversas (incluindo o reparo de leitos), prevê-se a construção de uma área de reserva mínima de 30%.

A solução do problema requer realizar várias etapas:

(1) Estimar a carga de sólidos a ser aplicada nos leitos de secagem.

A Fig. 9 mostra que a produtividade máxima é de se esperar na faixa de 30 kg/m²/d. Para uma análise mais acurada, podem-se fazer cálculos repetidos para diferentes cargas de sólidos aplicadas, mas as diferenças no dimensionamento dos leitos serão muito pequenas, na faixa de 20 a 40 kg/m²/d.

(2) Estimar o tempo necessário concluir um ciclo de secagem.

Para estimar a duração de um ciclo tem que ser adotado um período para encher o leito produzido no sistema e retirar o lodo após a secagem, por exemplo: $T_1 + T_4 = 2$ d para empresas particulares e $T_1 + T_4 = 4$ d para empresas públicas. Para o tempo de percolação da água, usa-se a Eq. 3: $T_2 = C_s^2/320 + 0.5$. No caso do exemplo da umidade inicial $U = (1 - 0,06) = 0,94$ até uma umidade no fim da percolação ($U = 0,8$): $T_2 = 3,3$ d.

O tempo para a evaporação é calculado com o auxílio da Eq. 6:

$$T_3 = C_s [U_i/(1-U_i) - U_e/(1-U_e) + \ln[(U_i/(1-U_i))/(U_e/(1-U_e))]] / (1,25 \cdot R_{H_2O})$$

$$= 30 \cdot [(0,6/0,4 - 0,3/0,7) + \ln((0,6/0,4)/(0,3/0,7))] / (1,25 \times 5) = 28 \text{ d}$$

Para o ciclo total:

$$T_c = T_1 + T_4 + T_2 + T_3 = 3 + 3,3 + 28 = 34,3 \text{ d}$$

(3) Determinar a produtividade máxima do leito de secagem sob as condições especificadas. A produtividade é dada pela Eq. 1:

$$P_r = C_s/T_c = 30/34,3 = 0,82 \text{ kgSTS/m}^2/\text{d}.$$

(4) Determinar a área mínima de secagem.

A área mínima necessária é a razão entre a produção diária de lodo e a produtividade:

$$A_l = ME_l/P_r$$

A produção diária de lodo é o produto da carga orgânica e a produção específica:

$$ME_l = C_o \cdot P_e = 4500 \cdot 0,15 = 675 \text{ kgSTS/d}$$

Portanto:

$$A_l = 675/0,82 = 771 \text{ m}^2.$$

A Tabela 2 mostra os valores da área para diferentes tipos de leitos e taxas de evaporação de água.

Tabela 2 - Tempo de evaporação, (T_e), Tempo total de um ciclo (T_c), produtividade (P_e) e área mínima (A_{min}) para uma produção de lodo de 675 kgSTS.d⁻¹ para diferentes taxas de evaporação de água e tipos de leitos (ao ar livre, opaco e com revolvimento).

Taxa de evaporação = 2,5 mm/d				
Tipo de leito	T_e (d)	T_c (d)	P_e (kg.m ⁻² .d ⁻¹)	A_{min} (m ⁻²)
Ao ar livre	55,7	63	0.47	1436
Cobertura opaca	111	119	0.25	2700
Revolvimento de lodo	43,2	51	0.59	1144
Taxa de evaporação = 5 mm/d				
Tipo de leito	T_e (d)	T_c (d)	P_e (kg.m ⁻² .d ⁻¹)	A_{min} (m ⁻²)
Ao ar livre	27,8	34,3	0.87	771
Cobertura opaca	55,6	63	0.43	1569
Revolvimento de lodo	21,5	29	1.01	655

As únicas variáveis a serem determinadas agora são a frequência de descarga de lodo do reator UASB e o número necessário de leitos. A frequência mínima de descargas pode ser determinada a partir da condição de que uma descarga não pode exceder 50% da massa de lodo no reator. Como a produção diária de lodo é de 675 kgSTS.d⁻¹ ou 675/30.000 kgST lodo = 2,25%.d⁻¹, o período máximo entre as descargas é de (50%)/(2,25%.d⁻¹) = 22 dias. Para esse período máximo, o volume de uma batelada de lodo seria [675(kgSTS.d⁻¹).22(d)/60(kg.m⁻³) = 248 m⁻³] e a camada de lodo a ser descarregada no leito seria 250m³/771m² = 0,32 m no caso de haver uma taxa de evaporação de 5 mm.d⁻¹.

Para uma operação sistemática, convém impor um intervalo predeterminado de operação, por exemplo, semanal ou múltiplos de semanas. No caso, sendo que o maior intervalo é 22 d, então os possíveis intervalos são de 21 dias, quinzenal ou semanal. Tome-se como exemplo a secagem de lodo no leito ao ar livre com uma taxa de evaporação de água de 2,5 mm.d⁻¹. No caso de descargas a cada 3 semanas, elas serão de 675(kgSTS.d⁻¹)*21(d)= 14.175 kgSTS e a área dos leitos será de 14.175(kgSTS)/30(kgSTS.m⁻²) = 472 m². Nesse caso, o número mínimo de leitos é 9/3 = 3: o ciclo de secagem é de 9 semanas e há descargas de lodo de 3 em 3 semanas. As-

sim, um total de 5 leitos será necessário: 3 em operação e 2 como capacidade de reserva para se antecipar condições adversas (chuvas pesadas, consertos). Portanto, a área total seria de 5(leitos)*472(m²/leito) = 2362 m².

Se o leito for construído com uma cobertura opaca, o tempo de ciclo é T_c = 119 d (Tabela 7.2). No entanto, 119 não é um múltiplo de 21 dias, que é o tempo para as descargas. Então o próximo múltiplo é escolhido: 126 d (126(d)/7(d/semana) = 18 semanas). Para uma descarga com intervalo de 3 semanas, o número de leitos em operação é de 18 (semanas)/3(semanas/leito) = 6 leitos, mas o tempo de ciclo é de 126 d, portanto a área do leito pode ser reduzida por um fator 126(d)/119(d) = 1,06, de 472 m² a 445 m². Para uma capacidade de reserva de 50%, deve haver 3 camas, então o número total é 9 leitos e a área total é 9 (leitos) * 445 (m²/leito) = 4050 m².

Se o leito opera ao ar livre e se aplica revolvimento de lodo, o tempo de ciclo e a produtividade são T_c = 51 d. Novamente, esse não é um múltiplo do ciclo de operação de 21 dias, então um ciclo de operação de 63 d = 3 * 21(d) é escolhido, levando a três leitos em operação com uma área de (51(d)/63(d)) * 472(m²) = 382 m² cada. Com duas camas como capacidade de reserva a área total é agora 5(leitos)*382(m²/leito) = 1910 m².

Na Tabela 3, o número de leitos em operação e a capacidade de reserva são calculados para os três tipos de leitos e para uma taxa de evaporação alta (5 mm.d^{-1}) e baixa ($2,5 \text{ mm.d}^{-1}$) de

água e para um tempo total de ciclo de 21 d. Os números para outros tempos totais podem ser calculados seguindo o mesmo método explicado acima.

Tabela 3: Número e dimensões de diferentes leitos de secagem para as condições de Tabela 2, taxa de evaporação de 2,5 e 5 mm/d para um intervalo de descargas de uma de 3 em 3 semanas.

Tipo de leito	Taxa de evaporação = 2,5 mm/d				Taxa de evaporação = 5 mm.d ⁻¹			
	Nº de operações	No de reserva	Área leito (m ²)	Área total (m ²)	Nº de operações	No de reserva	Área leito (m ²)	Área total (m ²)
Ao ar livre	3	2	472	2.362	2	1	392	1.176
Cobertura opaca	6	3	445	4.050	3	2	472	2.360
Revolvimento de lodo	2	1	382	1.910	1	1	472	944

Os dados apresentados na Tabela 3 levam às seguintes conclusões:

(1) A área necessária para os leitos realmente não é muito grande. Na Tabela 3, a área total de um leito aberto é de 2.362 m^2 quando a taxa de evaporação da água é baixa ($2,5 \text{ mm/d}$) para uma carga orgânica no esgoto de 4.500 kgDQO/d ou 45.000 habitantes, com uma contribuição per capita de $0,1 \text{ kgDQO/d}$. Assim, a área per capita no exemplo é $2362(\text{m}^2)/45.000(\text{hab}) = 0,053 \text{ m}^2$ ou 530 cm^2 por habitante. Isso pode ser comparado à área do UASB exemplificado que, para uma profundidade assumida de 4 m , é de $1500(\text{m}^3)/4(\text{m}) = 375 \text{ m}^2$, o que resulta em uma área per capita de $375 \text{ m}^2 / 45.000 (\text{hab}) = 0,0083 \text{ m}^2/\text{hab}$. Assim, a área do leito seria cerca de seis vezes maior que a área do reator sob essas condições desfavoráveis. Se a taxa de evaporação da água for maior, a área do leito pode ser diminuída correspondentemente.

(2) Cobrir o leito com um material opaco aumenta significativamente a área necessária e só é recomendável se a precipitação for intensa e frequente.

(3) O revolvimento de lodo sob as condições da investigação não levou a uma redução considerável da área do leito, mas isso pode ser devido a uma baixa frequência e intensidade da operação.

A taxa de evaporação de água tem uma forte influência sobre a área necessária do leito, porque o tempo de evaporação é inversamente proporcional à taxa de evaporação e o tempo de evaporação é o principal componente do tempo de um ciclo de secagem. Na Fig. 16, pode-se observar que a produtividade é quase linear com a taxa de evaporação de água.

Tabela 4: Influência da taxa de evaporação sobre a produtividade de leitos de secagem carga aplicada = 30 kg/m^2 ; umidade residual = $9,3\%$.

$R_{\text{H}_2\text{O}}$ (mm/d)	$T_1 + T_4$ (d)	T_2 (d)	T_3 (d)	T_5 (d)	P_r
1	3	3,3	139	145,3	0,206
2	3	3,3	70	76,3	0,393
3	3	3,3	46,4	52,9	0,567
4	3	3,3	34,8	41,1	0,730
5	3	3,3	27,8	34,1	0,880

Figura 16 – Influência da taxa de evaporação sobre a produtividade de leitos de secagem.

4.2 Influência da umidade residual sobre a massa de lodo seca a ser transportado

A quantidade de lodo que se produz é influenciada pela umidade residual, como fica aparente na Fig. 17, onde se pode observar a massa do lodo final depois da secagem por unidade de área para a carga de sólidos aplicada de 30 kgSTS/m². Pode-se observar que a massa de água no lodo seco é maior que a massa de sólidos quando a umidade residual é maior que 50%. Por outro lado, o ganho que se tem ao secar o lodo com uma umidade menor que 50% é relativamente pequeno. É interessante observar que secagem mecânica em centrífugas ou filtros resulta numa umidade residual de 80% aproximadamente, o que significa que o peso da água é 4 vezes maior que o peso dos sólidos. Nessas condições, o aumento da massa de água a ser transportado para a destinação final do lodo seco irá aumentar muito o custo de transporte.

Figura 17 - Massa de lodo depois da secagem por unidade de área do leito em função da umidade residual

A massa da água residual é diretamente ligada à massa de sólidos aplicada:

$$M_{ae} = C_s U_e / (1 - U_e) \quad (13)$$

Em que:

M_{ae} = massa de água residual por área de leito de secagem (kg/m²)

Na Fig. 17, pode-se observar o peso do lodo após a secagem (peso dos sólidos e a água) por unidade de massa de sólidos suspensos totais. Por exemplo, para um lodo de 60% de umidade e que tem a aparência de um sólido, a massa é 2,5 vezes maior que a massa dos sólidos propriamente ditos. Claramente, para diminuir os custos de transporte e destinação final do lodo, é necessário que a umidade seja a menor possível.

5 CONCLUSÕES

(1) Os leitos de secagem oferecem uma alternativa para reduzir o teor de água de lodos gerados em sistemas de tratamento de esgoto produzindo um produto final com teor de sólidos entre 50 e 95%, muito maior que os teores que podem ser obtidos com métodos de secagem mecânicos de lodo, que são em torno de 20%.

(2) Leitos também podem ser usados como opção de secagem térmica para aumentar o teor de sólidos de lodo após secagem mecânica.

(3) A diminuição da massa de lodo após a secagem é vantajosa tanto no custo de transporte para seu uso como adubo ou para aterro e necessária quando se considera usar a energia contida no lodo pela aplicação de combustão.

(4) Os leitos de secagem podem ser divididos em quatro tipos, de acordo com a sua construção: (1) leitos ao ar livre, (2) leitos cobertos (transparente ou opaco), (3) leitos com revolvimento de lodo e (4) leitos fechados.

(5) Vantagens da aplicação de leitos de secagem são: (a) diminuição radical da umidade, (b) possibilidade de melhorar a qualidade higiênica do lodo seco (somente para leitos fechados), (c) simplicidade de construção e operação, (d) baixo custo e (e) confiabilidade. Uma desvan-

tagem é que requer uma área significativa, na faixa de 300-500 cm² por equivalente de habitante.

(6) A produtividade de um leito de secagem é a massa de lodo após secagem, que pode ser produzida por unidade de área e por unidade de tempo e depende basicamente de quatro fatores: (1) a taxa de evaporação de água na região do leito, (2) a umidade residual desejada, (3) o tipo de leito aplicado e (4) a carga de sólidos aplicada.

(7) O modelo desenvolvido neste trabalho permite calcular a produtividade de leitos para qualquer um dos três tipos considerados.

6 AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo incentivo financeiro às pesquisas.

7 CONTRIBUIÇÃO DOS AUTORES

Todos os autores contribuíram de forma igualitária.

8 REFERÊNCIAS

ANDREOLI, C. V.; VON SPERLING, M.; FERNANDES, F. **Lodo de esgoto: tratamento e disposição final**. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2 ed, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12.209**: Elaboração de projetos hidráulico-sanitários de estações de tratamento de esgotos sanitários. Rio de Janeiro, 2011. 53p.

LOBATO, L. C. S.; RIBEIRO, T. B.; SILVA, B. S.; FLOREZ, C. A. D.; NEVES, P. N. P.; CHERNICHARO, A. A. L. Contribuição para o aprimoramento de projeto, construção e operação de reatores UASB aplicados ao tratamento de esgoto sanitária – Parte 3: Gerenciamento de lodo e espuma. **Revista DAE**. N. 214, v.66, edição especial, 2018. <https://doi.org/10.4322/dae.2018.040>

GONÇALVES, R.F.; LUDUVICE, M.; LIMA, M. R. P.; RAMALDES, D. L. C.; FERREIRA, A.C.; TELES, C.R.; ANDREOLI, C. V. Desidratação de lodo de esgotos. In: ANDREOLI, C.V. (Coord.). **Resíduos sólidos do saneamento: processamento, reciclagem e disposição final**. 1.ed. Rio de Janeiro: Rima Artes e Textos, p. 57 – 86. 2001.

SANTOS, D. S.; TESHIMA, L.; DIAS, S. M. F.; ARAUJO, R. A.; SILVA, C. M. R. Efeito da secagem em leito nas características físico-químicas e microbiológicas de lodo de reator anaeróbico de fluxo ascendente usado no tratamento de esgoto sanitário. **Revista Engenharia Sanitária e Ambiental**. v.22, n.21, p. 341-349, 2017. <https://doi.org/10.1590/s1413-41522016100531>

SOARES, S. R. A; MATOS, Z. M; BERNADES, R. S. Modelagem do processo de desidratação de lodo anaeróbico em leitos de secagem simulados. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.5, n.2, p.313-319, 2001. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662001000200023>

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY – USEPA. **EPA 625/R-92/013: Under 40 CFR Parte 503. Environmental Regulations and Technology. Control of Pathogens and Vector Attraction in Sewage Sludge (Including Domestic Septage)**. Washington: USEPA, 2003.

VAN HAANDEL, A.C.; VAN DER LUBBE, J. **Anaerobic sewage digestion: Theory and applications**. International Water Association, Londres RU, 2019.

XIAO, K.; BRAUN, G. A.; HORN, H. Changes in the characteristics of dissolved organic matter during sludge treatment: A critical review. **Water Research**. v. 187, 2020. <http://doi.org/10.1016/j.watres.2020.116441>