



II-208 - AVALIAÇÃO DE LAGOAS TERCIÁRIAS APLICADAS AO TRATAMENTO DE DEJETOS SUÍNOS

Lígia Barthel⁽¹⁾

Bióloga, Mestre em Engenharia Ambiental pela UFSC (1998). Doutora em Engenharia Ambiental pela UFSC.

Paulo Armando Victória de Oliveira

Pesquisador da EMBRAPA- Suínos e Aves, Concórdia, SC. Doutor pelo INRA, Rennes, França.

Cláudio Loesch

Professor do Programa de Pós-Graduação em Administração, Universidade Regional de Blumenau, FURB, Blumenau, SC. Doutor em Engenharia de Produção, UFSC, 1995.

Rejane Helena Ribeiro da Costa

Professora Titular do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina-UFSC, Florianópolis, SC. Doutora em Qualidade e Tratamento de Águas, INSA, Toulouse, França. Pós-doutorado na Université Montpellier I, Montpellier, França.

Endereço⁽¹⁾: Rua Divinópolis, 81- Blumenau - SC - CEP:88040-400 - Brasil - Tel: (47) 3325-1541 - e-mail: lbarthel@ig.com.br

RESUMO

O presente trabalho teve como objetivo estudar a sucessão sazonal, aplicar a análise fatorial em componentes principais (ACP) e efetuar o balanço da remoção de nutrientes em lagoas de maturação (LM1 e LM2) e de aguapés (LAG) utilizadas para tratamento terciário de dejetos suínos. A sucessão planctônica mostrou variações entre a ocorrência do fitoplâncton e zooplâncton com a sazonalidade. A disponibilidade de alimento e a associação das trocas bioquímicas influenciaram na dinâmica de populações, resultando em uma sucessão de organismos, representada por diversas espécies de algas clorofíceas, diatomáceas e protozoários (ciliados livres e fixos). A ocorrência de biomassa algal durante todo o período experimental, sem fase de “águas claras”, nas duas lagoas de maturação, resultou em maior aporte de oxigênio, via fotossíntese, que o observado na LAG. Na LM2 (*Sistema A*), o zooplâncton esteve em baixa concentração durante todo o período experimental, enquanto a LAG (*Sistema B*) funcionou como um ambiente de herbivoria. As clorofíceas foram predominantes nas lagoas, durante todo o período experimental. Os resultados obtidos para as variáveis de monitoramento do desempenho da lagoa foram analisados por meio de análise fatorial, empregando-se a técnica de componentes principais (ACP) para a extração dos fatores artificiais. A ACP demonstrou que os principais fatores explicativos do funcionamento da lagoa foram: remoção de nutrientes (PT) e crescimento algal (SS). A biomassa algal foi responsável pela remoção de nutrientes e pela atividade fotossintética, elevando o pH. O fator remoção de nutrientes foi obtido em decorrência de um ambiente adequado para o desenvolvimento de algas e consequente remoção por assimilação. O balanço de massa da remoção de nutrientes mostrou que o nitrogênio amoniacal foi removido principalmente por nitrificação-desnitrificação na lagoa LM1, com percentuais superiores a 85%, enquanto nas lagoas LM2 e LAG a remoção foi via assimilação biológica e nitrificação-desnitrificação, em igual intensidade, em torno de 40-50%. O fósforo total foi removido principalmente por assimilação biológica, exceto na lagoa LM1 na qual predominou a precipitação. A LAG (*Sistema B*) mostrou-se mais eficiente em termos de remoção específica de nutrientes que a LM2 (*Sistema A*), devido à ação conjugada do fitoplâncton com os aguapés.

PALAVRAS-CHAVE: Análise em Componentes Principais, Sucessão Planctônica, Remoção de Nutrientes, Dejetos Suínos, Lagoas de Maturação e de Aguapés.

INTRODUÇÃO

Os dejetos suínos são efluentes complexos, que apresentam elevadas concentrações de matéria orgânica (DQO ~30.000 mg/L e DBO ~20.000 mg/L) e nutrientes (nitrogênio amoniacal ~2.500 mg/L e fósforo total ~600 mg/L). Dentre as tecnologias disponíveis para seu tratamento, as lagoas de estabilização têm sido utilizadas com maior frequência por médios e grandes produtores na Região Sul do Brasil. A utilização de lagoas terciárias para tratamento destes dejetos visa a remoção, principalmente, dos nutrientes (N, P) e patogênicos. Estudos realizados por Costa et al. (2000) relatam que lagoas de aguapés foram eficientes na remoção de

metais pesados, nutrientes, algas, sólidos em suspensão, coliformes, cor, turbidez e DBO; por outro lado, as lagoas de maturação também têm demonstrado bom desempenho na remoção dos nutrientes.

Trabalhos utilizando dejetos suínos, efetuados por Aguirre et al. (2004) verificaram, em lagoa de alta taxa, que o mecanismo principal de remoção de nitrogênio foi através de nitrificação-desnitrificação (85%); houve absorção algal (12%) e volatilização da amônia (máximo de 10% do total removido). Valero e Mara (2006) observaram, em lagoas de maturação, para efluentes domésticos, que a remoção da amônia ocorreu principalmente por assimilação biológica (90% do nitrogênio total), enquanto a volatilização mostrou-se em processo secundário com apenas 3% do nitrogênio total (NT) removido.

O presente trabalho teve como objetivo avaliar o comportamento de lagoas terciárias (maturação e aguapés) utilizadas para tratamento de dejetos suínos, quanto a sucessão planctônica nas lagoas, ao comportamento de variáveis físico-químicas e biológicas, aplicando a análise fatorial em componentes principais (ACP); e a remoção específica de nutrientes utilizando modelos da literatura.

MATERIAIS E MÉTODOS

A pesquisa foi realizada na Unidade Experimental de Tratamento de Dejetos Suínos – UNETDS, da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – EMBRAPA, Suínos e Aves, localizada no município de Concórdia, SC (latitude de 27°14'03" e longitude de 52°01'40"). O sistema piloto experimental era formado por um tratamento preliminar (equalizador de vazões e decantador), tratamento primário (2 lagoas anaeróbias - ANA1 e ANA2), tratamento secundário (lagoa de alta taxa - LAT) e tratamento terciário (duas lagoas de maturação - LM1 e LM2, e uma lagoa de aguapés - LAG). Após a etapa preliminar, o efluente passava pela série de lagoas até a LM1, com vazão de 600 L d⁻¹, de onde parte do efluente (200 L d⁻¹) era destinada a LM2 formando o *Sistema A* e o restante fluía para a LAG (400 L d⁻¹) formando o *Sistema B* (Figura 1). Na Tabela 1 estão apresentadas as dimensões e as condições operacionais das lagoas LM1, LM2 e LAG (tratamento terciário), objetos da pesquisa.

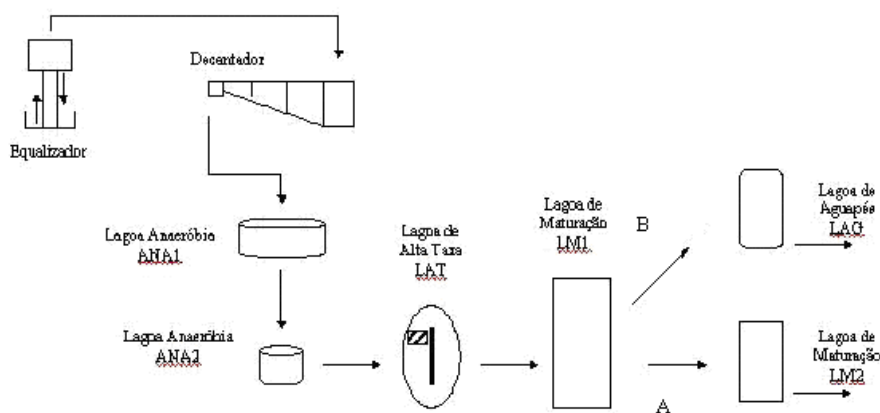


Figura 1: Fluxograma do sistema de tratamento.

Tabela 1: Dimensões e condições operacionais das lagoas terciárias (LM1, LM2 e LAG)

Lagoa	Profundidade (m)	Área Superficial (m ²)	Volume (m ³)	Vazão (m ³ d ⁻¹)	TDH (dias)	Carga superficial (KgDQO ₅ ha ⁻¹ .d ⁻¹)
LM1	0,70	60	42	0,60	70	32
LM2	0,70	6	3,44	0,20	17,2	90
LAG	0,70	6	3,44	0,40	8,6	148

O monitoramento das lagoas foi efetuado com análises de: pH, oxigênio dissolvido (OD) e temperatura da água, medidos *in loco* com sondas marca Hanna; amônia (N-NH₄), nitrato (N-NO₃), nitrito (N-NO₂), sólidos suspensos totais (SST), fósforo total (PT) e demanda química de oxigênio (DQO) total e solúvel, realizadas conforme o *Standard Methods* - APHA, AWWA, WEF (1998). As medidas meteorológicas: temperatura do



ar, precipitação, umidade relativa do ar e velocidade do vento foram fornecidas pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - EMBRAPA e os dados da radiação solar foram fornecidos pela Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina - EPAGRI.

Amostras destinadas à análise do fitoplâncton e zooplâncton (250 mL) foram fixadas imediatamente após as coletas com lugol. A identificação dos microrganismos, a nível de gênero, utilizando-se a câmara de Neubauer, foi realizada com auxílio do microscópio Olympus BX 40, com aumentos de 40 e 100 vezes, acoplado a um sistema analisador de imagens (Image Pro-Plus). A biomassa algal foi expressa em termos de clorofila *a* e determinada por espectrofotometria segundo Nusch (1980). As coletas foram realizadas a cada quinze dias, no período matutino, na entrada e saída de cada lagoa. O período de estudo teve duração de nove meses (fevereiro a outubro de 2003).

A sucessão planctônica foi efetuada utilizando-se os modelos de sucessão desenvolvidos por Sommer et al. (1986) para ambientes naturais e por Canovas et al. (1996) para lagoa de alta taxa.

Na análise fatorial foi empregada a técnica de componentes principais para a extração dos fatores artificiais e o critério de Kaiser para a escolha do número de fatores artificiais. Esse critério estabelece que na análise fatorial apenas os fatores artificiais com autovalor maior que a unidade devem ser considerados Silva et al. (2001).

Sete fatores artificiais foram obtidos das análises, adaptado de Silva et al. (2001), levadas ao efeito para as lagoas individuais deste sistema experimental:

- fator de estabilidade do processo aeróbio: descreve a influência principalmente do pH;
- fator remoção de nutrientes: propicia um ambiente adequado para o desenvolvimento de algas e remoção dos nutrientes (nitrogênio e fósforo) por assimilação biológica;
- fator concentração de material orgânico: indica a necessidade de cuidados com o lançamento de efluentes em corpos receptores, devido a insuficiente remoção de matéria orgânica ou excesso de sólidos suspensos que apresentam altas correlações com as variáveis DBO₅, DQO e às vezes com sólidos suspensos, coliformes fecais e clorofila *a*;
- fator aerobidade: retrata o saldo positivo do oxigênio (OD) na lagoa, representando a produtividade de oxigênio do fitoplâncton; pode estar correlacionado com a radiação;
- fator crescimento algal (fitoplâncton): correlacionado com a clorofila *a*, podendo estar associado a DBO₅, DQO, sólidos suspensos, oxigênio dissolvido e pH, indica uma produção inerente ao sistema;
- fator temperatura: relacionado à influência da temperatura na velocidade das reações bioquímicas que são processadas na lagoa e no ciclo diário de estratificação e mistura, que exerce influência na intensidade do contato entre os microrganismos e a massa líquida. Pode apresentar boa correlação com a radiação solar;
- fator condições climáticas: descreve a importância de condições ambientais, tais como umidade, chuva (precipitação) e vento, que interferem na dinâmica dos sistemas biológicos.

Para cada lagoa analisada foram obtidas séries de autovalores com números iguais aos das variáveis estudadas, sendo escolhidas os componentes principais (2 a 3) que explicam a maior parte da variância, e com esses componentes ortogonais foram feitas representações da distribuição das variáveis em espaços bidimensionais.

O comportamento das variáveis químicas, físicas e biológicas em cada lagoa do sistema de tratamento foi estudado em detalhes através da Análise Fatorial – Análise em Componentes Principais, com auxílio do software LHSTAT Estatística, 1ª versão (2004).

Para avaliar a remoção de nutrientes (NTK, N-NH₄, PT) nas lagoas, foram utilizadas as equações 1 e 2 propostas por Shelef et al. (1980):

$$N_{ef} = N_{af} - (N_b + N_{ev} + N_{sed}) \quad (1)$$

$$P_{ef} = P_{af} - (P_b + P_{sed} + P_{floc}) \quad (2)$$

Onde:

N_{ef} e P_{ef} = concentração de nitrogênio e fósforo do efluente da saída final;

N_{af} e P_{af} = concentração de nitrogênio e fósforo na entrada da lagoa;

N_b e P_b = remoção de nitrogênio e fósforo na lagoa por assimilação biológica;

N_{sed} = concentração de nitrogênio removido por sedimentação sob a forma complexa ($MgNH_4PO_4$);

P_{sed} = concentração de fósforo removido por sedimentação sob a forma estável de ($Ca_3(PO_4)_2$);



N_{ev} = concentração de nitrogênio removido por volatilização;

P_{floc} = concentração de fósforo removido por floculação, consequência eventual da agitação e adição de floclantes.

Os valores de N_{sed} e P_{sed} não foram medidos no presente estudo devido à dificuldade em realizar amostragem correta e representativa. P_{floc} só é considerado quando se usa um floclante, sendo então desprezado nos cálculos.

Para lagoas facultativas e/ou aeróbias fitoplanctônicas, N_b e P_b são estimados por análises ou avaliados a partir da velocidade de produção da biomassa com as equações 3 e 4 (SHELEF et al., 1980):

$$N_b = Pr. \varnothing / d. Y_N \quad (3)$$

$$P_b = Pr. \varnothing / d. Y_P \quad (4)$$

onde:

N_b e P_b = remoção de nitrogênio e fósforo na lagoa por assimilação biológica;

Pr = produtividade da biomassa algal ($g/m^2/dia$);

\varnothing = tempo de residência (dias);

d = profundidade da lagoa (m);

Y_N e Y_P = coeficientes de produção da biomassa (mg de biomassa produzida por mg de nitrogênio ou fósforo fixado por assimilação biológica), estimados em $Y_P = 59,4$ e $Y_N = 10,7$

As eficiências de remoção de nitrogênio e fósforo são expressas pelas equações 5 e 6:

$$ENR = (N_{af} - N_{ef}) / N_{af} * 100\% \quad (5)$$

$$EPR = (P_{af} - P_{ef}) / P_{af} * 100\% \quad (6)$$

Onde:

ENR e EPR = eficiência de remoção de nitrogênio e fósforo, respectivamente.

No afluente e efluente das lagoas, foram determinados os percentuais das formas nitrogenadas, segundo metodologia empregada por Chen et al. (2003), apresentados na forma de gráficos de setores, conforme equação 7:

$$NT = NTK + N-NO_2 + N-NO_3 \quad (7)$$

Sendo:

$$NTK = N_{org} + N-NH_4 \quad (8)$$

Onde:

NT = concentração de nitrogênio total (mg/L);

NTK = concentração de nitrogênio total Kjeldhal (mg/L);

$N-NO_2$ = concentração de nitritos (mg/L);

$N-NO_3$ = concentração de nitratos (mg/L);

N_{org} = concentração de nitrogênio orgânico (mg/L);

$N-NH_4$ = concentração de nitrogênio amoniacal (mg/L).

O balanço de nutrientes permite avaliar as formas e concentrações de entrada no afluente, transformações ocorridas e perdas no efluente. As diferentes formas de nitrogênio foram expressas em percentagem da concentração total do nitrogênio no afluente.

Para os cálculos do balanço de massa dos nutrientes (nitrogênio e fósforo) foram utilizadas as equações 9 a 12:

$$N_{aplicado} = N_{af} * Q \quad (9)$$

$$PT_{aplicado} = P_{af} * Q \quad (10)$$

Onde:

N_{af} = concentração de nitrogênio na entrada da lagoa (g/m^3);

P_{af} = concentração de fósforo na entrada da lagoa (g/m^3);

Q = vazão na lagoa (m^3/dia).

$$\text{Nitrogênio removido} = (N_{af} - N_{ef}) * Q \quad (11)$$

$$\text{Fósforo removido} = (P_{af} - P_{ef}) * Q \quad (12)$$



Onde:

N_{ef} e P_{ef} = concentração de nitrogênio e fósforo do efluente da saída final;

N_{af} e P_{af} = concentração de nitrogênio e fósforo na entrada da lagoa;

Q = vazão na lagoa (m^3/dia).

A quantidade diária de amônia removida (g/dia) por meio da “nitrificação/desnitrificação + sedimentação” (esta última não foi medida) foi calculada subtraindo-se a quantidade total removida menos a removida por volatilização e assimilação algal, segundo Chen et al. (2003) e Aguirre et al. (2004), conforme equação (13):

$$N \text{ (nitrif./desnitrif. + sed.)} = [(N_{af} - N_{ef}) - N_b - N_{ev}] * Q \quad (13)$$

Onde:

N_{af} = concentração de nitrogênio na entrada da lagoa;

N_{ef} = concentração de nitrogênio no efluente da saída final;

N_b = remoção de nitrogênio na lagoa por assimilação biológica;

N_{ev} = concentração de nitrogênio removido por volatilização;

Q = vazão na lagoa (m^3/dia).

Para o cálculo da concentração de nitrogênio removido por volatilização (N_{ev}) foram considerados 10% sobre a remoção de amônia total, segundo Metcalf e Eddy (2003), e igualmente Aguirre et al (2004) que obtiveram no máximo 10% de remoção de amônia por volatilização em lagoas de alta taxa com dejetos suínos.

$$\text{Remoção de PT por sedimentação} = [(P_{af} - P_{ef}) - P_b] * Q \quad (14)$$

Onde:

P_{af} = concentração de fósforo na entrada da lagoa;

P_{ef} = concentração de fósforo no efluente da saída final;

P_b = remoção de fósforo na lagoa por assimilação biológica;

Q = vazão na lagoa (m^3/dia).

A remoção específica de nutrientes em cada lagoa foi calculada segundo a equação 15:

$$\text{Remoção específica} = \text{nutriente removido} / A \quad (15)$$

Onde:

Nutriente removido = nitrogênio ou fósforo removido (g/dia);

A = área da lagoa (m^2).

RESULTADOS

A temperatura ambiente média variou entre 13,21 e 23,7°C durante o período experimental. A precipitação ficou compreendida entre 47 e 235 mm, estando acima de 200 mm em fevereiro e outubro, acima de 100 mm em abril e junho e inferior a este valor nos demais meses. Em agosto e setembro ocorreram as menores precipitações (47 e 55 mm, respectivamente). A velocidade do vento variou entre 1,3 e 1,9 $m s^{-1}$. Quanto à umidade do ar, os maiores valores foram registrados em junho (83,5%) e agosto (80,6%). A radiação solar ficou compreendida entre 45 e 111 $cal cm^{-2} d^{-1}$, sendo que em fevereiro, março, abril e outubro foram encontrados os maiores valores. Os meses de julho, fevereiro e setembro apresentaram os valores de menor insolação, nos demais meses do período experimental a insolação foi superior a 200 hh:mm. Na Tabela 2 estão apresentadas as variações dos parâmetros físico-químicos nas lagoas: LM1, LM2 e LAG.

**Tabela 2: Valores médios e desvios-padrões obtidos no sistema em contínuo. (n = 22)**

Lagoa	LM1	LM1	LM2	LAG
	Afluente	Efluente	Efluente	Efluente
Temper. (°C)	16,8 ± 3,22	17,0 ± 3,26	17,0 ± 3,21	17,3 ± 3,15
OD (mg/L)	3,08 ± 1,73	5,45 ± 2,64	4,06 ± 1,74	1,88 ± 1,6
pH	8,57 ± 0,6	9,0 ± 0,1	8,83 ± 0,9	7,61 ± 0,57
DQOt (mg/L)	1168 ± 923	449 ± 114	426 ± 98	299 ± 122
DQOs (mg/L)	713 ± 517	322 ± 172	269 ± 81	222 ± 100
NTK (mg/L)	240 ± 153	53 ± 32	34 ± 20	51 ± 64
NH ₄ -N (mg/L)	209 ± 86	36 ± 36	19 ± 23	28 ± 23
NO ₂ -N (mg/L)	313 ± 178	75 ± 67	32 ± 32	23 ± 40
NO ₃ -N (mg/L)	373 ± 427	114 ± 114	63 ± 84	87 ± 145
PT (mg/L)	23 ± 12	7 ± 4	6 ± 4	6,4 ± 3,6
SS (mg/L)	245 ± 140	84 ± 35	92,5 ± 41	83 ± 65
DBOs (mg/L)	41 ± 29	29 ± 20	54 ± 45	60 ± 55
CHL-a (µg/L)	2123 ± 2498	1757 ± 1022	1486 ± 858	1287 ± 898

A média da temperatura da massa líquida ficou em torno dos 17°C para todas as lagoas. A concentração média de OD variou bastante, ficando entre 0,5 e 5,5 mg/L, com valores máximos na LM1. O pH variou entre 7,6 e 9,0, sendo mais elevado nas lagoas de maturação.

A amônia foi diminuindo durante sua passagem no sistema de tratamento, com concentração média menor na saída do sistema A (19 mg/L) que no sistema B (28 mg/L). O mesmo ocorreu com o NTK. Os nitritos apresentaram-se elevados na entrada da lagoa LM1 (saída da lagoa de alta taxa do sistema de tratamento), diminuindo na saída das lagoas LM2 e LAG, porém no sistema A (saída da LM2) observou-se uma concentração maior (32 mg/L) que no sistema B (23 mg/L) (saída da LAG). Os nitratos também seguiram esta tendência, entrando na LM1 com média de 373 mg N-NO₃/L, finalizando no sistema A com 63 mg N-NO₃/L e 87 mg N-NO₃/L no sistema B. O fósforo também diminuiu ao longo do sistema, devido à sedimentação dos sólidos em suspensão e assimilação biológica.

As médias da DQO total e dos SS foram elevadas na entrada da LM1, em função da grande quantidade de algas, sendo que no final do sistema A, a concentração destes parâmetros é um pouco mais elevada que no sistema B. As concentrações médias da DQO solúvel foram em torno de 300 mg/L. Os valores médios obtidos para a clorofila *a* ficaram acima de 1.000 µg/L durante o período de monitoramento, sendo menores que os valores obtidos na lagoa secundária.

Quanto à sucessão sazonal, nas lagoas de maturação foram observadas clorofíceas, diatomáceas, protozoários (ciliados fixos e de vida livre). *Chlorella sp* foi a espécie dominante durante toda a fase experimental nas duas lagoas e foram identificadas cianobactérias.

Na LM1, as concentrações de clorofíceas e de clorofila *a* apresentaram densidade máxima até a 10ª semana na LM1, coincidindo com as concentrações máximas de zooplâncton (até 6.912 x 10⁴ ind/mL), alta radiação solar e temperatura e concentrações de PT inferiores a 5 mg/L. A ocorrência de zooplâncton reduziu-se na 17ª semana (etapas 17-18), não sendo mais encontrado a partir daí na LM1.



Na LM2, o zooplâncton esteve em baixa concentração durante todo o período experimental. As concentrações de clorofíceas e de clorofila *a* foram elevadas entre a 8ª e 15ª semana (etapas 10-15), beneficiadas por uma radiação solar não muito intensa (71-91 cal/cm²/dia). A ocorrência de biomassa algal durante todo o período experimental, sem fase de “águas claras”, nas duas lagoas de maturação, resultou em maior aporte de oxigênio, via fotossíntese, que o observado na LAG.

A presença de algas no efluente da LM1 permitiu o desenvolvimento de herbívoros na lagoa de aguapés. A ocorrência de algas filamentosas e diatomáceas (etapas 1-10) favoreceu sobre tudo o aparecimento de rotíferos (*Brachionus sp*) e ciliados livres (etapas 8-12). Somente nesta lagoa foi constatada a presença de nematóides. O zooplâncton esteve presente apenas no outono. A considerável população de euglenófitos observada na LAG indica que estes estão bem adaptados às condições de baixa DBO (60 mg/L) e concentração de nutrientes. A concentração de *Chlorella sp* atingiu densidade máxima (até 2.859 x 10⁴ ind/mL) entre a 8ª e 10ª semana (etapas 1 a 10), quando foi constatada maior concentração de zooplâncton e concentrações de amônia inferiores a 7 mg/L, pH neutro, OD em torno de 2 mg/L e precipitação de 114 mm. Picos da concentração de clorofila *a* e de clorofíceas foram observados na 2ª e 14ª semana (etapas 2 a 16), coincidindo com baixas concentrações de OD e PT superior a 1 mg/L. Na 14ª semana foi constatada baixa precipitação pluviométrica (70 mm). Um pico de clorofila *a* também foi observado na 24ª semana (etapas 19 a 21), onde possivelmente a menor precipitação (47 mm) deixou o efluente mais concentrado.

A análise fatorial das dezoito variáveis medidas na LM1 determinou dezessete fatores artificiais sendo que destes foram escolhidos os cinco primeiros com carga maior que a unidade, representados na Tabela 3, que explicam 82,2% da variância das variáveis da respectiva lagoa. Os coeficientes de correlação entre as variáveis originais e os três fatores artificiais provenientes da análise dos autovalores estão na Tabela 4.

Tabela 3: Autovalores e percentuais das variâncias das variáveis resultantes da análise para a LM1.

Núm.eixo principal	Autovalor	% Inércia total	% Inércia acumulada
1	5,8487	32,5	32,5
2	3,7556	20,9	53,4
3	2,5633	14,2	67,6
4	1,3986	7,8	75,4
5	1,2385	6,9	82,2

Tabela 4: Coeficientes de correlação das variáveis com os fatores artificiais na LM1.

Variável	Eixo 1	Eixo 2	Eixo 3
N-NH4	0,960	-0,030	0,072
DQOs	0,741	-0,257	-0,282
DBOs	0,215	-0,256	-0,706
N-NO3	0,831	-0,383	0,042
N-NO2	0,884	-0,257	-0,003
NTK	0,707	-0,653	0,122
PT	0,898	0,144	-0,062
SS	-0,185	-0,664	-0,552
pH	-0,442	-0,421	-0,296
OD	0,039	-0,251	-0,677
Tagua	-0,275	-0,468	0,410
Chl-a	-0,727	-0,127	-0,465
Radiação	-0,330	-0,739	0,261
Chuva	-0,113	-0,683	0,407
Vento	-0,403	-0,381	-0,131
Umidade	-0,226	0,732	0,040
Tar	-0,467	-0,582	0,573
Fito	-0,405	-0,129	-0,378

Nesta lagoa predomina o fator remoção de nutrientes (relacionado com o fator 1) pelo valor de correlação atribuído a N-NH4 (0,960), o fator aerobividade relacionado ao fator 2 pela radiação tendo coeficiente de correlação (-0,739) e o fator concentração de material orgânico referente ao fator 3 pela DBOs com coeficiente de correlação (-0,706).

O fator 1 apresentou alta correlação positiva com a DQOs (fator concentração de material orgânico), N-NH₄, N-NO₃, N-NO₂, NTK, PT (fator remoção de nutrientes) e correlação negativa com a chl-a, descritiva do fator crescimento algal. O segundo fator esteve correlacionado negativamente com radiação solar, descritiva do fator aerobividade. O terceiro fator, de menor importância, relacionou-se de forma negativa com a DBOs, descritiva da concentração de material orgânico.

O fator concentração de material orgânico é característico de lagoas que apresentam o efluente de pior qualidade, dada a influência de variáveis como DBOs e DQOs, ao longo da série de lagoas do sistema de tratamento. Nesta lagoa, DQOs, N-NO₃, N-NO₂, NTK correlacionaram-se positivamente, mas não sofreram influência as variáveis vento, chuva, radiação solar, SS, pH, temperatura do ar e da água, que apresentaram correlação negativa entre si.

No estudo da LM2 foram analisadas dezoito variáveis. Através da análise fatorial foram determinados dezesseis fatores artificiais, sendo escolhidos os cinco primeiros fatores, representados na Tabela 5, que somados explicam 80,8% da variância das variáveis. Na Tabela 6 estão apresentados os coeficientes de correlação entre as variáveis medidas e os três fatores artificiais da análise dos autovalores.

Tabela 5: Autovalores e percentuais das variâncias das variáveis resultantes da análise para a LM2.

Núm.eixo Principal	Autovalor	% Inércia total	% Inércia acumulada
1	5,7228	31,8	31,8
2	3,8521	21,4	53,2
3	2,2385	12,4	65,6
4	1,5268	8,5	74,1
5	1,2047	6,7	80,8

Tabela 6: Coeficientes de correlação das variáveis com os fatores artificiais na LM2.

Variável	Eixo 1	Eixo 2	Eixo 3
N-NH ₄	0,849	-0,090	0,283
DQOs	0,885	-0,257	-0,139
DBOs	0,430	0,196	0,429
N-NO ₃	0,737	-0,607	-0,012
N-NO ₂	0,862	-0,403	-0,029
NTK	0,487	-0,786	-0,262
PT	0,932	0,221	0,006
SS	-0,243	-0,668	0,008
pH	-0,231	0,135	-0,459
OD	0,224	-0,060	-0,530
Tagua	-0,447	-0,440	0,343
Chl-a	0,229	-0,102	-0,692
Radiação	-0,540	-0,643	0,202
Chuva	-0,365	-0,714	-0,186
Vento	-0,375	-0,134	-0,425
Umidade	-0,123	0,716	0,083
Tar	-0,718	-0,592	0,247
Fito	-0,363	0,258	-0,687

Relacionado ao fator 1 está o fator remoção de nutrientes, expresso pelo PT (0,932); ao fator 2 está o fator remoção de nutrientes, atribuída ao NTK com coeficiente de correlação (-0,786); e ao fator 3 está o fator crescimento algal devido à chl-a (-0,692).

O primeiro fator correlacionou-se positivamente com a DQOs (fator concentração de material orgânico), N-NH₄, N-NO₃, N-NO₂, PT (fator remoção de nutrientes) e negativamente com a Tar, descritiva do fator temperatura. O segundo fator apresentou correlação positiva com a umidade (fator condições climáticas) e negativa com o NTK (fator remoção de nutrientes). O terceiro fator artificial, de menor importância, não apresentou coeficiente de correlação maior ou igual a 0,7 para nenhuma variável. Porém, a correlação da chl-a com este fator é praticamente 0,7 (-0,692), indicando o desenvolvimento da biomassa algal.

O fator remoção de nutrientes (N-NH₄) (fator 1) correlacionou-se positivamente com outros compostos nitrogenados, chl-a e PT e negativamente com o fitoplâncton (fito). O fator aerobividade (fator 2), representado pela radiação solar correlacionou de forma negativa com Tar, Tagua, chuva e de forma positiva com PT. Ao fator 3 está relacionado a DBOs.



Nesta lagoa, DQOs, N-NH₄, N-NO₃, N-NO₂ apresentaram correlação positiva e temperatura do ar e da água, radiação solar, chuva, SS, apresentaram correlação negativa, porém esses dois grupos de variáveis não tiveram influência um sobre o outro).

A análise fatorial aplicada no estudo de dezoito variáveis originais da lagoa com aguapés (LAG) resultou em dezesseis fatores artificiais, dos quais foram escolhidos cinco, apresentados na Tabela 7, com autovalores maiores que 1, os quais somados explicam 84,3% da variância das variáveis originais. Na Tabela 8 estão apresentados os coeficientes de correlação entre as variáveis medidas e os três fatores artificiais da análise dos autovalores.

Tabela 7: Autovalores e percentuais das variâncias das variáveis resultantes da análise para a LAG.

Núm.eixo principal	Autovalor	% Inércia Total	% Inércia acumulada
1	5,8663	32,6	32,6
2	3,9484	21,9	54,5
3	2,1044	11,7	66,2
4	1,8051	10,0	76,2
5	1,4410	8,0	84,3

Tabela 8: Coeficientes de correlação das variáveis com os fatores artificiais na LAG.

Variável	Eixo 1	Eixo 2	Eixo 3
N-NH ₄	-0,687	0,435	-0,201
DQOs	-0,803	0,567	0,057
DBOs	-0,404	0,273	0,251
N-NO₃	-0,748	0,368	-0,024
N-NO₂	-0,867	0,338	0,112
NTK	-0,945	-0,071	-0,048
PT	-0,610	0,053	-0,577
SS	-0,163	-0,412	0,711
pH	-0,603	0,193	0,563
OD	-0,610	-0,453	-0,168
Tagua	-0,269	-0,793	-0,235
Chl-a	-0,090	-0,573	-0,158
Radiação	-0,497	-0,632	0,179
Chuva	-0,529	-0,574	-0,124
Vento	0,129	-0,539	0,236
Umidade	0,689	0,167	-0,339
Tar	-0,340	-0,811	-0,202
Fito	0,181	-0,179	0,679

O fator de maior representatividade na LAG foi a remoção de nutrientes (correspondentes ao fator 1, abscissas) devido ao alto coeficiente de correlação (-0,945) apresentado pelo NTK e associado ao fator 2 (eixo das ordenadas) está o fator temperatura (Tar) (-0,811) e ao fator 3, o fator crescimento algal referente aos SS com coeficiente de correlação (0,711).

O fator 1 apresentou correlação negativa com a DQOs (fator concentração de material orgânico), N-NO₃, N-NO₂ e NTK, descritivas do fator remoção de nutrientes. O segundo fator apresentou correlação negativa com o fator temperatura (Tar e Tagua). O terceiro fator correlacionou-se positivamente com os SS, descritivo do fator crescimento algal.

O fator remoção de nutrientes (NTK) correlacionou-se de forma negativa com os compostos nitrogenados (amônia, nitrito e nitrato). O fator temperatura correlacionou-se negativamente com: radiação solar, chl-a e chuva.

Pode-se constatar que os fatores remoção de nutrientes (compostos nitrogenados e PT), estabilidade do processo (pH) e concentração de material orgânico (DQOs, DBOs) apresentam correlação negativa. Os fatores crescimento algal (SS, chl-a), temperatura (Tar, Tagua), aerobividade (radiação, OD) também apresentaram correlação negativa entre si, porém estes fatores correlacionaram-se positivamente com a umidade. Para a variável fitoplâncton (fito) foi possível observar relação inversa com o PT.

As duas principais variáveis, em relação ao eixo 1, foram NTK e umidade, que se correlacionam negativamente, sendo que quando a concentração de NTK é elevada, há pouca umidade e vice-versa.

Os resultados de maior importância, que descrevem o funcionamento das lagoas, foram a remoção de nutrientes e o desenvolvimento da biomassa algal. Na LM1, o fator aerobicidade é significativo, comprovado pela alta concentração de OD, atingindo 8 mg/L. As algas removeram os nutrientes, compostos nitrogenados e o PT, mas elevaram a concentração de material orgânico (DBOs), demonstrando a necessidade de melhoria da eficiência do sistema de tratamento. Na sequência, continuando o processo, a LM2 é influenciada pelo crescimento algal e pela remoção de nutrientes. Na LAG, os fatores mais significativos foram: remoção de nutrientes, temperatura e crescimento algal. O fator temperatura, na LAG, não foi tão expressivo como nas outras lagoas.

O fator concentração de material orgânico foi obtido apenas na LM1, enquanto o fator remoção de nutrientes foi obtido em todas as lagoas, em decorrência de um ambiente adequado para o desenvolvimento de algas e remoção de nutrientes por assimilação. O fator aerobicidade refletiu a importância das condições aeróbias das lagoas.

Quanto a remoção de nutrientes e balanço de massa, constata-se que as lagoas de maturação (LM1 e LM2) e de aguapés (LAG) removeram os nutrientes, promovendo o polimento dos dejetos suínos tratados na lagoa secundária (LAT). Na Figura 3 apresenta-se a distribuição das diferentes formas de nitrogênio nas lagoas.

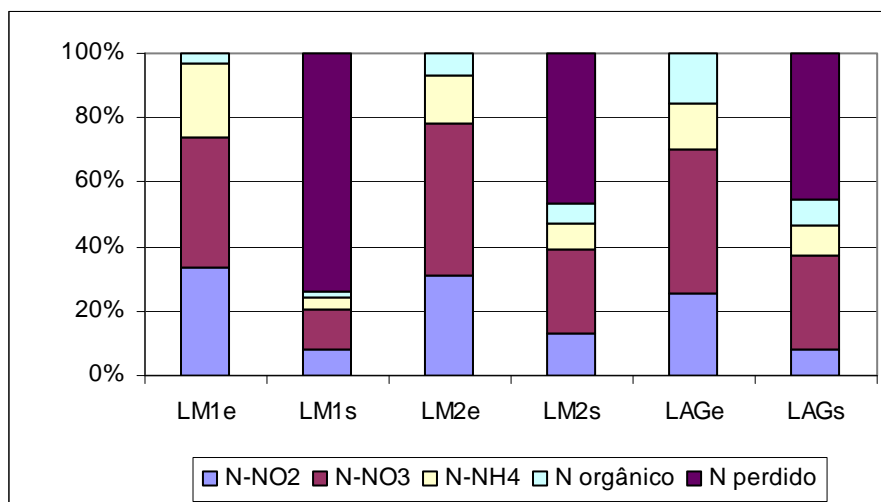


Figura 3: Distribuição das diferentes formas de nitrogênio no afluente e efluente da LM1.
(e = entrada do afluente; s = saída do efluente)

Na Figura 3, para LM1, os nitritos e nitratos somam 74% do total das formas nitrogenadas no afluente (686 mg/L), no efluente representam 20% (189 mg/L). O nitrogênio orgânico e amoniacal com concentrações afluentes de 31 e 209 mg/L, representaram 3 e 23%, respectivamente, e no efluente 2 e 4% (17 e 36 mg/L). Houve uma perda de nitrogênio correspondente a 74%.

O balanço de todas as formas de nitrogênio da LM2 mostrou que, para uma concentração de nitrogênio total afluente e efluente de 242 mg/L, o nitrogênio perdido foi de 113 mg/L, correspondendo a 47% (Figura 3). As concentrações de nitritos e nitratos no afluente eram de 75 e 114 mg/L (31 e 47%) e no efluente de 32 e 63 mg/L (13 e 26%), respectivamente. As concentrações de nitrogênio orgânico e amoniacal no afluente eram de 17 e 36 mg/L (7 e 15%) e no efluente diminuíram para 15 e 19 mg/L (6 e 8%), respectivamente.

Para a LAG, observou-se que os nitritos e nitratos contribuíram com 69% das diferentes formas de nitrogênio no afluente, diminuindo para 37% no efluente. Nitratos apresentaram elevadas concentrações tanto no afluente como no efluente 132 e 87 mg/L (44 e 29%), respectivamente. Nitritos passaram de 75 mg/L no afluente a 23 mg/L efluente, correspondendo a 25 e 8% do nitrogênio total. O nitrogênio orgânico diminuiu cerca de 50% na LAG (46 e 23 mg/L), representando 16 e 8% do nitrogênio total. O nitrogênio perdido foi de 46%.



O balanço de massa das diversas formas de nitrogênio nas lagoas mostrou que a maior perda ocorreu na primeira lagoa de maturação LM1 (74%).

O balanço da concentração média do PT em cada lagoa, calculado utilizando a equação proposta por Shelef et al. (1980), é apresentado na Tabela 9.

Tabela 9: Balanço da concentração média de fósforo (mg/L) em cada lagoa.

	LM1	LM2	LAG
Pafluente	23	7	8,4
Pefluente	7	6	6,4
Pb (assimilado)	1,411	1,557	1,3947
Psedimentado	8,163	-0,557	0,605

Para o fósforo, o modelo mostrou que este foi removido nas lagoas LM2 e LAG principalmente por assimilação biológica, exceto na LM1 em que predominou a sedimentação, na forma de compostos complexos estáveis, devido ao elevado pH (>9) do meio. Na LM2, o balanço do fósforo sedimentado é negativo, indicando ocorrência de relargagem deste, como havia sido mostrado no cálculo da eficiência de remoção. Pode-se concluir que o modelo proposto por Shelef et al. (1980) é limitado, pois o mesmo não considera a possibilidade de relargagem do fósforo.

Aplicando-se a metodologia proposta por Aguirre et al. (2004), que considera o processo de nitrificação-desnitrificação, além da assimilação biológica e a volatilização da amônia, o balanço da massa dos nutrientes (nitrogênio e fósforo), em cada lagoa, expresso em g/dia, é apresentado na Tabela 10. Verifica-se que o nitrogênio foi removido principalmente por nitrificação-desnitrificação na LM1 (~86%), enquanto nas lagoas LM2 e LAG ocorreu remoção por assimilação biológica (~50%) e nitrificação-desnitrificação em igual intensidade. Para o fósforo, os resultados confirmam aqueles calculados pelo modelo de Shelef et al. (1980), sendo a assimilação algal a principal via de remoção nas lagoas, exceto na LM1 onde predominou a sedimentação.

O balanço do nitrogênio em lagoas mostra-se complexo. Muitos autores, como Shelef et al. (1980) e Pano e Middlebrooks (1982), não consideram a possibilidade de ocorrência de nitrificação-desnitrificação nas lagoas, partindo do pressuposto que o ambiente é eutrófico e as variáveis que devem ser levadas em consideração são pH (responsável pela volatilização da amônia) e biomassa fitoplanctônica (responsável pela assimilação biológica). Alguns estudos confirmam essa teoria, como os de Bassères (1990) e Costa et al. (2006), devido principalmente ao pH elevado medido nas lagoas (>9).

Os resultados obtidos no presente trabalho confirmam esses estudos, devendo o processo de nitrificação-desnitrificação ser considerado como fundamental em lagoas secundárias e terciárias de dejetos suínos, desde que as condições ambientais (temperatura, pH e OD) estejam dentro da faixa ótima para sua realização.



Tabela 10: Balanço de massa de nutrientes (g/dia) em cada lagoa.

		LM1	LM2	LAG
Aplicado	N-NH ₄	125	7,2	17
	NTK	144	10	35
	PT	14	1,4	3,3
Removido	N-NH ₄	104 (83%)	3,4 (47%)	6 (35%)
	NTK	112 (78%)	3,8 (36%)	15 (44%)
	PT	9,6 (70%)	0,2 (14%)	0,8 (24%)
Removido por assimilação algal	N-NH ₄	4,7 (4,5%)	1,7 (50%)	3,0 (50%)
	NTK	4,7 (4,19%)	1,7 (42,5%)	3,0 (20%)
	PT	0,8 (8,3%)	--	0,6 (69%)
Removido por Volatilização (10%)	N-NH ₄	10,4	0,34	0,6
Removido por Sedimentação + Nitrificação/desnitrificação	N-NH ₄	88,9 (85,48%)	1,36 (40%)	2,4 (40%)
PT sedimentado		8,7 (91%)	--	0,2 (30%)

Na Tabela 11 são apresentados os resultados obtidos para a remoção específica de nutrientes (nitrogênio e fósforo).

Tabela 11: Remoção específica de nutrientes (g/m²/dia) em cada lagoa.

	N-NH ₄	NTK	PT
LM1 (60 m ²)	1,73	1,87	0,16
LM2 (6 m ²)	0,57	0,63	0,03
LAG (6 m ²)	1,00	2,50	0,13

Bassères (1990), utilizando lagoas piloto com dejetos suínos, constatou que com tempo de residência de dez dias, 50% da amônia foi eliminado por volatilização e que a participação das algas na remoção de nitrogênio foi pequena (5%). Obteve remoção de amônia de 2,86 g/m²/dia e de fosfatos de 0,042 g/m²/dia. No presente estudo, a remoção específica observada nas lagoas foi muito superior ao obtido por esse autor, principalmente na lagoa de alta taxa, cuja remoção específica da amônia foi de 21,27 g/m²/dia, mostrando o potencial desse tipo de lagoa na remoção de nutrientes, utilizando menor superfície que uma lagoa facultativa convencional. A LAG teve desempenho superior a LM2, devido à ação conjunta do fitoplâncton com os aguapés na remoção dos nutrientes.

CONCLUSÕES

Em geral, a sucessão se apresentou, neste trabalho, representada por diversas espécies de algas clorofíceas, diatomáceas, cianobactérias, protozoários (ciliados livres e fixos), euglenófitos e posteriormente metazoários (estes somente na LAG). A disponibilidade de alimento e a associação das trocas bioquímicas (sistema bicarbonato-carbonato, fitoplâncton e zooplâncton) influenciaram a dinâmica de populações nas lagoas estudadas, resultando em uma sucessão de organismos.

As algas clorofíceas foram predominantes em todas as lagoas, durante todo o período experimental. A recorrência de certas espécies algais nas lagoas pode ser atribuída, entre outros fatores, às flutuações na concentração da matéria orgânica.

As lagoas de maturação funcionaram sem fase de “águas claras”, caracterizando-se como ambiente predominantemente fotossintético e a LAG como um ambiente de herbivoria, destacando-se a ocorrência de algas filamentosas, diatomáceas, rotíferos e ciliados livres.



A ACP demonstrou que o funcionamento das lagoas esteve associado principalmente à remoção de nutrientes e ao desenvolvimento da biomassa algal. A temperatura (ar, água) e a energia solar estiveram fortemente correlacionadas com os principais fatores ambientais que controlam o processo de tratamento efetuado nas lagoas, demonstrando o bom funcionamento destas.

O balanço de massa da remoção de nutrientes mostrou que o nitrogênio amoniacal foi removido principalmente por nitrificação-desnitrificação na LM1, com percentuais superiores a 85%, enquanto nas lagoas LM2 e LAG a remoção foi via assimilação biológica e nitrificação-desnitrificação, em igual intensidade, em torno de 40-50%. O fósforo total foi removido principalmente por assimilação biológica, exceto na lagoa LM1 na qual predominou a precipitação, ocorrida em função do elevado pH (>9,0) nessa lagoa. Quanto às lagoas finais, LM2 (Sistema A) e LAG (Sistema B), esta última mostrou-se mais eficiente em termos de remoção específica que a LM2, devido à ação conjugada do fitoplâncton com os aguapés.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. AGUIRRE, P.; GARCÍA, J.; ÁLVAREZ, E. Efficiency and design considerations of high rate ponds used for the treatment of piggy wastes. In: 6th INTERNATIONAL CONFERENCE ON WASTE STABILISATION PONDS. Avignon, France, p. 131-138, 2004.
2. APHA. AWWA. WEF. Standard methods for the examination of water and wastewater. 20 Ed., Washington, DC, USA, American Public Health Association, 1998.
3. BASSÈRES, A. Performance des microphytes et des macrophytes dans l'épuration d'effluents organiques a forte charge em ammoniacque. Thèse, Université Paul Sebatier, Toulouse, France, 1990.
4. CANOVAS, S.; PICOT, B.; CASELLAS, C.; ZULKIFLI, H.; DUBOIS, A.; BONToux, J. Seasonal development of phytoplankton in a high-rate algal pond. WAT. SCI. TECH., v. 33, n. 7, p. 199-206, 1996.
5. CHEN, P.; ZHOU, Q.; PAING, J.; LE, H.; PICOT, B. Nutrient removal by an integrated use of high rate algal pond and macrohyte systems in China. WAT. SCI. TECH., v. 48, n. 2, p. 251-257, 2003. 6.
6. COSTA, R. H. R.; BAVARESCO, A. S. L.; MEDRI, W.; PHILIPPI, L. S. Tertiary treatment of piggy wastes in water hyacinth ponds. WAT. SCI. TECH., v. 42, n. 10-11, p. 211-214, 2000.
7. COSTA, R. H. R.; ARAUJO, I. S.; BELLI FILHO, P. Aerated facultative pond and maturation pond in-series for treatment of piggy wastes. In: CONFERENCE ON WASTE STABILISATION PONDS. Bangkok, Thailand, 2006. 1CD-ROM.
8. NUSCH, E. A. Comparison of different methods for chlorophyll and phaeopigment determination.
9. ARCH. HYDROBIOL. BEIH. Stuttgart, v. 14, p. 14-36, 1980.
10. METCALF & EDDY. WASTEWATER ENGINEERING, TREATMENT AND REUSE. 4th edition. McGraw-Hill Inc. New York, 2003. 1.334p.
11. PANO, A.; MIDDLEBROOKS, E. J. Ammonia nitrogen removal in facultative wastewater stabilization ponds. J. WAT. POLLUT. CONTROL FED., v.54, n.4, p.344-351, 1982.
12. SHELEF, G.; AZOV, Y.; MORAINÉ, R.; ORON, G. Algal mass production as an integral part of waste treatment and reclamation system. In: ALGAE BIOMASS: production and use, G. Shelef and C. J. Soeder. Elsevier/North Holland Biomedical Press, Amsterdam, 1980.
13. SILVA Fº, T. A. T.; SILVA, S. A.; OLIVEIRA, R.; MOREIRA, J. F. V. Análise multivariada de dados de operação de uma série de lagoas de estabilização profundas tratando esgoto doméstico no nordeste do Brasil. In: XXI CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL. João Pessoa, PB, 2001. 1CD-ROM.
14. SOMMER, U.; GLIWICZ, Z. M.; LAMPERT, W.; DUNCAN, A. The PEG-model of seasonal succession of planktonic events in freshwater. ARCHIV FÜR HYDROBIOLOGIE, 106, p. 433-471, 1986.
15. VALERO, M. A. C.; MARA, D. D. Nitrogen removal via ammonia volatilization in maturation ponds. In: CONFERENCE ON WASTE STABILISATION PONDS. Bangkok, Thailand, 2006. 1CD-ROM.