

Otimização de sistemas de lagoas de estabilização para tratamento de dejetos suínos

Optimization of pond systems for the treatment of swine waste

Waldir Medri¹ ; Vandir Medri²

Resumo

Este artigo apresenta os resultados do monitoramento de três sistemas de lagoas para tratamento de dejetos suínos, realizado durante 12 meses, com o objetivo de encontrar os parâmetros operacionais para otimização do sistema de tratamento. O primeiro sistema é composto de duas lagoas anaeróbias e uma facultativa, o segundo e o terceiro sistemas consistem de duas lagoas anaeróbias, duas facultativas e uma de maturação, em séries, com eficiência de remoção, em média, dos três sistemas de 90% da DQO e 76% para o nitrogênio total. Um modelo matemático de minimização de custos para tratamento destes resíduos foi desenvolvido considerando os conceitos econômicos.

Palavras-chave: Modelo, otimização, lagoas, dejetos suínos

Abstract

This article discusses the results of a 12-month study involving the monitoring of three pond systems for the treatment of swine waste. The objective of the study was to find operational parameters to optimize the treatment systems. The first system included two anaerobic and one optional pond, and the second and third systems included two anaerobic ponds, two optional ponds and one maturation pond, in a series, with 90% of DQO and 76% of total nitrogen removal efficiency, on average, for the three systems. A mathematical model to minimize residue treatment costs based on economy concepts was developed.

Key words: mathematical model ; optimization; ponds; swine waste

Introdução

A suinocultura é uma das atividades mais importantes do complexo agropecuário brasileiro, por ser predominantemente desenvolvida em pequenas propriedades rurais e em áreas com limitações topográficas para o estabelecimento de lavouras extensivas. Além de gerar alimento e emprego, a suinocultura constitui-se num excelente instrumento de fixação do homem ao campo. O

rebanho nacional é composto por aproximadamente 38,3 milhões de suínos, concentrando-se principalmente nos estados do Rio Grande do Sul, Paraná e Santa Catarina. A Região Sul do Brasil representa 33% dessa atividade segundo Pork World (2002). Porém, esta atividade é realizada em sistemas confinados, nas quais são geradas altas concentrações de resíduos, causas potenciais de degradação do meio ambiente.

¹ Universidade Estadual de Londrina, CCE/DEMA, Cx. Postal 6001, CEP 86051-990, Londrina, PR, Email: medri@uel.br

² Universidade Estadual de Londrina, CCE/DEMA, Cx. Postal 6001, CEP 86051-990, Londrina, PR, Email: vandir@uel.br

O crescimento da suinocultura acelerado, principalmente na Região Sul, não foi acompanhado por um programa de planejamento de expansão de processo de tratamento dos resíduos orgânicos. Assim, tanto os médios quanto os grandes produtores têm excedente desses resíduos e, conseqüentemente, os problemas ambientais dessa atividade resultam num quadro crítico quanto à poluição dos dejetos provenientes das granjas, demandando a busca de soluções que sejam adequadas. A produção média diária de dejetos líquidos é da ordem de 8,6 litros/suíno nas diferentes fases produtivas. Os dejetos são altamente concentrados, com valores médios de matéria orgânica DBO~12.000 e DQO~21.000 mg/l e nutrientes Nt~2.200 e Pt~600 mg/l (MEDRI, 1997).

Uma das soluções é o armazenamento dos dejetos por meio do uso de esterqueiras e bioesterqueiras para posteriormente serem usados no solo como adubo. Esses resíduos são ricos em nutrientes, como nitrogênio e fósforo e deveriam ser usados na agricultura (BELLI FILHO; CASTILHOS; LAPLANCHE, 1997), apenas as quantidades excedentes devem ser tratadas antes do lançamento nos cursos d'água. Contudo, na maioria das situações, esses procedimentos não são aplicáveis, pois os produtores não dispõem de áreas suficientes para absorver toda a carga orgânica, além de apresentar áreas com limitações topográficas, dificultando a distribuição dos dejetos nas lavouras. Esta situação, aliada aos investimentos para viabilizar a sua utilização, está acima das capacidades dos pequenos e médios produtores.

Dessa forma, uma alternativa interessante é o tratamento preliminar, seguido de tratamento biológico com o uso de lagoas de estabilização, por apresentar um excelente desempenho quanto à remoção da matéria orgânica, dos sólidos, dos nutrientes e de coliformes fecais (MEDRI, 1997; CAZARRÉ, 2000; DALAVÉQUIA, 2000; COSTA; MEDRI; PERDOMO, 2000, ZANOTELLI, 2002). Porém, na elaboração de novos projetos de tratamento desses resíduos, a estimativa de redução da Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) ou Demanda Química de Oxigênio (DQO), de

coliformes e de nitrogênio em lagoas de estabilização tem, até o momento, encontrado algumas dificuldades, como por exemplo:

- dificuldade na determinação do regime hidráulico da lagoa, em função de suas relações geométricas (comprimento e largura), e correta utilização do regime hidráulico no projeto;
- dificuldade na obtenção de coeficientes cinéticos de redução da DBO, DQO, Nitrogênio e de coliformes confiáveis.

O objetivo principal desta pesquisa é obter os parâmetros fundamentais de funcionamento das lagoas anaeróbias, facultativas e de maturação para modelagem e otimização do sistema de tratamento, levando-se em consideração os aspectos econômicos.

É conveniente ressaltar que os sistemas que são utilizados para tratamento dos dejetos em Santa Catarina são construídos sem critérios científicos, com operação deficiente, e isso acarreta conseqüentes problemas ambientais como contaminação dos corpos receptores desses efluentes e desenvolvimento de odores indesejáveis.

Esses dejetos de origem orgânica, quando lançados aos mananciais sem tratamento, causam rápida diminuição do oxigênio dissolvido, diminuindo também as espécies aquáticas capazes de sobreviver no ambiente eutrofizado (HOODA et al., 2000). O autor ainda comenta que o principal responsável pela contaminação poluente dos dejetos de suínos não é a carga orgânica, mas os nutrientes presentes, como fósforo e nitrogênio. Além de prejuízos ambientais, esses elementos também trazem problemas à saúde pública.

Sistemas de lagoas de estabilização apresentam-se como excelente alternativa de tratamento de águas residuárias. Trata-se de um processo simples, como baixo custo de capital e operacional, relatado pelos pesquisadores como, Mara e Pearson (1998), Bento, Ribeiro e Sartorato (2002), Archer e Mara (2002), Köning, Ceballos e Cavalcanti (2002). Como desvantagens, a principal causa é atribuída à necessidade de grande área para sua construção.

As lagoas de estabilização são projetadas para promover um controle ambiental por meio do tratamento dos despejos. Seu tamanho é estabelecido com base nas relações teóricas e empíricas dos resultados esperados, e o tempo de detenção hidráulica é estimado de acordo com a qualidade do efluente que se pretenda alcançar (KELLNER; PIRES, 2000).

Materiais e Métodos

Instalações Experimentais

A presente pesquisa foi realizada na Unidade Experimental de Tratamento de Dejetos Suínos (UNETDS) do Centro Nacional de Pesquisas de Suínos e Aves – CNPSA da Empresa Brasileira de Pesquisas Agropecuárias – EMBRAPA, localizada em Concórdia/SC, Brasil. Foram analisados três sistemas de lagoas, em escala piloto, construídos em caixa d'água de cimento amianto, em série. O primeiro sistema consiste de duas lagoas anaeróbias (LA1, LA2), uma facultativa (LF) e uma de aguapés (LAG); o segundo e o terceiro sistemas são compostos de duas lagoas anaeróbias (LA1, LA2), duas facultativas (LF1, LF2) e uma de maturação (LM). A Figura 1 mostra um esquema e a Tabela 1 apresenta as características físicas e operacionais dos sistemas. Ressalte-se que a lagoa de aguapés não faz parte do presente estudo.

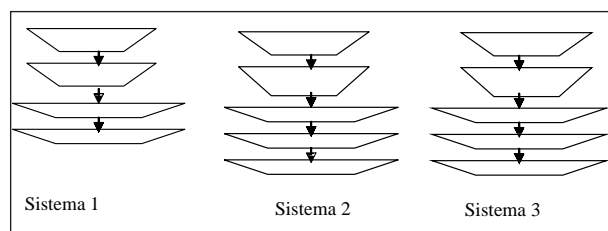


Figura 1. Sistemas de tratamento de objetos suínos

Tabela 1. Características físicas e operacionais dos três sistemas de lagoas

LAGOAS	SISTEMA 1		SISTEMA 2		SISTEMA 3	
	Tempo (dias)	Volume (litros)	Tempo (dias)	Volume (litros)	Tempo (dias)	Volume (litros)
LA1	35	700	35	700	30	600
LA2	46	920	30	600	20	400
LF1	24	480	20	400	15	300
LF2	15	300	15	300	15	300
LM	-	-	7	140	7	140

Alimentação do Sistema e Carga das Lagoas

Os sistemas de tratamento eram alimentados diariamente pela manhã com fluxo intermitente. Os dejetos oriundos das instalações suinícolas do sistema de produção de suínos (SPS) do CNPSA eram transportados até o equalizador da unidade experimental (UNETDS). Com o acionamento de uma bomba peristáltica, submersa, faz-se a homogeneização dos mesmos, e estes, por sua vez, eram conduzidos ao decantador. Daí, com uma vazão constante, os dejetos eram conduzidos por gravidade para o sistema de lagoas em estudo.

Monitoramento de Rotina

Os três sistemas entraram em funcionamento em maio de 1999, e o monitoramento de rotina das lagoas foi realizado no período de maio de 1999 a maio de 2000. As coletas das amostras foram efetuadas quinzenalmente nos afluentes e nos efluentes de cada lagoas para os seguintes parâmetros: Demanda Química de Oxigênio total (DQOt); Demanda Química de Oxigênio filtrado (DQOf); Sólidos Totais (ST); Sólidos Fixos (SF); Sólidos Voláteis (SV); Nitrogênio total (Nt); Fósforo total (Pt); Coliformes Fecais (CF), de acordo com os métodos estabelecidos pelo “Standard Methods” (AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION, 1995). A Tabela 2 apresenta os resultados médios para os parâmetros da DQO e do NT dos três sistemas obtidos nas lagoas anaeróbias LA1, LA2, nas lagoas facultativas LF1, LF2, e nas lagoas de maturação.

Tabela 2. Resultados médios do monitoramento para a DQO (mg/l) e NT (mg/l) nos afluentes e nos efluentes das lagoas dos sistemas

	LA1		LA2		LF1		LF2		LM	
	DQO	NT	DQO	NT	DQO	NT	DQO	NT	DQO	NT
Afluente	9729	1195	2043	953	1309	752	1137	451	976	288
Efluente	2043	953	1309	742	1049	426	976	288	867	153
$k(d^{-1})$	0,116	-	0,017	-	0,013	0,04	0,011	0,04	0,018	0,124

Modelagem e Otimização

Em sistemas de lagoas de estabilização para tratamento de águas residuárias, a otimização consiste em minimizar o custo total e obter uma eficiência adequada em termos de tratamento. Os custos são caracterizados como de capital e operacional, os quais são influenciados pela distribuição da carga orgânica de cada lagoa (MEISHENG; KEZHAO; LIANQUAN, 1992; KEZHAO, 1994; YANG; CHEN, 1994). O custo de capital consiste no somatório dos custos da terra, de construção e de revestimento das lagoas. Já o custo operacional é constituído pela manutenção do sistema. Dessa forma, faz-se necessário à obtenção dos modelos matemáticos de custos da terra, de construção, de revestimento e de manutenção das lagoas, bem como os modelos dos principais parâmetros de funcionamento das lagoas.

Eficiência das Lagoas

Os resultados médios obtidos ao longo do fluxo das lagoas, da Unidade Experimental de Tratamento de Dejetos Suínos – UNETDS do CNPSA mostraram-se quase idênticos, caracterizando um sistema próximo ao de mistura completa, por possibilitar uma quase completa dispersão e imediata do poluente por toda a lagoa. Desse modo, ao adentrá-la, a concentração do poluente foi “igualada” à concentração efluente da mesma, apesar da relação geométrica comprimento/largura que existe entre elas.

Dessa forma, considerando-se os valores das

concentrações afluentes e efluentes médias em termos de DQO de cada lagoa, os modelos matemáticos de eficiências para as lagoas podem ser apresentados pelas equações como segue:

– para as lagoas anaeróbias, o modelo de eficiência de remoção da DQO é dado pela equação:

$$E_{ai} = \frac{k_{ai} \cdot t_i}{1 + k_{ai} \cdot t_i} F_{ai} \quad (1)$$

onde: E_{ai} é a eficiência de redução da lagoa i , em termos de DQO;

t_i é o tempo de detenção da lagoa i , em dia;

k_{ai} é a constante de degradação da DQO, em dia^{-1} ;

F_{ai} é o fator de ajuste das lagoas anaeróbias.

– para as lagoas facultativas e de maturação, os modelos de eficiência de redução dos parâmetros: DQO e Nitrogênio são caracterizados pelas respectivas expressões:

$$E_i = \frac{k_i \cdot t_i}{1 + k_i \cdot t_i} F_i \quad E_i = \frac{k'_i \cdot t_i}{1 + k'_i \cdot t_i} F'_i \quad (2)$$

onde: E_i é a eficiência de redução da lagoa i ;

t_i é o tempo de detenção da lagoa i , em dia;

k_i e k'_i são as constantes de degradação da DQO e do NT, respectivamente, em dia^{-1} ;

F_i e F'_i são os fatores de ajuste das lagoas facultativas e de maturação.

Embora a cinética de redução da DQO seja a mesma para as lagoas anaeróbias LA1 e LA2 (cinética de primeira ordem), a taxa de redução da DQO é tanto mais elevada quanto maior for a concentração da DQO do meio. As curvas de eficiência ajustadas da DQO das lagoas anaeróbias LA1 e LA2 são apresentadas na Figura 2, e da DQO e do NT nas lagoas facultativa LF1 e LF2 nas Figuras 3 e 4, e na lagoa de maturação na Fig 5.

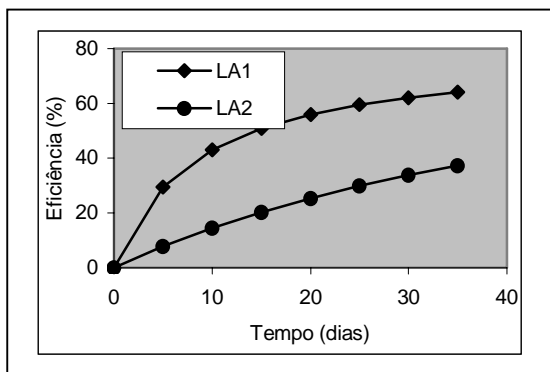


Figura 2. Relação entre eficiência de remoção da DQO com o Tempo da LA1 e da LA2

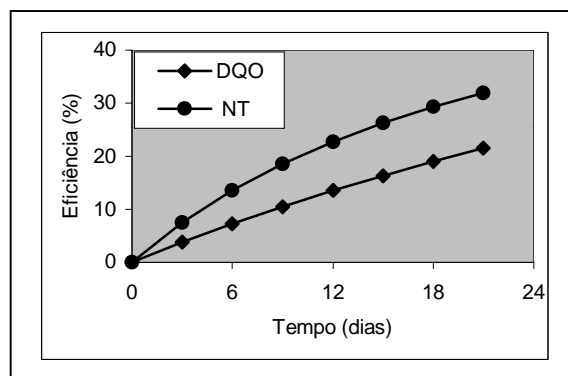


Figura 3. Relação entre eficiência de remoção da DQO e do NT com o Tempo da LF1

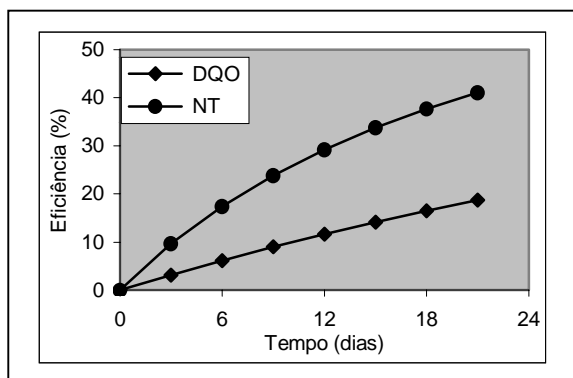


Figura 4. Relação entre eficiência de remoção da DQO e do NT com o Tempo da LF2

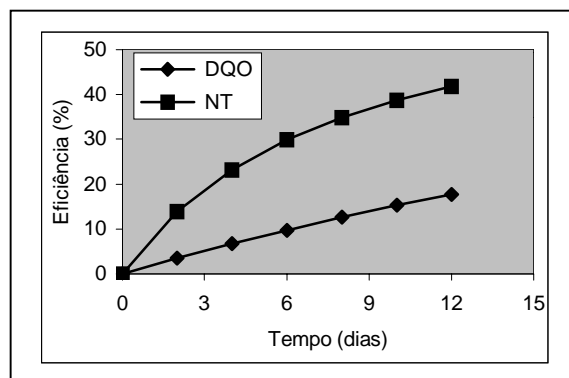


Figura 5. Relação entre eficiência de remoção da DQO e do NT com o Tempo da LM

Tempo de Detenção

O tempo de detenção de cada lagoa de estabilização é dado pela expressão:

$$t_i = \frac{V_i}{Q} \quad (3)$$

onde: V_i é o volume da lagoa i , em m^3 , e Q é a vazão, em m^3/dia .

Custo da Terra

O custo da terra consiste de área ocupada pelas lagoas acrescidas de 100% de áreas adjacentes a elas, para circulação de pessoas e/ou veículos. Como as

variáveis de decisão são as eficiências das lagoas, as quais são função do volume, o modelo matemático que melhor caracteriza é dado pela equação:

$$Ct = 1,5.Pt.\Sigma\gamma_i.V_i \quad (4)$$

onde: $\gamma_i.V_i = A_i$ (área) e 1,5 representa 50% a mais da área das lagoas;

Ct é o custo da terra do sistema de lagoas e áreas adjacentes a elas, em R\$;

γ_i é a relação entre a superfície e o volume da lagoa i , em m^2/m^3 ;

Pt é o preço da terra, em R\$/ m^2 .

Custo de Construção

O custo de construção é representado por uma equação linear, o qual engloba limpeza do terreno, escavação mecânica, transporte de terra excedente e acerto de taludes. O modelo matemático, que melhor expressa o custo de construção das lagoas é representado pela expressão:

$$C_c = n \cdot \alpha + \beta \sum V_i \quad (5)$$

onde: C_c é o custo de construção das lagoas, em R\$;

α é o coeficiente linear, em R\$;

β é o coeficiente angular, em R\$/m³.

Custo de Revestimento das Lagoas

As lagoas foram revestidas com vinimanta de PVC flexível. O modelo que melhor expressa o custo de revestimento das lagoas é representado pela equação:

$$C_r = n \cdot \mu + \psi \sum V_i \quad (6)$$

onde: C_r é o custo de revestimento das lagoas, em R\$.

μ é o coeficiente linear, em R\$;

ψ é o coeficiente angular, em R\$/m³.

Por meio dos dados obtidos de custos de construção e de revestimento, obtiveram-se os modelos ajustados, isto é, as constantes para expressar os custos de construção e de revestimento das lagoas. Os dados são plotados nas Figuras 6 e 7.

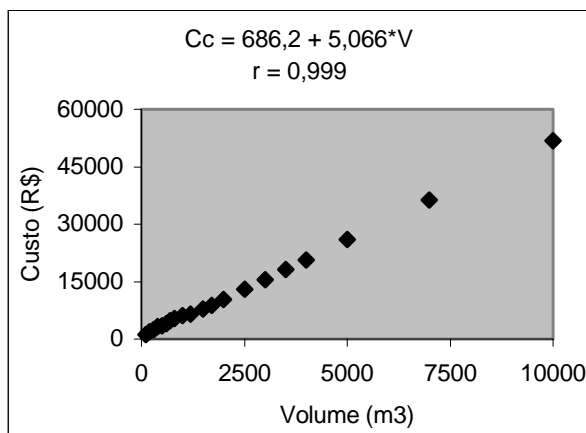


Figura 6. Custo de construção das lagoas

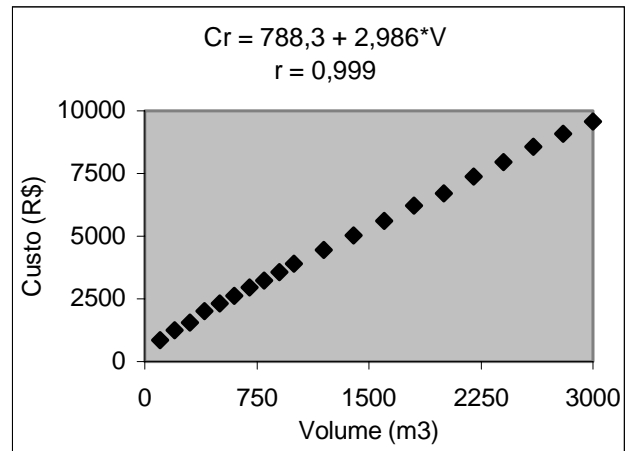


Figura 7. Custo de revestimento das lagoas

Custo de Manutenção

O custo de manutenção do sistema de lagoas é estimado com base no número mínimo de pessoas necessárias para a limpeza de áreas adjacentes a elas. Admitindo que a manutenção das áreas adjacentes às lagoas é igual a 50% das áreas ocupadas por elas. Dessa forma, a área do sistema é caracterizada pelo somatório das áreas adjacentes às lagoas e pode ser expressa como:

$$C_m = 0,5 A_t \quad \text{e} \quad A_t = \sum_{i=1}^n A_i \quad (7)$$

na qual $A_i = \gamma_i V_i$

Ressalta-se que os suinocultores terão gastos mensais, ao longo do horizonte de planejamento. Pesquisadores da área como Yang e Chen (1997), em estudos de sistema de lagoas para tratamento de dejetos suínos, indicam um período de 10 anos. Dessa forma, os custos mensais serão contabilizados na data do investimento através das seguintes expressões:

$$C_m = 0,5 \cdot \Phi (n \cdot \eta + \tau \cdot \sum \gamma_i V_i) \quad (8)$$

onde: C_m é o custo de manutenção do sistema de lagoas, em R\$;

$$\Phi = \frac{1 - (1 + r)^{-1}}{r} \quad (9)$$

ϕ é o fator do valor atual;

η é o coeficiente linear, em R\$;

τ é o coeficiente angular, em R\$/m³;

r é a taxa de juros anual;

n número de lagoas do sistema;

τ é o tempo de vida útil das lagoas, em anos.

Com os dados obtidos, foi ajustado o modelo matemático (eq. 8), por meio dos métodos dos mínimos quadrados, para expressar o custo de manutenção do sistema, no qual os valores das constantes são: $\eta = 79,7$ e $\tau = 0,032$.

Da equação (4) até a (9), têm-se os custos das lagoas:

$$CL_i = 1,5.Pt.\Sigma\gamma_i.V_i + n.\alpha + \beta.\Sigma V_i + n.\mu + \psi.\Sigma V_i + 0,5.\phi.(n.\eta + \tau.\Sigma\gamma_i) \quad (10)$$

Da equação (1) a (3), têm-se os volumes das lagoas:

– para as lagoas anaeróbias;

$$V_{ai} = Q.E_{ai} [k_{ai} (F_{ai} - E_{ai})]^{-1} \quad (11)$$

– para as lagoas facultativas e de maturação:

$$V_i = 0,5.Q.\{E_i [K_i(F_i - E_i)]^{-1} + [K_i'(F_i' - E_i)]^{-1}\} \quad (12)$$

Substituindo-se os valores da equação (11) na equação (10), tem-se os custos das lagoas anaeróbias:

$$CLA_i = 1,5.Pt.Q.\Sigma\{\gamma_{ai}.E_{ai} [k_{ai} (F_{ai} - E_{ai})]^{-1}\} + n.\alpha + Q.\beta.\Sigma\{E_{ai} [k_{ai} (F_{ai} - E_{ai})]^{-1}\} + n.\mu + Q.\psi.\Sigma\{E_{ai} [k_{ai} (F_{ai} - E_{ai})]^{-1}\} + 0,5.\phi.\{n.\eta + Q.\tau.\Sigma\{\gamma_{ai}.E_{ai} (k_{ai} (F_{ai} - E_{ai}))^{-1}\}\} \quad (13)$$

onde: CLA é o custo da lagoa anaeróbia i, em R\$.

Substituindo-se a equação (12) na equação (10), têm-se os custos das lagoas facultativas e de maturação:

$$CL_i = 0,75.Pt.Q.\Sigma\{\gamma_i.[E_i.(K_i(F_i - E_i))^{-1} + (K_i'(F_i' - E_i))^{-1}]\} + n.\alpha + \beta\{0,5.Q.\Sigma[(E_i.(K_i(F_i - E_i))^{-1} + (K_i'(F_i' - E_i))^{-1})]\} + n.\mu + \psi\{0,5.Q.\Sigma[(E_i.(K_i(F_i - E_i))^{-1} + K_i'(F_i' - E_i))^{-1}]\} + 0,5.\phi\{n.\eta + 0,5.Q.\tau.\Sigma[\gamma_i.(E_i.(K_i(F_i - E_i))^{-1} + (K_i'(F_i' - E_i))^{-1})]\} \quad (14)$$

onde: CL é o custo das lagoas facultativa e de maturação i, em R\$.

Função Objetivo

A otimização do sistema de lagoas de estabilização significa minimizar o custo total (Min CT), objetivando o sistema mais econômico e as condições de restrição é a qualidade do efluente final, isto é obter uma eficiência da matéria orgânica e de nitrogênio total de acordo com o desejo do suinocultor.

$$\text{Min CT} = \sum_{i=1}^n CLA_i + \sum_{i=1}^n CL_i \quad (15)$$

$$\text{s.a.:} \quad E_o \geq E_d$$

$$0 \leq E_{ai} \leq 1 \quad \text{e} \quad 0 \leq E_i \leq 1$$

onde: CT é o custo total do sistema, em R\$;

E_o é a eficiência obtida do sistema;

E_d é a eficiência desejada do sistema.

Aplicação

Fazendo-se um estudo para dez anos e admitindo-se taxa de juros de 10% ao ano, os custos mensais estimados de manutenção do sistema de tratamento de dejetos suínos, computados na data presente do investimento dados pela equação (9) são iguais a 77. Isto é, o fator do valor presente ($\Phi = 77$). Considerando-se as concentrações médias na entrada e na saída de cada lagoa e o tempo de detenção delas, as constantes de degradação (k) para os parâmetros da DQO e NT são dados de acordo com a tabela 2. Sendo a relação superficial área/volume de cada lagoa, como: $\gamma_{a1} = 2,42$; $\gamma_{a2} = 2,80$; $\gamma_1 = 2,64$; $\gamma_2 = 3,33$ e $\gamma_3 = 7,14$ (m²/m³). Portanto, considerando-se as cinco lagoas em estudo LA₁, LA₂, LF₁, LF₂ e LM, a equação (15) pode ser reescrita como:

$$\begin{aligned} \text{Min CT} = & 1,5 \cdot \text{Pt} \cdot \text{Q} \cdot (2,42 \text{Xa}_1 (0,116(0,8 - \text{Xa}_1))^{-1} + 2,8 \text{Xa}_2 (0,017(0,9 - \text{Xa}_2))^{-1}) + \\ & 2 \times 686,2 + 5,066 \text{Q} (\text{Xa}_1 (0,116(0,8 - \text{Xa}_1))^{-1} + \text{Xa}_2 (0,017(0,9 - \text{Xa}_2))^{-1}) + \\ & 2 \times 788,3 + 2,986 \text{Q} (\text{Xa}_1 (0,116(0,8 - \text{Xa}_1))^{-1} + \text{Xa}_2 (0,017(0,9 - \text{Xa}_2))^{-1}) + \\ & 0,5 \times 77 (2 \times 79,7 + 0,032 \text{Q} (2,42 \text{Xa}_1 (0,116(0,8 - \text{Xa}_1))^{-1} + 2,8 \text{Xa}_2 (0,017(0,9 - \text{Xa}_2))^{-1}) + \\ & 0,75 \text{Pt} \cdot \text{Q} (2,64 \text{X}_1 ((0,013(0,9 - \text{X}_1))^{-1} + (0,04(0,9 - \text{X}_1))^{-1}) + \\ & 3,33 \text{X}_2 ((0,011(1,0 - \text{X}_2))^{-1} + (0,04(0,9 - \text{X}_2))^{-1}) + \\ & 7,14 \text{X}_3 ((0,018(1,0 - \text{X}_3))^{-1} + (0,124(0,9 - \text{X}_3))^{-1})) + \\ & 3 \times 686,2 + 0,5 \text{Q} 5,066 (\text{X}_1 ((0,013(0,9 - \text{X}_1))^{-1} + (0,04(0,9 - \text{X}_1))^{-1}) + \\ & \text{X}_2 ((0,011(1,0 - \text{X}_2))^{-1} + (0,04(0,9 - \text{X}_2))^{-1}) + \text{X}_3 ((0,018(1,0 - \text{X}_3))^{-1} + (0,124(0,9 - \text{X}_3))^{-1})) + \\ & 3 \times 788,3 + 0,5 \text{Q} 2,986 (\text{X}_1 ((0,013(0,9 - \text{X}_1))^{-1} + (0,04(0,9 - \text{X}_1))^{-1}) + \\ & \text{X}_2 ((0,011(1,0 - \text{X}_2))^{-1} + (0,04(0,9 - \text{X}_2))^{-1}) + \text{X}_3 ((0,018(1,0 - \text{X}_3))^{-1} + (0,124(0,9 - \text{X}_3))^{-1})) + \\ & 0,5 \times 77 (3 \times 79,7 + 0,5 \text{Q} 0,032 (2,64 \text{X}_1 ((0,013(0,9 - \text{X}_1))^{-1} + (0,04(0,9 - \text{X}_1))^{-1}) + \\ & 3,33 \text{X}_2 ((0,011(1,0 - \text{X}_2))^{-1} + (0,04(0,9 - \text{X}_2))^{-1}) + 7,14 \text{X}_3 ((0,018(1,0 - \text{X}_3))^{-1} + (0,124(0,9 - \text{X}_3))^{-1}))) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{s.a. :} & \quad 1 - (1 - \text{Xa}_1) (1 - \text{Xa}_2) (1 - \text{X}_1) (1 - \text{X}_2) (1 - \text{X}_3) e'' E_d \\ & 0 \leq \text{Xa}_1 \leq 1; \quad 0 \leq \text{Xa}_2 \leq 1; \quad 0 \leq \text{X}_1 \leq 1; \quad 0 \leq \text{X}_2 \leq 1; \quad 0 \leq \text{X}_3 \leq 1 \quad (16) \end{aligned}$$

Os resultados obtidos no monitoramento do sistema de tratamento indicam reduções do nitrogênio total nas lagoas anaeróbias. Essas reduções são decorrentes da sedimentação do nitrogênio orgânico em suspensão e o tempo hidráulico de retenção das lagoas. Dado isto, o fator de calibração (F_{a_i}) e (F_{i_i}) das respectivas lagoas anaeróbias, facultativas e de maturação usadas para estas lagoas, variam entre 0,8 e 1,0.

A Tabela 3 apresenta as características físicas das lagoas e custos da terra, de escavação mecânica, de revestimento e de manutenção do sistema, admitindo vazão de 20m³/dia, preço da terra R\$ 10.000,00/ hectare, e eficiência do sistema de 90%, e considerando $F_{a_1} = 0,8$; $F_{a_2} = 1,0$; $F_{i_1} = 0,9$; $F_{i_2} = 0,8$; $F_{i_3} = 1,0$; $F_{i_4} = 0,9$; $F_{i_5} = 1,0$ e $F_{i_5} = 0,9$. A Tabela 4 mostra os resultados para o modelo de calibração.

Tabela 3. Resultados da aplicação prática para as características físicas das lagoas e os custos

Eficiência	Tempo de detenção (dias)	Volume das lagoas (m ³)	Área das lagoas (m ²)
$E_1 = 0,65$	$t_1 = 34$	$V_1 = 685$	$A_1 = 1.657$
$E_2 = 0,34$	$t_2 = 31$	$V_2 = 619$	$A_2 = 1.733$
$E_3 = 0,28$	$t_3 = 25$	$V_3 = 495$	$A_3 = 1.305$
$E_4 = 0,26$	$t_4 = 21$	$V_4 = 429$	$A_4 = 1.430$
$E_5 = 0,36$	$t_5 = 18$	$V_5 = 362$	$A_5 = 2.586$
Custo da terra (R\$)	Custo de Construção (R\$)	Custo de revestimento (R\$)	Custo de Manutenção (R\$)
$Ct_1 = 2.485,95$	$Cc_1 = 4.155,57$	$Cr_1 = 2.833,21$	$Cm_1 = 5.110,24$
$Ct_2 = 2.600,21$	$Cc_2 = 3.822,55$	$Cr_2 = 2.636,93$	$Cm_2 = 5.204,09$
$Ct_3 = 1.957,79$	$Cc_3 = 3.190,79$	$Cr_3 = 2.264,56$	$Cm_3 = 4.676,45$
$Ct_4 = 2.144,41$	$Cc_4 = 2.861,09$	$Cr_4 = 2.070,22$	$Cm_4 = 4.829,73$
$Ct_5 = 3.879,35$	$Cc_5 = 2.521,19$	$Cr_5 = 1.869,88$	$Cm_5 = 6.254,69$
Total:			
13.067,71	16.551,19	11.674,80	26.075,19

Custo total do sistema: R\$ 67.368,89

Tabela 4. Resultados para o modelo de calibração

L A G O A S						
Eficiência	LA1	LA2	LF1	LF2	LM	TOTAL
DQO	0,64	0,35	0,22	0,19	0,25	0,89
NT	0,20	0,20	0,40	0,42	0,62	0,91

Na calibração, a redução do nitrogênio nas lagoas anaeróbias é considerado 20% para cada lagoa, se o tempo de detenção estiver próximo a 20 dias.

Conclusões

Os parâmetros fundamentais para projetos de lagoas que tratam dejetos suínos, para adequação do efluente às exigências dos padrões ambientais, são DQO (ou DBO) e Nitrogênio. Esses resíduos são altamente concentrados em matéria orgânica e nutrientes, e suas remoções ocorrem de maneira adversa em sistemas de lagoas, ou seja, o primeiro é removido basicamente nas lagoas anaeróbias, e o segundo nas lagoas facultativa e, de forma otimizada, nas lagoas de maturação.

O modelo (16) é dinâmico e flexível, e isso permite a introdução de vários tipos de lagoas, selecionadas de acordo com o seu desempenho e com os aspectos econômicos. Além disso, esse procedimento permite que os suinocultores regulem as concentrações de DQO (ou DBO) e de Nitrogênio total que serão despejados nos corpos receptores.

Referências

AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION. *Standard methods for the examination of water and wastewater*. 19th ed. Washington, D.C., 1995.

ARCHER, H. E.; MARA, D. D. Waste stabilization pond development in New Zealand. In: INTERNATIONAL IWA SPECIALIST GROUP CONFERENCE ON WASTE STABILISATION PONDS, 5., 2002, Auckland, New Zealand. *Proceeding...* Auckland, New Zealand Pond Technology for the New Millenium, 2002. v. 1, p.19-24

BELLI FILHO, P.; CASTILHOS, A. B.; LAPLANCHE, A. Etude comparative du stockage du lisier de porc avec fosse à Chambre unique et avec fosse à chambres en séries. In: 2^{ÈME}. COLLOQUE INTERNATIONAL DE RECHERCHE SUR LES SOUS-PRODUITS DE TRAITEMENT ET DÉPURATION DES FLUIDES: NUISANCES AGRICOLES: CONSTATS ET SOLUTIONS, 2., 1997, Rennes, França. *Annales...* Rennes, França 1997.

BENTO, A. P.; RIBEIRO, L. F.; SARTORATO, J. Wastewater treatment using stabilization ponds: Florianópolis experience, south of Brazil. In: INTERNATIONAL IWA SPECIALIST GROUP CONFERENCE ON WASTE STABILISATION PONDS, 5., 2002, Auckland, New Zealand. *Proceeding...* Auckland, New Zealand: Pond Technology for the Millenium,. 2002. v. 2, p.679-684.

COSTA, R. H. R.; MEDRI, W.; PERDOMO, C. C. High-rate pond for treatment of piggery wastes. *Water Science and Technology*, London, v. 2, n.10-11, p.357-362, 2000

CAZERRÉ, M. M. *Otimização de lagoas anaeróbias para tratamento de dejetos suínos*. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. 2000.

DALAVÉQUIA, M. A. *Avaliação de lagoas de estabilização para tratamento de dejetos suínos*. 2000. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. 2000.

HOODA, P. S.; EDWARDS, A. C.; ANDERSON, H. A.; MILLER, A. A reviw of water quality concerns in livestock farming areas. *Science of the Total Environment*, Amsterdam, v.250, p.143-167, 2000.

KELLNER, E.; PIRES E. C. Influence of the termal stratification in the hidraulic behavior of stabilization ponds. In: CONFERÊNCIA LATINO AMERICANA EN LAGUNAS DE ESTABILIZACION Y REUSO, 1., 2000, Santiago de Cali, Colombia. *Anales...* Santiago de Cali, Colombia, 2000. p.187-198.

KEZHAO, Z. Pond system optimization. In: INTERNATIONAL CONFERENCE, SINGAPORE, 1994, Singapore Rai. *Proceeding...* Singapore Rai: National University of Singapore, 1994. p. 275-286, 1994.

KÖNING, A.; CEBALLOS, B. S. O.; CAVALCANTI, L.E.G. Pre-evaluation of real scale WSP performance in Northeast of Brazil. In: INTERNATIONAL IWA SPECIALIST GROUP CONFERENCE ON WASTE STABILISATION PONDS, 5., 2002, Auckland, New Zealand. *Proceeding ...* Auckland, New Zealand: Pond Technology for the New Millenium, 2002. p.61-68,

- MARA, D. D.; PEARSON, H. W. *Design manual for waste stabilization ponds in Mediterranean Countries*: European Investment Bank, Mediterranean Environmental Technical Assistance Programme. Leeds, England: Lagoons Technology International, 1998.
- MEDRI, W. *Modelagem e otimização de sistemas de lagoas de estabilização para tratamento de dejetos suínos*. Florianópolis, 1997. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. 1997.
- MEISHENG, N.; KEZHAO, Z.; LIANQUAN, L. System optimization of stabilization ponds. *Water Science and Technology*, London, v. 26, n. 7-8, p. 1679-1688, 1992.
- PORK WORLD Estatística. *A Revista do Suinocultor Moderno*. Disponível em: <<http://www.porkworld.com.br>> . Acesso em: 2002.
- ZANOTELLI, C. T. *Modelagem matemática de nitrogênio e fósforo em lagoas facultativas e de aguapés para tratamento de dejetos suínos*. Florianópolis, 2002. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. 2002.
- YANG, P. Y.; CHEN, H. A land-limited and energy-saving treatment system for dilute swine wastewater. *Bioresource Technology*, Essex, v.49, n.2, p.129-137, 1994.