

Lagoa anaeróbia: teorias e práticas operacionais

HISSASHI KAMIYAMA

Engenheiro do Depto. de Projeto ao Interior, Superintendência de Apoio Técnico ao Interior/Diretoria de Operação do Interior da Sabesp

O autor busca esclarecer, a nível atual de conhecimentos, as teorias sobre Lagoa Anaeróbia e práticas operacionais recomendáveis decorrentes daquelas teorias. O autor desce a detalhes interessantes, como "Recomendações para o projeto da L. An.", e se preocupa com questões como o visual que a L. An. apresenta para a população.

As lagoas de estabilização de esgotos têm sido consideradas, entre nós, como sendo uma das soluções mais convenientes para o tratamento de esgotos sanitários e, como tal, adotadas cada vez mais, principalmente nas comunidades do interior.

Uma das formas mais freqüentemente adotada é aquela denominada de sistema australiano, ou seja, normalmente constituído de uma lagoa primária e anaeróbia, seguida de uma lagoa facultativa. Quanto a esta última, há uma boa quantidade tanto de estudos, quanto de dados operacionais, se bem que em condições distintas das nossas, que têm servido para importantes melhorias no desempenho daquela lagoa. O mesmo não se pode dizer, porém, a respeito da lagoa anaeróbia (abreviadamente referida no texto como L.An.). Poucos pesquisadores têm tentado esclarecer o comportamento da L.An., apesar daquela ser a causadora maior dos problemas operacionais referentes à lagoa. Isso se deve, provavelmente, à complexidade do processo de digestão anaeróbia, acrescido de inúmeros fatores que influenciam o comportamento da L.An., muitos dos quais nem sempre são facilmente detectáveis.

O presente artigo tenta esclarecer, a nível atual de conhecimentos, as teorias sobre L.An., e práticas operacionais recomendáveis decorrentes daquelas teorias.

É necessário esclarecer, ainda, que na prática não existe lagoa completamente anaeróbia, mas sim facultativa, com maior ou menor predominância de anaerobiose.

CONCEITOS GERAIS

Ao introduzirmos o esgoto numa lagoa e o mantermos por determinado tempo, inicia-se o processo denominado *depuração*. A depuração do esgoto consiste inicialmente no surgimento de determinadas bactérias que se alimentam de matérias orgânicas biodegradáveis contidas no esgoto. As bactérias que aparecem na fase inicial da depuração são normalmente denominadas *aeróbias*, ou seja, necessitam de oxigênio livre dissolvido no meio líquido. Estas bactérias, ao se alimentarem de matéria orgânica, consomem o oxigênio, transformando-a em água, gás carbônico, material para criação de novas células, além de extrair energia necessária para a ma-

nutenção de suas atividades.

Na medida em que aquelas bactérias forem se proliferando, vai sendo consumido oxigênio do esgoto. E se nenhuma fonte de oxigênio houvesse para suprir a tal deficiência, as bactérias aeróbias iriam extinguindo-se, sendo substituídas por outros tipos de bactérias. Estas bactérias são as denominadas facultativas e anaeróbias, que conseguem sobreviver mesmo sem a presença de oxigênio dissolvido (O.D.) no meio líquido.

As bactérias facultativas e anaeróbias assimilam igualmente a matéria orgânica, mas ao invés de produzir água e gás carbônico, como as bactérias aeróbias, produzem principalmente os ácidos orgânicos, gás carbônico, gás hidrogênio e outros gases, alguns dos quais odorosos. É a fase denominada de *fermentação*. Com o passar do tempo, surgem outras espécies de bactérias, igualmente anaeróbias, transformando os ácidos orgânicos em *gás metano* e *gás carbônico*, além de gerar energia para as suas atividades. O gás metano, sendo insolúvel em água, é eliminado à atmosfera.

Essencialmente, os fenômenos que ocorrem na chamada lagoa anaeróbia é o que foi descrito acima. A lagoa é mantida sob condições deficientes de O.D. por diversos meios, permitindo a proliferação de bactérias anaeróbias.

O efluente final da lagoa anaeróbia, no entanto, do ponto de vista de qualidade d'água, deixa muito a desejar. Seu aspecto é desagradável, de cor escura, com algum odor. O O.D. é normalmente próximo a zero. Contém normalmente alto teor de sólidos (em suspensão e dissolvidos), além de coliformes. Em suma, o esgoto tratado na L.An. não está seguro sanitariamente para lançamento direto ao corpo receptor. Do ponto de vista de balanço energético, a quantidade de energia consumida no processo anaeróbio é bem inferior a do processo aeróbio (por isso, o gás gerado na digestão anaeróbia contém alto teor energético). Em outras palavras, o aproveitamento energético realizado pelas bactérias anaeróbias, a partir da matéria orgânica, é muito reduzido. Isto quer dizer a lenta taxa de crescimento da massa bacteriana no processo anaeróbio.

Pergunta-se, então:

por que utilizar lagoa anaeróbia no tratamento de esgotos?

Dissemos que o efluente da L.An. não é seguro sanitariamente. Contém, ainda, altos teores de matérias orgânicas e outras substâncias consumidoras de oxigênio, além do seu aspecto desagradável. Mas disso não pode concluir o leitor que o processo anaeróbio seja ineficiente. Ao contrário, sob condições favoráveis, as bactérias anaeróbias conseguem estabilizar até cerca de 90% das matérias orgânicas biodegradáveis disponíveis (McCarty, 1964). Se bem que aquela eficiência é dificilmente alcançada numa L.An., a verdade é que a baixa qualidade do efluente da L.An. é devido à grande quantidade de carga orgânica introduzida, num volume relativamente pequeno de lagoa, se comparado com as lagoas de processo aeróbio. Normalmente sob temperatura em torno de 20°C, com tempo de detenção hidráulica de 4 a 5 dias, obtém-se estabilização de 40 a 60% da matéria orgânica introduzida na lagoa. A turbulência causada por gases no interior da L.An., aliada ao pouco tempo de detenção hidráulica, faz com que o efluente contenha alto teor de sólidos em suspensão, além das diversas substâncias geradas no processo de digestão anaeróbia.

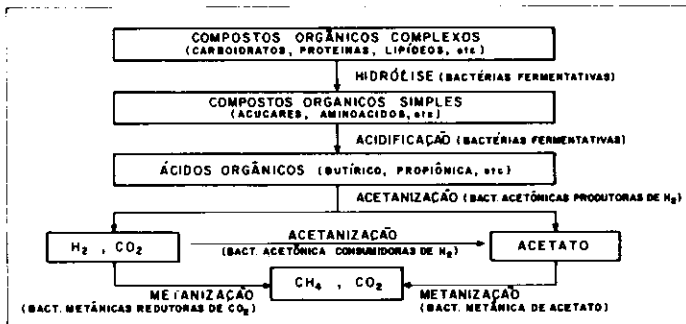
A redução considerável, a curto prazo, da carga orgânica contida no esgoto, faz com que a L.An. seja freqüentemente utilizada como uma unidade preliminar de tratamento, obtendo-se considerável redução de carga orgânica bruta

afluente. Para adequar a qualidade do efluente ao nível sanitariamente seguro, deve-se proceder ao pós-tratamento, eliminando-se a cor, o odor e a carga orgânica residual do efluente da L..An.

Mecanismos da digestão anaeróbia

Para se compreender melhor o funcionamento da L..An., faz-se necessário proceder a uma explanação um pouco mais detalhada sobre o mecanismo da digestão anaeróbia. O processo de digestão anaeróbia pode ser concebido como processo envolvendo algumas etapas distintas, para a digestão da matéria orgânica de alta complexidade, como aquela contida no esgoto, conforme exposto na figura 1.

FIGURA 1



A primeira etapa do processo (hidrólise) é a decomposição das matérias orgânicas de formas complexas (de alta massa molecular — sob formas solúveis e não solúveis) em substâncias mais simples, de menor massa molecular, facilmente assimiláveis pelas bactérias. Essa atividade é sustentada pelas enzimas elaboradas pelas bactérias e tem como resultado a conversão de carboidratos, proteínas, lipídios, em açúcares, aminoácidos e peptídeos.

Na segunda etapa (acidificação) as substâncias resultantes da primeira etapa são convertidas em acetatos, ácidos propiônicos, H_2 , CO_2 etc., que são fontes de produção do gás metano e CO_2 nas etapas ulteriores. A formação de acetatos é de suma importância para a geração de metano (isto é, estabilização final da matéria orgânica), isto porque cerca de 70% do total de metano é originado do acetato. Mesmo aquelas substâncias que não se converteram diretamente em acetato, na segunda etapa serão convertidas, em parte, para o acetato e H_2 . Esta é a etapa de acetanização, de importante significado no processo de digestão anaeróbia.

A quarta e última etapa é a denominada metânica, onde, a partir dos produtos obtidos nas etapas anteriores, principalmente do acetato, há geração de gás metano (CH_4). A verdadeira estabilização ocorre somente nesta última etapa, com redução da DQO.

Diferentemente do processo aeróbio, as etapas componentes do processo de digestão anaeróbia são executadas por grupos distintos de bactérias. As etapas de hidrólise e de acidificação são normalmente realizadas por mesmos grupos de bactérias. São hoje conhecidos diversos grupos que necessitam, em geral, de CO_2 e de ácidos orgânicos como fontes de carbono. Grande parte desses grupos são aneróbios, enquanto que outros são facultativos. Vivem normalmente sob ambiente ácido, tendo pH ótimo na faixa entre 5,2 a 6,9. Mas os produtos resultantes da atividade daqueles grupos dependem da concentração de H_2 no meio (Novaes, 1986). Se a pressão parcial de H_2 fosse baixa, aquelas bactérias tenderiam a produzir acetato, CO_2 e H_2 . Se a pressão parcial de H_2 fosse alta, ocorreria a formação de outros tipos de ácidos, lactose e etanol.

A terceira etapa, conversão de diversas substâncias em acetato, é realizada por grupos de bactérias que convertem o propionato, álcoois etc., em acetato, CO_2 e H_2 . Na realidade, esta etapa é executada por dois grupos distintos: os que produzem H_2 , produzindo concomitantemente o acetato, e os que consomem H_2 , produzindo igualmente o acetato. Do equilíbrio populacional entre estes dois grupos de bactérias depende o nível de concentração de H_2 no meio que, por sua vez, afeta a produção de acetato na etapa anterior.

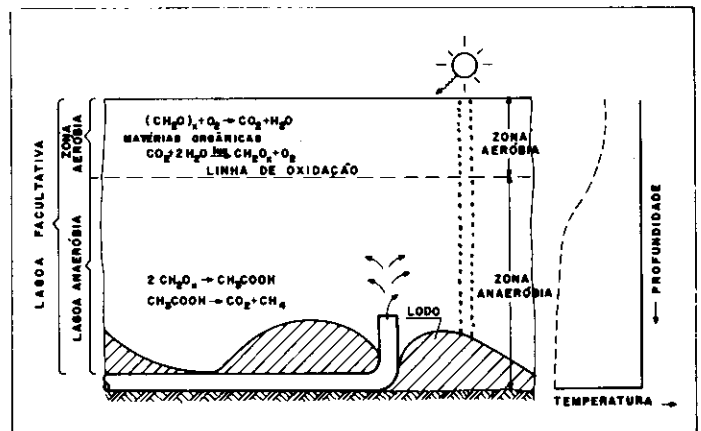
Na quarta e última etapa de digestão anaeróbia, as substâncias formadas na fase anterior são convertidas em gás metano e CO_2 , através da ação de grupos bacteriológicos, primitivos, normalmente conhecidos como formadores de metano, estritamente anaeróbios e extremamente seletivos, quanto às substâncias por eles utilizadas.

Dois faixas de temperaturas são conhecidas para atuação daqueles grupos formadores de metano: de 15 a cerca de $40^\circ C$, onde atuam os denominados mesófilos, e de 40 a cerca de $60^\circ C$, os denominados termófilos. Quanto à faixa de pH favorável, os grupos metanogênicos atuam na faixa entre 6,8 a 7,2, mas os valores parecem variar conforme o grupo.

Digestão anaeróbia na lagoa anaeróbia

Pelo que foi dito no item anterior, percebe-se que o processo de digestão anaeróbia é composto de etapas, cujas respectivas condições favoráveis nem sempre coincidem. Em outras palavras, os fatores favoráveis para uma etapa são, muitas vezes, inibidores para outras. Este fato é mais evidente entre as etapas de acidificação e de metanização. Além disso, num reator biológico aberto como a L. An., as condições internas da lagoa ficam à mercê das condições ambientais do local. Vejamos a corte de uma L. An. (figura 2):

FIGURA 2



Normalmente uma lagoa possui camadas estratificadas termicamente, dividindo a lâmina d'água horizontalmente. A camada superior é a mais afetada pelas condições ambientais; é normalmente mais quente, leve e oxigenada. A camada inferior é mais densa, fria, menos afetada pelas variações das condições externas. A diferença de densidade das águas entre as camadas é fator benéfico na operação da L. An., já que dificulta a mistura vertical de líquido entre as camadas e, por conseguinte, dificultando a introdução de oxigênio na camada inferior, onde devem prevalecer condições anaeróbias.

Mesmo sob condições favoráveis, para que o processo anaeróbio seja bem estabelecido na L. An., é necessário um prazo de alguns meses a partir da sua operação inicial. Isto se deve à complexidade do processo, que exige a formação equilibrada de todos os grupos bacterianos.

Fatores influentes no comportamento da L. An.

São vários os fatores influentes no comportamento da L. An. Dentre eles, os mais importantes são a temperatura, pH,

O.D., substâncias tóxicas, distribuição de cargas, geometria da lagoa, tempo de detenção, velocidade e direção dos ventos predominantes etc. Na tabela seguinte, alguns destes parâmetros são apresentados:

TABELA 1

FATORES	OXIDAÇÃO AERÓBIA			FOTOSÍNTESE DE ALGAS			FORMAÇÃO DE AC. ORGÂNICOS			FERMENTAÇÃO METÂNICA		
	MIN.	OT.	MAX.	MIN.	OT.	MAX.	MIN.	OT.	MAX.	MIN.	OT.	MAX.
O. D. (mg/l)	1	10	30	DESCONHEC.			0	0	1	0	0	0
TEMPO (dias)	5	o	10	30	a	60	5	a	10	40	a	120
TEMP. (°C)	15	25	40	4	25	40	4	25	40	15	32	40
pH	6,5	8,0	10,0	7,0	8,5	10,8	4,3	6,5	7,5	6,8	7,0	7,2

OT. = ÓTIMO

Algumas conclusões podem ser extraídas da tabela 1:

a) os ácidos orgânicos são essenciais para bactérias metânicas, mas, ao mesmo tempo, aquelas bactérias requerem pH próximo a 7,0;

b) as bactérias formadoras de ácidos são capazes de manter suas atividades mesmo sob baixa temperatura e proliferam rapidamente, enquanto que as metânicas requerem meses para estabelecerem-se;

c) as algas produzem oxigênio, enquanto que as bactérias metânicas não toleram oxigênio;

d) o excesso de algas pode elevar o pH para acima de 10,0, enquanto que as bactérias acidogênicas exigem pH inferior a 7,0;

e) a mistura da massa bacteriana, através da ação de ventos, borbulhamento de gases etc., é desejável, porém, a mesma permite o ingresso de oxigênio, que é inibidor do processo de digestão metânica, além de ressuspender os sólidos sedimentados;

f) as bactérias metânicas exigem temperaturas superiores a 15°C, enquanto que as temperaturas nos fundos das L. An. são, muitas vezes, inferiores àquele valor.

Baseado nestas constatações um projeto racional e operação adequada podem ser sugeridos, o que faremos nos itens seguintes.

Recomendações para o projeto da L. An.

a) Distribuição de carga no interior da L. An.

Os parâmetros freqüentemente utilizados, a taxa de carga volumétrica ou taxa de aplicação superficial têm como pressuposto a uniformização da carga em todo o interior da lagoa. Sabemos, porém, que tal não ocorre na prática. Pelo contrário, as pesquisas mais recentes demonstram que o esgoto percorre caminhos consideravelmente diversos daqueles idealizados, com tempo de detenção hidráulica sensivelmente inferior àquele calculado teoricamente. Os fatores que norteiam o comportamento do fluxo no interior da lagoa são dos mais variados: as localizações da entrada e saída dos esgotos; a velocidade do flu-

xo afluente; diferença de temperatura entre o esgoto afluente e a massa líquida da lagoa; relação comprimento/largura; velocidade e direção do vento etc.

Se bem que, neste último caso, a conclusão é de que o efeito principal dos ventos na lagoa é o de mistura, há casos em que o vento é responsável pela redução do tempo de detenção para apenas 5% do valor teórico.

Normalmente a carga orgânica torna-se extremamente elevada nas proximidades da entrada do esgoto da L. An., chegando a ser dezenas de vezes superior ao valor médio. Um dos meios efetivos para a redução da concentração é o aumento da vazão, fazendo a recirculação do efluente da lagoa, forçando a melhor distribuição da carga em toda a lagoa.

Mas o excesso de vazão pode trazer conseqüências indesejáveis, tais como a redução do tempo de detenção hidráulica ou introdução de O.D. no interior da L. An.

A distribuição mais uniforme de carga orgânica pode também ser obtida numa L. An. ativa, profunda, devido ao intenso borbulhamento de gases em toda a superfície da lagoa. No caso de esgoto doméstico, Oswald informa que entre 62 a 75 litros de gás são gerados por kg de DBO estabilizado. Muitas vezes os sólidos se sedimentam próximo à entrada, numa taxa superior àquele da fermentação. Isto provoca excesso de acúmulo de ácidos orgânicos, resultantes da fermentação, causando a queda de pH, prejudicando, conseqüentemente, a atividade das bactérias metânicas. Esse fenômeno é uma das causas do mau funcionamento da L. An., com digestão incompleta, causando fortes odores, provocando reclamações dos moradores das áreas circunvizinhas. A taxa de produção de gás em relação à carga varia com a distância da entrada de esgotos, aumentando a partir da entrada até atingir o valor máximo e decrescendo, após isso.

Nas lagoas profundas, estes efeitos são menos pronunciados devido ao volume da lagoa e ao tempo de detenção, que proporcionam efeito tampão contra mudanças súbitas de pH, assim como da temperatura.

A diferença de temperatura entre o esgoto afluente e a massa líquida da lagoa é fator influente na distribuição de carga. Se a temperatura do esgoto afluente fosse maior que a da água da lagoa, o esgoto tenderia a espalhar-se sobre a superfície da lagoa, distribuindo os sólidos sedimentáveis sobre a extensa área. Inversamente, se o esgoto afluente fosse mais frio que a água da

lagoa, aquele penetraria no fundo da lagoa, ocorrendo a sedimentação dos sólidos próximo à entrada do esgoto.

As localizações e posições relativas entre os dispositivos de entrada e de saída das lagoas também exercem influências na distribuição de esgotos. Ferrara *et al* (ASCE, vol. 107, dez/81) concluíram que a existência de cortinas, tanto na entrada quanto na saída, é bastante importante para redução do efeito de curto-circuito do fluxo.

Os estudos mais recentes (Ferrara, Real, Thachston) revelaram que o fluxo dentro da lagoa é dividido, basicamente, em duas partes: uma parte ativa, onde o fluxo é direto, direcionado da entrada para a saída; e outra, considerada zona de retorno ou zona morta onde, devido ao atrito com a zona ativa, a massa líquida tende a voltar em sentido oposto ao fluxo ativo. O tempo de detenção real do esgoto na lagoa depende do volume que a zona ativa ocupa dentro da lagoa, que normalmente é bem inferior ao volume total teórico.

A maioria dos pesquisadores é unânime em concluir que a eficiência da lagoa está intimamente ligada ao fator C/L (comprimento/largura) da lagoa. Quanto maior a relação, melhor é a *performance*. Em outras palavras, quanto menos disperso for o fluxo, melhor é a remoção. Esta teoria, hoje aceita universalmente, não deve, no entanto, ser aplicada diretamente à L. An., isto porque quanto menos disperso for o fluxo, maior será o acúmulo de lodo próximo à entrada, contrariando a boa prática operacional.

b) Profundidade versus temperatura

É conhecido que as lagoas profundas acumulam mais calor do que as rasas, ainda que estas últimas possam, temporariamente, atingir temperaturas mais elevadas durante o período de insolação. No entanto, o calor é rapidamente perdido durante a noite ou numa brusca mudança de tempo, enquanto nas lagoas mais profundas o calor é retido mais. Se os volumes das lagoas fossem os mesmos, é evidente que a área superficial na lagoa profunda seria menor que a da rasa, diminuindo, por conseguinte, a área de contato da água com a atmosfera, retardando a fuga do calor.

A mudança súbita de temperatura na camada superior da lagoa pode ser causa de mau funcionamento de uma L. An. rasa. O resfriamento súbito da camada superior causa a descida daquela em direção ao fundo da L. An. e, inversamente, a subida da massa líquida do fundo em direção à superfície. Isto acarreta a introdução de O. D. no fundo, causando a inibição do processo metânico, ao mesmo tempo que arrasta à superfície materiais contendo gases odorosos. Se este ciclo for repetido periodicamente, haverá possibilidade de não estabelecer o processo de digestão anaeróbia completo, fracassando o tratamento.

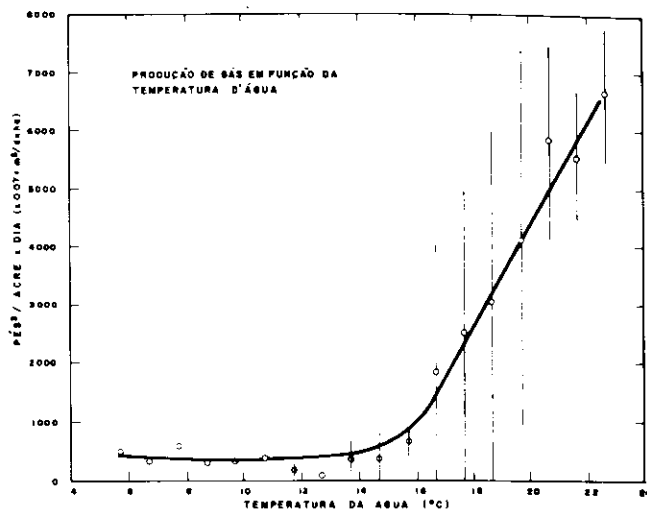
Já as lagoas profundas têm temperaturas médias mais baixas, mas mantêm certa uniformidade nos seus valores. Assim, a temperatura média noturna nas lagoas profundas é maior que das rasas.

O desnível térmico entre a camada superior e a inferior cria o problema de *taxa de queda térmica*. Segundo Berend e Oswald, uma queda de 2° C/pé ou mais já foi observada, mas esta dificilmente continua caindo além de 2 pés de profundidade. No entanto, a taxa média de queda de 1°C/pé é comum nas lagoas acima de 3,0m de profundidade e tendo como fonte de calor unicamente o sol.

Tendo em vista que a temperatura exerce influência decisiva sobre o processo de digestão e que esta digestão ocorre basicamente no fundo da lagoa, deve-se evitar igualmente a adoção de lagoas extremamente profundas, pois resultam em temperaturas inferiores àquela, tolerável para a atividade das bactérias metânicas.

Para se ter idéia da importância da temperatura sobre a digestão, apresentamos a figura 3, para o caso de aplicação total de 477 kg DBO/ha x d.

FIGURA 3



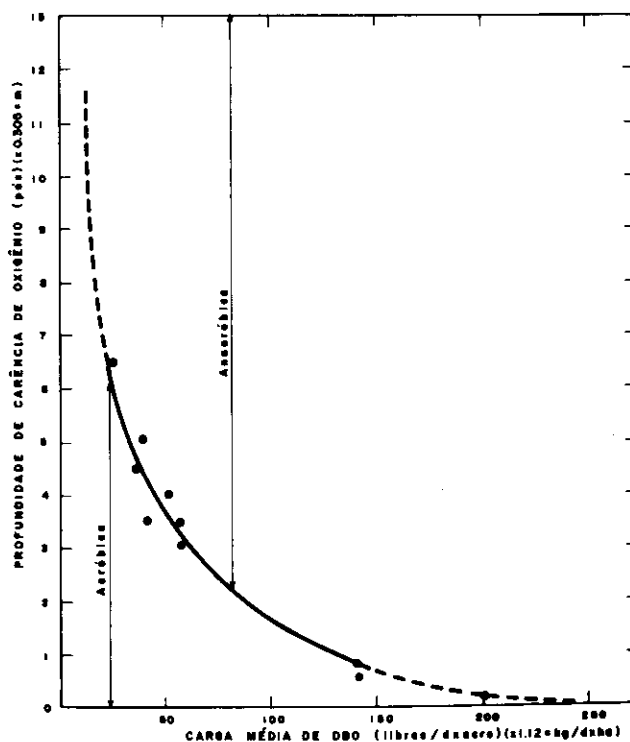
Pela figura 3, observa-se que, para a temperatura d'água no fundo inferior a 19°C, o lodo decomponível acumula-se mais rapidamente do que a sua conversão em gás. Em outras palavras, segundo a figura 3, para a L. An. com o processo de digestão bem estabelecido e com a temperatura do fundo superior a 19°C, não ocorrerá acumulação de lodo. Acima daquela temperatura, são outros os fatores limitantes da digestão, por exemplo, a taxa de carga.

c) Profundidade versus O.D.

Uma das maiores razões para se adotar lagoas profundas é a proteção da digestão metânica contra o O.D.

Segundo apresentado por Oswald, o aprofundamento foi método bem sucedido contra a penetração de O.D. Numa lagoa com 2,4m de profundidade, pouco carregada (28 kg/ha x d), o O.D. penetrou a cerca de 2,0 metros, apesar de atingir saturação até a profundidade de 1,0m. A estratificação térmica tem efeito inibidor contra o ingresso de O.D., uma vez que dificulta a mistura vertical d'água na L. An. É evidente que a penetração de O.D. depende da taxa de carga orgânica, como veremos na figura 4:

FIGURA 4



No verão, com a maior intensidade de radiação solar, ocorre maior oxigenação e, portanto, maior penetração de O.D. Nas regiões tropicais devemos, portanto, inferir que ocorra maior penetração de O.D. Assim, para se proteger contra a penetração de O.D., ou devemos aprofundar a lagoa ou aumentar a carga orgânica ou ainda ambas as coisas. Matsushita (A. T. Matsushita, 1973, SP) encontrou O.D. até 0,8m de profundidade na lagoa facultativa, localizada em São José dos Campos, e de 2,0 mg/l a 0,6m, em Pradópolis.

O efeito de O.D. sobre a digestão metânica pode ser comprovado em Stockton, Califórnia. Observou-se, numa lagoa com 1,3m de profundidade, com 24°C, que no fundo geravam-se 20 bolhas de gás por minuto por m², enquanto on-

de a profundidade era de 1,8m, com 22,8°C, geravam-se bolhas numa taxa de 30 bolhas por minuto por m².

Normalmente, o lodo acumulado tem alta demanda de oxigênio, o que protege a camada inferior contra a penetração de O.D. Tal proteção não é assegurada quando a taxa de decomposição de lodo é igual à taxa de decomposição de sólidos. Naquelas condições, somente a profundidade adequada proporciona proteção contra o O.D. Mas excessivo aprofundamento da L. An., como já observamos, pode reduzir a temperatura abaixo do tolerável para a digestão metânica. A definição da profundidade deve, assim, levar em consideração vários aspectos distintos.

d) *Profundidade versus remoção de carga orgânica*

TABELA 2

REDUÇÃO NATURAL DE DBO NO SOBRENADANTE DA LAGOA CALMA				
TEMPO DIAS	PORCENTAGEM DE REMOÇÃO DE DBO			
	10 °C	14 °C	15 °C	18 °C
0	0	0	0	0
1	23	35	47	33
2	40	61	56	53
4	46	70	67	56
9	57	75	75	81
16	72	89	90	87
32	90	90	95	96
64	94	-	94	-

A tabela 2 demonstra o efeito do tempo de detenção sobre a remoção de carga orgânica. Se a condição fosse boa (lagoa calma), a remoção aumentaria rapidamente no início e menos depois. Como o tempo de detenção aumenta com a profundidade e com o melhor desempenho do processo de digestão metânica, a remoção de carga orgânica é geralmente maior na lagoa mais profunda.

Aqui, novamente, o comportamento hidráulico da lagoa é importante, pois dele depende o tempo de detenção real do esgoto.

e) *Remoção de Coliformes na L. An.*

São conhecidos diversos microorganismos causadores de moléstias transmissíveis por meio hídrico. Citando alguns, a *Salmonella typhi*, causadora da febre tifóide, a *Entamoeba histolytica*, causadora da disenteria amébrica etc. É prática comum, no entanto, avaliar o nível de contaminação bacteriológica d'água utilizando apenas o *E. Coli*, microorganismo encontrado no intestino humano e de fácil detecção. Para se adequar o efluente de um sistema de tratamento a um nível sanitariamente seguro, exige-se que a quantidade daquela bactéria seja inferior a um determinado número, p. ex., 3.000 por cada 100 ml.

A remoção daquelas bactérias no interior da lagoa foi bem descrita por Marais (ASCE, vol. 100, fev./1974). Demonstra aquele pesquisador que a pior remoção é obtida com uma lagoa única, e a melhor remoção é obtida sob condição de *plug flow*. Se o tempo de retenção fosse o mesmo, com as lagoas em série, obter-se-ia eficiência de remoção de coliformes dezenas de vezes superior a de uma lagoa única.

As condições anaeróbias de uma lagoa reduzem em muito a taxa de remoção de bactérias coliformes. Como o tempo de detenção normalmente adotado entre nós, para o projeto da L. An., é cerca de 5 dias (muito pouco para remoção satisfatória de coliformes), não se deve considerar a L. An. como sendo um sistema adequado para a remoção de coliformes.

Operação da lagoa anaeróbia

Diferentemente dos processos de tratamento biológico mais compactos (Lodo Ativado, Filtro Biológico etc.), o desempenho das lagoas de estabilização é muito mais dependente das condições ambientais locais.

Mas isto não quer dizer que, uma vez construída, a lagoa possa ser deixada sem cuidados. Como todo o processo biológico de tratamento, a lagoa requer cuidados operacionais, que exercem grande influência no desempenho.

A preocupação dos responsáveis pela operação deve ser voltada para como contornar, utilizando-se os meios disponíveis, os problemas causados pelas adversidades naturais. Dos itens anteriores sobre os princípios de digestão anaeróbia decorrem as principais diretrizes para a boa operação da L. An.

Partida inicial da L. An.

Para que uma L. An. atinja plena capacidade, com estabelecimento equilibrado de todos os grupos de bactérias, é necessário um período de tempo razoável, de até alguns meses. Como foi descrito no início deste artigo, o estabelecimento do processo de digestão anaeróbia, no início do processo, é gradual e paulatino. Não havendo bactérias metânicas para estabilização da matéria orgânica, é necessário que a L. An. não seja carregada com elevada carga orgânica no início da operação. Isto porque, se houvesse muita matéria orgânica, ocorreria a proliferação de bactérias facultativas e anaeróbias não metânicas, responsáveis pelas primeiras etapas da biodegradação anaeróbia. Disso provém a geração de gases odorosos e a queda de pH. Se o pH fosse mantido baixo, devido à alta carga orgânica afluente, não haveria condições propícias para o estabelecimento de bactérias metânicas e, logo, da digestão completa. Assim, a L. An., apesar de anaeróbia, manter-se-á desequilibrada, exalando odores, com baixa eficiência de tratamento.

Para evitar tal fenômeno, é recomendável que seja introduzida na L. An. uma pequena carga inicial, aumentando paulatinamente ao longo do prazo necessário para estabelecimento da massa microbiana no interior da lagoa. É procedimento normal colocar água doce (geralmente água fluvial) até cerca de 1/3 da profundidade útil para a diluição da carga inicial.

Na fase inicial da operação é comum ocorrer intensa proliferação de algas, devido à boa penetração de luz solar. Na medida que vai aumentando a carga orgânica, a lagoa vai tomando tonalidade escura, ao mesmo tempo que vão desaparecendo as algas. Após um bom tempo de operação com a superfície já razoavelmente coberta de escumas com pouco ou nenhum odor, com intenso borbulhamento de gases, pode-se concluir pelo estabelecimento do processo de digestão anaeróbia. É evidente que os aspectos visuais apenas, não são indicativos seguros das condições operacionais da L. An. É necessário fazer acompanhar com análises laboratoriais, como veremos adiante.

Técnicas para manutenção das condições anaeróbias

Como se sabe, a condição essencial para a boa operação da L. An. é a ausência de O. D. Se essa condição não fosse satisfeita, pelo menos no fundo da lagoa, não haveria perfeita digestão. Não havendo digestão completa, haverá exalação de odores, além do efluente conter grande quantidade de matérias orgânicas.

Digestão completa significa *metanização*. Metanização significa geração de gás metano, com intenso borbulhamento na superfície. E como se pode manter a condição anaeróbia?

a) Cobrir a superfície com o manto de espuma

O manto de espuma, desde que não seja removido, vai-se formando naturalmente ao longo do tempo. Ele é composto, essencialmente, de lodos que sobem à superfície, juntamente com sólidos flutuantes (cabelos, estopas etc.) que são contidos no esgoto bruto.

O manto de espuma impede a penetração de luz solar na lagoa, impedindo a proliferação de algas que oxigenam a camada superior da lagoa. Se a superfície da lagoa estiver oxigenada, há sempre a possibilidade de o O. D. imigrar para o fundo, devido à agitação causada tanto pelos ventos, quanto pelos gases.

Em segundo lugar, a camada de espuma oferece uma proteção contra a súbita mudança de temperatura, além de conservar melhor o calor contido, uniformizando a distribuição de temperatura no interior da lagoa.

Em terceiro lugar, a camada de espuma protege a lagoa contra a agitação ou curto-circuito, causado pelos ventos. Como aspecto negativo, a lagoa coberta de espuma causa má impressão visual perante os habitantes das proximidades. Mas este aspecto pode ser atenuado plantando-se árvores a certa distância da lagoa, protegendo-se a vista dos habitantes.

Para conservar a camada de espuma, os dispositivos de saída do efluente devem possuir anteparos (0,3 m acima e 0,5 m abaixo da superfície líquida) para impedirem a saída da espuma junto com o efluente.

b) Aumentar a carga orgânica introduzida na L. An.

Outro meio para manter a condição anaeróbia na lagoa é aumentar a carga orgânica afluente. Tendo alta demanda de oxigênio, mantém-se permanentemente a condição anaeróbia.

Pode-se aumentar a carga:

- b.1 — reduzindo o número de L. An. em operação;
- b.2 — aumentando a contribuição de esgotos ou
- b.3 — ambas as coisas.

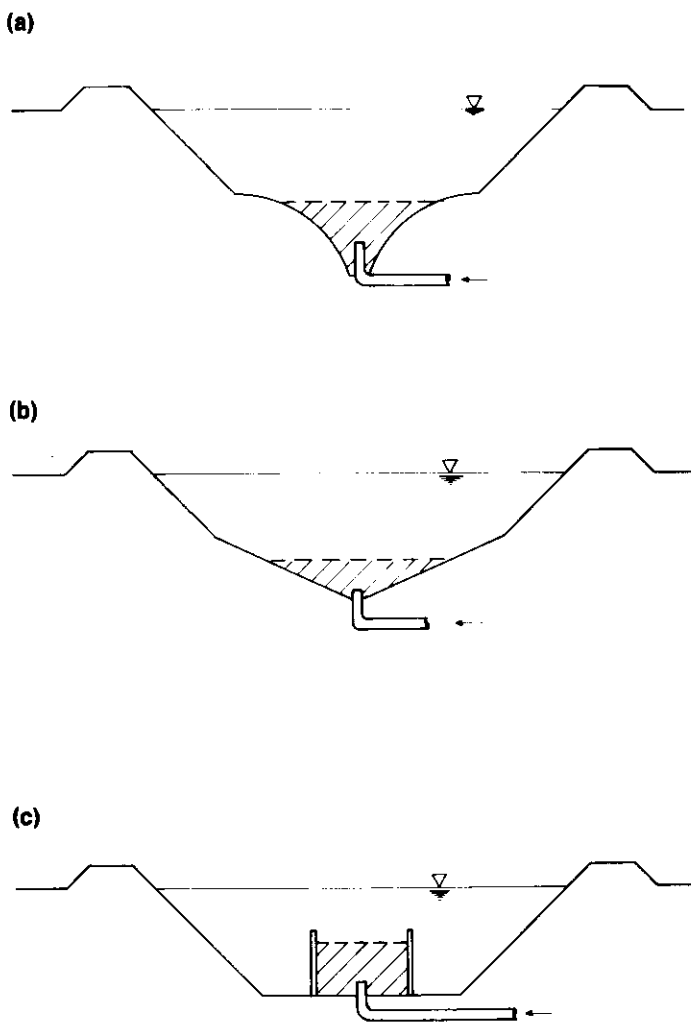
Na prática, porém, as alternativas acima expostas nem sempre são possíveis de ser adotadas. Entre nós não é usual (a não ser para E.T.E. muito grande) construir mais de uma unidade

de L. An., o que elimina a possibilidade de se adotar a alternativa "b.1". Por outro lado, o aumento da vazão ou da carga orgânica é dependente do número de ligações de esgotos, não sendo possível adotar-se de imediato. Há possibilidade de se lançar despejos oriundos das fossas sépticas, transportados por meio de caminhões-pipa, mas devemos nos certificar antes da origem dos materiais, evitando aqueles provenientes das indústrias, principalmente do setor metalúrgico ou químico.

c) Instalação de dispositivos protetores de digestão anaeróbia

A instalação de dispositivos de proteção da digestão anaeróbia foi proposta por Oswald (*Advances in Anaerobic Pond System Design*, 1968). Tais dispositivos, instalados no fundo da L. An., permitem o acúmulo de lodos, impedindo o ingresso de oxigênio. Alguns desses dispositivos são mostrados na figura 5, a, b, c:

FIGURA 5



Segundo Oswald, a instalação daqueles dispositivos no campo trouxe excelentes resultados, possibilitando a aplicação orgânica superior a 1.122 Kg DBO/d x ha.

Controle de pH

Um dos parâmetros mais importantes na operação do processo anaeróbio é o pH. Como já dissemos, o pH indica, na maioria das vezes, as condições ambientais dominantes no interior da L. An. Dissemos também que a L. An. engloba etapas antagônicas, em termos de pH. Enquanto a etapa de transformação de matéria orgânica em ácidos reduz o pH, as bactérias metânicas necessitam de pH próximo a 7,0. Esta é uma das ra-

ções porque o processo não apresenta alto rendimento. Hoje existem digestores anaeróbios com separação daquelas duas fases, reduzindo em muito o volume total de reatores necessários. Mas não são, ainda, aplicados para a L. An.

A boa operação da L. An. recomenda a manutenção de pH próximo ao neutro (6,7 a 7,2). Os ácidos produzidos são normalmente convertidos rapidamente em CH_4 e CO_2 ; o desequilíbrio do processo quase sempre é denotado pela queda de pH. Necessário se torna, então, a correção do pH. Antes, porém, é preciso conhecer a verdadeira causa da queda de pH.

Se a anormalidade fosse decorrente da inatividade das bactérias metânicas, devido à baixa temperatura (inferior a 15°C), haveria necessidade de se reduzir a carga orgânica afluyente. Mas essa alternativa só é viável se houver outras unidades disponíveis para receberem esgotos. Não é recomendável a adição, p. ex., de cal, pois não remove a causa principal, além da possibilidade de acumular cal insolúvel no fundo.

Se o desequilíbrio fosse devido ao excesso temporário de carga orgânica, poderíamos utilizar o neutralizador para corrigir condições ácidas. A adição destes produtos deve ser controlada laboratorialmente, pois a cal em excesso tende a se precipitar, sem reagir.

Controle de odores

Um dos problemas mais freqüentes relacionados com a operação da L. An. é a exalação de odores que, conforme a direção do vento, pode afetar habitantes de até alguns quilômetros de distância.

Na realidade, os odores são decorrentes da má situação operacional. Uma lagoa bem operada, com o processo de digestão anaeróbia em pleno funcionamento, não causa odores. O único meio para conter odores é, portanto, manter a L. An. bem operada. Muitas vezes, com boa técnica operacional, pode-se contornar problemas criados pela deficiência de projeto ou de localização inadequada.

Como exemplo típico com problemas de odores, podemos citar um conjunto de lagoas (L. An. + L. Fac.) localizado no interior de São Paulo. Devido ao intenso odor exalado pela L. An., os responsáveis pela operação contornavam o problema lançando dezenas de toneladas de cal por ano. Essa operação continuada durante alguns anos resultou em um acúmulo de sólidos não digeridos na L. An., diminuindo a profundidade útil da lagoa, além de criar algumas "ilhas" isoladas.

Como a causa presumível do cheiro era o não estabelecimento do ciclo completo de digestão, devido a freqüentes inversões térmicas ocorridas no interior da L. An., a adição de cal apenas resolvia o problema momentaneamente, em detrimento da atividade bacteriológica. A partir de certos momentos, as "ilhas" formadas também teriam aumentada a intensidade do odor. O que os responsáveis pela operação tinham que fazer, a nosso ver, era o cobrimento da lagoa com a camada de espuma, como explanado no item 2.5.2. Com isso, evita-se o superaquecimento da camada superficial durante o dia (o que causa a precipitação de sólidos, permitindo o ingresso de luz solar e de O.D. no interior da L. An.) e seu rápido resfriamento ao anoitecer ou na ocasião da chuva, causando a mistura vertical do líquido.

Conservação da L. An.

A conservação da L. An. é das mais simples. Alguns dos cuidados necessários são os seguintes:

a) manter limpa a área, removendo periodicamente a vegetação que prolifera nos taludes à margem da lagoa;

b) não permitir a proliferação de roedores. Normalmente, quando há casas habitadas nas proximidades, é mais propícia a proliferação de roedores, que chegam a cavar túneis nos taludes da lagoa. Quando houver densa espuma cobrindo a lagoa, há possibilidade de se atrair os ratos à procura de alimentos. Assim que for notada a presença de roedores, deve-se providenciar imediatamente os meios para eliminá-los.

c) providenciar o plantio de árvores (com fartas folhagens) ao redor da lagoa, mas com certa distância dos taludes. Com isso, evita-se a exposição, à vista da população, dos aspectos às vezes desagradáveis (espuma, por exemplo).

Análises laboratoriais e acompanhamentos necessários para a operação

Todo processo biológico para o tratamento de esgotos exige um bom acompanhamento laboratorial. As lagoas de estabilização, apesar da sua simplicidade aparente, exigem, para o seu bom desempenho, um acompanhamento laboratorial adequado. A necessidade de acompanhamento se torna maior na fase inicial da operação e normalmente diminui com a estabilização do processo. Mesmo assim, alguns itens de análise deverão ser feitos diariamente, enquanto que outros, apenas periodicamente.

Serão, a seguir, apresentados diversos parâmetros, seus significados e correlações existentes com a operação da L. An. Serão, também, apresentadas planilhas de registros de dados laboratoriais e operacionais.

Temperatura

É o fator mais influente no comportamento da L. An. Devido à extensa área superficial, as lagoas de estabilização são normalmente bastante sensíveis às flutuações térmicas do meio ambiente. Precipitações pluviais refletem imediatamente na mudança de temperatura d'água na lagoa, pelo menos na camada superficial, afetando o comportamento da L. An.

A escolha do terreno, de tal modo que a zona de digestão da L. An. fique acima do nível do lençol freático e, assim, impedir que o ingresso de águas subterrâneas de baixa temperatura afete o rendimento do processo, é um importante passo inicial para a operação bem-sucedida.

Mais grave que as baixas temperaturas (abaixo de 15°C quase todas as atividades de bactérias metânicas são paralisadas) são as flutuações das temperaturas. É preferível ter, antes, temperatura baixa (mas superior a 15°C) do que sofrer alterações térmicas, mesmo de temperaturas altas. Nesse sentido, é de suma importância a aferição periódica das temperaturas na L. An., em diversos pontos e com profundidades distintas. Através de medições minuciosas de temperaturas e seus registros, identificando os pontos de coleta e suas respectivas profundidades de coleta numa planta da lagoa, pode-se, muitas vezes, reconhecer as causas de insucesso daquela, servindo ao mesmo tempo como importante subsídio aos futuros projetos. As planilhas do modelo I (anexo) são alguns exemplos das planilhas de registro.

Oxigênio Dissolvido (O.D.)

O efeito de O.D. no processo de digestão anaeróbia já foi repetidas vezes explanado. Igualmente à medição de temperatura, os pontos de coleta devem ser múltiplos, com várias profundidades. A realização da campanha de medição do O.D. durante 24 horas servirá de importante subsídio para análise de comportamento da L. An. É importante realizar aquelas cam-

panhas mesmo nos dias de chuva (pois o esgoto nestes dias é normalmente mais frio, com alto teor de O.D.), para avaliar seus efeitos sobre a lagoa. É desejável utilizar o medidor de O.D. com eletrodo, pois permite rápida medição com boa margem de precisão.

pH

A medição de pH, juntamente com a medição de temperatura e O.D., forma base de controle operacional da L. An. Igualmente aos dois outros parâmetros, o pH deve ser medido em vários pontos e em diversas profundidades da lagoa. O pH dos pontos próximos à entrada tende, normalmente, a ser mais baixo que o dos pontos mais distantes, enquanto que o da camada superior tende a ser mais elevado, notadamente no período de intensa insolação.

O pH nos pontos próximos ao fundo deve manter-se próximo a 7,0, sob condição de boa performance. A manutenção de pH inferior a 6,2 naquela zona caracteriza a predominância do processo de fermentação, mas não a de metanização. Em suma, a medição de pH pode detectar diversos problemas, tais como a sobrecarga orgânica, ingresso de substâncias tóxicas etc.

Ácidos orgânicos voláteis e alcalinidade

É corrente adotar como parâmetro do processo de digestão anaeróbia a concentração de ácidos orgânicos voláteis, que são produzidos nas etapas iniciais da digestão. Como se sabe, o desequilíbrio entre a produção de ácidos e suas conversões para o metano reduz o pH, inibindo a metanização. É necessário, então, manter a concentração de ácidos orgânicos dentro de determinada faixa de valores, para uma dada condição da operação. As concentrações daqueles ácidos, representadas em termos de ácido acético, variam normalmente entre 50 a 500mg/l. Mas podem haver variações dependendo das condições locais, devendo ser obtidos os valores mais adequados através da operação cotidiana.

A *alcalinidade*, por sua vez, representa a quantidade de substâncias alcalinas contidas no esgoto (sais de bicarbonato, carbonato ou hidróxidos), representadas em termos de CaCO_3 . Representa a capacidade do meio de neutralizar os ácidos (efeito tampão) no processo de digestão anaeróbia, inibindo a queda de pH.

É necessário, então, manter o valor da relação Ac. Org. Vol./Alcalinidade dentro de uma determinada faixa, para ocorrer a digestão anaeróbia. Uma faixa entre 0,03 a 0,30 pode ser considerada normal, mas pode variar conforme o local.

Parâmetros orgânicos — a DBO e a DQO

Tudo o que foi dito aqui tem como objetivo principal a remoção da carga orgânica contida no esgoto. A DBO (Demanda Bioquímica de Oxigênio) avalia, diretamente, o consumo de oxigênio causado pelos microorganismos, quando estes se alimentam de matéria orgânica contida no meio líquido. Seu uso como parâmetro de avaliação de desempenho operacional de um sistema de tratamento sofre uma série de restrições, além de demandar muito tempo para chegar ao resultado final (maior que 5 dias). Sobre as restrições ao uso da DBO, ver na *Revista DAE*, n.º 152, artigo do autor. Já a Demanda Química de Oxigênio (DQO) demanda pouco tempo para obtenção de resultados, além de poder analisar amostras contendo substâncias tóxicas aos microorganismos. Assim, desde que se tivesse a relação DQO/DBO para um determinado esgoto de uma faixa, poder-se-ia utilizar a DQO para estimar a DBO. Mas aquela re-

lação não é constante dentro de um sistema de tratamento, sendo progressivamente maior na medida em que o tratamento vai avançando.

Através de DBO e DQO avalia-se a concentração de carga orgânica no esgoto. Com estes parâmetros, estima-se a intensidade de carga aplicada na lagoa, em termos de $\text{kg/d} \times \text{ha}$ (carga superficial) ou $\text{g/d} \times \text{m}^3$ (carga volumétrica). Se bem que, no caso de L. An. com boa mistura, a expressão mais adequada fosse a segunda, ainda há autores que se utilizam da primeira expressão. Determinam-se como segue:

$$\text{Taxa de Apl. Vol.} = \frac{\text{Vazão afl. (m}^3/\text{d)} \times \text{C.Org. (DBO ou DQO - mg/l)}}{\text{Vol. útil da lagoa (m}^3\text{)}} \\ (\text{g/m} \times \text{dia})$$

$$\text{Taxa de Apl. Sup.} = \frac{\text{Vazão afl. (m}^3/\text{d)} \times \text{Conc. org. (DBO ou DQO - mg/l)}}{\text{Área sup. da lagoa (ha.)} \times 1.000} \\ (\text{kg/ha} \times \text{d})$$

Lodo acumulado

Apesar de não necessitar de análise laboratorial, a medição periódica da altura de lodo acumulado no fundo da L. An., apesar da sua simplicidade, é um meio bastante prático e útil para avaliar o desempenho do processo de digestão anaeróbia. É evidente que se o processo está em boas condições operacionais, os sólidos sedimentados, exceto os sólidos inorgânicos, serão continuamente estabilizados, reduzindo-se o volume. Se não houvesse estabilização, o lodo se acumularia no fundo, podendo formar ilhas, exalando odores desagradáveis.

O mapeamento da altura da camada de lodo traz importantes subsídios para análise do seu comportamento, tanto biológico quanto hidráulico.

Índice Pluviométrico

Medir a intensidade das chuvas na microregião onde está instalada a lagoa é importante, tanto para a operação quanto para futuros projetos. Os parâmetros importantes, tais como temperatura, O. D., tempo de detenção hidráulica sofrem influência direta da chuva. Sendo de fácil obtenção, é recomendável que seja medido na proximidade da lagoa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 — Novaes, Rosana F. V. — *Microbiology of Anaerobic Digestion, in Anaerobic Treatment in Tropical Countries*, São Paulo, agosto de 1986.
- 2 — McCarty, P. L. — *Historical trends in the Anaerobic Treatment of dilute wastewaters*, in Proceedings of Seminar/workshop on anaerobic treatment of sewage, Amherst. Massachusetts, jun 27 and 28 1985.
- 3 — McCarty, P. L. — "Anaerobic Treatment of Soluble Wastes", in *Advances in water quality improvements*, Water Resources Symposium n.º 01.
- 4 — Oswald, W. J. — "Advances in Anaerobic Pond Design", in *Advances in Water Quality Improvements*, University of Texas Press, Austin and London, 1968.
- 5 — EPA — *Operations Manual, Stabilization Pond* EPA 430/9-77-012, ago/1977.
- 6 — Thackston, E. L. e al — "Residence time distributions on shallow basins", *Journal of Environmental Engineering*, vol. 113, n.º 06, dez/1987.

7 — Polprasert, C. e al — “Dispersion Model for Waste Stabilization Ponds”, *Journal of Environmental Engineering*, vol. 111, n.º 01, fev/1985.

8 — Jeris, J. S. e McCarty, P. L. — *The Biochemistry of Methane Fermentation using C 14 Tracers*, J. W. P. C. F., vol. 37, n.º 02, fev/1965.

9 — *Waste Treatment Lagoons — State of the Art*, U. S. Environmental Protection Agency, julho/1971.

10 — Kamiyama, Hissashi — “DEO: os problemas e suas limitações como parâmetro de avaliação do desempenho da E.T.E.”, *Rev. DAE*, n.º 152, 1988.

11 — Matsushita, A. T. — Dissertação de, Mestrado, 1973, São Paulo — “Estudo Experimental sobre Lagoas de Es-

tabilização para Esgoto Sanitário”.

12 — Neel, J. K. e al — *Experimental Lagooning of Raw Sewage at Fayette*, Missouri, J. W. P. C. F., vol. 33, n.º 06, jun/1961.

13 — *Disease Transmission Control as a Factor in Pond Design, in Waste Stabilization Ponds* — WHO — Monograph Series n.º 60.

14 — Lochr, R. C. e Ruf, J. A. — *Anaerobic Lagoon Treatment of Milking-parlor Wastes*, J. W. P. C. F., vol. 40, n.º 01, jan/1968.

15 — Marais, G. v. R., *Faecal Bacterial Kinetics in Stabilization Ponds*, J. Env. Eng. Div. Amer. Soc. Civil Eng., 100, EE 1, 119, 1974.

ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ESGOTOS - LAGOA DE

-FL 1/3-

SUP. REG. DE

MUNICÍPIO:

DATA:

EQUIPE:

MOD. 1 - REGISTRO DE DADOS LABORATORIAIS:

TEMPERATURA DO AR: °C

ITEM	LOCAL DE COLETA	ESGOTO BRUTO (PTO 1)	LAGOA 1				LAGOA 2			LAGOA 3		
			PTO 2 (m)	PTO 3 (m)	PTO 4 (m)	EFL. (5) (m)	PTO 6 (m)	PTO 7 (m)	EFL. (8) (m)	PTO 9 (m)	PTO 10 (m)	EFL. (11) (m)
HORA DA COLETA												
TEMPERATURA D'ÁGUA - °C												
VAZÃO (l/s)												
pH												
OXIGÊNIO DISSOLVIDO (mg/l)												
TURBIDEZ												
TRANSPARÊNCIA (cm)												
DQO (mg/l)	TOTAL											
	SOLÚVEL											
DBO (mg/l)	TOTAL											
	SOLÚVEL											
SÓLIDOS	SEDIMENTÁVEIS (m/l)											
	TOTAIS (mg/l)											
	TOTAIS DISSOLVIDOS (mg/l)											
	NÃO FILTR. TOTAIS (mg/l)											
	NÃO FILTR. VOLÁTEIS (mg/l)											
CLORETO (mg/l)												

