

Risco de sobrecarga em lagoa facultativa primária em região de clima quente

Fernando José Araújo da Silva

fjas@unifor.br

Vicente de Paulo P. B. Vieira

vpvieira@ufc.br

Raimundo Oliveira de Souza

rsouza@ufc.br

Resumo

Investigou-se o risco de sobrecarga orgânica em lagoa facultativa primária com base em modelos empíricos. A função-desempenho de avaliação de risco foi empregada em estudo de caso, numa lagoa facultativa em Fortaleza, Ceará (3° 46' 43" sul 38° 30' 27" oeste, 11,0 m a.n.m). Para efeito comparativo, foram consideradas situações diferentes com os métodos de simulação Monte Carlo, PEM e MFOSM. O risco médio de sobrecarga da ETE do Lagamar variou entre 2,21 e 16,93%, com a temperatura média mensal mais baixa ao longo do ano. Empregando a temperatura média mínima absoluta anual, o risco médio foi maior (entre 2,51 e 28,11%). Para λ_s igual a 350 kg DBO/ha.dia, o risco médio foi em torno de 10%. Em regiões com características climáticas semelhantes às de Fortaleza, é recomendável adotar esta carga máxima. A equação sugerida por MARA (1987) é mais conservadora, com risco menor, em razão de λ_s mais baixa. Deve-se dar atenção às variações de concentração de DBO e de vazão de esgotos.

Palavras-chave: Lagoas facultativas. Risco de sobrecarga. Confiabilidade.

Abstract

Organic overloading risk in primary facultative pond was investigated considering empiric design models. A general risk evaluation model was used in a case study, applied to a full scale primary facultative pond in Fortaleza, Ceará (3° 46' 43" south; 38° 30' 27" west, 11.0 m a.s.l). Three risk evaluation methods were applied: Monte Carlo simulation, PEM and MFOSM. Mean overloading risk varied from 2.21 to 16.93%, considering the mean temperature of coldest month in the year. Using mean from monthly lowest temperature the risk was higher (between 2.51 and 28.11%). For a maximum surface loading of 350 kg DBO/ha.day the mean risk was around 10%. In areas with climatic characteristics similar to those found in Fortaleza, it is advisable to adopt the limit loading. The equation suggested by MARA (1987) is more conservative, with lower risk due to the smaller λ_s . Attention must be paid to the variations of BOD concentration and of flow rate.

Keywords: Facultative ponds. Overloading risk. Reliability.

1 Introdução

As lagoas de estabilização são consideradas uma das técnicas mais efetivas para o tratamento de esgotos sanitários. São simples de construir, operar e manter. São mais atraentes em regiões de clima quente, e quando o custo de terreno para implantação é baixo. As configurações mais simples desta tecnologia de tratamento de esgotos são constituídas de uma única lagoa facultativa primária (i.e. que recebem esgoto bruto).

As lagoas facultativas são assim denominadas em razão da coexistência dos mecanismos de digestão aeróbia e anaeróbia para remoção da matéria orgânica. O processo de degradação da matéria orgânica é alcançado a partir da relação mutualística entre algas e bactérias (MARA et al., 1992; VON SPERLING, 2002).

O dimensionamento de lagoas facultativas é freqüentemente baseado em modelo empírico que considera o carregamento superficial máximo admissível (λ_s) de matéria orgânica na lagoa, expresso como kg DBO/ha.dia. O valor

de λ_s é função da temperatura média mensal mais baixa ao longo do ano. O Quadro 1 mostra as equações empíricas mais utilizadas para determinação do valor de λ_s .

Quadro 1: Equações empíricas mais empregadas na determinação da carga superficial máxima admissível (λ_s), em função da temperatura média mensal mais baixa ao longo do ciclo anual.

<i>Equação</i>	<i>Número</i>	<i>Referência</i>
$\lambda_s = 20.T - 120$	(1)	MARA (1976)
$\lambda_s = 20.T - 60$	(2)	ARTHUR (1983)
$\lambda_s = 350.(1,107 - 0,002.T)^{T-25}$	(3)	MARA (1987)
$\lambda_s = 357.(1,085)^{T-20}$	(4)	YANEZ (1993)
$\lambda_s = 26.T - 156$	(5)	MARA et al. (1997)

λ_s = Kg DBO/ha.dia;

T = Temperatura em °C.

A área da lagoa facultativa é função de três variáveis. Além de λ_s , é necessário conhecer a vazão média a ser tratada e a concentração média de DBO do esgoto bruto afluente, conforme mostrado na Equação 6. O cálculo da área da lagoa é de maneira simples, conforme mostra a Equação 7, após a correção apropriada das unidades dimensionais (MARA et al., 1992).

$$A = f(L; Q; \lambda_s) \quad (6)$$

$$A = 10. Q. L/\lambda_s \quad (7)$$

Onde: A = área da lagoa facultativa primária em m²;

L = DBO média do esgoto bruto em g/m³;

Q = vazão média do esgoto bruto em m³/dia;

λ_s = carga orgânica superficial em kg DBO/ha.dia.

2 Risco de sobrecarga em lagoas facultativas

Conforme já declarado, o critério de dimensionamento da área da lagoa considera apenas os valores médios de L, Q e λ_s . Esta última variável também é obtida a partir de um valor médio. Na realidade, ocorrem variações de L, Q e λ_s que podem ser observadas até mesmo ao longo do dia.

Para L e Q, valores acima da média significam probabilidade de a lagoa funcionar em condições de insegurança (i.e. acima de sua capacidade de carga). Quanto à temperatura, variável necessária ao cálculo de λ_s , valores abaixo da média mensal mais baixa durante o ano implicam na necessidade de área maior para que seja respeitada a mesma capacidade de carga orgânica definida *a priori* no projeto.

O funcionamento de lagoa facultativa com carga orgânica superior à sua capacidade pode resultar em sensível redução da biomassa de algas (MARA, 1987; YANEZ, 1993). Tal decréscimo resulta em concentrações mínimas de oxigênio dissolvido, com diminuição de desempenho e possibilidade de exalação de mau cheiro. No caso do mau odor, o principal responsável é o H₂S gerado na camada anaeróbia da lagoa. É necessária uma camada aeróbia consistente na parte superior da coluna líquida da lagoa, a fim de que o enxofre em forma reduzida seja oxidado a formas não odoríferas. Sabe-se ainda que cargas superiores a 350 kg DBO/ha.dia podem contribuir para o mau funcionamento da lagoa.

Pouca ou nenhuma atenção costuma ser dada ao risco de funcionamento de lagoas de estabilização sob condição de sobrecarga, quando estas atingem a vazão máxima operacional. Em geral, tal foco é resultante de inspeção operacional de lagoas, e quando já há problema de baixo desempenho e geração de mau odor.

O presente trabalho surge da necessidade de se avaliar o risco de sobrecarga em lagoas facultativas primárias, ao considerar variações reais de vazão, de concentração do esgoto bruto afluente e de λ_s . Assim, sob a ótica de risco de falha, é possível definir a seguinte função-desempenho para lagoas facultativas:

$$P [Z < 0] = A - 10. Q. L/\lambda_s \quad (8)$$

Na função-desempenho, A é uma constante definida como a área de uma lagoa projetada e em funcionamento, representando a capacidade do sistema (C). O segundo termo (i.e. $10 \cdot Q \cdot L/\lambda_s$) representa a solicitação (S) do sistema, sendo, portanto, a área demandada para tratamento do esgoto.

A probabilidade de falha (i.e. sobrecarga) representada pela função geral e mostrada na equação anterior é redefinida da seguinte maneira para uma lagoa já existente:

$$Z = \text{Constante} - S \quad (9)$$

$$S = 10 \cdot Q \cdot L/\lambda_s \quad (10)$$

É importante atentar que cada equação mostrada no Quadro 1 produz um valor de λ_s . Desta forma, para uma dada localidade e sua característica climática, haverá valores distintos de λ_s adotáveis como critério de projeto no dimensionamento da lagoa. É possível ainda considerar certa margem de segurança se, ao invés da temperatura média mensal mais baixa ao longo do ano, for empregada a temperatura média mínima absoluta no cálculo de λ_s . Haverá, assim, pelo menos 10 valores limites de λ_s , sendo 5 para a temperatura média mensal mais baixa ao longo do ano e o restante para a temperatura média mínima absoluta.

O presente trabalho busca determinar o risco de sobrecarga de lagoas facultativas em região de clima quente, considerando variações de vazão afluente, de concentração de DBO do esgoto bruto e de λ_s em função da temperatura. Para esta última variável será considerada não apenas a temperatura média mensal mais baixa ao longo do ano, mas também a temperatura média mínima absoluta.

O estudo considera todas as equações apresentadas no Quadro 1. São utilizados três métodos de cálculo, descritos a seguir:

Mean value first order second moment - MFOSM

Consiste na expansão da função-desempenho em série de Taylor em torno dos pontos médios das variáveis (VOSE, 1996). Consideram-se apenas os termos de primeira ordem. A aplicação no estudo leva em conta duas simplificações para o desenvolvimento matemático da solução, conforme salienta VIEIRA (2005): 1) as variáveis são estatisticamente independentes, com fraca correlação entre si e 2) o segundo termo da função-desempenho (a área requerida em função de Q , L e λ_s) tem sua variância igualada à da própria função original. Assim:

$$\text{VAR}(Z) = \text{VAR}(S) \quad (11)$$

$$\text{VAR}(S) = \left(\frac{\partial S}{\partial Q}\right)^2 \cdot \sigma_Q^2 + \left(\frac{\partial S}{\partial L}\right)^2 \cdot \sigma_L^2 + \left(\frac{\partial S}{\partial \lambda_s}\right)^2 \cdot \sigma_{\lambda_s}^2 \quad (12)$$

$$\frac{\partial S}{\partial Q} = \frac{10 \cdot L}{\lambda_s} \quad (13)$$

$$\frac{\partial S}{\partial L} = \frac{10 \cdot Q}{\lambda_s} \quad (14)$$

$$\frac{\partial S}{\partial \lambda_s} = -\frac{10 \cdot L \cdot Q}{\lambda_s^2} \quad (15)$$

O valor do risco é dado então por:

$$K = 1 - \Phi\left(\frac{\mu_Z}{\sigma_Z}\right) \quad (16)$$

Método de estimativa por pontos (Point Estimation Method – PEM)

Baseia-se na analogia entre a distribuição de probabilidades e a distribuição vertical de cargas em um sistema rígido (MILLER, WHYATT e McHUGH, 2006). O método contorna as dificuldades de determinação de derivadas de função-desempenho, no desenvolvimento de séries de Taylor usado nos métodos FOSM (First Order Second Moment) (VIEIRA, 2005). Com o método PEM e as variáveis do presente estudo, o valor de Z será dado por:

$$Z = f[\mu_{Q\pm}\sigma_Q; \mu_{L\pm}\sigma_L; \mu_{T\pm}\sigma_T] \quad (11)$$

Os valores de Z variam para as diferentes combinações dos limites superiores e inferiores das variáveis Q, L e ls na função geral. Para três variáveis existirão, portanto, 8 valores de Z. A influência das correlações (ρ) entre as variáveis da função-desempenho pode ser computada, sendo representadas pelo conjunto de formulações abaixo (Equações 12 a 15). Caso as correlações entre variáveis não sejam significativas, os valores de P podem ser considerados iguais a 1/8. O valor médio de Z [E(Z)] será determinado conforme a Equação 16 e o risco de falha dado pela Equação 17.

$$P_{+++} = P_{---} = (1/8).(1 + \rho_{Q,L} + \rho_{L,T} + \rho_{Q,T}) \quad (12)$$

$$P_{++-} = P_{--+} = (1/8).(1 + \rho_{Q,L} - \rho_{L,T} - \rho_{Q,T}) \quad (13)$$

$$P_{+-+} = P_{-+-} = (1/8).(1 - \rho_{Q,L} - \rho_{L,T} + \rho_{Q,T}) \quad (14)$$

$$P_{+--} = P_{-++} = (1/8).(1 - \rho_{Q,L} + \rho_{L,T} - \rho_{Q,T}) \quad (15)$$

$$E(Z) = P_{+++}Z_{+++} + P_{++-}Z_{++-} + P_{+-+}Z_{+-+} + P_{+--}Z_{+--} + P_{--+}Z_{--+} + P_{-+-}Z_{-+-} + P_{-++}Z_{-++} + P_{---}Z_{---} \quad (16)$$

$$K = 1 - \Phi\left(\frac{E(Z)}{\sigma_Z}\right) \quad (17)$$

Simulação Monte Carlo

Método de Simulação Monte Carlo pressupõe o conhecimento das distribuições de probabilidades das variáveis que integram as funções de solicitação (S) e de capacidade (C). O método é bastante prático e parte da premissa de que as completas distribuições de probabilidade das variáveis randômicas dependentes são facilmente determinadas.

A idéia básica da ferramenta é formar uma amostra significativa do comportamento de um sistema, pelo sorteio de situações aleatórias e respectiva análise. Intenta-se assim avaliar o valor médio dos resultados ou outros parâmetros, e daí deduzir o comportamento global do sistema a partir do comportamento da amostra. A simulação Monte Carlo é um método usado em muitas áreas do conhecimento, e encontra seu lugar na Engenharia Ambiental (EPA, 1997). Uma descrição do procedimento utilizado no presente estudo é feita a seguir:

- a) Geração de 1.000 números aleatórios ($\mu_{1-1.000}$) entre 0 e 1 com distribuição uniforme;
- b) Obtenção de 1.000 números aleatórios de cada variável da função-desempenho ($Q_{1-1.000}$; $L_{1-1.000}$; $T_{1-1.000}$), correspondentes à distribuição específica de cada uma;
- c) Cálculo de resultados da função-desempenho com o emprego combinado dos valores definidos nos itens a e b.

O cálculo da probabilidade de sobrecarga é obtido pela razão entre a quantidade de valores negativos de Z ($N_{Z<0}$) e a quantidade total de eventos Z gerados (N_Z), formulado abaixo:

$$P_{\text{sobrecarga}} = N_{Z<0}/N_Z \quad (18)$$

3 A lagoa facultativa do Lagamar – estudo de caso

O presente estudo tomou como objeto uma lagoa facultativa primária em escala real. A estação de tratamento de esgotos (ETE) do Lagamar é constituída de uma lagoa facultativa primária e foi projetada para operar com uma carga orgânica superficial de 244 kg DBO/ha.dia (ARAÚJO, 2000). A lagoa está localizada às margens do rio Cocó (3° 46' 43" sul 38° 30' 27" oeste, 11,0 m a.n.m), no bairro Lagamar, em Fortaleza, Ceará, Nordeste do Brasil.

Para o projeto foi considerada uma DBO de 288 g/m³ e uma vazão de 2.539,3 m³/dia. A lagoa tem de área 30.000 m², profundidade 1,7 m, e tempo de detenção hidráulica (Volume da lagoa/Qmédia) de projeto igual a 20,1 dias. O projeto é datado de 1984 e o início da operação da ETE foi em dezembro de 1985. A Figura 1 mostra uma vista aérea da lagoa facultativa do Lagamar.



Figura 1: Vista aérea da lagoa facultativa do Lagamar.

3.1 Dados experimentais e função-desempenho da lagoa facultativa do Lagamar

Foram compiladas da Estação Meteorológica do *Campus* do Pici na Universidade Federal do Ceará – UFC as medições de temperatura média mensal ao longo do ciclo anual (T1) e mínima absoluta mensal (T2) relativas a um período de 32 anos (entre 1966 e 1998).

Os dados de vazão e concentração de DBO do esgoto bruto foram compilados de resultados parcialmente publicados no trabalho de DA SILVA e BEZERRA (2005), com 19 estações de tratamento de esgotos em Fortaleza, Ceará. A distribuição de resultados dos parâmetros foi admitida como normal ou próxima da normal. Esta hipótese simplificadora é condição relevante para o presente estudo de risco.

A afirmação de que as distribuições são normais considerou os seguintes elementos sugeridos por PAGANO e GAUVREAU (2004): 1) a razão entre mediana e média deve ser próxima de 1; 2) o desvio médio deve ser próximo a 0,8 do valor do desvio padrão e 3) a amplitude semi-quartilica deve se aproximar de 0,67 do valor do desvio padrão. A Tabela 1 mostra o resumo estatístico dos dados empregados no estudo.

Tabela 1: Resumo estatístico das variáveis empregadas.

Parâmetro	Q (m ³ /d)	DBO (g/m ³)	T1 (°C)	T2 (°C)
Média	2.155,2	338	23,5	21,9
Mediana	2.040	352	23,6	22,0
Desvio padrão	476,8	85	1,20	1,16
Variância	227.374	7.201	1,4	1,4
Mínimo	1.308,0	143	18,4	16,6
Máximo	3.709,0	561	31,1	25,1
Número de dados	23	38	392	392
Coefficiente de variação (%)	22,1	25,1	5,1	5,3
Desvio médio/desvio padrão	0,7	0,8	0,7	0,7
Amplitude semi-quartilica/desvio padrão	0,5	0,6	0,6	0,5
Mediana/média	0,95	1,04	1,00	1,00

Outra informação relevante diz respeito à correlação entre as variáveis consideradas no estudo de risco. A Tabela 2 mostra que não há correlação significativa entre as variáveis. No caso da temperatura mínima absoluta mensal (T2), esta apenas substitui a variável temperatura média mensal no cálculo de λ_s . Portanto, a correlação existente entre as duas variáveis não é aplicável. As equações que definem o valor de λ_s em função de T1 e T2 produzem resultados cuja correlação é, obviamente, igual à obtida para as variáveis de temperatura.

Tabela 2: Matriz de correlação entre os parâmetros a serem empregados no estudo.

Parâmetros	Q	DBO	$\lambda_s = f(T1)$	$\lambda_s = f(T2)$
Q	1			
DBO	0,0422	1		
$\lambda_s = f(T1)$	-0,0852	0,2514	1	
$\lambda_s = f(T2)$	-0,1206	0,1219	0,7800	1

4 Resultados e discussão

A Tabela 3 mostra os limites admissíveis de λ_s (kg DBO/ha.dia) para quatro valores de temperatura em Fortaleza, correspondentes à média mensal mais baixa ao longo do ano, média mínima absoluta ao longo do ano, valor mínimo das temperaturas médias mensais e valor mínimo das temperaturas mínimas absolutas mensais. A tabela mostra ainda a temperatura para a qual se obtém o valor de λ_s igual a 350 kg DBO/ha.dia em cada equação. Quando foram empregados valores mínimos das mínimas médias mensais e mínimas médias absolutas mensais, o limite de 350 kg DBO/ha.dia foi respeitado, em qualquer uma das equações empregadas.

Tabela 3: Carga superficial máxima admissível (λ_s) para as diferentes equações de projeto, em função da temperatura e valor da temperatura correspondente à carga de 350 kg DBO/ha.dia.

Equação	$\lambda_s = f(Temp.)$ em kg DBO/ha.dia				Temperatura em que $\lambda_s = 350$ kg DBO/ha.dia
	23,5 °C ^a	21,9 °C ^b	18,8 °C ^c	16,6 °C ^d	
$\lambda_s = 20.T - 120$	350	318	248	212	23,5 °C
$\lambda_s = 20.T - 60$	410	378	308	272	20,5 °C
$\lambda_s = 350.(1,107 - 0,002.T)^{T-25}$	321	289	224	192	25,0 °C
$\lambda_s = 357.(1,085)^{T-20}$	476	417	314	271	19,7 °C
$\lambda_s = 26.T - 156$	455	413	322	276	19,4 °C
Média	402	363	283	245	21,6 °C
Coefficiente de variação (%)	17,1	15,9	15,7	16,7	11,5

^a temperatura média mais baixa ao longo do ano;

^b temperatura média mínima absoluta ao longo do ano;

^c valor mínimo das temperaturas médias mensais;

^d valor mínimo das temperaturas mínimas absolutas mensais.

As Tabelas 4 e 5 mostram o risco calculado para cada modelo. Nas tabelas foram consideradas tanto a temperatura média mais baixa ao longo do ano quanto a média mínima absoluta ao longo do ano, respectivamente. Os valores de risco obtidos com os diferentes métodos foram próximos para as Equações de números 1 a 3 (mostradas no Quadro 1).

No caso das Equações 4 e 5, o risco calculado pelo método Monte Carlo foi maior. Nestas situações as distribuições da variável λ_s não devem ser necessariamente aproximadas àquelas aplicadas aos demais métodos, conforme lembra VOSE (1996). Assim, é provável que um maior nível de precisão seja alcançado com o incremento do número de iterações. Também as Equações 4 e 5 sugerem λ_s mais elevada que as demais, de maneira que os valores de risco sejam menores em si mesmos.

Tabela 4: Risco de sobrecarga orgânica da lagoa facultativa do Lagamar considerando a temperatura média mais baixa ao longo do ano.

Equação	Método			
	MFOSM	PEM	Monte Carlo	Média
$\lambda_s = 20.T - 120$	9,85	10,03	10,10	9,99
$\lambda_s = 20.T - 60$	2,12	2,28	2,80	2,40
$\lambda_s = 350.(1,107 - 0,002.T)^{T-25}$	17,36	18,14	15,30	16,93
$\lambda_s = 357.(1,085)^{T-20}$	0,30	0,32	6,0	2,21
$\lambda_s = 26.T - 156$	0,52	0,55	9,0	3,36

Tabela 5: Risco de sobrecarga orgânica da lagoa facultativa do Lagamar considerando a temperatura média mínima absoluta ao longo do ano.

Equação	Método			
	MFOSM	PEM	Monte Carlo	Média
$\lambda_s = 20.T - 120$	18,41	20,04	15,60	18,01
$\lambda_s = 20.T - 60$	5,05	6,06	7,30	6,14
$\lambda_s = 350.(1,107 - 0,002.T)^{T-25}$	28,77	30,85	24,70	28,11
$\lambda_s = 357.(1,085)^{T-20}$	1,92	2,50	3,10	2,51
$\lambda_s = 26.T - 156$	2,02	2,68	3,30	2,67

Nos modelos de dimensionamento, valores menores de λ_s resultam em área maior da lagoa. Portanto, a utilização de valores mais baixos de temperatura para calcular λ_s é mais seguro. Porém, maiores áreas implicam em investimento maior, constituindo assim uma abordagem mais conservadora. Resta, então, o desafio de determinar qual seria o risco admissível.

A adoção de λ_s igual ao limite de segurança para bom funcionamento de lagoas facultativas (i.e. 350 kg DBO/ha.dia) mostrou que o risco médio seria de 10,19%, 10,20% e 9,34% com os métodos Monte Carlo, PEM e MFOSM, respectivamente. Os valores foram próximos do risco calculado para temperatura média mais baixa ao longo do ano, com λ_s determinada com a Equação 1 do Quadro 1. Foram, por outro lado, maiores que os obtidos com as Equações 2, 4 e 5.

No caso da Equação 3, que é a mais conservadora de todas, o risco foi bem maior se comparado aos resultados determinados com base nas demais equações. Quando se empregam valores menores de temperatura, conforme mostrado, os resultados do cálculo do risco são majorados.

Os resultados evidenciaram que, para regiões com características climáticas semelhantes ou com temperaturas mínimas superiores à de Fortaleza, seria recomendável adotar o limite de segurança de 350 kg DBO/ha.dia no cálculo de λ_s . Assim, em princípio, o risco máximo admissível seria em torno de 10%. Pode-se afirmar, por outro lado, que a Equação 3 sugerida por MARA (1987) é mais adequada. Nela o valor de λ_s seria menor que o determinado com as outras equações e, portanto, o risco seria também menor.

Um aspecto importante a ser considerado é que, apesar de haver uma distribuição normal bem definida para DBO (L), a distribuição probabilística da vazão (Q) pode variar consideravelmente. Restrições de uso da água, clima, hábitos, pressão na rede de distribuição, valor da tarifa, capacidade de pagamento, e qualidade da água podem influenciar o consumo e, por consequência, a geração de esgotos (CAMPOS e VON SPERLING, 1996).

5 Conclusão

O risco médio de sobrecarga da ETE do Lagamar variou entre 2,21 e 16,93%, para a temperatura média mensal mais baixa ao longo do ano, com as cinco equações empregadas no cálculo de λ_s e os três métodos empregados. No caso de aplicação da temperatura média mínima absoluta anual, o risco médio teve maior variação (entre 2,51 e 28,11%). Para temperaturas mais baixas, o risco imposto pela variação deste parâmetro é mais relevante.

Os riscos calculados com os diferentes métodos foram próximos com o emprego das equações propostas por MARA (1976), ARTHUR (1983) e MARA (1987). Quando λ_s foi obtido a partir das equações de YANEZ (1993) e MARA et al. (1997), o risco calculado pelo método Monte Carlo foi maior. Possivelmente, uma elevação do grau de precisão será alcançada realizando-se maior número de iterações.

Para o valor de λs igual a 350 kg DBO/ha.dia, considerado limite de segurança operacional, o risco médio foi em torno de 10%, indistintamente do método empregado. Neste caso, tomou-se como referência a temperatura média mais baixa ao longo do ano. Assim, em regiões com características climáticas semelhantes às de Fortaleza é recomendável adotar o limite de segurança. Paralelo a isso, é possível afirmar que a equação sugerida por MARA (1987) é mais adequada, pois produz um risco menor, em razão de λs mais baixa.

É necessário, ainda, considerar de maneira mais detalhada as variações de concentração de DBO e de vazão de esgotos. Importa dar maior atenção às características de uso da água e conseqüente geração de esgotos.

Referências

- ARAÚJO, L. F. P. *Reuso com lagoas de estabilização*: potencialidade no Ceará. Fortaleza: SEMACE, 2000. 136 p.
- ARTHUR, J. P. *Notes on the design and operation of waste stabilization ponds in warm climates of developing countries*. Washington.: World Bank, 1983. 123 p. Technical paper nº. 7
- CAMPOS, H. M.; VON SPERLING, M. Estimation of domestic wastewater in a developing country based on social economic variables. *Water Science and Technology*, London, v. 34, n. 3/4, p. 71-77. Mar./Apr. 1996.
- DA SILVA, F. J. A.; BEZERRA, M. E. E. Contribuição à caracterização de esgotos sanitários em Fortaleza, Ceará. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 23., 2005, Campo Grande, MS. *Anais...* Campo Grande, MS: ABES, 2005.
- ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. *Guiding principles for Monte Carlo analysis*. Washington, DC.: Risk Assessment Forum, 1997. 35 p. Technical Panel.
- MARA, D. D. Waste stabilization ponds: problems and controversies. *Water Quality International*, London, n. 1, p. 20-22, Mar. 1987.
- MARA, D. D. et al. *Waste stabilization ponds: a design manual for Eastern Africa*. Leeds, UK: Lagoon Technology International, 1992. 121 p.
- MILLER, S. M.; WHYATT, J. K.; McHUGH, E. D. *Applications of the point estimation method for stochastic rock slope engineering*. Moscow: Department of Civil Engineering. University of Idaho, 2006. 12 p. Working Paper.
- PAGANO, M.; GAUVREAU, K. *Princípios de bioestatística*. 2. ed. São Paulo: Pioneira Thomson Learning, 2004. 506 p.
- VIEIRA, V. P. P. B. *Análise de risco em recursos hídricos: fundamentos e aplicações*. Porto Alegre: ABRH, 2005. 372 p. (Coleção ABRH 10).
- VON SPERLING, M. *Princípios do tratamento biológicos de águas residuárias: lagoas de estabilização*. 2. ed. Belo Horizonte: DESA/UFMG, 2002. 196 p.
- VOSE, D. *Quantitative risk analysis: a guide to Monte Carlo simulation*. Chichester: John Wiley & Sons, 1996. 328 p.
- YÁNEZ, F. *Lagunas de estabilización: teoría, diseño y mantenimiento*. Cuenca: ETAPA, 1993. 421 p.

SOBRE OS AUTORES

Fernando José Araújo da Silva

Engenheiro Civil pela Universidade de Fortaleza – UNIFOR. Mestre em Engenharia Civil, área de Engenharia Sanitária e Ambiental pela Universidade Federal da Paraíba – UFPb. Professor Adjunto do curso de Engenharia Civil da UNIFOR. Doutorando do Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental – DEHA da Universidade Federal do Ceará – UFC, desde março de 2006.

Vicente de Paulo Pereira Barbosa Vieira

Engenheiro Civil Economista pela Universidade Federal do Ceará. Mestre em Hidrologia Aplicada pelo Instituto de Pesquisas Hidráulicas – IPH da Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS. Ph.D. pela Colorado State University – CSU em Gestão dos Recursos Hídricos. Professor Titular do Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental – DEHA da UFC.

Raimundo Oliveira de Souza

Engenheiro Civil. Doutor pela Universidade de São Paulo –m USP. Professor Titular do Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental – DEHA da Universidade Federal do Ceará – UFC.