



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
CURSO DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL
CAMPUS II - CAMPINA GRANDE

"QUANTIFICAÇÃO DOS PROCESSOS QUE AFETAM
O pH EM LAGOAS DE POLIMENTO"

FREDSON GOMES DE MENEZES

CAMPINA GRANDE

MAIO / 2002

**“QUANTIFICAÇÃO DOS PROCESSOS QUE AFETAM O pH EM LAGOAS DE
POLIMENTO”**

FREDSON GOMES DE MENEZES

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado
em Engenharia Civil da Universidade Federal
da Paraíba, em cumprimento às exigências
para obtenção do Grau de Mestre.

Área de Concentração: ENGENHARIA SANITÁRIA

Orientadores: Prof. Adrianus Van Haandel – M. Sc. Ph.D.

Profa. Paula Frassinetti F. Cavalcanti – M. Sc. Doutoranda

CAMPINA GRANDE - PARAÍBA

2002



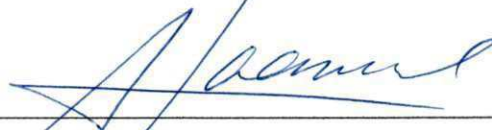
M543q	<p>Menezes, Fredson Gomes de. "Quantificação dos processos que afetam o pH em lagoas de polimento" / Fredson Gomes de Menezes. - Campina Grande, 2002. 84 f.</p> <p>Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal da Paraíba, Centro de Ciências e Tecnologia, 2002. "Orientação : Prof. Dr. Adrianus Cornelius Van Haandel, Profa. M.Sc. Paula Frassinetti Feitosa Cavalcanti". Referências.</p> <p>1. Lagoas de Estabilização. 2. Lagoas de Polimento. 3. Remoção de Nutrientes. 4. Dissertação - Engenharia Civil. I. Haandel, Adrianus Van. II. Cavalcanti, Paula Frassinetti Feitosa. III. Universidade Federal da Paraíba - Campina Grande (PB). IV. Título</p> <p style="text-align: right;">CDU 628.357.1(043)</p>
-------	----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

FREDSON GOMES DE MENEZES

“QUANTIFICAÇÃO DOS PROCESSOS QUE AFETAM O pH EM LAGOAS DE
POLIMENTO”

Dissertação aprovada em: ___ / ___ / ___

COMISSÃO EXAMINADORA



Prof. Adrianus Van Haandel – M. Sc. Ph. D.

Orientador



Prof.ª Paula Frassinetti F. Cavalcanti – M. Sc. Doutoranda

Orientadora



Prof. Rui de Oliveira – M. Sc. Ph.D.

Examinador Interno



Prof. José Tavares de Sousa – M. Sc. Dr.

Examinador Externo

Campina Grande – PB

Maio/2002

AGRADECIMENTOS

A DEUS pela força e fé.

Aos professores Adrianus Van Haandel e Paula F. Cavalcanti, pela orientação e paciência durante a execução deste trabalho.

Aos meus pais Francisco J. de Menezes e Dione G. de Menezes pelo apoio nos momentos mais decisivos da minha vida.

As amigas Maria de Fátima A. Vieira e Maria Angélica Miná pela amizade, carinho, ajuda e confiança.

À amiga e ao amigo de Belém do Pará, Heline Modesto e Leonardo Neves pela grande amizade conquistada.

Aos colegas Anamaria, Paulo Cosentino e Lukinha, pela amizade, apoio e incentivo.

À minha namorada Jussara Aguiar pela preocupação.

Aos(a) companheiros(a) do PROSAB Eudes, Nélia e Romário pelo companheirismo e atenção prestado durante a realização das análises e da pesquisa.

A todos que ajudaram de forma direta e/ou indireta.

À Universidade Federal da Paraíba (UFPB) campus II.

À CAPES pelo apoio financeiro.

LISTA DE FIGURAS

<u>Figura 2.1 – Ciclo do Nitrogênio (Metcalf & Eddy)</u>	4
<u>Figura 2.2 – Diagrama de Deffeyes</u>	13
<u>Figura 2.3 – Distribuição da amônia e ion amônio com o pH e temperatura (WPCF, 1983)</u>	16
<u>Figura 3.1 – Representação esquemática das lagoas de polimento utilizadas nos experimentos</u>	20
<u>Figura 4.1 – Alcalinidade, pH e acidez experimentais e teóricos em lagoas de polimento com limitação fotossintética em regime de batelada operada em maio de 2001 (dados da Tabela 4.19). Profundidade de 0,40 m</u>	51
<u>Figura 4.2 – Alcalinidade, pH e acidez experimentais e teóricos em lagoas de polimento com limitação fotossintética em regime de batelada operada em maio de 2001 (dados da Tabela 4.20). Profundidade de 0,60 m</u>	52
<u>Figura 4.3 – Alcalinidade, pH e acidez experimentais e teóricos em lagoas de polimento com limitação fotossintética em regime de batelada operada em maio de 2001 (dados da Tabela 4.21). Profundidade de 0,80 m</u>	53
<u>Figura 4.4 – Alcalinidade, pH e acidez experimentais e teóricos em lagoas de polimento com limitação fotossintética em regime de batelada operada em outubro de 2001 (dados da Tabela 4.22). Profundidade de 0,40 m</u>	54
<u>Figura 4.5 – Alcalinidade, pH e acidez experimentais e teóricos em lagoas de polimento com limitação fotossintética em regime de batelada operada em outubro de 2001 (dados da Tabela 4.23). Profundidade de 0,60 m</u>	55
<u>Figura 4.6 – Alcalinidade, pH e acidez experimentais e teóricos em lagoas de polimento com limitação fotossintética em regime de batelada operada em outubro de 2001 (dados da Tabela 4.24). Profundidade de 0,80 m</u>	56

<u>Figura 4.7 – Alcalinidade, pH e acidez experimentais e teóricos em lagoas de polimento sem limitação fotossintética em regime de batelada operada em maio de 2001 (dados da Tabela 4.25). Profundidade de 0,40 m.</u>	64
<u>Figura 4.8 – Alcalinidade, pH e acidez experimentais e teóricos em lagoas de polimento sem limitação fotossintética em regime de batelada operada em maio de 2001 (dados da Tabela 4.26). Profundidade de 0,60 m.</u>	65
<u>Figura 4.9 – Alcalinidade, pH e acidez experimentais e teóricos em lagoas de polimento sem limitação fotossintética em regime de batelada operada em maio de 2001 (dados da Tabela 4.27). Profundidade de 0,80 m.</u>	66
<u>Figura 4.10 – Alcalinidade, pH e acidez experimentais e teóricos em lagoas de polimento sem limitação fotossintética em regime de batelada operada em outubro de 2001 (dados da Tabela 4.28). Profundidade de 0,40 m.</u>	67
<u>Figura 4.11 – Alcalinidade, pH e acidez experimentais e teóricos em lagoas de polimento sem limitação fotossintética em regime de batelada operada em outubro de 2001 (dados da Tabela 4.29). Profundidade de 0,60 m.</u>	68
<u>Figura 4.12 – Alcalinidade, pH e acidez experimentais e teóricos em lagoas de polimento sem limitação fotossintética em regime de batelada operada em outubro de 2001 (dados da Tabela 4.30). Profundidade de 0,80 m.</u>	69
<u>Figura 5.1 – Taxa de dessorção e de consumo fotossintético em lagoas para diferentes condições de alcalinidade, pH, intensidade solar e profundidade de lagoas.</u>	72
<u>Figura 5.2 - A taxa relativa de dessorção de amônia em função do pH (esq) e da altura em lagoas de polimento.</u>	74
<u>Figura 5.3 - Deslocamento do ponto de equilíbrio no diagrama de Deffeyes devido à remoção de amônia e de dióxido de carbono.</u>	78

LISTA DE TABELAS

<u>Tabela 2.1 – Características do efluente da lagoa de polimento.</u>	7
<u>Tabela 2.2– Efeito de diferentes processos sobre a alcalinidade, acidez e o pH em lagoas de polimento (segundo CAVALCANTI, 2001).</u>	14
<u>Tabela 3.1 – Características físicas das lagoas de polimento.</u>	19
<u>Tabela 3.2– Características operacionais iniciais do Experimento 1.</u>	21
<u>Tabela 3.3 – Características operacionais iniciais do experimento 2 (abril de 2001).</u>	23
<u>Tabela 3.4 – Características operacionais iniciais do experimento 2 (agosto de 2001).</u>	23
<u>Tabela 4.1– Valores de pH, alcalinidade total e concentração de dióxido de carbono na massa líquida das lagoas LP-1, LP-2 e LP-3.</u>	29
<u>Tabela 4.2 – Valores para determinação da constante de dessorção do CO₂ para as lagoas LP-1, LP-2 e LP-3.</u>	29
<u>Tabela 4.3 – Valores de pH, alcalinidade total e a concentração de dióxido de carbono na massa líquida da lagoa de 0,60 m.</u>	30
<u>Tabela 4.4 – Valores para determinação da constante de dessorção do CO₂ para as lagoas LP-4, LP-5 e LP-6.</u>	30
<u>Tabela 4.5 – Valores de pH, alcalinidade total e a concentração de dióxido de carbono na massa líquida da lagoa de 0,80 m.</u>	31
<u>Tabela 4.6 – Valores para determinação da constante de dessorção do CO₂ para as lagoas LP-7, LP-8 e LP-9.</u>	31
<u>Tabela 4.7 – Valores de pH, amônia gasosa e amônia total na massa líquida da lagoa de 0,40m de profundidade (abril de 2001).</u>	33
<u>Tabela 4.8 – Constantes de amônia das lagoas de 0,40m (abril de 2001).</u>	33

<u>Tabela 4.9 – Valores de pH, amônia gasosa e amônia total na massa líquida da lagoa de 0,60m de profundidade (abril de 2001).</u>	33
<u>Tabela 4.10 – Constantes de amônia das lagoas de 0,60m (abril de 2001).</u>	34
<u>Tabela 4.11 – Valores de pH, amônia gasosa e amônia total na massa líquida da lagoa de 0,80m de profundidade (abril de 2001).</u>	34
<u>Tabela 4.12 – Concentração de amônia gasosa na massa líquida da lagoa de 0,80m (abril de 2001).</u>	35
<u>Tabela 4.13 – Valores de pH, amônia gasosa e amônia total na massa líquida da lagoa de 0,40m de profundidade (agosto de 2001).</u>	36
<u>Tabela 4.14 – Constantes de amônia das lagoas de 0,40m (agosto de 2001).</u>	36
<u>Tabela 4.15 – Valores de pH, amônia gasosa e amônia total na massa líquida da lagoa de 0,60m de profundidade (agosto de 2001).</u>	37
<u>Tabela 4.16 – Constantes de amônia das lagoas de 0,60m (agosto de 2001).</u>	38
<u>Tabela 4.17– Valores de pH, amônia gasosa e amônia total na massa líquida da lagoa de 0,80m de profundidade (agosto de 2001).</u>	39
<u>Tabela 4.18 – Constantes de amônia das lagoas de 0,80m (agosto de 2001).</u>	40
<u>Tabela 4.19 – Valores de pH, alcalinidade e concentrações de amônia em função do tempo na lagoa de batelada com profundidade de 0,40 m (maio de 2001). Operação com limitação da fotossíntese.</u>	44
<u>Tabela 4.20 – Valores de pH, alcalinidade e concentrações de amônia em função do tempo na lagoa de batelada com profundidade de 0,60 m (maio de 2001). Operação com limitação da fotossíntese.</u>	45
<u>Tabela 4.21 – Valores de pH, alcalinidade e concentrações de amônia em função do tempo na lagoa de batelada com profundidade de 0,80 m (maio de 2001). Operação com limitação da fotossíntese.</u>	46

<u>Tabela 4.22 – Valores de pH, alcalinidade e concentrações de amônia em função do tempo na lagoa de batelada com profundidade de 0,40 m (outubro de 2001). Operação com limitação da fotossíntese.</u>	48
<u>Tabela 4.23 – Valores de pH, alcalinidade e concentrações de amônia em função do tempo na lagoa de batelada com profundidade de 0,60 m (outubro de 2001). Operação com limitação da fotossíntese.</u>	49
<u>Tabela 4.24 – Valores de pH, alcalinidade e concentrações de amônia em função do tempo na lagoa de batelada com profundidade de 0,80 m (outubro de 2001). Operação com limitação da fotossíntese.</u>	50
<u>Tabela 4.25 – Valores de pH, alcalinidade, OD e concentrações de amônia em função do tempo na lagoa de batelada com profundidade de 0,40 m (maio de 2001). Operação sem limitação da fotossíntese.</u>	57
<u>Tabela 4.26 – Valores de pH, alcalinidade, OD e concentrações de amônia em função do tempo na lagoa de batelada com profundidade de 0,60 m (maio de 2001). Operação sem limitação da fotossíntese.</u>	58
<u>Tabela 4.27 – Valores de pH, alcalinidade, OD e concentrações de amônia em função do tempo na lagoa de batelada com profundidade de 0,80 m (maio de 2001). Operação sem limitação da fotossíntese.</u>	59
<u>Tabela 4.28 – Valores de pH, alcalinidade, OD e concentrações de amônia em função do tempo na lagoa de batelada com profundidade de 0,40 m (outubro de 2001). Operação com limitação da fotossíntese.</u>	61
<u>Tabela 4.29 – Valores de pH, alcalinidade, OD e concentrações de amônia em função do tempo na lagoa de batelada com profundidade de 0,60 m (outubro de 2001). Operação sem limitação da fotossíntese.</u>	62
<u>Tabela 4.30 – Valores de pH, alcalinidade, OD e concentrações de amônia em função do tempo na lagoa de batelada com profundidade de 0,80 m (outubro de 2001). Operação sem limitação da fotossíntese.</u>	63

<u>Tabela 5.1 – Valores experimentais médios da constante de dessorção de CO₂ nas lagoas experimentais, usando água</u>	71
<u>Tabela 5.2 – Valores experimentais médios da constante de dessorção de CO₂ nas lagoas experimentais, usando água</u>	73
<u>Tabela 5.3 – Efeito da remoção de dióxido de carbono e de amônia sobre o valor da alcalinidade e da acidez</u>	76

RESUMO

As lagoas de estabilização são reconhecidamente eficientes na remoção de material orgânico e de organismos patogênicos, mas a remoção de nutrientes é muito menos eficiente. Todavia, na prática, a remoção de nutrientes em um sistema de lagoas pode ser importante, por exemplo, quando se pretende lançar o efluente em um corpo d'água de uma represa. Neste caso a remoção de nutrientes pode ser necessária para evitar a eutrofização.

Os mecanismos de remoção dos dois macronutrientes (nitrogênio e fósforo) são diferentes: o nitrogênio desprende como o gás amoníaco para a atmosfera e o fósforo precipita como ortofosfato. Todavia, para o desprendimento de amoníaco e a precipitação de fosfato podem ocorrer com taxas elevadas sendo necessário que o pH se eleve, deslocando o equilíbrio de amônia para a forma não ionizada e gasosa, NH_3 e o equilíbrio de fósforo para o íon PO_4^{3-} .

No presente estudo foi procurado identificar quais os processos que, ocorrendo em lagoas, afetam o pH e determinar quantitativamente qual o efeito destes processos sobre o pH e os parâmetros ligados: alcalinidade e acidez. Foi estabelecido que a variação do pH, da alcalinidade e da acidez em lagoas é afetada principalmente pela remoção de CO_2 e de NH_3 da fase líquida. A remoção de CO_2 diminui a acidez e não afeta a alcalinidade. A dessorção de NH_3 aumenta a acidez e diminui a alcalinidade. Tendo-se a variação da alcalinidade e da acidez é possível determinar a variação do pH a partir de reações químicas da água.

Através de uma investigação experimental, foi estabelecido que é possível prever as variações da alcalinidade, da acidez e do pH, quando se quantifica os processos da remoção de CO_2 e de amônia. Por outro lado, se houver possibilidade de se estimar a velocidade dos processos de dessorção de CO_2 e NH_3 e da produção de oxigênio mediante a fotossíntese, então é possível estimar o tempo necessário para que o pH se eleve até um determinado valor.

ABSTRACT

Waste stabilization ponds are known to be efficient in the removal of organic material and pathogens, but nutrient removal is much less efficient. However in practice nutrient removal can be important for example when the effluent from a pond system is to be discharged in a dam. In that case nutrient removal may be necessary to avoid eutrophication.

The removal mechanism of the macronutrients nitrogen and phosphorus is different: nitrogen is released as ammonium gas to the atmosphere, whereas phosphorus precipitates as ortho phosphate. Both ammonium release and phosphate precipitation can only occur at high pH, when the ammonium equilibrium shifts towards the unionized gas form, NH_3 , and the phosphorus equilibrium towards the ortho phosphate ion PO_4^{3-} .

In this study it is attempted to identify the processes that take place in ponds and affect pH and to determine quantitatively the effect of these processes on pH and linked parameters: alkalinity and acidity. It was established that the variation of pH alkalinity and acidity in ponds is affected mainly by the removal of CO_2 and NH_3 from the liquid phase. CO_2 removal takes place to both physical (desorption) and biological processes (photosynthesis). NH_3 removal is due to desorption results in increase of acidity and decrease of alkalinity. When both the variation of alkalinity and acidity are known the effect on pH can be calculated with the aid of concepts of water chemistry.

Through an experimental investigation it was established that it is possible to predict variations of alkalinity and acidity and hence of pH when the extent of CO_2 and NH_3 removal is known. On the other hand, if there is a possibility to estimate the rate of the processes of CO_2 and NH_3 desorption and of photosynthesis, it is possible to estimate the required time for a particular desired pH increase.

SUMÁRIO

<u>AGRADECIMENTOS</u>	iv
<u>LISTA DE FIGURAS</u>	v
<u>LISTA DE TABELAS</u>	vii
<u>RESUMO</u>	xi
<u>ABSTRACT</u>	xii
1 <u>INTRODUÇÃO E OBJETIVOS</u>	1
2 <u>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</u>	3
2.1 <u>NUTRIENTES NO ESGOTO DOMÉSTICO</u>	3
2.1.1 <u>Nitrogênio</u>	3
2.1.2 <u>Problemas causados pelos nutrientes: Eutrofização</u>	5
2.1.3 <u>Remoção de nutrientes</u>	6
2.2 <u>LAGOAS DE POLIMENTO</u>	7
2.2.1 <u>Reator UASB + Lagoa de polimento</u>	7
2.3 <u>SOLUBILIDADE DE GASES NA ÁGUA</u>	9
2.4 <u>SISTEMA CARBÔNICO</u>	9
2.5 <u>PROCESSOS QUE ALTERAM O SISTEMA CARBÔNICO EM LAGOAS DE POLIMENTO</u>	11
2.6 <u>- MECANISMO DE REMOÇÃO DO CO₂</u>	14
2.6.1 <u>Concentração do dióxido de carbono em água</u>	14

2.7	<u>MECANISMO DE REMOÇÃO DE NH₃ EM LAGOAS</u>	15
2.7.1	<u>Processo Fundamental</u>	16
3	<u>MATERIAL E MÉTODOS</u>	19
3.1	<u>O SISTEMA EXPERIMENTAL</u>	19
3.2	<u>EXPERIMENTOS</u>	20
3.2.1	<u>Experimento 1: Dessorção de dióxido de carbono (CO₂)</u>	21
3.2.2	<u>Experimento 2: Dessorção de amônia (NH₃)</u>	22
3.2.3	<u>Experimento 3: Lagoas de polimento em regime de batelada</u>	24
3.2.4	<u>Análises instrumentais</u>	26
4	<u>APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS</u>	28
4.1	<u>DESORÇÃO DO DIÓXIDO DE CARBONO</u>	28
4.2	<u>DESORÇÃO DA AMÔNIA</u>	32
4.3	<u>LAGOAS DE POLIMENTO EM REGIME DE BATELADA</u>	41
5	<u>DISCUSSÃO</u>	70
5.1	<u>SOBRE A CONSTANTE DE DESSORÇÃO DE CO₂ DAS LAGOAS DE POLIMENTO</u>	70
5.2	<u>SOBRE A CONSTANTE DE DESSORÇÃO DE NH₃ EM LAGOAS DE POLIMENTO</u>	73
5.3	<u>INTERPRETAÇÃO DOS DADOS</u>	75
5.3.1	<u>Estimativa da variação da alcalinidade, da acidez e do pH em lagoas de polimento</u>	75
5.3.2	<u>Uso do diagrama de Deffeyes</u>	76
6	<u>CONCLUSÕES</u>	80

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 82

1 INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

A remoção de nutrientes em lagoas de polimento que se destinam ao pós-tratamento de esgoto previamente digerido em reatores UASB, pode ser obtida se o pH na lagoa for elevado. Há, processos que afetam o pH, como: consumo de dióxido de carbono (biológico por fotossíntese ou físico por dessorção) e remoção de amônia por dessorção ou incorporação nas algas como nitrogênio orgânico. Estes processos afetam a alcalinidade e/ou acidez e por sua vez causam mudança no pH. Somente o processo de remoção de CO_2 (biológico e físico) que ocorrem simultaneamente, tende a aumentar o pH. A remoção física por dessorção se deve à supersaturação deste gás no líquido, até se estabelecer um equilíbrio entre a concentração na fase líquida e aquela no ar. Quanto à remoção de nitrogênio, se dar pela forma de amônia molecular livre (NH_3), que em pH alto se desprenderá na forma de gás da fase líquida, pela dessorção de amônia, o que por outro lado é equivalente à adição de um ácido forte (e por tanto tende a causar uma diminuição do pH).

A influência desses processos mencionados acima sobre equilíbrio iônico e pH podem ser estimados pelo diagrama de Deffeyes. O diagrama também pode ser usado (num caso de remoção de nutrientes) para calcular o tempo necessário em que essa remoção se dá, para qualquer mudança no valor do pH, desde que as influências desses fatores sejam conhecidas: taxa de produção de oxigênio fotossintética e características de esgoto digerido, principalmente concentração de amônia, alcalinidade e pH.

Para avaliar a influência da profundidade pretende-se usar lagoas em bateladas com três profundidades diferentes e medir a taxa de dessorção de amônia, em função das variáveis operacionais que influenciam na taxa de produção de oxigênio, pH e amônia total. A partir destes dados será possível sugerir um modelo que permite prever a taxa de dessorção e inclusive dar as dimensões principais (profundidade, tempo de permanência) para que ocorra remoção de nitrogênio com, ou então para que se evite o desenvolvimento do processo.

Objetivos deste trabalho:

Determinar o desenvolvimento de dois principais processos que afetam o pH em lagoas de polimento: (1) consumo de dióxido de carbono (biológico por fotossíntese e físico por dessorção) e (2) remoção de amônia por dessorção.

Objetivos Específicos

Através da medição desses processos em lagoas de bateladas poder-se-á determinar a variação teórica do pH, alcalinidade e acidez, em lagoas de polimento e estas variações podem então ser comparadas com os valores observados experimentalmente.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 NUTRIENTES NO ESGOTO DOMÉSTICO

Os nutrientes mais importantes encontrados no esgoto são: o nitrogênio e o fósforo. Estão presentes no esgoto bruto sob forma de compostos orgânicos e como íons minerais: o material nitrogenado se compõe principalmente de nitrogênio amoniacal (gasoso, NH_3 , e salino, NH_4^+) e nitrogênio orgânico (uréia, aminoácidos e outras substâncias orgânicas com o grupo amino) e formas de fosfato (HPO_4^{2-} e H_2PO_4^-). Ocasionalmente ocorrem traços de formas oxidadas do nitrogênio, nitrito (NO_2^-) e, principalmente, nitrato (NO_3^-). A concentração de nutrientes no esgoto varia consideravelmente segundo a origem do esgoto e, principalmente, dos hábitos sócio-econômicos da população contribuinte. Geralmente no caso de esgoto doméstico a concentração do TKN no afluente é de 40 a 60 mg N.L⁻¹. Dessa concentração total cerca de 75% é nitrogênio amoniacal e 25% é nitrogênio orgânico (van HAANDEL & MARAIS, 1999).

2.1.1 Nitrogênio

O nitrogênio é o gás mais abundante no ar atmosférico, representando 78%. Os compostos de nitrogênio são de suma importância para a Engenharia Ambiental no que diz respeito as suas formas tóxicas ou vitais ao corpo d'água.

O nitrogênio em ambientes aquáticos apresenta-se sob várias formas: nitrato (NO_3^-), nitrito (NO_2^-), íon amônio (NH_4^+), óxido nitroso (N_2O), nitrogênio molecular (N_2), nitrogênio orgânico dissolvido (peptídeos, purinas, aminas, aminoácidos, etc.) entre outros. Todavia, as formas de maior interesse estão resumidas em:

Formas de nitrogênio	$\text{NH}_3 - \text{N}_2 - \text{NO}_2^- - \text{NO}_3^-$
Número de oxidação	-III 0 III V

Dentre suas várias formas e mudanças que ocorrem os compostos de nitrogênio na natureza ficam melhor ilustrados por um diagrama conhecido como ciclo do nitrogênio (ver Figura 2.1).

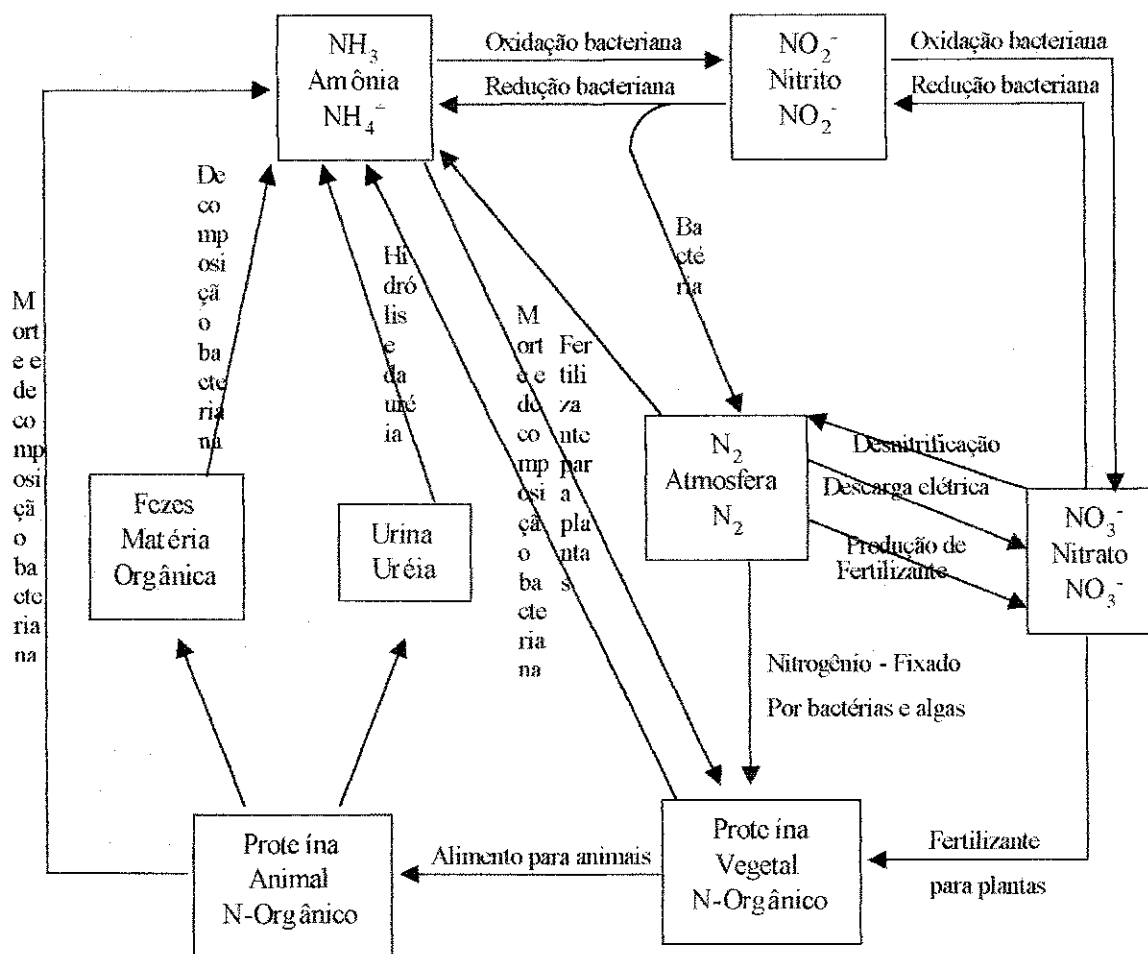


Figura 2.1 – Ciclo do Nitrogênio (Metcalf & Eddy)

A fixação do nitrogênio pode ser feita por processos físicos (ação de relâmpagos ou por processos industriais de produção de fertilizantes), mas ocorre, principalmente, por meio biológico, representando 90% da que se realiza no planeta (MOTA, 1997).

Distribuição entre as formas de amônia em meio aquático:

pH menor que 8,0 (praticamente toda amônia na forma de NH_4^+);

pH igual a 9,5 (aproximadamente 50% NH_3 gasosa e 50% NH_4^+ salino);

pH maior que 11 (praticamente toda amônia na forma de NH_3).

A amônia pode sofrer transformações posteriores: processo de nitrificação (a amônia é oxidada a nitrito e este a nitrato) e processo de desnitrificação (os nitratos são reduzidos a nitrogênio gasoso).

Amonificação

É a formação do nitrogênio amoniacal durante o processo de decomposição da matéria orgânica dissolvida e particulada. A amônia formada é resultante da decomposição tanto aeróbia como anaeróbia nitrogenada da matéria orgânica por organismos heterotróficos.

No meio aquático, especialmente em valores de pH ácido e neutro, a amônia formada é instável, sendo convertida por hidratação a íon amônio ($\text{NH}_3 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{NH}_4^+ + \text{OH}^-$). Já em meio alcalino, a possibilidade de ocorrência deste processo é muito reduzida e a parte da amônia formada pode difundir-se para a atmosfera. A amonificação é a principal fonte deste composto para a ambiente aquático.

Nitrificação

A oxidação biológica destes compostos (amônia) a nitrato denomina-se nitrificação, que na realidade é caracterizada pela utilização de compostos inorgânicos reduzidos, amônio como doadores de hidrogênio. A nitrificação é processo predominantemente aeróbio e, como tal, ocorre somente nas regiões onde há oxigênio disponível.

Fósforo

Este elemento é o décimo primeiro dos mais abundantes na natureza e encontrado com maior frequência na forma de fosfatos como $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$. As formas usuais de fósforo encontradas em águas incluem o ortofosfato (trisódio fosfato ($\text{Na}_3 \text{PO}_4$), dissódio fosfato (Na_2HPO_4), monossódio fosfato (NaH_2PO_4), polifosfato (sódio hexametáfosfato ($\text{Na}_3(\text{PO}_3)_6$), sódio tripolifosfato ($\text{Na}_5\text{P}_3\text{O}_{10}$) e fosfato organicamente combinado. Os fosfatos presentes em águas residuárias representam a maioria e o fósforo orgânico compõe parte do material celular das algas e outros organismos biológicos. Em esgotos domésticos, por exemplo, pode conter de 4 a 15 mg P/L de fósforo (METECALF & EDDY, 1991).

2.1.2 Problemas causados pelos nutrientes: Eutrofização

A eutrofização é causada pelo aumento da concentração de nutrientes, tendo como principal fator de estímulo o nível excessivo de nitrogênio (N) e fósforo (P), que presentes nos corpos aquáticos, podem vir a ocasionar a sua extinção. Existem dois tipos de eutrofização: natural e artificial. O primeiro tipo é um processo lento e contínuo que resulta do aporte de

nutrientes trazidos pelas chuvas e pelas águas superficiais à superfície terrestre. O segundo pode ser um processo mais agressivo que leva rapidamente a modificações qualitativas e quantitativas às comunidades aquáticas e principalmente as condições físicas e químicas do meio. Os principais nutrientes N e P podem ter diferentes origens e/ou fontes, tais como: efluentes domésticos, efluentes industriais e/ou atividades agrícolas, entre outras (ESTEVEZ, 1988).

O tratamento de águas residuárias visa não só a remoção de matéria orgânica e dos sólidos em suspensão, mas, também, de nutrientes, podendo reduzir o teor de N e P (principais nutrientes para eutrofização) diminuindo o impacto ao corpo d'água receptor destas águas residuárias.

2.1.3 Remoção de nutrientes

O principal papel do pós-tratamento de águas residuárias é o de completar a remoção da matéria orgânica, bem como o de proporcionar a remoção de constituintes pouco afetados no tratamento anaeróbio (nutrientes e patogênicos).

Sendo assim, torna-se importante a necessidade de inclusão de uma etapa de pós-tratamento para o polimento não só da qualidade microbiológica dos efluentes, mas também no que diz respeito à concentração de nutrientes, em particular o nitrogênio e o fósforo. Dentre as principais alternativas pesquisadas para a remoção de nutrientes, de sistemas aeróbios e anaeróbios encontram-se: sistemas de lodos ativados – variante UCT (que utilizam como mecanismo de remoção biológica de nitrogênio os processos seqüenciais de nitrificação e desnitrificação. O primeiro processo é a oxidação biológica de amônia para nitrato, enquanto que o segundo processo é a redução biológica de nitrato a nitrogênio molecular, usando-se material orgânico como redutor) e lagoas de polimento que podem cumprir bem o papel de remoção de nutrientes, possibilitando a dessorção da amônia para a atmosfera e precipitação de fosfatos em um alto valor de pH, adquirido pelas condições favoráveis do consumo biológico de CO₂ (predominância da fotossíntese sobre os processos de degradação do material orgânico) para se elevar o pH das lagoas.

2.2 LAGOAS DE POLIMENTO

As lagoas de polimento se destinam ao pós-tratamento de esgoto previamente tratado de outras lagoas ou de outros sistemas de tratamento como, por exemplo, de reatores UASB, sistema de lodos ativados ou de filtros biológicos. A sua principal função é a redução de organismos patogênicos para atingir os padrões exigidos pela legislação vigente (VON SPERLING, 1996). No Brasil existe a resolução CONAMA em busca dos níveis de qualidade de seus mananciais através de regulamentação de parâmetros e indicadores específicos.

As lagoas de polimento também podem ser utilizadas para remoção de nutrientes, o que, só se materializa quando o pH adquire um valor elevado. Neste caso, com a elevação do pH prevalecerá à forma não dissociada de NH_3 que, por ser um composto volátil, pode ser removido fisicamente através da dessorção da fase líquida da lagoa. Essa dessorção pode ser acelerada através do desprendimento de bolhas de oxigênio da fase líquida supersaturada com OD (van HAANDEL & LETTINGA, 1994). Já o fósforo pode ser precipitado como fosfato; dependendo é claro, das condições operacionais e ambientais, pode se transformar em compostos como hidroxiapatita $\text{Ca}_5(\text{OH})(\text{PO}_4)_3$ ou estruvita $\text{Mg}(\text{NH}_4)\text{PO}_4$ (CHERNICHARO, 2001). O efluente das lagoas de polimento apresentam as seguintes características ver Tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Características do efluente da lagoa de polimento.

Parâmetro	Unidade	Efluente da lagoa de polimento
DQO	mg/L	60 a 120
DBO ₅	mg/L	30 a 50
SST	mg/L	40 a 80
NTK	mg/L	10 a 40
P	mg/L	5 a 8
Coliformes fecais	CF/100 mL	10^2 a 10^4
Ovos de helmintos	Nº/L	≈0
pH		7,5 a 9,0
Sólidos sedimentáveis	mL/L	≈0,1

2.2.1 Reator UASB + Lagoa de polimento

A utilização dessas lagoas como unidades finais do sistema de tratamento, visa dar polimento a qualquer tipo de efluente seja em termos de remoção de patogênicos e de nutrientes, ou mesmo para um polimento em termos de DQO (CHERNICHARO, 1997).

O uso da combinação do reator UASB seguido de lagoa de polimento tem também como vantagem a redução da área necessária, em comparação com os sistemas de lagoas de estabilização que necessitam de áreas muito grandes, cerca de 3 m²/hab. Além disso a remoção de nutrientes para o caso de lagoas de estabilização se torna mais difícil, pois a presença de uma concentração elevada de material orgânico inevitavelmente levará à geração de CO₂, o que, por sua vez, limita a possibilidade de aumento expressivo do pH na lagoa (CHERNICHARO, 2001).

Uma particularidade de fundamental importância da lagoa de polimento, relacionada indiretamente ao tratamento anaeróbio antes do lançamento do esgoto na lagoa, é a possibilidade de se manipular o pH. Contrário, à estabilização do material orgânico pelas bactérias, a fotossíntese consome CO₂ e, dessa forma, leva a um aumento de pH. Devido ao pré-tratamento no reator UASB, ter-se-á, no afluente da lagoa de polimento, uma concentração baixa de material orgânico e, portanto, a geração de CO₂ na lagoa de polimento será reduzida. Somando a isto, nas lagoas de polimento haverá uma maior atividade fotossintetizante e, conseqüentemente, um maior consumo de CO₂, uma vez que o afluente, pré-tratado num reator UASB, geralmente apresenta uma baixa turbidez, facilitando a penetração da luz solar na coluna líquida. Assim sendo, pode haver uma redução importante da concentração de CO₂, resultando num aumento substancial do pH (CHERNICHARO, 2001).

“Assim, quando o pH sobe, o íon amônio (NH₄⁺) tende a se transformar em amônia molecular livre (NH₃), que se desprenderá na forma de gás da fase líquida, pela dessorção de amônia. Do mesmo modo também a um pH elevado ocorrerá uma mudança do equilíbrio das espécies de fosfatos levando a uma maior concentração do íon PO₄³⁻ o que, por sua vez, pode resultar na precipitação de sais como fosfato de cálcio (Ca₃(PO₄)₂)”.

Nem sempre é conveniente remover nutrientes do esgoto. Sua remoção só tem vantagem quando o efluente é lançado em águas de superfície. Neste caso, particularmente, é importante reduzir ao máximo o teor de nutrientes, para evitar o crescimento exacerbado de algas, que pode prejudicar a qualidade da água, devido ao já citado processo eutrofização. No caso de se usar o efluente para irrigação, acontece o contrário. Há um interesse de se conservar os nutrientes, uma vez que estes poderão substituir os nutrientes de fertilizantes químicos.

2.3 SOLUBILIDADE DE GASES NA ÁGUA

A solubilidade dos gases que não reagem quimicamente com água – tais como o oxigênio, o metano e o nitrogênio – é regida pela lei de Henry, na qual a concentração de saturação ou de equilíbrio é diretamente proporcional à pressão parcial do gás na atmosfera em contato com o líquido. A lei de Henry se exprime da seguinte forma:

$$C_s = K \cdot p \quad (2.1)$$

onde:

C_s representa a concentração de saturação do gás no líquido (em miligramas por litro);

p a pressão parcial do gás na atmosfera em contato com a água (em atmosfera) e,

K um coeficiente de proporcionalidade, denominado coeficiente de absorção ou de solubilidade.

O valor de K , para um determinado gás, depende de sua natureza, do líquido e da temperatura; decresce quando se eleva a temperatura ou quando aumenta a salinidade da água.

A altitude exerce uma influência na solubilidade de um gás, por ser inversamente proporcional à pressão atmosférica. Quanto maior a altitude, menor a pressão atmosférica, e menor a pressão para que o gás se dissolva na água.

A lei de Henry também é válida, com aproximação satisfatória, aos gases que reagem com a água em pequena proporção, tais como o dióxido de carbono (CO_2).

Quando a concentração de um gás na água C_1 é diferente da concentração de saturação C_s haverá transferência do gás no líquido para a atmosfera se $C_1 > C_s$ ou da atmosfera para a água $C_s > C_1$ até que o equilíbrio seja estabelecido: $C_1 = C_s = K \cdot p$.

Quando as condições iniciais são de supersaturação, tem-se $C_0 > C_s$ e verifica-se liberação de gás que pode ser considerada uma absorção negativa.

2.4 SISTEMA CARBÔNICO

Segundo Van Haandel e Lettinga (1994), o valor do pH e sua estabilidade em sistemas de tratamento de esgoto são quase completamente determinadas pelo sistema carbônico. O sistema carbônico é definido pela concentração (atividade) de cinco espécies: CO_2 , H_2CO_3 , representando este cerca de 0,3%, HCO_3^- , CO_3^{2-} , OH^- e H^+ e é formado a partir da solubilização do CO_2 na água, segundo as seguintes Equações:



$$K1 = [HCO_3^-][H^+]/[CO_2] \quad (2.2c)$$



$$K2 = [CO_3^{2-}][H^+]/[HCO_3^-] \quad (2.3b)$$



$$Kw = [H^+][OH^-] \quad (2.4b)$$

Como são cinco os parâmetros que definem o sistema carbônico, necessita-se de 5 equações independentes para obter os valores de cada um desses parâmetros. As Equações (2.2c), (2.3b) e (2.4b) mais a determinação do pH e da alcalinidade (ou acidez) permitem definir todo o sistema carbônico.

O sistema carbônico também pode ser definido pela determinação da concentração total de carbono ($CT = [CO_2] + [HCO_3^-] + [CO_3^{2-}]$) e as Equações 2.2 a 2.4.

Devido à facilidade de equipamentos e precisão se usa mais a determinação da alcalinidade como a quinta expressão independente do sistema carbônico.

A alcalinidade bem como a acidez podem ser definidas a partir das seguintes equações estequiométricas, (LOEWENTHAL e MARAIS)1986:

$$Alcalinidade : Alc = 2[CO_3^{2-}] + [HCO_3^-] + [OH^-] - [H^+] \quad (2.5)$$

$$Acidez : Ac = 2[CO_2] + [HCO_3^-] - [OH^-] + [H^+] \quad (2.6)$$

As Equações que definem a alcalinidade e a acidez (Equações 2.5 e 2.6) permitem que uma relação desses parâmetros com o pH. Eliminando as espécies carbônicas (usando as Equações 2.2c e 2.3b) e os hidróxidos (com a Equação 2.4b), e substituindo-se o valor do pH tem-se:

$$Ac = (Alc + [H^+] - [OH^-]) \frac{(1 + 2[H^+]/K1)}{(1 + 2K2/[H^+])} + [H^+] - [OH^-] \quad (2.7a)$$

com:

$$[H^+] = 10^{-pH}$$

$$[OH^-] = 10^{pH-pK_w}$$

$$Ac = [Alc + 10^{(-pH)} - 10^{(pH-pK_w)}] \frac{1 + 2 \cdot 10^{(pK_1 - pH)}}{1 + 2 \cdot 10^{(pH - pK_2)}} + 10^{(-pH)} - 10^{(pH - pK_w)} \quad (2.7b)$$

Rearrmando a Equação 2.5 e eliminando as concentrações de carbonato, bicarbonato e hidróxido com o auxílio das equações (2.2c), (2.3b) e (2.4b), temos agora:

$$Alc = [CO_2]K_1/[H^+](1 + 2K_2/[H^+]) + K_w/[H^+] - [H^+] \quad (2.8a)$$

$$Alc = [CO_2] \cdot 10^{(pH - pK_1)}(1 + 2 \cdot 10^{(pH - pK_2)}) + 10^{(pH - pK_w)} - 10^{(-pH)} \quad (2.8b)$$

As Equações (2.7a e 2.7b) mostram que há uma relação linear entre alcalinidade e acidez para qualquer valor específico do pH. A Figura 2.1 denominada de diagrama de Deffeyes mostra essa relação graficamente para valores diferentes do pH. O diagrama de Deffeyes ((Deffeyes, 1956) primeiro cientista que mostrou a relação entre alcalinidade, acidez e pH), é muito útil, para descrever as variações da alcalinidade, do pH e, da acidez em sistemas na qual predomina o sistema carbônico.

2.5 PROCESSOS QUE ALTERAM O SISTEMA CARBÔNICO EM LAGOAS DE POLIMENTO

Em lagoas de tratamento de águas residuárias se desenvolvem vários processos que afetam a alcalinidade e/ou a acidez e o pH, sendo os mais importantes:

- (1) produção biológica de CO₂ devido à estabilização da matéria orgânica: aumenta a acidez sem alterar a alcalinidade;
- (2) remoção biológica de CO₂, através da fotossíntese e dessorção de CO₂ para a atmosfera: diminui a acidez sem alterar a alcalinidade;
- (3) precipitação de CaCO₃, diminui a alcalinidade sem alterar a acidez;

- (4) dessorção de NH_3 , que é equivalente à adição de um ácido forte: diminui a alcalinidade, aumentando proporcionalmente a acidez.

Em lagoas de polimento de efluentes digeridos anaerobiamente, diferentes de lagoas de estabilização de matéria orgânica, a taxa de produção fotossintetizante se sobrepõe à de oxidação de material orgânico (CAVALCANTI, 2000). Portanto o processo de oxidação biológica com a conseqüente produção de CO_2 , não seria considerado significativo na variação do pH.

A Tabela 2.2 resume o efeito sobre a alcalinidade e a acidez e conseqüentemente sobre o pH dos principais processos que alteram o sistema carbônico em lagoas de polimento.

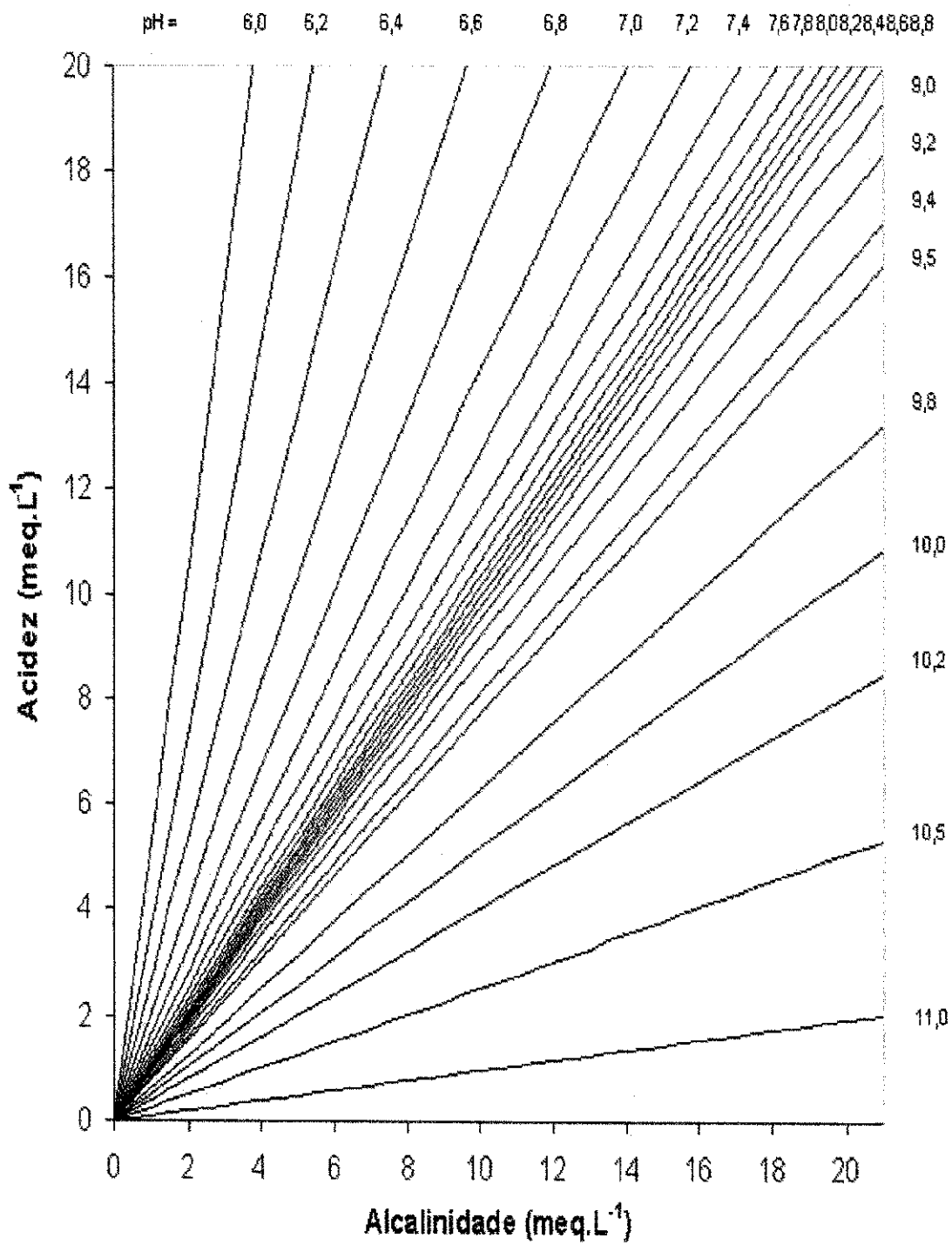


Figura 2.1 – Diagrama de Deffeyes

Tabela 2.2– Efeito de diferentes processos sobre a alcalinidade, acidez e o pH em lagoas de polimento (segundo CAVALCANTI, 2001).

Processos	Δ Alcalinidade (meq/mmol)	Δ Acidez (meq/mmol)	Δ pH
Remoção de CO ₂	0	-2	Aumenta
Remoção de NH ₃	-1	+1	Diminui
Precipitação de CaCO ₃	-2	0	Diminui

2.6 - MECANISMO DE REMOÇÃO DO CO₂

2.6.1 Concentração do dióxido de carbono em água

O dióxido de carbono é sempre encontrado nas águas naturais. Ele provém, em primeiro lugar, do ar atmosférico, onde se encontra numa proporção de 0,03 %, aproximadamente. De acordo com a lei de Henry, sendo esta a sua pressão parcial no ar, coeficiente de solubilidade 1495 (mg/L.atm), a concentração de equilíbrio na água, a 25°C, 1 atm, $C_s = 1495 \times 0,0003 = 0,45$ mg/L.

Na superfície de lagoas de polimento podem ser verificadas condições de subsaturação, em virtude da utilização do gás (CO₂) pelas algas, no processo da fotossíntese.

Embora o dióxido de carbono reaja ligeiramente com a água (na proporção de aproximadamente 1%), considera-se que a solubilidade deste gás acompanhe sensivelmente a lei de Henry (LIMA, 1996).

Ambos os mecanismos de remoção de CO₂ (biológico e físico) ocorrem simultaneamente. A remoção física por dessorção se deve à supersaturação deste gás no esgoto digerido. No sistema de tratamento anaeróbio a concentração de CO₂ na fase líquida está em equilíbrio com aquela no biogás (com pressão parcial de 10 a 15%). No entanto, na lagoa, em contato com o ar, sob uma pressão parcial de CO₂ muito menor (0,03%), o líquido passa a ser supersaturado, ocorrendo a dessorção do CO₂, até se estabelecer um equilíbrio entre a concentração na fase líquida e aquela no ar. A concentração de equilíbrio pode ser

avaliada pela equação de Henry, já citada, expressa agora em função de CO_2 (van HAANDEL & LETTINGA, 1994):

$$[CO_2]_s = k_H \cdot P_{CO_2} \quad (2.9)$$

Na qual:

k_H é a constante de Henry = 0,034 a 25°C

$pk_H = 0,0138T + 1,12$ (CAPRI e MARAIS, 1974) (T em °C)

P_{CO_2} é a pressão parcial de CO_2 no ar = 31 P (ou 0,031% da pressão atmosférica)

$[CO_2]_s$ é a concentração molar de saturação de CO_2 dissolvido em água em equilíbrio com ar.

A taxa de dessorção de CO_2 pode ser expressa pela Equação de Chick:

$$Rd\ CO_2 = K_{CO_2} ([CO_2]_s - [CO_2]_{liq}) \quad (2.10)$$

onde:

Rd CO_2 : taxa de dessorção de CO_2

K_{CO_2} : constante de CO_2

$[CO_2]_{liq}$: concentração de CO_2 na fase líquida

$[CO_2]_s$: concentração de saturação de CO_2

A Equação (2.10) diz que a taxa de dessorção é proporcional à diferença que existe entre a concentração realmente existente na fase líquida e a concentração de saturação.

2.7 MECANISMO DE REMOÇÃO DE NH_3 EM LAGOAS

Segundo ARCEIVALA, 1981; SOARES *et al.*, 1995 citado por VON SPERLING, (1996) os principais mecanismos de remoção de nitrogênio em lagoas são:

- ✓ Volatilização da amônia (pH > 8,0);
- ✓ Assimilação da amônia e nitrato pela biomassa de algas;
- ✓ Nitrificação e desnitrificação biológica.

O mais importante dentre esses mecanismos é a dessorção (volatilização) da amônia. Os demais mecanismos de remoção de nitrogênio atuam simultaneamente, mas são considerados de menor importância.

2.7.1 Processo Fundamental

Em ambientes aquáticos, existe um equilíbrio entre a amônia livre (NH_3) e o íon amônio (NH_4^+) dependente do pH como mostra a equação:



A Figura 2.1 mostra que para valores de $\text{pH} < 7,3$, a forma de amônia NH_3 é pequena predominado na solução os íons amônio (NH_4^+). Em $\text{pH} 12$, a amônia (NH_3) existe dissolvida na solução como gás. No intervalo de $\text{pH} 7$ a 12 , o íon amônio e a amônia coexistem em percentagem proporcional, em função do pH. Com um valor de pH acima de 7 , o equilíbrio mostrado na Equação (2.11) é deslocado para esquerda em favor da forma da amônia gasosa, possibilitando-se assim, a sua volatilização para a atmosfera (WPCF, 1983).

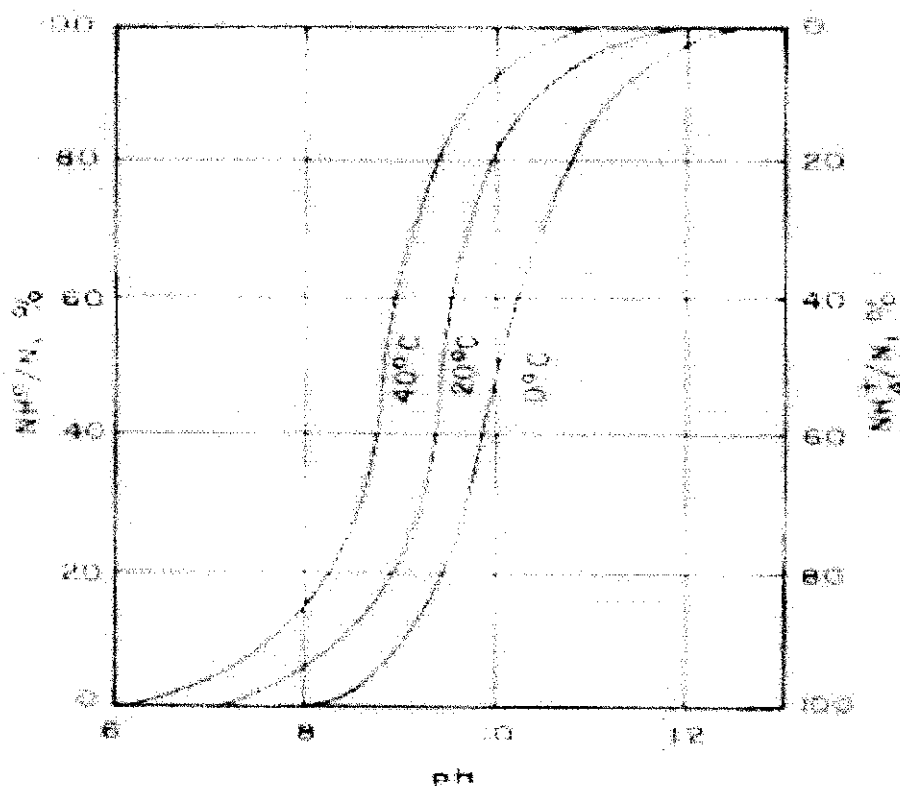


Figura 2.1 – Distribuição da amônia e íon amônio com o pH e temperatura (WPCF, 1983).

Em efluentes de digestores anaeróbios o nitrogênio predomina na forma amoniacal como gás amônia ($NH_3(aq)$), íon amônio (NH_4^+) e hidróxido de amônio (NH_4OH). A quantidade de NH_4OH é muito pequena e a relação entre $NH_3(aq)$ e o íon amônio NH_4^+ pode ser expressa como:



$$Ka = [NH_4^+]/[NH_3(aq)][H^+] \quad (2.12b)$$

Onde K_a = constante de dissociação da amônia

A amônia total contém tanto a forma de amônia gasosa (NH_3)gás como a forma salina NH_4^+ . A concentração da amônia gasosa pode ser expressa como uma função do valor do pH, pKa e da concentração de amônia total ($NH_4^+ + NH_3$) como segue:

$$C = ([NH_4^+] + [NH_3gás]) \quad (2.13)$$

$$NH_3gás = \frac{C}{1 + 10^{(pKa - pH)}} \quad (2.14)$$

A Equação 2.12a mostra que a remoção de amônia é equivalente à adição de um ácido forte, isto é, por mol de NH_3 dissolvido, há uma diminuição de 1 meq de alcalinidade e um aumento de 1 meq de acidez. Segundo a Lei de Fick, a taxa de dessorção é proporcional à concentração de amônia não ionizada, que pode ser calculada com auxílio do valor de dissociação. Segundo EMERSON *et al.* (1975) a constante de ionização pKa , quando a temperatura T está em grau Kelvin, é dada pela equação 2.15:

$$pKa = 0,09018 + 2729,92/T \quad (2.15)$$

Assim, para uma temperatura de 25°C (298°K) e uma concentração de sólidos fixos de 1 g/L (isto é, um coeficiente de atividade de 0,9 aproximadamente), a constante de dissociação é $pKa = 9,1$. Portanto, para valores de pH maiores que 9,1, predomina a forma não ionizada NH_3 (Equação 2.12a). Em contraste, para valores de pH próximo do neutro, a fração de amônia não dissociada é pequena (1% para pH = 7,1).

A mudança da alcalinidade e acidez atribuída à remoção de CO_2 e NH_3 pode expressa como (CAVALCANTI, 2001):

$$\Delta Alc = -\Delta N / 14 - 2\Delta Ca / 100 \quad (2.16a)$$

$$Alc = Alc_i - RdN \cdot \Delta t \quad (2.16b)$$

A precipitação de CaCO_3 só ocorre de forma significativa para valores de $\text{pH} > 10$. Como na prática esses valores de pH dificilmente ocorrem, a Equação 2.16a fica simplificada para $\Delta \text{Alc} = -\Delta \text{N}/14$.

$$\Delta \text{Ac} = -2\Delta \text{CO}_2 \text{dess} - 2\Delta \text{OD}/32 + \Delta \text{N}/14 \quad (2.17a)$$

$$\text{Ac} = \text{Ac}_i + (\text{Rd } \Delta \text{N} - 2\text{Rfoto} - 2\text{Rd } \text{CO}_2) \cdot \Delta t \quad (2.17b)$$

onde:

ΔAlc : variação da alcalinidade na lagoa (meq/L)

ΔAc : variação da acidez na lagoa (meq/L)

ΔN : variação observada na concentração de amônia na lagoa (mg/L)

ΔCa : variação da concentração de cálcio (mg/L)

$\text{Rd } \Delta \text{N}$: taxa de dessorção de amônia (meq/L/d)

Rfoto : taxa de consumo fotossintético (mmol/L/d)

$\text{Rd } \text{CO}_2$: taxa de dessorção de CO_2 (mmol/L/d)

$\Delta \text{CO}_2 \text{dess}$: magnitude de dessorção de dióxido de carbono (mmol/L)

ΔOD : produção líquida de OD na lagoa (fotossíntese – respiração) (mg/L).

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 O SISTEMA EXPERIMENTAL

O trabalho experimental consistiu na determinação da taxa com que ocorriam os processos que alteram o valor de pH em lagoas: consumo fotossintético e dessorção de CO₂ e dessorção de amônia. Para a realização do trabalho experimental foram utilizadas nove lagoas de polimento dispostas em campo sob as condições ambientais existentes instaladas a céu aberto. As lagoas eram baldes de plástico, em número de 6, e tonéis de concreto, em número de 3. Três conjuntos de lagoas foram formados: o primeiro conjunto formado pelas lagoas LP-1, LP-4 e LP-7, com 0,40, 0,60 e 0,80 m de profundidade; no segundo as lagoas LP-2, LP-5 e LP-8 tinham 0,40, 0,60 e 0,80 m e finalmente as lagoas LP-3, LP-6 e LP-9 formavam o terceiro conjunto com 0,40, 0,60 e 0,80 m de profundidade. As dimensões das lagoas estão apresentadas na Tabela 3.1 e a Figura 3.1 representa um esquema destas.

Tabela 3.1 – Características físicas das lagoas de polimento.

Conjunto	Lagoas de Polimento	Profundidade (m)	Área (m ²)	Volume (m ³)
1	LP-1	0,40	0,0875	0,035
	LP-4	0,60	0,1700	0,100
	LP-7	0,80	0,2000	0,160
2	LP-2	0,40	0,0875	0,035
	LP-5	0,60	0,1700	0,100
	LP-8	0,80	0,2000	0,160
3	LP-3	0,40	0,0875	0,035
	LP-6	0,60	0,1700	0,100
	LP-9	0,80	0,2000	0,160

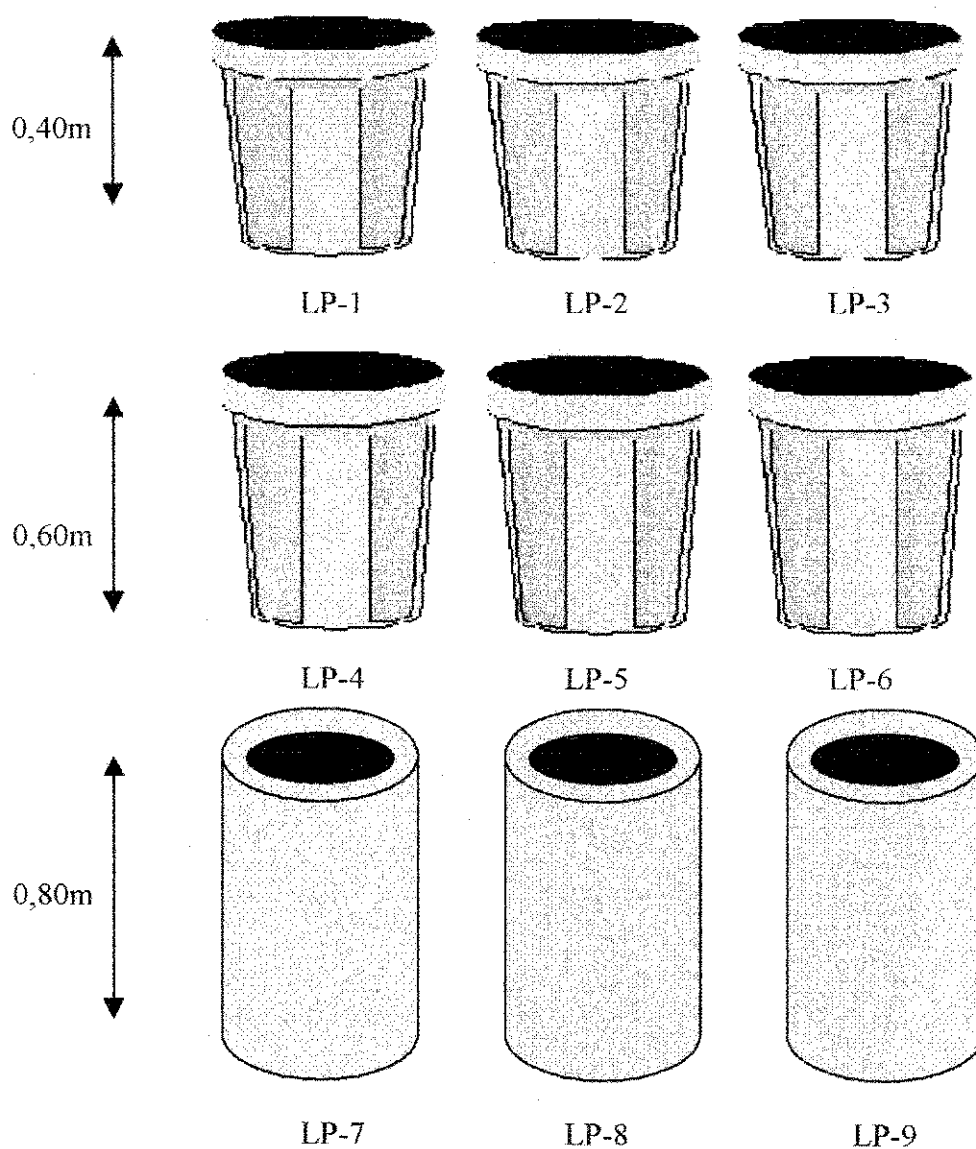


Figura 3.1 – Representação esquemática das lagoas de polimento utilizadas nos experimentos.

3.2 EXPERIMENTOS

O trabalho experimental pode ser dividido em três etapas ou experimentos relacionados com diferentes processos:

Experimento 1: dessorção de gás carbônico, CO_2 ;

Experimento 2: dessorção de amônia (NH_3);

Experimento 3: processos simultâneos de dessorção de CO_2 e NH_3 e consumo de CO_2 por fotossíntese (em lagoas de polimento em regime de batelada).

3.2.1 Experimento 1: Dessorção de dióxido de carbono (CO_2).

Os processos de dessorção e consumo por fotossíntese não podem ser dissociados em lagoas tratando esgoto. Desta forma, para determinar a taxa de dessorção de CO_2 sem interferência de outros processos que ocorrem em lagoas tratando esgoto foi utilizada água de torneira com diferentes valores de pH e alcalinidade. Três conjuntos de baldes (ou lagoas de polimento) de diferentes alturas foram utilizados no experimento. Para obter os valores de pH e alcalinidade que constam na Tabela 3., aos 3 conjuntos de lagoas de polimento, contendo água de torneira, foram adicionadas dosagens de 5 mmol/m^3 de bicarbonato de sódio. Em cada conjunto de lagoas, o pH de cada uma das 3 lagoas foi ajustado para valores aproximados de 6,0, 6,5 e 7,0 com uma solução 10N de ácido clorídrico. Assim, para cada conjunto de lagoa, foram criados três diferentes valores de concentração de CO_2 , podendo assim ser observado não só a influência da profundidade da lagoa na taxa de dessorção, mas, também, a influência da concentração inicial de CO_2 .

Tabela 3.2– Características operacionais iniciais do Experimento 1.

Conjunto	Lagoas de Polimento	pH	Alcalinidade (meq.L ⁻¹)	CO ₂ (mmol.L ⁻¹)
1	LP-1	6,0	3,6	7,69
	LP-4	6,0	3,6	7,69
	LP-7	6,0	3,6	7,69
2	LP-2	6,5	6,0	4,05
	LP-5	6,5	6,0	4,05
	LP-8	6,5	6,0	4,05
3	LP-3	7,0	7,4	1,58
	LP-6	7,0	7,4	1,58
	LP-9	7,0	7,4	1,58

O experimento foi iniciado em 19 de abril de 2001 e finalizado em 02 de maio do mesmo ano quando a concentração de CO_2 , em todos os baldes, atingiu valores próximos ao seu valor de saturação de 0,01 mmol/L. No início do experimento e, depois, diariamente foram determinados, em todos os baldes, o pH e a alcalinidade, sendo a concentração de CO_2 determinada a partir destes dados e com auxílio da Equação 2.8b.

3.2.2 Experimento 2: Dessorção de amônia (NH_3).

O experimento para determinar a taxa de dessorção de amônia também foi realizado nas lagoas e utilizando água de torneira. A fim de ter uma concentração de amônia próxima àquela encontrada em esgoto doméstico, qual seja em torno de 50 mgN/L, foram adicionados num tanque de 1000 litros $((78/14)*50) = 278,6$ g de bicarbonato de amônio (NH_4HCO_3). Esta solução foi usada para encher os nove baldes. Como era previsto que na dessorção de amônia iria se perder alcalinidade nos baldes, foram criados três conjuntos, sendo que em cada conjunto havia três baldes, um com profundidade de 0,40 m, outro com 0,60 m e o terceiro com 0,80 m. Aos baldes do segundo e do terceiro conjunto foi adicionado respectivamente 2 e 5 meq/L de bicarbonato de sódio para aumentar a alcalinidade e, assim, a resistência contra uma diminuição do pH ao haver dessorção de amônia. Depois de preparar os três conjuntos de baldes o pH inicial em todos foi elevado com auxílio de uma solução concentrada de soda cáustica para um valor de pH = 10,0. A alcalinidade variou de um conjunto para outro em 50% aproximadamente. A Tabela 3.3 mostra os valores iniciais do pH e das concentrações de amônia e alcalinidade das lagoas que formavam os 3 conjuntos.

A intenção do procedimento era criar três níveis de alcalinidade: no primeiro conjunto (sem adição de alcalinidade extra na forma de bicarbonato de sódio) a alcalinidade e o pH seriam reduzidos rapidamente e, então, a dessorção de amônia praticamente pararia. No segundo conjunto com adição de pouca alcalinidade a dessorção seria suficiente para diminuir a alcalinidade sensivelmente de modo que o pH diminuiria, sem contudo, inviabilizar a dessorção. No terceiro conjunto haveria alcalinidade suficiente para manter um pH elevado durante todo o processo de dessorção.

Tabela 3.3 – Características operacionais iniciais do experimento 2 (abril de 2001).

Conjunto	Lagoas de Polimento	pH	Alcalinidade Total (meq.L ⁻¹)	Amônia Total (mgN.L ⁻¹)
1	LP-1	10,0	7,8	35,8
	LP-4	10,0	7,4	35,8
	LP-7	10,0	7,8	35,8
2	LP-2	10,0	12,7	35,8
	LP-5	10,0	13,1	35,8
	LP-8	10,0	11,9	35,8
3	LP-3	10,0	20,7	35,8
	LP-6	10,0	19,9	35,8
	LP-9	10,0	20,2	35,8

Tabela 3.4 – Características operacionais iniciais do experimento 2 (agosto de 2001).

Conjunto	Lagoas de Polimento	pH	Alcalinidade Total (meq.L ⁻¹)	Amônia Total (mgN.L ⁻¹)
1	LP-1	10,0	6,8	70,0
	LP-4	10,0	6,8	70,0
	LP-7	10,0	6,8	70,0
2	LP-2	10,0	10,7	70,0
	LP-5	10,0	10,7	70,0
	LP-8	10,0	10,7	70,0
3	LP-3	10,0	16,3	70,0
	LP-6	10,0	16,3	70,0
	LP-9	10,0	16,3	70,0

O experimento teve início em 03.05.2001. O final do experimento foi determinado quando a variação na concentração de amônia já não era significativa (entre 1 e 3 mgN/L). Durante o experimento foram determinados os valores de pH, alcalinidade e da concentração de amônia total de amostras coletadas diariamente.

Um segundo experimento de dessorção foi realizado desta vez com valores menores da alcalinidade. Em vez de usar NH₄HCO₃ aplicou-se NH₄Cl e reduziu-se a adição de NaHCO₃. A concentração inicial de amônia foi aumentada para 70 mg/L, para se ter um efeito mais claro da dessorção. A Tabela 3.4 mostra a condição inicial dos diferentes baldes.

3.2.3 Experimento 3: Lagoas de polimento em regime de batelada.

Foram realizados testes com uma mistura de 90% do esgoto digerido de um reator UASB que tratava esgoto doméstico e 10% do efluente de uma lagoa de pós-tratamento deste efluente, operando com um tempo de detenção hidráulica de 15 dias. O reator, em escala piloto, operava com um tempo de retenção hidráulica de 5 horas e produzia um efluente com baixa turbidez (em torno de 30 UNT) e baixa concentração de matéria orgânica (em média DBO_5 de 60 mg/L e DQO de 150 mg/L). O consumo de CO_2 era medido indiretamente através da produção acumulada de OD. Oportunamente, a dessorção de CO_2 também pode ser medida, após serem tomadas certas providências em seguida descritas.

(1) Os testes podem ser divididos em dois conjuntos: no primeiro reduziu-se artificialmente a atividade fotossintética das algas, onde a parte externa e as tampas dessas lagoas foram envolvidas com um plástico preto, a fim de reduzir a passagem da luz solar para o interior das lagoas. Para garantir uma concentração de OD aproximada em 4 mg/L nas lagoas, estas foram tampadas e destampadas quando necessário durante parte do dia de tal modo que não havia acumulação expressiva de oxigênio, embora houvesse produção suficiente para também não se estabelecer um ambiente anaeróbio. Assim nas três lagoas (LP-1, LP-4 e LP-7) do primeiro conjunto era mantido um equilíbrio entre os processos de fotossíntese e oxidação de material orgânico. Portanto, nestas lagoas não havia consumo biológico de dióxido de carbono e a variação na concentração de CO_2 poderia ser atribuída unicamente à dessorção deste gás;

Outras três lagoas (LP-2, LP-5 e LP-8) foram operadas com pleno acesso da luz solar. A concentração de OD foi monitorada, mantendo o OD inferior ao valor de saturação através da adição de sulfito de Sódio (Na_2SO_3). Sempre que a concentração de OD na lagoa excedia o valor de saturação era adicionado sulfito de sódio, que consumia OD ao ser oxidado para sulfato, usando cloreto de cobalto (1 mg/L) como catalisador. Dessa maneira foi possível determinar o consumo acumulativo de oxigênio nas três lagoas em função do tempo. Procurou-se deixar no final do dia uma concentração de OD próximo a 9 mg/L para garantir oxigênio para as algas, durante a noite, uma demanda de 4 a 6 mg/L;

As três últimas lagoas (LP-3, LP-6 e LP-9) foram operadas da mesma maneira que as do segundo conjunto, mas sem adição de sulfito. Assim a concentração de OD aumentava e se desprendia parcialmente para a atmosfera. Tal procedimento serviu para verificar a

possibilidade de toxidez ou inibição dos organismos fotossintetizantes frente ao sulfito de sódio. Para tanto foi verificado que a variação da alcalinidade e do pH nas lagoas do primeiro conjunto (com adição de sulfito) era diferente do terceiro conjunto (sem esta adição).

O 3º Experimento foi realizado inicialmente em 17 de maio e um outro em 24 de setembro de 2001. Com uma frequência diária de três vezes, eram medidos diretamente do conteúdo da lagoa a temperatura, o pH e a concentração de OD, após misturar delicadamente o conteúdo da lagoa. Também foi determinado nesse experimento o teste de clorofila "a" para saber como foi o desenvolvimento de algas nessas lagoas de polimento em bateladas, porém os dados desta análise não se encontram neste trabalho, pois estes não faziam parte do objetivo principal desse estudo. Nessas oportunidades eram tomadas amostras para a determinação da concentração de amônia e alcalinidade. Diariamente, água destilada era adicionada para compensar perdas de evaporação.

Deste modo os testes com as lagoas em regime de batelada tratando a mistura de esgoto digerido e efluente de lagoas de pós-tratamento com algas serviam a duas finalidades:

- (1) Nas lagoas com atividade fotossintética limitada as variações da alcalinidade, do pH e da acidez podem ser atribuídas aos processos de dessorção de CO_2 e NH_3 .
- (2) Nas lagoas com plena atividade fotossintética todos os três processos (dessorção de CO_2 e NH_3 e consumo biológico de CO_2 se desenvolviam simultaneamente).

Em ambos os casos há condições de se comparar a variação experimental da alcalinidade e do pH (e eventualmente a acidez) com os valores calculados a partir das variações observadas dos parâmetros que afetam o pH e alcalinidade. Para avaliar os três processos juntos foi usado o seguinte procedimento:

- (1) a partir da alcalinidade e do pH medidos em função do tempo, calcula-se os valores correspondentes da acidez.
- (2) independentemente foram determinados os valores da concentração de amônia em função do tempo e a taxa de dessorção de amônia.
- (3) da mesma foi determinada a taxa de consumo biológico de CO_2 a partir da produção de oxigênio na lagoa, sabendo-se que 1 mol de oxigênio produzido repercute no consumo de 1 mol de CO_2 .

(4) avalia-se ainda a taxa de dessorção de CO₂ da seguinte maneira: sabe-se que a metade da soma da alcalinidade e a acidez de uma água é igual à concentração de espécies carbônicas na água. Por outro lado, nas lagoas os processos que afetam a concentração das espécies carbônicas são a remoção de CO₂ por dessorção ou consumo biológico. Assim tem-se:

$$(dC_i/dt) = R_d \text{ CO}_2 + R \text{ foto} = (\Delta \text{Alc} + \Delta \text{Ac})/\Delta t/2$$

Desta maneira pode se estimar a taxa de dessorção de CO₂ como:

$$R_d \text{ CO}_2 = (\Delta \text{Alc} + \Delta \text{Ac})/\Delta t/2 - R \text{ foto}$$

Nos casos que: limitação artificial da fotossíntese, com a intenção de evitar o consumo biológico de CO₂ os cálculos se simplificam, uma vez que R foto = 0.

3.2.4 Análises instrumentais

Para determinação dos parâmetros experimentais foram usados métodos eletrométricos e titrimétricos, quais sejam:

- **pH**

Os valores de pH foram determinados pelo método potenciométrico, usando um medidor de pH ORION.

- **Temperatura**

As medidas de temperatura foram realizadas com um termômetro de filamento de mercúrio.

- **Oxigênio Dissolvido**

Determinado pelo método eletrométrico, utilizando um medidor YSI 54 A acoplado a um eletrodo de membrana seletiva.

- **Alcalinidade**

A alcalinidade total foi determinada pelo método de Kapp, segundo descrito por CAVALCANTI (2000). Os resultados foram expressos em mg CaCO₃/L.

- **Nitrogênio Amoniacal**

Empregou-se o método da destilação seguida por titulação acidimétrica, segundo o Standard Methods, 1995.

Os resultados obtidos dos experimentos bem como o tratamento dado a esses dados estão apresentados no próximo Capítulo.

4 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

4.1 DESORÇÃO DO DIÓXIDO DE CARBONO

A constante de dessorção de CO_2 foi determinada em três conjuntos de lagoas com profundidades de 0,40, 0,60 e 0,80 m. Os parâmetros determinados experimentalmente foram o pH e a alcalinidade. Os valores de pH e alcalinidade e aqueles calculados de CO_2 estão apresentados na Tabela 4.1, Tabela 4.3 e Tabela 4.5. Nessas Tabelas foi observado que não houve variações da alcalinidade nas 3 lagoas conforme prediz a teoria. Com os dados de pH e alcalinidade total e a Equação 2.8b, foram calculadas as concentrações de CO_2 ao longo do experimento. A variação da concentração de CO_2 está indicada em mmol/L na Tabela 4.1, Tabela 4.3 e Tabela 4.5. Com os dados dessas Tabelas foi possível determinar a variação de CO_2 e, conseqüentemente da acidez, em cada uma das três lagoas, sendo então calculados os valores da constante de dessorção para cada uma das três profundidades (Tabela 4.2, Tabela 4.4 e Tabela 4.6).

Para avaliar a taxa de dessorção de CO_2 não se pode tomar como base simplesmente a variação da concentração deste gás na fase líquida, uma vez que devido ao aumento do pH haverá também diminuição de CO_2 remanescente devido à formação de bicarbonato. Deste modo para calcular a taxa de dessorção o procedimento utilizado foi o seguinte:

- (1) com auxílio da Equação 2.8b, foram calculados os valores da concentração de CO_2 em mmol/L para os valores do pH e da alcalinidade observados nos diferentes dias (colunas 9, 10 e 11 da Tabela 4.1, Tabela 4.3 e Tabela 4.5);
- (2) a partir dos valores da concentração de CO_2 e da Equação 2.7b foram determinados os valores da acidez em meq/L (colunas 1, 2 e 3 da Tabela 4.2, Tabela 4.4 e Tabela 4.6);
- (3) a taxa de dessorção ($\Delta\text{Ac}/\Delta t$), em meq/L, foi calculada a partir da variação diária da acidez (colunas 4, 5 e 6 das Tabelas 4.2, 4.4 e 4.6).

- (4) sabendo que 1 mmol de CO_2 tem por definição uma acidez de 2 meq, a constante de dessorção " K_{CO_2} " pode ser calculada como a razão entre a taxa de dessorção de CO_2 ($= 0,5\Delta\text{Ac}/\Delta t$ em $\text{meq.L}^{-1}.\text{dia}^{-1}$) e a diferença entre a concentração de CO_2 de saturação $[\text{CO}_2]_s$, e a existente na fase líquida $[\text{CO}_2]_{\text{liq}}$ ambas em mmol.L^{-1} conforme a Equação (2.10).

Tabela 4.1– Valores de pH, alcalinidade total e concentração de dióxido de carbono na massa líquida das lagoas LP-1, LP-2 e LP-3.

Lagoas de 0,40m										
Data	Tempo (dia)	pH			Alcalinidade Total (meq.L^{-1})			$[\text{CO}_2]_{\text{liq}}$ (mmol.L^{-1})		
		LP-1	LP-2	LP-3	LP-1	LP-2	LP-3	LP-1	LP-2	LP-3
19.04.01	0	6,00	6,50	7,00	3,60	6,00	7,40	7,69	4,05	1,58
20.04.01	1	6,57	7,13	7,49	3,60	6,00	7,40	2,09	0,96	0,52
21.04.01	2	7,04	7,66	8,00	3,60	6,00	7,40	0,71	0,28	0,16
22.04.01	3	7,47	8,05	8,28	3,60	6,00	7,40	0,26	0,12	0,08
23.04.01	4	7,81	-	-	3,60	-	-	0,12	-	-
24.04.01	5	8,08	-	-	3,60	-	-	0,06	-	-

Tabela 4.2 – Valores para determinação da constante de dessorção do CO_2 para as lagoas LP-1, LP-2 e LP-3.

Acidez (meq.L^{-1})			$\Delta \text{Ac}/\Delta t$ ($\text{meq.L}^{-1}.\text{dia}^{-1}$)			$[\text{CO}_2]_s - [\text{CO}_2]_{\text{liq}}$ (mmol.L^{-1})			K_{CO_2} (dia^{-1})		
LP-1	LP-2	LP-3	LP-1	LP-2	LP-3	LP-1	LP-2	LP-3	LP-1	LP-2	LP-3
18,99	14,11	10,55	-	-	-	-	-	-	-	-	-
7,79	7,91	8,41	-11,20	-6,19	-2,14	-7,69	-4,04	-1,57	0,73	0,77	0,68
5,02	6,54	7,64	-2,77	-1,37	-0,77	-2,08	-0,95	-0,51	0,67	0,72	0,76
4,11	6,17	7,43	-0,90	-0,37	-0,21	-0,70	-0,27	-0,15	0,65	0,69	0,72
3,82	-	-	-0,29	-	-	-0,25	-	-	0,59	-	-
3,69	-	-	-0,13	-	-	-0,11	-	-	0,60	-	-

$[\text{CO}_2]_s$ é a concentração de saturação do dióxido de carbono (0,01 mmol/L).

$[\text{CO}_2]_{\text{liq}}$ é a concentração do dióxido de carbono no líquido após um tempo "t".

Os valores médios das constantes das lagoas de 0,40m foram:

$$\text{Para: LP-1} \Rightarrow K_{CO_2} = 0,65 \text{ dia}^{-1}$$

$$\text{LP-2} \Rightarrow K_{CO_2} = 0,72 \text{ dia}^{-1}$$

$$\text{LP-3} \Rightarrow K_{CO_2} = 0,72 \text{ dia}^{-1}$$

As diferenças entre os valores foram atribuídas a erros acidentais e a média aritmética do valor das constantes foi adotada como o valor da constante nas lagoas de 0,40 m:

$$K_{CO_2}, \text{ médio} = 0,70 \text{ dia}^{-1}$$

Tabela 4.3 – Valores de pH, alcalinidade total e a concentração de dióxido de carbono na massa líquida da lagoa de 0,60 m.

Lagoas de 0,60 m										
Data	Tempo (dia)	pH			Alcalinidade Total (meq.L ⁻¹)			[CO ₂] _{liq} (mmol.L ⁻¹)		
		LP-4	LP-5	LP-6	LP-4	LP-5	LP-6	LP-4	LP-5	LP-6
19.04.01	0	6,00	6,50	7,00	3,60	6,00	7,40	7,69	4,05	1,58
20.04.01	1	6,39	6,98	7,36	3,60	6,00	7,40	3,14	1,34	0,69
21.04.01	2	6,72	7,30	7,69	3,60	6,00	7,40	1,46	0,64	0,33
22.04.01	3	6,99	7,67	7,92	3,60	6,00	7,40	0,79	0,27	0,19
23.04.01	4	7,23	7,83	8,18	3,60	6,00	7,40	0,46	0,19	0,10
24.04.01	5	7,39	8,00	8,22	3,60	6,00	7,40	0,31	0,13	0,09
25.04.01	6	7,61	8,19	8,33	3,60	6,00	7,40	0,19	0,08	0,07

Tabela 4.4 – Valores para determinação da constante de desorção do CO₂ para as lagoas LP-4, LP-5 e LP-6.

Acidez (meq.L ⁻¹)			$\Delta \text{Ac} / \Delta t$ (meq.L ⁻¹ . dia ⁻¹)			[CO ₂] _s - [CO ₂] _{liq} (mmol.L ⁻¹)			K_{CO_2} (dia ⁻¹)		
LP-4	LP-5	LP-6	LP-4	LP-5	LP-6	LP-4	LP-5	LP-6	LP-4	LP-5	LP-6
18,99	14,11	10,55	-	-	-	-	-	-	-	-	-
9,87	8,68	8,76	-9,12	-5,43	-1,79	-7,69	-4,04	-1,57	0,59	0,67	0,57
6,53	7,27	8,02	-3,34	-1,41	-0,75	-3,12	-1,33	-0,68	0,53	0,53	0,55
5,19	6,53	7,73	-1,34	-0,75	-0,29	-1,46	-0,63	-0,31	0,46	0,59	0,46
4,51	6,34	7,50	-0,68	-0,18	-0,22	-0,79	-0,27	-0,18	0,43	0,34	0,62
4,22	6,20	7,47	-0,29	-0,14	-0,03	-0,45	-0,18	-0,09	0,33	0,39	0,15
3,97	6,08	7,40	-0,25	-0,12	-0,07	-0,30	-0,12	-0,08	0,41	0,52	0,45

Os valores médios das constantes das lagoas de 0,60m foram:

$$\text{Para: LP-4} \Rightarrow K_{CO_2} = 0,46 \text{ dia}^{-1}$$

$$\text{LP-5} \Rightarrow K_{CO_2} = 0,51 \text{ dia}^{-1}$$

$$\text{LP-6} \Rightarrow K_{CO_2} = 0,47 \text{ dia}^{-1}$$

Novamente a constante calculada de dessorção em boa aproximação é igual nas três lagoas e calcula-se a média como o valor mais significativo:

$$K_{CO_2}, \text{ médio} = 0,48 \text{ dia}^{-1}$$

Tabela 4.5 – Valores de pH, alcalinidade total e a concentração de dióxido de carbono na massa líquida da lagoa de 0,80 m.

Lagoas de 0,80 m										
Data	Tempo (dia)	pH			Alcalinidade Total (meq.L ⁻¹)			[CO ₂] _{liq} (mmol.L ⁻¹)		
		LP-7	LP-8	LP-9	LP-7	LP-8	LP-9	LP-7	LP-8	LP-9
19.04.01	0	6,00	6,50	7,00	3,60	6,00	7,40	7,69	4,05	1,58
20.04.01	1	6,54	6,94	7,355	3,60	6,00	7,40	2,25	1,49	0,69
21.04.01	2	6,84	7,17	7,61	3,60	6,00	7,40	1,11	0,86	0,38
22.04.01	3	7,04	7,36	7,795	3,60	6,00	7,40	0,70	0,56	0,25
23.04.01	4	7,25	7,57	8,01	3,60	6,00	7,40	0,44	0,34	0,15
24.04.01	5	7,43	7,73	8,07	3,60	6,00	7,40	0,29	0,24	0,13

Tabela 4.6 – Valores para determinação da constante de dessorção do CO₂ para as lagoas LP-7, LP-8 e LP-9.

Acidez (meq.L ⁻¹)			$\Delta \text{Ac} / \Delta t$ (meq.L ⁻¹ . d ⁻¹)			[CO ₂] _s - [CO ₂] _{liq} (mmol.L ⁻¹)			K_{CO_2} (d ⁻¹)		
LP-7	LP-8	LP-9	LP-7	LP-8	LP-9	LP-7	LP-8	LP-9	LP-7	LP-8	LP-9
18,99	14,11	10,55	-	-	-	-	-	-	-	-	-
8,09	8,97	8,78	-10,90	-5,14	-1,78	-7,69	-4,04	-1,57	-	0,63	0,57
5,82	7,72	8,15	-2,27	-1,25	-0,63	-2,23	-1,48	-0,69	0,51	0,42	0,46
5,00	7,10	7,86	-0,82	-0,62	-0,28	-1,10	-0,86	-0,38	0,37	0,36	0,38
4,47	6,67	7,64	-0,53	-0,44	-0,23	-0,69	-0,55	-0,24	0,38	0,40	0,47
4,17	6,45	7,59	-0,30	-0,22	-0,05	-0,43	-0,33	-0,14	0,35	0,32	0,18

Os valores médios das constantes das lagoas de 0,80m foram:

$$\text{Para: LP-7} \Rightarrow K_{CO_2} = 0,40 \text{ dia}^{-1}$$

$$\text{LP-8} \Rightarrow K_{CO_2} = 0,43 \text{ dia}^{-1}$$

$$\text{LP-9} \Rightarrow K_{CO_2} = 0,41 \text{ dia}^{-1}$$

$$K_{CO_2} \text{ médio} = 0,41 \text{ dia}^{-1}$$

Comparando os resultados dos testes com diferentes profundidades, foi observado claramente que esta influi o valor da constante de dessorção. Este aspecto será discutido com mais detalhe no Capítulo 5.

4.2 DESSORÇÃO DA AMÔNIA

As Tabelas 4.7, 4.9 e 4.11 apresentam os valores do pH e das concentrações de amônia total (colunas 6, 7 e 8) e amônia gasosa (colunas 9,10 e 11, calculadas com a Equação 2.14), determinados ao longo do experimento com as lagoas de polimento de 0,40, 0,60 e 0,80m de profundidade, respectivamente. O pH inicial das nove lagoas foi de 10,0 e a concentração de amônia cerca de 36 mgN/L. O experimento foi finalizado quando a concentração de amônia no líquido atingiu uma concentração próxima a zero.

As Tabelas 4.8, 4.10 e 4.12 apresentam, nas colunas 3, 4 e 5, os valores da taxa de dessorção, $RdNH_3$, calculados como a diferença diária das concentrações de amônia total (dissolvida e gasosa) e, nas colunas 6, 7 e 8, os valores da constante de dessorção de amônia K_{NH_3} , calculados como a razão entre a taxa de dessorção e a concentração de amônia não ionizada (NH_3).

Os valores médios das constantes das lagoas de 0,40m foram:

$$\text{Para: LP-1} \Rightarrow K_{NH_3} = 0,44 \text{ dia}^{-1}$$

$$\text{LP-2} \Rightarrow K_{NH_3} = 0,43 \text{ dia}^{-1}$$

$$\text{LP-3} \Rightarrow K_{NH_3} = 0,41 \text{ dia}^{-1}$$

$$K_{NH_3} \text{ médio} = 0,43 \text{ dia}^{-1}$$

Tabela 4.1 – Valores de pH, amônia gasosa e amônia total na massa líquida da lagoa de 0,40m de profundidade (abril de 2001).

Lagoas de 0,40 m										
Data	Tempo (dia)	pH			[Amônia] ^{total} (mgN.L ⁻¹)			[Amônia] ^{gás} (mgN.L ⁻¹)		
		LP-1	LP-2	LP-3	LP-1	LP-2	LP-3	LP-1	LP-2	LP-3
03.05.01	0	10,00	10,00	10,00	35,8	35,8	35,8	31,8	31,8	31,8
04.05.01	1	9,71	9,63	9,81	19,6	20,7	20,7	15,7	16,0	17,3
05.05.01	2	9,62	9,56	9,79	14,6	14,6	14,0	11,2	10,8	11,6
07.05.01	4	9,56	9,56	9,83	5,6	5,6	5,6	4,2	4,2	4,7
08.05.01	5	9,47	9,50	9,76	3,9	3,9	3,6	2,7	2,8	3,0
09.05.01	6	9,39	9,46	-	2,2	2,0	-	1,5	1,4	-
10.05.01	7	9,31	9,43	-	1,7	1,7	-	1,0	1,1	-

Tabela 4.2 – Constantes de amônia das lagoas de 0,40m (abril de 2001).

Lagoas de 0,40 m							
Data	Tempo (dia)	Rd NH ₃ (mgN.L ⁻¹ .dia ⁻¹)			K _{NH₃} (dia ⁻¹)		
		LP-1	LP-2	LP-3	LP-1	LP-2	LP-3
03.05.01	0	-	-	-	-	-	-
04.05.01	1	16,2	15,1	15,1	0,51	0,47	0,47
05.05.01	2	5,0	6,2	6,7	0,32	0,39	0,39
07.05.01	4	4,5	4,5	4,2	0,40	0,41	0,36
08.05.01	5	1,7	1,7	2,0	0,40	0,40	0,42
09.05.01	6	1,7	2,0	-	0,61	0,70	-
10.05.01	7	0,6	0,3	-	0,38	0,21	-

Tabela 4.3 – Valores de pH, amônia gasosa e amônia total na massa líquida da lagoa de 0,60m de profundidade (abril de 2001).

Lagoa de 0,60 m										
Data	Tempo (dia)	pH			[Amônia] ^{total} (mgN.L ⁻¹)			[Amônia] ^{gás} (mgN.L ⁻¹)		
		LP-4	LP-5	LP-6	LP-4	LP-5	LP-6	LP-4	LP-5	LP-6
03.05.01	0	10,0	10,0	10,0	35,8	35,8	35,8	31,8	31,8	31,8
04.05.01	1	9,5	9,7	9,7	24,6	24,1	25,2	17,3	19,2	20,0
05.05.01	2	9,4	9,7	9,7	18,5	18,5	19,6	12,7	14,5	15,3
07.05.01	4	9,4	9,7	9,7	11,8	11,8	11,8	7,8	9,2	9,4
08.05.01	5	9,3	9,6	9,7	10,6	9,5	8,4	6,5	7,3	6,5
09.05.01	6	9,2	9,6	9,6	6,7	5,6	4,5	3,9	4,2	3,5
10.05.01	7	9,2	9,6	9,6	7,0	5,0	5,0	3,8	3,7	3,9
11.05.01	8	9,2	9,5	9,6	5,0	5,0	3,4	2,7	3,7	2,6
12.05.01	9	9,0	9,5	9,6	4,8	3,9	3,4	2,1	2,8	2,5

Tabela 4.4 – Constantes de amônia das lagoas de 0,60m (abril de 2001).

Lagoas de 0,60 m							
Data	Tempo (dia)	Rd NH ₃ (mgN.L ⁻¹ .dia ⁻¹)			K _{NH₃} (dia ⁻¹)		
		LP-4	LP-5	LP-6	LP-4	LP-5	LP-6
03.05.01	0	-	-	-	-	-	-
04.05.01	1	11,2	11,8	10,6	0,35	0,37	0,33
05.05.01	2	6,2	5,6	5,6	0,36	0,29	0,28
07.05.01	4	3,4	3,4	3,9	0,26	0,23	0,26
08.05.01	5	1,1	2,2	3,4	0,14	0,24	0,36
09.05.01	6	3,9	3,9	3,9	0,61	0,54	0,60
10.05.01	7	0,3	0,6	0,6	0,07	0,13	0,16
11.05.01	8	2,0	0,0	1,7	0,51	0,00	0,43
12.05.01	9	0,3	1,1	0,0	0,10	0,30	0,00

Os valores médios das constantes das lagoas de 0,60m foram:

$$\text{Para: LP-4} \Rightarrow K_{NH_3} = 0,28 \text{ dia}^{-1}$$

$$\text{LP-5} \Rightarrow K_{NH_3} = 0,26 \text{ dia}^{-1}$$

$$\text{LP-6} \Rightarrow K_{NH_3} = 0,26 \text{ dia}^{-1}$$

$$K_{NH_3} \text{ médio} = 0,27 \text{ dia}^{-1}$$

Tabela 4.5 – Valores de pH, amônia gasosa e amônia total na massa líquida da lagoa de 0,80m de profundidade (abril de 2001).

Lagoas de 0,80 m										
Data	Tempo (dia)	pH			[Amônia] _{total} (mgN.L ⁻¹)			[Amônia] _{gás} (mgN.L ⁻¹)		
		LP-7	LP-8	LP-9	LP-7	LP-8	LP-9	LP-7	LP-8	LP-9
03.05.01	0	10,0	10,0	10,0	35,8	35,8	35,8	31,8	31,8	31,8
04.05.01	1	9,6	9,6	9,7	25,2	26,3	25,2	18,7	19,9	19,6
05.05.01	2	9,5	9,5	9,7	22,4	21,3	23,0	15,9	15,6	18,3
07.05.01	4	9,5	9,6	9,7	16,8	17,9	16,2	11,9	13,3	13,0
08.05.01	5	9,4	9,5	9,7	14,6	14,6	12,9	9,6	10,3	10,2
09.05.01	6	9,4	9,5	9,7	9,5	9,2	8,1	6,1	6,4	6,4
10.05.01	7	9,3	9,4	9,7	9,0	8,4	8,4	5,6	5,7	6,7
11.05.01	8	9,3	9,4	9,7	8,4	8,4	7,8	5,1	5,7	6,2
12.05.01	9	9,2	9,4	9,6	7,3	7,0	7,0	4,0	4,6	5,4

Tabela 4.6 – Concentração de amônia gasosa na massa líquida da lagoa de 0,80m (abril de 2001).

Data	Tempo (dia)	Lagoas de 0,80 m					
		Rd NH ₃ (mgN.L ⁻¹ .dia ⁻¹)			K _{NH₃} (dia ⁻¹)		
		LP-7	LP-8	LP-9	LP-7	LP-8	LP-9
03.05.01	0	-	-	-	-	-	-
04.05.01	1	10,6	9,5	10,6	0,33	0,30	0,33
05.05.01	2	2,8	5,0	2,2	0,15	0,25	0,11
07.05.01	4	2,8	1,7	3,4	0,18	0,11	0,18
08.05.01	5	2,2	3,4	3,4	0,19	0,25	0,26
09.05.01	6	5,0	5,3	4,8	0,52	0,52	0,46
10.05.01	7	0,6	0,8	0,3	0,09	0,13	0,04
11.05.01	8	0,6	0,0	0,6	0,10	0,00	0,08
12.05.01	9	1,1	1,4	0,8	0,22	0,24	0,13

Os valores médios das constantes das lagoas de 0,80m foram:

$$\text{Para: LP-7} \Rightarrow K_{NH_3} = 0,22 \text{ dia}^{-1}$$

$$\text{LP-8} \Rightarrow K_{NH_3} = 0,23 \text{ dia}^{-1}$$

$$\text{LP-9} \Rightarrow K_{NH_3} = 0,19 \text{ dia}^{-1}$$

$$K_{NH_3} \text{ médio} = 0,21 \text{ dia}^{-1}$$

Devido ao fato que a alcalinidade na primeira série de testes era bem maior e a concentração de amônia menor que se esperava, a diminuição desta alcalinidade durante a dessorção não era muito significativa. Conseqüentemente, o pH sempre manteve um valor alto em todas as unidades experimentais. Por esta razão foi realizado um teste com menor alcalinidade, para observar se efetivamente o pH diminuía quando havia dessorção de amônia. A Tabela 4.13 apresenta os dados de pH e amônia total determinados nas 3 lagoas de polimento LP-1, LP-2 e LP-3 com 0,40 m de profundidade e amônia gasosa calculada pela Equação 2.14. O experimento teve a duração de 11 dias (agosto de 2001). O pH inicial das nove lagoas foi de 10,0 e a concentração de amônia cerca de 70 mgN/L. O experimento foi finalizado quando a concentração de amônia no líquido (ou dessorção de NH₃ gasosa para atmosfera) atingissem uma concentração mínima possível ou próxima a zero.

Tabela 4.7 – Valores de pH, amônia gasosa e amônia total na massa líquida da lagoa de 0,40m de profundidade (agosto de 2001).

Lagoas de 0,40 m										
Data	Tempo (dia)	pH			[Amônia] ^{total} (mgN.L ⁻¹)			[Amônia] ^{gas} (mgN.L ⁻¹)		
		LP-1	LP-2	LP-3	LP-1	LP-2	LP-3	LP-1	LP-2	LP-3
05.08.01	0	10,0	10,0	10,0	70,0	70,0	70,0	62,2	62,2	62,2
06.08.01	1	9,6	9,7	9,9	46,5	45,9	44,2	35,5	37,4	38,1
07.08.01	2	9,4	9,6	9,8	35,3	33,0	29,7	24,3	25,5	25,0
08.08.01	3	9,1	9,4	9,7	28,6	23,5	20,2	14,3	15,4	15,9
09.08.01	4	8,9	9,3	9,7	23,5	17,4	14,6	9,1	10,5	11,5
10.08.01	5	8,8	9,2	9,7	20,7	14,0	10,1	6,5	8,1	8,1
11.08.01	6	8,6	9,1	9,7	20,2	12,9	7,3	4,5	6,7	5,8
12.08.01	7	8,4	9,1	9,7	20,2	10,1	6,7	3,7	4,8	5,2
13.08.01	8	8,3	8,9	9,6	16,8	8,4	4,5	2,1	3,3	3,4
14.08.01	9	8,2	8,9	9,6	16,2	6,2	3,9	1,7	2,3	2,9
15.08.01	10	8,2	8,8	9,5	15,1	6,2	2,8	1,6	2,1	2,1
16.08.01	11	8,2	8,8	9,6	14,0	5,0	2,2	1,5	1,8	1,7

Tabela 4.8 – Constantes de amônia das lagoas de 0,40m (agosto de 2001).

Lagoas de 0,40 m							
Data	Tempo (dia)	Rd NH ₃ (mgN.L ⁻¹ . dia ⁻¹)			K _{NH₃} (dia ⁻¹)		
		LP-1	LP-2	LP-3	LP-1	LP-2	LP-3
05.08.01	0	-	-	-	-	-	-
06.08.01	1	23,5	24,1	25,8	0,4	0,4	0,4
07.08.01	2	11,2	12,9	14,6	0,3	0,3	0,4
08.08.01	3	6,7	9,5	9,5	0,3	0,4	0,4
09.08.01	4	5,0	6,2	5,6	0,4	0,4	0,4
10.08.01	5	2,8	3,4	4,5	0,3	0,3	0,4
11.08.01	6	0,6	1,1	2,8	0,1	0,1	0,3
12.08.01	7	0,0	2,8	0,6	0,0	0,4	0,1
13.08.01	8	3,4	1,7	2,2	0,9	0,4	0,4
14.08.01	9	0,6	2,2	0,6	0,3	0,7	0,2
15.08.01	10	1,1	0,0	1,1	0,6	0,0	0,4
16.08.01	11	1,1	1,1	0,6	0,7	0,5	0,3

Os valores médios das constantes das lagoas de 0,40m foram:

$$\text{Para: LP-1} \Rightarrow K_{NH_3} = 0,39 \text{ dia}^{-1}$$

$$\text{LP-2} \Rightarrow K_{NH_3} = 0,36 \text{ dia}^{-1}$$

$$\text{LP-3} \Rightarrow K_{NH_3} = 0,33 \text{ dia}^{-1}$$

$$K_{NH_3} \text{ médio} = 0,36 \text{ dia}^{-1}$$

A

Tabela 4.8 mostra as determinações da taxa de dessorção de amônia e as constantes da amônia, utilizando os dados das variações da concentração das duas formas de amônia da Tabela 4.13 em função do tempo do experimento.

As Tabelas (4.15, 4.16, 4.17 e 4.18) também mostram dados de pH, amônia gasosa e amônia total para as lagoas de polimento com profundidades de 0,60 e 0,80 m respectivamente, também com diferença apenas na duração do experimento, em relação às Tabelas 4.13 e 4.14.

Tabela 4.9 – Valores de pH, amônia gasosa e amônia total na massa líquida da lagoa de 0,60m de profundidade (agosto de 2001).

Lagoas de 0,60 m										
Data	Tempo (dia)	pH			[Amônia] _{total} (mgN.L ⁻¹)			[Amônia] _{gas} (mgN.L ⁻¹)		
		LP-4	LP-5	LP-6	LP-4	LP-5	LP-6	LP-4	LP-5	LP-6
05.08.01	0	10,0	10,0	10,0	70,0	70,0	70,0	62,2	62,2	62,2
06.08.01	1	9,7	9,8	9,9	51,5	49,8	48,2	41,1	41,6	41,8
07.08.01	2	9,6	9,7	9,9	41,4	38,1	35,3	31,4	31,0	30,2
08.08.01	3	9,3	9,5	9,7	33,6	33,0	28,0	21,0	23,7	22,2
09.08.01	4	9,2	9,5	9,8	30,8	25,8	23,0	16,4	17,9	18,8
10.08.01	5	9,1	9,5	9,8	24,6	21,8	17,9	12,5	15,2	14,9
11.08.01	6	9,0	9,4	9,8	24,4	19,6	16,2	10,8	13,2	13,5
12.08.01	7	8,9	9,3	9,8	24,1	16,8	14,0	9,1	10,6	11,5
13.08.01	8	8,7	9,2	9,7	20,2	13,4	9,5	5,8	7,6	7,6
14.08.01	9	8,6	9,2	9,7	18,5	10,4	7,8	4,5	5,5	6,2
15.08.01	10	8,5	9,1	9,6	18,5	9,5	5,6	3,4	4,6	4,3
16.08.01	11	8,4	9,1	9,7	18,2	9,5	5,6	3,3	4,7	4,4
17.08.01	12	8,4	9,1	9,7	15,1	7,8	4,5	2,5	3,8	3,6
18.08.01	13	8,3	9,0	9,6	15,7	6,7	2,8	2,2	2,9	2,2
19.08.01	14	8,2	8,9	9,5	16,2	6,2	2,8	1,9	2,2	2,0
20.08.01	15	8,1	8,7	9,4	15,1	6,7	2,2	1,5	2,1	1,5
21.08.01	16	8,1	8,6	9,3	15,1	6,7	2,8	1,4	1,7	1,8

22.08.01	17	8,2	8,6	9,5	14,0	5,0	2,2	1,4	1,3	1,5
23.08.01	18	8,2	8,7	9,4	12,3	3,9	1,7	1,4	1,1	1,1
24.08.01	19	8,3	8,9	9,5	12,3	3,4	1,7	1,8	1,3	1,2

Tabela 4.10 – Constantes de amônia das lagoas de 0,60m (agosto de 2001).

		Lagoas de 0,60 m					
Data	Tempo (dia)	Rd NH ₃ (mgN.L ⁻¹ . dia ⁻¹)			K _{NH₃} (dia ⁻¹)		
		LP-4	LP-5	LP-6	LP-4	LP-5	LP-6
05.08.01	0	-	-	-	-	-	-
06.08.01	1	18,5	20,2	21,8	0,3	0,3	0,4
07.08.01	2	10,1	11,8	12,9	0,2	0,3	0,3
08.08.01	3	7,8	5,0	7,3	0,2	0,2	0,2
09.08.01	4	2,8	7,3	5,0	0,1	0,3	0,2
10.08.01	5	6,2	3,9	5,0	0,4	0,2	0,3
11.08.01	6	0,3	2,2	1,7	0,0	0,1	0,1
12.08.01	7	0,3	2,8	2,2	0,0	0,2	0,2
13.08.01	8	3,9	3,4	4,5	0,4	0,3	0,4
14.08.01	9	1,7	3,1	1,7	0,3	0,4	0,2
15.08.01	10	0,0	0,8	2,2	0,0	0,2	0,4
16.08.01	11	0,3	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0
17.08.01	12	3,1	1,7	1,1	0,9	0,4	0,3
18.08.01	13	0,6	1,1	1,7	0,2	0,3	0,5
19.08.01	14	0,6	0,6	0,0	0,3	0,2	0,0
20.08.01	15	1,1	0,6	0,6	0,6	0,3	0,3
21.08.01	16	0,0	0,0	0,6	0,0	0,0	0,4
22.08.01	17	1,1	1,7	0,6	0,8	1,0	0,3
23.08.01	18	1,7	1,1	0,6	1,2	0,9	0,4
24.08.01	19	0,0	0,6	0,0	0,0	0,5	0,0

Os valores médios das constantes das lagoas de 0,60m foram:

Para: LP-4 $\Rightarrow K_{NH_3} = 0,27 \text{ dia}^{-1}$

LP-5 $\Rightarrow K_{NH_3} = 0,29 \text{ dia}^{-1}$

LP-6 $\Rightarrow K_{NH_3} = 0,21 \text{ dia}^{-1}$

$$K_{NH_3} \text{ médio} = 0,26 \text{ dia}^{-1}$$

Tabela 4.11– Valores de pH, amônia gasosa e amônia total na massa líquida da lagoa de 0,80m de profundidade (agosto de 2001).

Lagoas de 0,80 m										
Data	Tempo (dia)	pH			[Amônia] ^{total} (mgN.L ⁻¹)			[Amônia] ^{gás} (mgN.L ⁻¹)		
		LP-7	LP-8	LP-9	LP-7	LP-8	LP-9	LP-7	LP-8	LP-9
05.08.01	0	10,0	10,0	10,0	70,0	70,0	70,0	62,2	62,2	62,2
06.08.01	1	9,8	9,8	10,0	54,3	53,8	49,3	44,4	45,2	43,3
07.08.01	2	9,7	9,8	9,9	44,8	43,1	40,3	35,8	35,9	35,3
08.08.01	3	9,5	9,6	9,9	38,1	39,2	35,3	27,6	30,2	30,0
09.08.01	4	9,4	9,6	9,8	37,5	35,3	30,2	24,6	26,9	25,3
10.08.01	5	9,4	9,6	9,9	31,4	29,7	24,6	21,0	22,9	21,1
11.08.01	6	9,3	9,6	9,9	30,8	29,1	23,0	19,6	22,2	19,6
12.08.01	7	9,2	9,6	9,8	29,1	25,2	19,6	17,0	18,7	16,5
13.08.01	8	9,1	9,5	9,8	24,6	20,2	14,6	11,9	14,1	12,1
14.08.01	9	8,9	9,4	9,8	21,6	21,3	12,3	8,9	14,5	10,1
15.08.01	10	8,8	9,4	9,7	21,8	16,8	11,2	7,0	10,8	9,1
16.08.01	11	8,8	9,4	9,8	22,4	15,7	11,2	6,9	10,1	9,2
17.08.01	12	8,7	9,3	9,8	19,6	13,4	9,0	5,6	8,4	7,4
18.08.01	13	8,6	9,2	9,7	19,0	11,8	7,8	4,7	6,8	6,4
19.08.01	14	8,5	9,2	9,7	20,2	11,8	7,3	4,2	6,2	5,7
20.08.01	15	8,4	9,0	9,5	17,9	9,5	5,0	3,0	4,2	3,7
21.08.01	16	8,3	8,9	9,4	17,9	10,1	5,0	2,7	3,8	3,5
22.08.01	17	8,5	8,9	9,4	16,8	9,0	4,5	3,1	3,5	3,1
23.08.01	18	8,7	9,0	9,5	15,7	7,3	4,5	4,2	3,1	3,2
24.08.01	19	9,0	9,3	9,7	13,4	6,2	3,4	6,0	3,8	2,7
25.08.01	20	9,4	9,6	9,9	11,2	5,0	2,8	7,3	3,9	2,4
26.08.01	21	9,3	9,4	9,7	10,6	5,0	2,2	6,2	3,4	1,8
27.08.01	22	9,3	9,5	9,8	10,6	4,5	2,2	6,3	3,3	1,8

Tabela 4.12 – Constantes de amônia das lagoas de 0,80m (agosto de 2001).

Lagoas de 0,80 m							
Data	Tempo (dia)	Rd NH ₃ (mgN.L ⁻¹ . dia ⁻¹)			K _{NH₃} (dia ⁻¹)		
		LP-7	LP-8	LP-9	LP-7	LP-8	LP-9
05.08.01	0	-	-	-	-	-	-
06.08.01	1	15,7	16,2	20,7	0,3	0,3	0,3
07.08.01	2	9,5	10,6	9,0	0,2	0,2	0,2
08.08.01	3	6,7	3,9	5,0	0,2	0,1	0,1
09.08.01	4	0,6	3,9	5,0	0,0	0,1	0,2
10.08.01	5	6,2	5,6	5,6	0,3	0,2	0,2
11.08.01	6	0,6	0,6	1,7	0,0	0,0	0,1
12.08.01	7	1,7	3,9	3,4	0,1	0,2	0,2
13.08.01	8	4,5	5,0	5,0	0,3	0,3	0,3
14.08.01	9	3,1	1,1	2,2	0,3	0,1	0,2
15.08.01	10	0,3	4,5	1,1	0,0	0,3	0,1
16.08.01	11	0,6	1,1	0,0	0,1	0,1	0,0
17.08.01	12	2,8	2,2	2,2	0,4	0,2	0,2
18.08.01	13	0,6	1,7	1,1	0,1	0,2	0,2
19.08.01	14	1,1	0,0	0,6	0,2	0,0	0,1
20.08.01	15	2,2	2,2	2,2	0,5	0,4	0,4
21.08.01	16	0,0	0,6	0,0	0,0	0,1	0,0
22.08.01	17	1,1	1,1	0,6	0,4	0,3	0,2
23.08.01	18	1,1	1,7	0,0	0,4	0,5	0,0
24.08.01	19	2,2	1,1	1,1	0,5	0,4	0,4
25.08.01	20	2,2	1,1	0,6	0,4	0,3	0,2
26.08.01	21	0,6	0,0	0,6	0,1	0,0	0,2
27.08.01	22	0,0	0,6	0,0	0,0	0,2	0,0

Os valores médios das constantes das lagoas de 0,80m foram:

Para: LP-7 $\Rightarrow K_{NH_3} = 0,18 \text{ dia}^{-1}$

LP-8 $\Rightarrow K_{NH_3} = 0,18 \text{ dia}^{-1}$

$$LP-9 \Rightarrow K_{NH_3} = 0,17 \text{ d}^{-1}$$

$$K_{NH_3} \text{ médio} = 0,18 \text{ d}^{-1}$$

4.3 LAGOAS DE POLIMENTO EM REGIME DE BATELADA

Depois de testes específicos para determinar a taxa de dessorção de CO_2 e NH_3 da fase líquida de lagoas, foram realizados testes onde estes processos se desenvolviam juntamente com o consumo fotossintético de CO_2 pelas algas. Nestes testes novamente eram operadas lagoas em regime de batelada, com a diferença que, desta vez, estas continham uma mistura de esgoto digerido (90%) e efluente de lagoas de pós-tratamento (10%) com algas. Como já referido no Capítulo 3, havia um conjunto de lagoas (com profundidades de 0,40, 0,60 e 0,80 m) nas quais se mantinha um ambiente aeróbio sem permitir uma expressiva acumulação de oxigênio, reduzindo-se assim a influência do consumo biológico de CO_2 . Em um outro conjunto havia fotossíntese sem limitação e a acumulação de oxigênio era medida diariamente através da adição de sulfito de sódio.

Foi observado não somente a alcalinidade e o pH, o que permitia a avaliação do deslocamento do ponto de equilíbrio químico, mas também os parâmetros ligados especificamente com a dessorção de NH_3 e (no segundo conjunto) com o consumo fotossintético de CO_2 . Para avaliar a dessorção foi determinada a variação da concentração de nitrogênio amoniacal nas lagoas em função do tempo. O consumo biológico de CO_2 era avaliado a partir da produção de OD nas lagoas, que por sua vez esse OD era determinado pela introdução de sulfito de sódio para sua redução. A taxa de dessorção era avaliada a partir da variação da soma da alcalinidade e da acidez conforme explicado no Capítulo 3.

As Tabelas 4.19 a 4.24, mostram os resultados do primeiro conjunto de lagoas (com limitação de fotossíntese) em dois experimentos realizados em maio e em outubro de 2001. Os seguintes dados e cálculos são apresentados nas colunas (1) a (12):

- (1) data da realização dos testes.
- (2) período percorrido desde o início do teste (dia).
- (3) alcalinidade da lagoa após suave mistura (meq/L).
- (4) pH da lagoa.

- (5) acidez calculada a partir da Equação de Deffeyes (meq/L).
- (6) concentração de amônia em mgN/L (ambas as formas: ionizada e gasosa).
- (7) taxa de dessorção de amônia calculada como a razão entre a concentração de amônia total em dois testes consecutivos e o intervalo entre estes testes (mmol/L/dia).
- (8) concentração de espécies carbônicas calculada como a metade da soma da alcalinidade e da acidez (em mmol/L).
- (9) taxa de dessorção de CO₂ como a taxa de variação de espécies carbônicas (supõe-se que a dessorção é o único processo a diminuir a concentração das espécies carbônicas)
- (10) a alcalinidade teórica calculada como a diferença entre a alcalinidade original e a concentração de amônia dessorvida.
- (11) a acidez teórica como a diferença entre a acidez original e os efeitos da dessorção de CO₂ (cada mmol dessorvido reduz a acidez em 2 mmol e cada mmol de amônia dessorvido aumenta a acidez em 1 mmol).
- (12) o pH teórico: este pode ser calculado a partir da alcalinidade e a acidez teóricas usando-se a expressão de Deffeyes (Equação 2.7b).

Desse modo tem-se em cada um dos experimentos valores experimentais da alcalinidade, do pH e da acidez em função do tempo.

Nas Figuras 4.1 a 4.3 foram observados os valores dos parâmetros experimentais e teóricos para as três profundidades das lagoas no experimento de maio de 2001. As Figuras 4.4 a 4.6 mostram as mesmas relações para o experimento em outubro de 2001.

Nos testes do segundo conjunto de lagoas havia fotossíntese sem limitação artificial e conseqüentemente tinha uma acumulação de OD que era determinada pela adição diária de sulfito. A partir da acumulação de OD foi calculada a taxa de produção de oxigênio que era igualada à taxa de remoção biológica de CO₂. A taxa de dessorção de CO₂ era estimada a partir da variação da concentração de espécies carbônicas (calculada a partir dos valores de alcalinidade e da acidez), subtraindo-se a taxa de remoção devido ao consumo biológico de CO₂.

Nas Tabelas 4.25 a 4.30 tem-se os dados experimentais de dois experimentos, realizados em maio e em outubro de 2001. Foram determinados os valores experimentais da alcalinidade e do pH permitindo o cálculo da acidez. Também foram determinadas a taxa de acumulação de oxigênio (igual à taxa de consumo biológico de CO_2) e a taxa de dessorção de NH_3 a partir da diminuição da concentração de nitrogênio amoniacal. Para estimar a taxa do terceiro processo, a dessorção de CO_2 foi determinado primeiro a taxa de variação da concentração de espécies carbonáceas e subtrai-se desta taxa a taxa consumo de CO_2 . Com auxílio das três taxas pode-se calcular a variação da alcalinidade, da acidez e do pH, como já foi demonstrado.

Novamente podem-se calcular os valores teóricos da alcalinidade, da acidez e do pH seguindo o roteiro já explicado para o caso de lagoas com fotossíntese limitada. Os valores experimentais estão nas colunas 12, 13 e 14.

Nas Figuras 4.7 a 4.12 são observados os valores experimentais e teóricos de alcalinidade, acidez e pH nas lagoas sem limitação de fotossíntese, para as lagoas de 0,40, 0,60 e 0,80 m de profundidade e para os experimentos de maio e de outubro de 2001.

**Tabela 4.1 – Valores de pH, alcalinidade e concentrações de amônia em função do tempo na lagoa de batelada com profundidade de 0,40 m (maio de 2001).
Operação com limitação da fotossíntese.**

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Data	Tempo (dia)	Alc. Med (meq/L)	pH med	Ac “obs” (meq/L)	NH ₃ med (mg/L)	Rd NH ₃ (meq/L/dia)	(Alc + Ac)/2 (mmol/L)	Rd CO ₂ (mmol/L/dia)	Alc Teor	Ac Teor	pH Teor
17.05.01	0	7,3	7,0	10,4	39,2		8,9		7,3	10,4	7,0
18.05.01	1	7,2	7,3	8,7	38,6	0,0	8,0	-0,9	7,3	8,7	7,4
19.05.01	2	6,9	7,9	7,2	36,4	0,2	7,1	-0,9	7,1	7,0	8,5
20.05.01	3	6,8	7,9	7,1	35,3	0,1	7,0	-0,1	7,0	6,9	8,5
21.05.01	4	6,7	8,3	6,7	35,3	0,0	6,7	-0,2	7,0	6,4	9,1
22.05.01	5	6,5	8,3	6,5	28,6	0,5	6,5	-0,2	6,5	6,5	8,5
23.05.01	6	6,5	8,3	6,5	28,6	0,0	6,5	0,0	6,5	6,5	8,5
24.05.01	7	6,2	8,4	6,2	26,3	0,2	6,2	-0,3	6,4	6,0	8,9
25.05.01	8	6,0	8,3	6,0	25,2	0,1	6,0	-0,2	6,3	5,7	9,1
26.05.01	9	5,8	8,2	5,9	21,8	0,2	5,8	-0,2	6,1	5,6	9,0
27.05.01	10	5,6	8,1	5,7	20,2	0,1	5,7	-0,2	5,9	5,4	9,1
28.05.01	11	5,1	8,4	5,1	16,2	0,3	5,1	-0,6	5,7	4,5	9,5
29.05.01	12	5,0	8,4	5,0	14,6	0,1	5,0	-0,1	5,5	4,4	9,5
30.05.01	13	5,1	8,4	5,1	14,6	0,0	5,1	0,1	5,5	4,6	9,3
31.05.01	14	4,8	8,3	4,8	12,3	0,2	4,8	-0,3	5,4	4,2	9,5
01.06.01	15	4,8	8,3	4,8	11,8	0,0	4,8	0,0	5,3	4,3	9,4

**Tabela 4.2 – Valores de pH, alcalinidade e concentrações de amônia em função do tempo na lagoa de batelada com profundidade de 0,60 m (maio de 2001).
Operação com limitação da fotossíntese.**

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Data	Tempo (dia)	Alc. Med (meq/L)	pH med	Ac "obs" (meq/L)	NH ₃ med (mg/L)	Rd NH ₃ (meq/L/dia)	(Alc + Ac)/2 (mmol/L)	Rd CO ₂ (mmol/L/dia)	Alc Teor	Ac Teor	pH Teor
17.05.01	0	7,3	7,0	10,4	39,2		8,9		7,3	10,4	7,0
18.05.01	1	7,3	7,1	9,8	38,6	0,0	8,5	-0,3	7,3	9,8	7,1
19.05.01	2	6,8	7,6	7,5	38,6	0,0	7,2	-1,4	7,3	7,0	8,7
20.05.01	3	6,8	7,9	7,1	37,0	0,1	7,0	-0,2	7,1	6,8	8,8
21.05.01	4	6,6	8,1	6,7	36,4	0,0	6,7	-0,3	7,1	6,2	9,2
22.05.01	5	6,5	8,1	6,6	30,8	0,4	6,6	-0,1	6,7	6,4	8,7
23.05.01	6	6,6	8,1	6,7	30,8	0,0	6,7	0,1	6,7	6,6	8,4
24.05.01	7	6,5	8,2	6,6	30,2	0,0	6,5	-0,1	6,7	6,4	8,7
25.05.01	8	6,4	8,3	6,4	21,3	0,6	6,4	-0,1	6,0	6,8	7,5
26.05.01	9	6,1	8,0	6,3	25,2	-0,3	6,2	-0,2	6,3	6,1	8,7
27.05.01	10	6,1	8,0	6,3	25,2	0,0	6,2	0,0	6,3	6,1	8,7
28.05.01	11	5,8	8,2	5,9	23,5	0,1	5,8	-0,4	6,2	5,5	9,2
29.05.01	12	5,4	8,2	5,5	23,0	0,0	5,4	-0,4	6,1	4,7	9,5
30.05.01	13	5,4	8,4	5,4	22,4	0,0	5,4	0,0	6,1	4,7	9,5
31.05.01	14	5,3	8,3	5,3	20,2	0,2	5,3	-0,1	5,9	4,7	9,5
01.06.01	15	5,2	8,3	5,2	19,0	0,1	5,2	-0,1	5,9	4,6	9,5
05.06.01	19	4,2	8,3	4,2	10,6	0,2	4,2	-0,3	5,3	3,2	9,9
07.06.01	21	4,0	8,2	4,0	6,2	0,2	4,0	-0,1	4,9	3,1	9,8
08.06.01	22	3,9	8,2	3,9	6,2	0,0	3,9	-0,1	4,9	2,9	9,9
09.06.01	23	4,0	7,7	4,3	4,8	0,1	4,2	0,2	4,8	3,5	9,6
10.06.01	24	3,8	7,7	4,1	3,9	0,1	4,0	-0,2	4,8	3,1	9,8
11.06.01	25	3,7	7,7	4,0	3,4	0,0	3,8	-0,1	4,7	3,0	9,8
12.06.01	26	3,5	7,7	3,8	1,1	0,2	3,6	-0,2	4,6	2,7	9,9
14.06.01	28	3,2	7,7	3,5	0,6	0,0	3,3	-0,2	4,5	2,1	10,1

**Tabela 4.3 – Valores de pH, alcalinidade e concentrações de amônia em função do tempo na lagoa de batelada com profundidade de 0,80 m (maio de 2001).
Operação com limitação da fotossíntese.**

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Data	Tempo (dia)	Alc. Med (meq/L)	pH med	Ac “obs” (meq/L)	NH ₃ med (mg/L)	Rd NH ₃ (meq/L/dia)	(Alc + Ac)/2 (mmol/L)	Rd CO ₂ (mmol/L/dia)	Alc Teor	Ac Teor	pH Teor
17.05.01	0	7,3	7,0	10,4	39,2		8,9		7,3	10,4	7,0
18.05.01	1	7,5	7,1	10,0	39,2	0,0	8,8	-0,1	7,3	10,2	7,0
19.05.01	2	6,9	7,2	8,7	38,1	0,1	7,8	-0,9	7,2	8,4	7,4
20.05.01	3	7,2	7,5	8,1	38,1	0,0	7,7	-0,1	7,2	8,1	7,5
21.05.01	4	7,0	7,8	7,4	38,1	0,0	7,2	-0,5	7,2	7,2	8,4
22.05.01	5	7,1	8,0	7,3	35,3	0,2	7,2	0,0	7,0	7,4	7,9
23.05.01	6	7,0	8,1	7,2	34,7	0,0	7,1	-0,1	7,0	7,2	8,1
24.05.01	7	6,5	8,1	6,6	30,8	0,3	6,6	-0,5	6,7	6,4	8,7
25.05.01	8	6,7	8,2	6,8	29,7	0,1	6,7	0,2	6,6	6,9	8,0
26.05.01	9	6,7	8,1	6,8	28,0	0,1	6,8	0,0	6,5	7,0	7,7
27.05.01	10	6,5	8,1	6,6	27,4	0,0	6,6	-0,2	6,5	6,7	8,0
28.05.01	11	6,3	8,3	6,3	27,4	0,0	6,3	-0,3	6,5	6,2	8,8
29.05.01	12	6,0	8,2	6,1	22,4	0,4	6,0	-0,3	6,1	6,0	8,6
30.05.01	13	6,3	8,3	6,3	22,4	0,0	6,3	0,3	6,1	6,5	7,8

Tabela 4.21 – Valores de pH, alcalinidade e concentrações de amônia em função do tempo na lagoa de batelada com profundidade de 0,80 m (maio de 2001).
Operação com limitação da fotossíntese (continuação).

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Data	Tempo (dia)	Alc. Med (meq/L)	pH med	Ac "obs" (meq/L)	NH ₃ med (mg/L)	Rd NH ₃ (meq/L/dia)	(Alc + Ac)/2 (mmol/L)	Rd CO ₂ (mmol/L/dia)	Alc Teor	Ac Teor	pH Teor
31.05.01	14	6,1	8,2	6,2	24,1	-0,1	6,1	-0,2	6,2	6,1	8,6
01.06.01	15	5,9	8,2	6,0	22,4	0,1	5,9	-0,2	6,1	5,8	8,8
05.06.01	19	5,7	8,2	5,8	17,9	0,1	5,7	-0,1	5,8	5,7	8,5
07.06.01	21	5,2	8,2	5,3	14,0	0,1	5,2	-0,3	5,5	5,0	9,1
08.06.01	22	5,0	8,3	5,0	11,8	0,2	5,0	-0,2	5,3	4,7	9,2
09.06.01	23	4,9	8,1	5,0	10,6	0,1	5,0	-0,1	5,3	4,7	9,2
10.06.01	24	4,6	8,1	4,7	8,4	0,2	4,7	-0,3	5,1	4,2	9,4
11.06.01	25	4,6	7,9	4,8	7,8	0,0	4,7	0,1	5,1	4,4	9,3
12.06.01	26	4,6	7,9	4,8	7,3	0,0	4,7	0,0	5,0	4,4	9,2
14.06.01	28	4,4	7,8	4,7	6,2	0,0	4,5	-0,1	4,9	4,1	9,3
15.06.01	29	4,3	7,7	4,6	5,6	0,0	4,5	-0,1	4,9	4,0	9,4
16.06.01	30	4,2	7,8	4,5	5,0	0,0	4,3	-0,1	4,9	3,8	9,5
17.06.01	31	4,1	7,8	4,4	3,9	0,1	4,2	-0,1	4,8	3,7	9,5
18.06.01	32	4,0	8,0	4,1	2,8	0,1	4,1	-0,2	4,7	3,4	9,6
19.06.01	33	3,6	7,9	3,8	1,1	0,1	3,7	-0,4	4,6	2,8	9,9
20.06.01	34	3,7	8,0	3,8	0,6	0,0	3,8	0,1	4,5	3,0	9,8
21.06.01	35	3,6	8,2	3,6	0,6	0,0	3,6	-0,1	4,5	2,7	9,9
22.06.01	36	3,6	8,1	3,7	0,6	0,0	3,6	0,0	4,5	2,7	9,9
24.06.01	38	3,7	8,2	3,7	0,6	0,0	3,7	0,0	4,5	2,9	9,8

**Tabela 4.4 – Valores de pH, alcalinidade e concentrações de amônia em função do tempo na lagoa de batelada com profundidade de 0,40 m (outubro de 2001).
Operação com limitação da fotossíntese.**

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Data	Tempo (dia)	Alc. Med (meq/L)	pH med	Ac “obs” (meq/L)	NH₃ med (mg/L)	Rd NH₃ (meq/L/dia)	(Alc + Ac)/2 (mmol/L)	Rd CO₂ (mmol/L/dia)	Alc Teor	Ac Teor	pH Teor
24.09.01	0	9,1	7,0	13,0	56,0		11,0		9,1	13,0	7,0
26.09.01	2	8,3	7,7	9,0	54,9	0,0	8,6	-1,2	9,0	8,2	9,0
28.09.01	4	8,1	8,0	8,4	44,8	0,4	8,2	-0,2	8,3	8,2	8,5
29.09.01	5	7,7	7,9	8,1	40,3	0,3	7,9	-0,4	8,0	7,8	8,6
30.09.01	6	7,7	8,0	8,0	33,6	0,5	7,8	0,0	7,5	8,2	7,7
01.10.01	7	6,4	8,1	6,5	29,1	0,3	6,5	-1,4	7,2	5,8	9,4
02.10.01	8	6,4	8,1	6,5	29,1	0,0	6,5	0,0	7,2	5,8	9,4
03.10.01	9	6,3	7,9	6,6	23,5	0,4	6,4	0,0	6,8	6,1	9,1

Tabela 4.5 – Valores de pH, alcalinidade e concentrações de amônia em função do tempo na lagoa de batelada com profundidade de 0,60 m (outubro de 2001).
Operação com limitação da fotossíntese.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Data	Tempo (dia)	Alc. Med (meq/L)	pH med	Ac "obs" (meq/L)	NH ₃ med (mg/L)	Rd NH ₃ (meq/L/dia)	(Alc + Ac)/2 (mmol/L)	Rd CO ₂ (mmol/L/dia)	Alc Teor	Ac Teor	pH Teor
24.09.01	0	9,0	6,9	13,0	58,8		11,0		9,1	13,0	7,0
26.09.01	2	8,4	7,4	9,8	55,4	0,1	9,1	-1,0	8,9	9,3	7,9
28.09.01	4	8,1	7,6	8,9	53,8	0,1	8,5	-0,3	8,7	8,3	8,8
29.09.01	5	7,9	7,7	8,5	46,5	0,5	8,2	-0,3	8,2	8,2	8,4
30.09.01	6	7,8	7,8	8,3	44,8	0,1	8,0	-0,2	8,1	8,0	8,5
01.10.01	7	7,3	7,9	7,6	40,3	0,3	7,5	-0,6	7,8	7,2	9,0
02.10.01	8	7,1	7,9	7,4	38,1	0,2	7,3	-0,2	7,6	6,9	9,1
03.10.01	9	7,0	7,9	7,3	33,6	0,3	7,2	-0,1	7,3	7,0	8,7
04.10.01	10	6,5	8,1	6,6	33,6	0,0	6,6	-0,6	7,3	5,8	9,4
05.10.01	11	6,6	8,0	6,8	33,0	0,0	6,7	0,1	7,3	6,2	9,3
06.10.01	12	6,4	8,1	6,5	30,2	0,2	6,5	-0,2	7,1	5,9	9,4
07.10.01	13	6,3	7,8	6,7	26,3	0,3	6,5	0,0	6,8	6,2	9,0
08.10.01	14	6,2	8,0	6,4	24,1	0,2	6,3	-0,2	6,6	6,0	9,1
09.10.01	15	6,0	8,2	6,1	23,8	0,0	6,0	-0,3	6,6	5,5	9,4
11.10.01	17	6,0	8,2	6,1	23,8	0,0	6,0	0,0	6,6	5,5	9,4
13.10.01	19	5,9	8,0	6,1	19,0	0,1	6,0	0,0	6,3	5,7	9,0
14.10.01	20	5,9	8,3	5,9	18,5	0,0	5,9	-0,1	6,2	5,6	9,1
15.10.01	21	5,3	8,2	5,4	16,2	0,2	5,3	-0,6	6,1	4,6	9,5

**Tabela 4.6 – Valores de pH, alcalinidade e concentrações de amônia em função do tempo na lagoa de batelada com profundidade de 0,80 m (outubro de 2001).
Operação com limitação da fotossíntese.**

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Data	Tempo (dia)	Alc. Med (meq/L)	pH med	Ac “obs” (meq/L)	NH ₃ med (mg/L)	Rd NH ₃ (meq/L/dia)	(Alc + Ac)/2 (mmol/L)	Rd CO ₂ (mmol/L/dia)	Alc Teor	Ac Teor	pH Teor
24.09.01	0	9,1	7,0	13,0	56,0		11,4		9,1	13,7	7,0
26.09.01	2	8,7	7,2	11,0	56,0	0,0	9,9	-0,6	9,1	10,6	7,4
28.09.01	4	8,6	7,3	10,4	55,0	0,0	9,5	-0,2	9,1	9,8	7,6
29.09.01	5	8,5	7,4	9,9	53,0	0,1	9,2	-0,3	8,9	9,6	7,8
30.09.01	6	8,1	7,6	8,9	53,0	0,0	8,5	-0,7	8,9	8,2	9,0
01.10.01	7	8,4	7,8	8,9	48,0	0,4	8,7	0,1	8,5	8,9	8,0
02.10.01	8	8,2	7,9	8,6	45,0	0,2	8,4	-0,3	8,3	8,6	8,2
03.10.01	9	7,9	7,7	8,5	40,0	0,3	8,2	-0,2	8,0	8,5	7,8
04.10.01	10	7,7	7,9	8,1	40,0	0,0	7,9	-0,3	7,9	7,7	8,6
05.10.01	11	7,3	8,1	7,5	32,0	0,5	7,4	-0,5	7,4	7,4	8,4
07.10.01	13	7,2	8,2	7,3	33,0	0,0	7,2	-0,1	7,5	7,0	8,9
08.10.01	14	6,6	7,8	7,0	29,0	0,3	6,8	-0,4	7,2	6,3	9,1
09.10.01	15	6,4	8,0	6,6	28,0	0,1	6,5	-0,3	7,1	6,0	9,4
11.10.01	17	6,5	8,2	6,6	25,0	0,2	6,5	0,0	6,9	6,3	9,1
13.10.01	19	6,0	8,4	6,0	24,0	0,0	6,0	-0,6	6,8	5,2	9,6
14.10.01	20	5,9	8,4	5,9	19,0	0,1	5,9	0,0	6,5	5,3	9,4
15.10.01	21	5,6	8,6	5,5	18,0	0,1	5,5	-0,4	6,4	4,6	9,6
17.10.01	23	5,0	8,3	5,0	11,8	0,2	5,0	-0,3	5,3	4,7	9,7
18.10.01	24	4,9	8,1	5,0	10,6	0,1	5,0	-0,1	5,9	4,1	9,7
19.10.01	25	4,6	8,1	4,7	8,4	0,2	4,7	-0,3	5,7	3,6	9,8
22.10.01	27	4,6	7,9	4,8	7,3	0,0	4,7	0,0	5,6	3,8	9,7
23.10.01	28	4,4	7,8	4,7	6,2	0,1	4,5	-0,2	5,5	3,5	9,8
24.10.01	29	4,3	7,7	4,6	5,6	0,0	4,5	-0,1	5,5	3,4	9,8

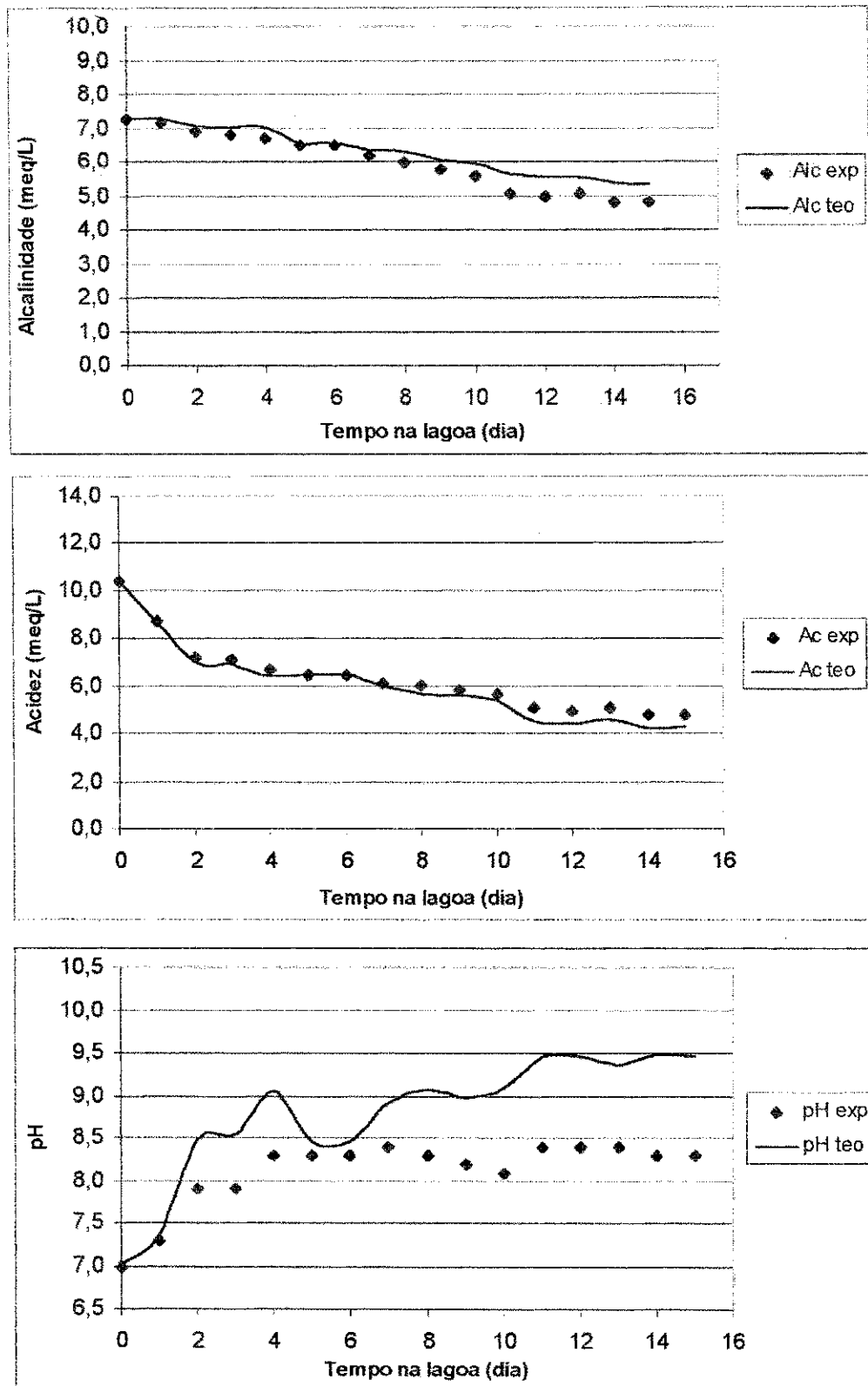


Figura 4.1 – Alcalinidade, pH e acidez experimentais e teóricos em lagoas de polimento com limitação fotossintética em regime de batelada operada em maio de 2001 (dados da Tabela 4.19). Profundidade de 0,40 m.

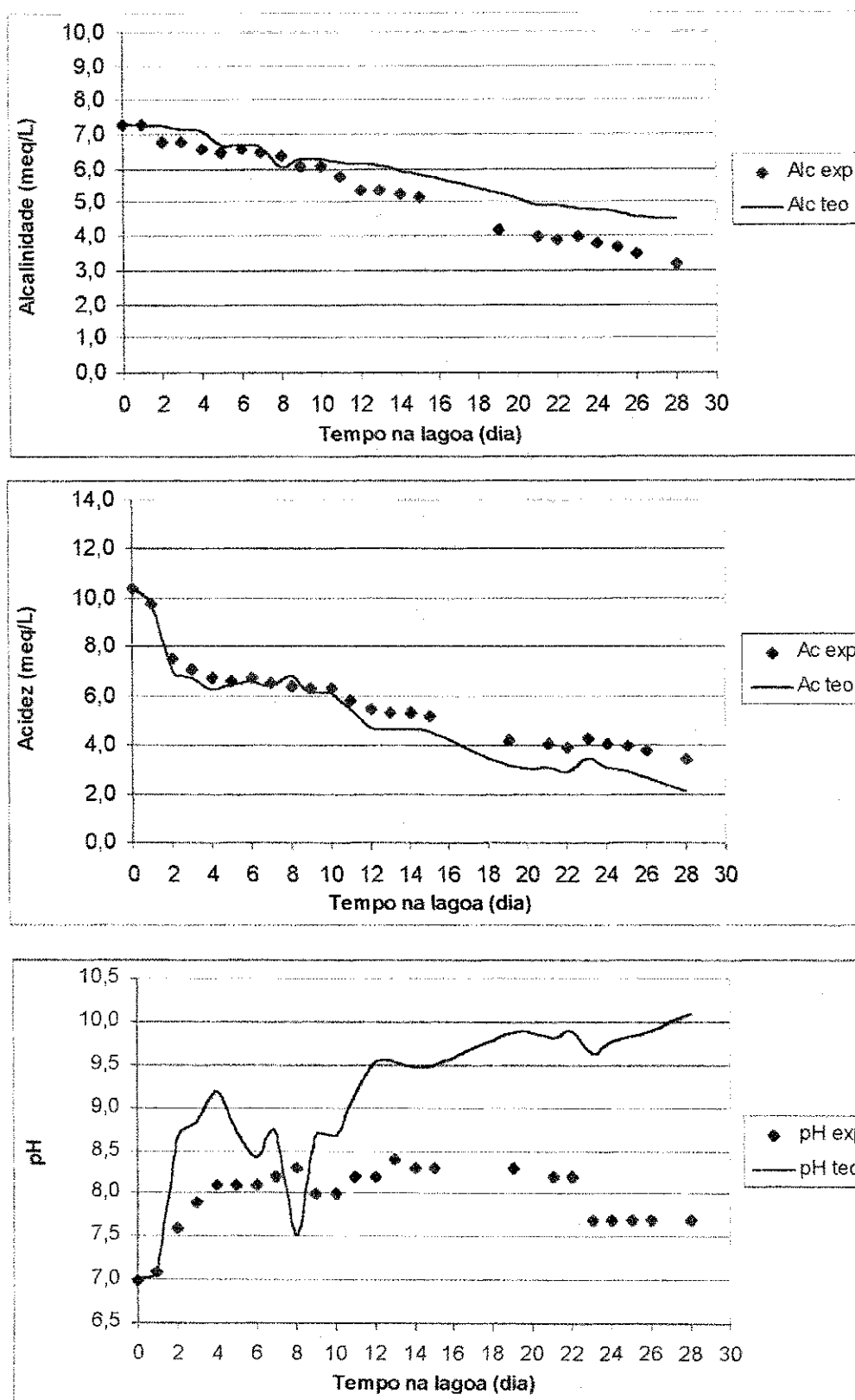


Figura 4.2 – Alcalinidade, pH e acidez experimentais e teóricos em lagoas de polimento com limitação fotossintética em regime de batelada operada em maio de 2001 (dados da Tabela 4.20). Profundidade de 0,60 m.

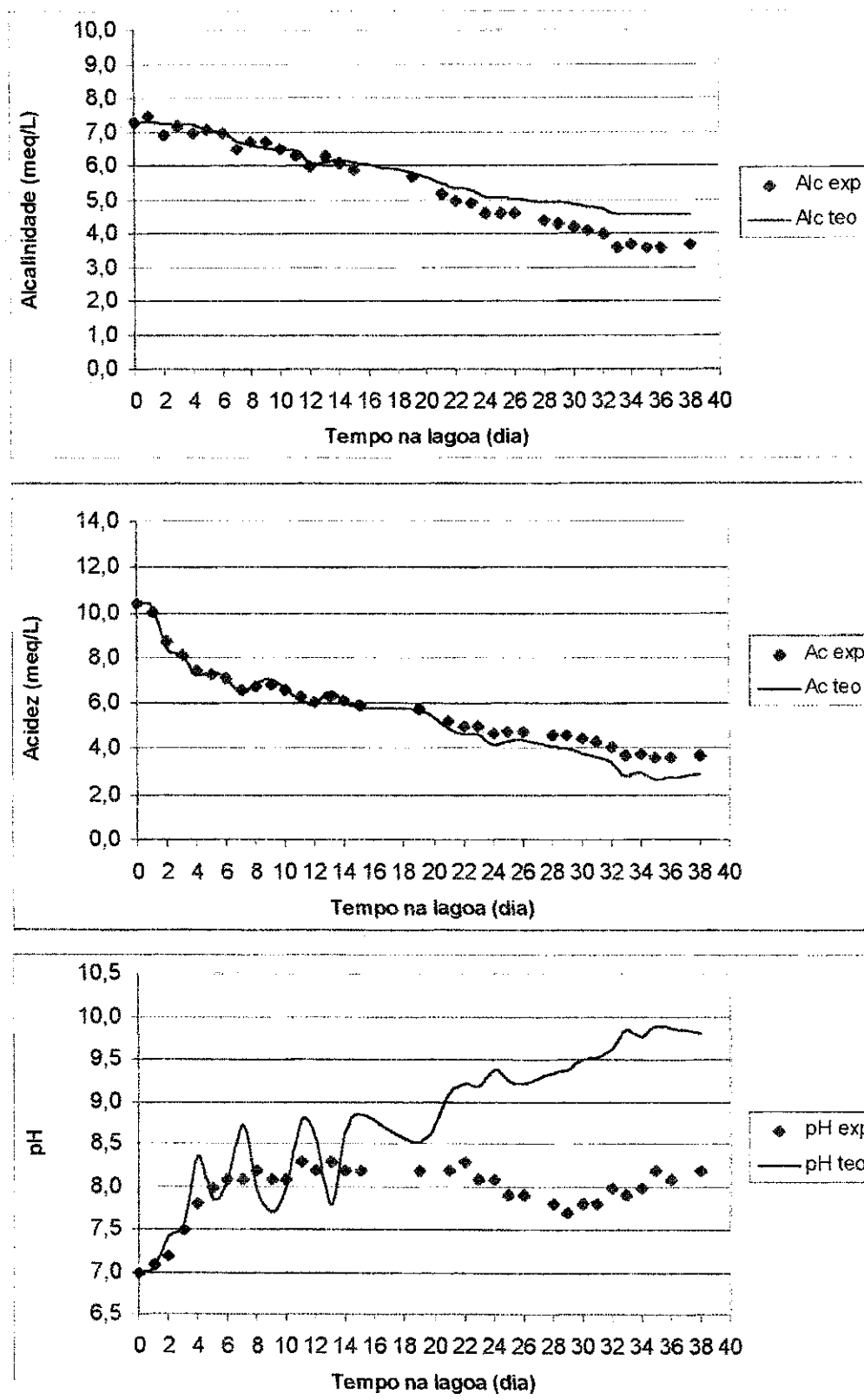


Figura 4.3 – Alcalinidade, pH e acidez experimentais e teóricos em lagoas de polimento com limitação fotossintética em regime de batelada operada em maio de 2001 (dados da Tabela 4.21). Profundidade de 0,80 m.

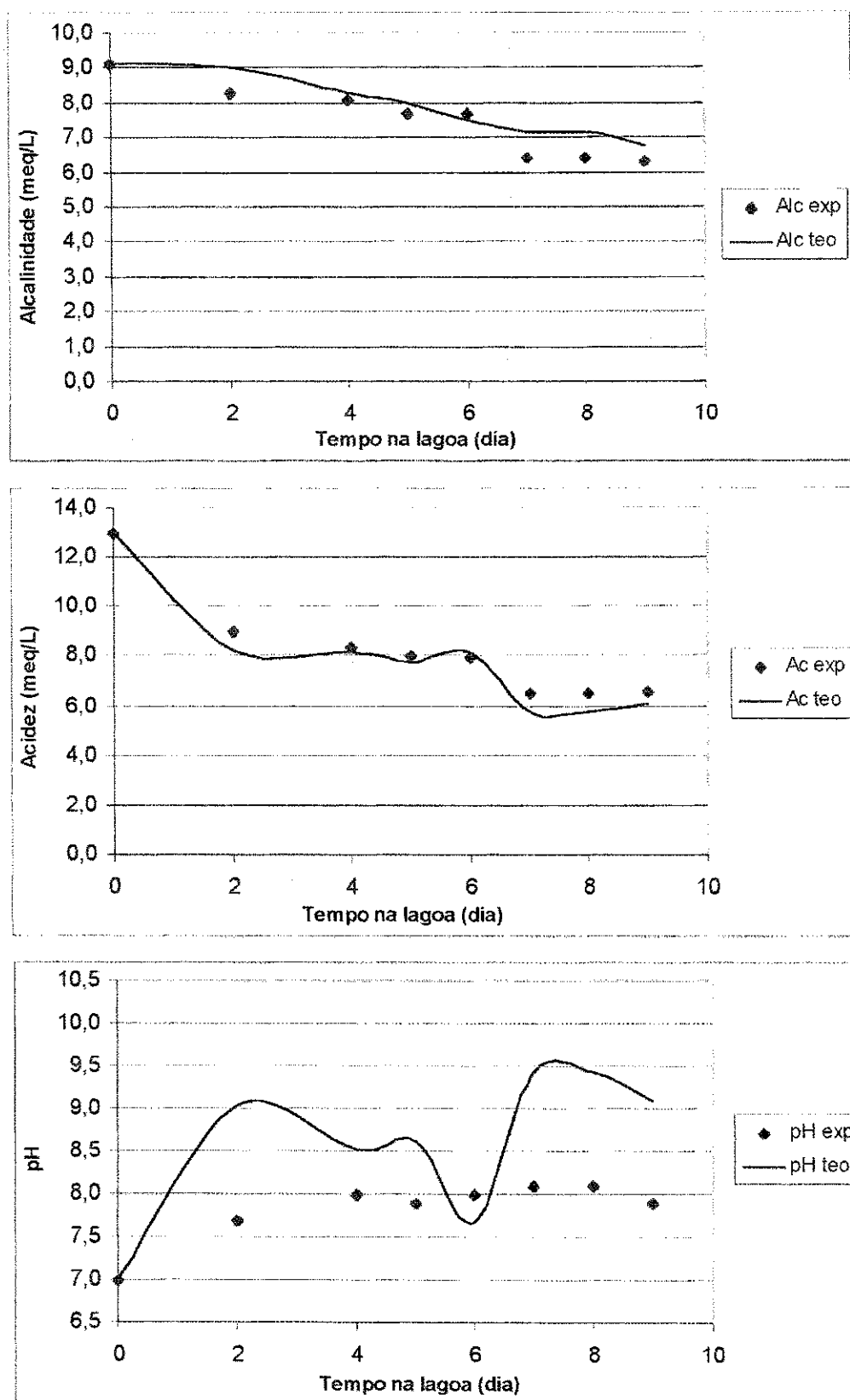


Figura 4.4 – Alcalinidade, pH e acidez experimentais e teóricos em lagoas de polimento com limitação fotossintética em regime de batelada operada em outubro de 2001 (dados da Tabela 4.22). Profundidade de 0,40 m.

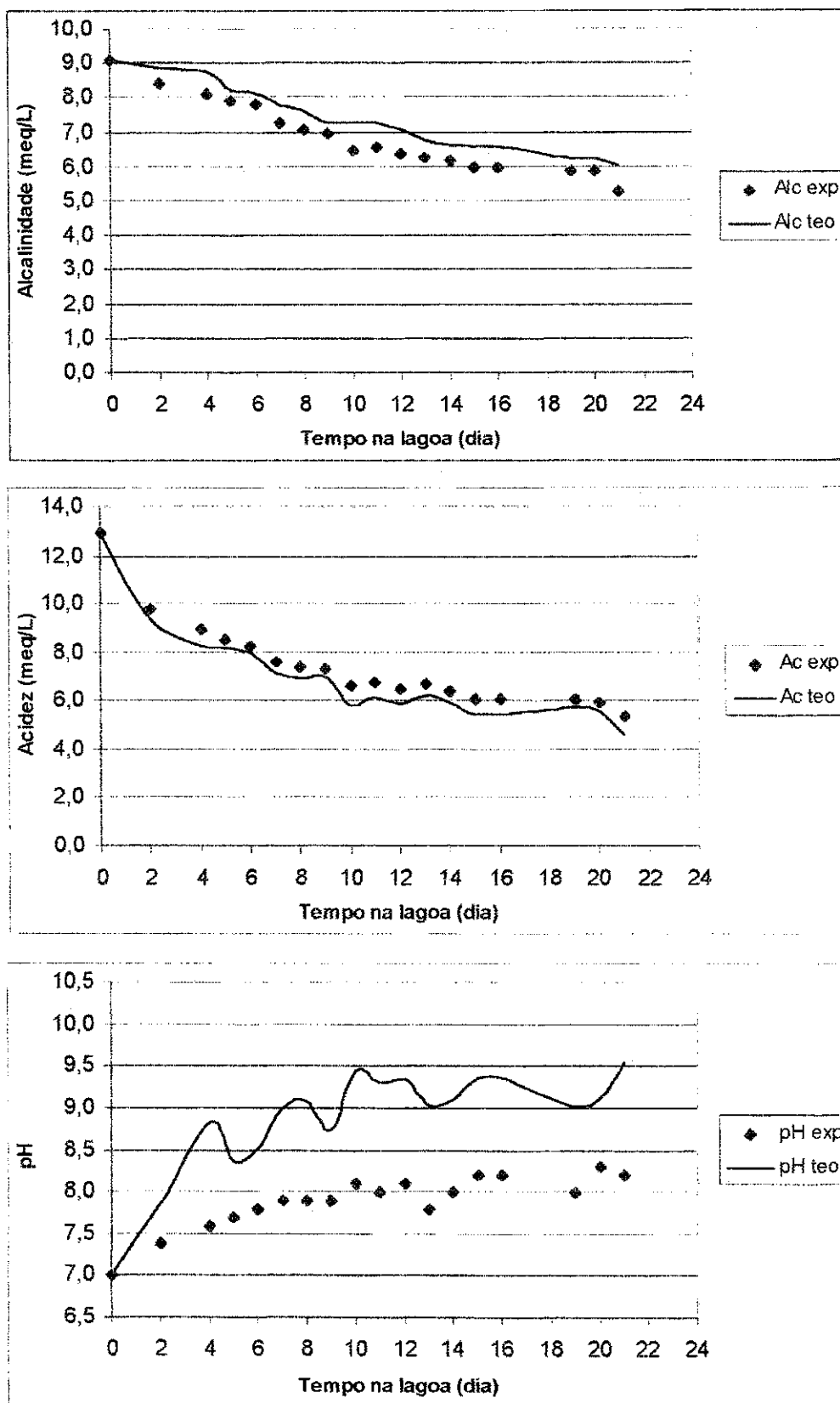


Figura 4.5 – Alcalinidade, pH e acidez experimentais e teóricos em lagoas de polimento com limitação fotossintética em regime de batelada operada em outubro de 2001 (dados da Tabela 4.23). Profundidade de 0,60 m.

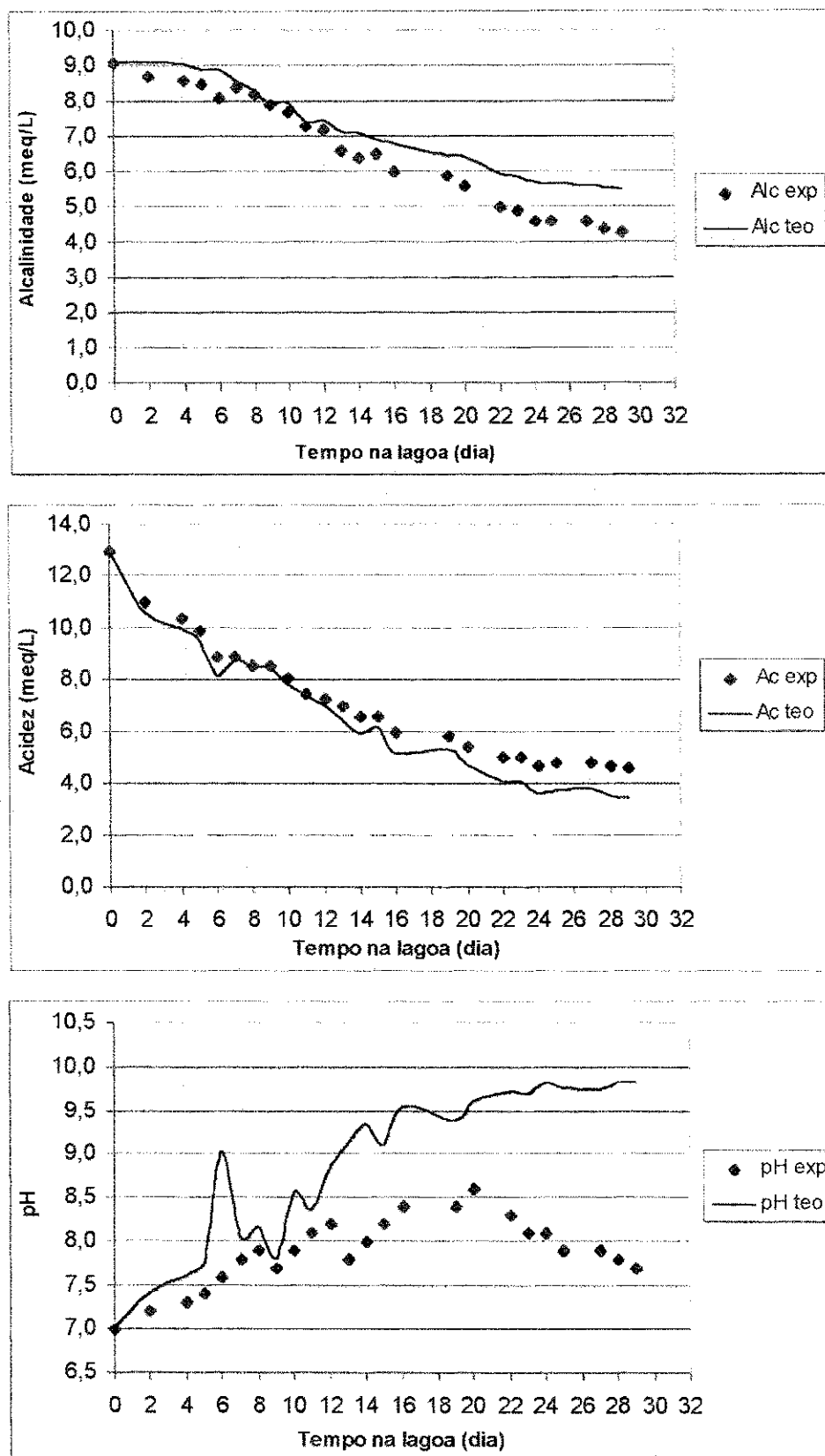


Figura 4.6 – Alcalinidade, pH e acidez experimentais e teóricos em lagoas de polimento com limitação fotossintética em regime de batelada operada em outubro de 2001 (dados da Tabela 4.24). Profundidade de 0,80 m.

Tabela 4.7 – Valores de pH, alcalinidade, OD e concentrações de amônia em função do tempo na lagoa de batelada com profundidade de 0,40 m (maio de 2001).
Operação sem limitação da fotossíntese.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Data	Tempo (dia)	Alc. Med (meq/L)	pH med	Ac "obs" (meq/L)	NH ₃ med (mg/L)	OD acc (mg/L)	OD acc (mmol/L)	R foto (mmol/L/dia)	Rd NH ₃ (meq/L/dia)	Rd CO ₂ (mmol/L/dia)	Alc Teor	Ac Teor	pH Teor
17.05.01	0	7,3	7,0	10,4	39,2	0,0	0,0			0,0	7,3	10,4	7,0
18.05.01	1	7,3	7,3	8,8	39,2	2,8	0,1	0,1	0,0	0,7	7,3	8,8	7,3
19.05.01	2	7,0	8,1	7,2	34,2	22,4	0,7	0,6	0,4	0,4	6,9	7,2	8,0
20.05.01	3	6,4	8,3	6,4	31,4	35,6	1,1	0,4	0,2	0,3	6,7	6,1	9,1
21.05.01	4	6,3	8,4	6,3	27,4	45,7	1,4	0,3	0,3	-0,2	6,4	6,1	8,9
22.05.01	5	6,1	8,4	6,1	23,5	53,7	1,7	0,3	0,3	-0,1	6,2	6,0	8,7
23.05.01	6	6,1	8,5	6,0	21,3	50,4	1,6	-0,1	0,2	0,1	6,0	6,1	8,2
24.05.01	7	6,0	8,4	6,0	17,9	48,2	1,5	-0,1	0,2	0,1	5,8	6,2	7,8
25.05.01	8	5,2	8,4	5,2	17,9	48,3	1,5	0,0	0,0	0,8	5,8	4,6	9,5
26.05.01	9	5,1	8,4	5,1	10,1	54,8	1,7	0,2	0,6	-0,1	5,2	4,9	8,8
27.05.01	10	4,9	8,5	4,8	9,0	51,6	1,6	-0,1	0,1	0,3	5,1	4,6	9,1
28.05.01	11	4,4	8,8	4,2	6,7	56,1	1,8	0,1	0,2	0,4	5,0	3,6	9,6
29.05.01	12	4,2	9,0	3,9	5,0	60,5	1,9	0,1	0,1	0,2	4,8	3,2	9,8
30.05.01	13	4,4	9,1	3,9	4,5	80,7	2,5	0,6	0,0	-0,8	4,8	3,5	9,6
31.05.01	14	4,2	9,3	3,5	2,8	98,7	3,1	0,6	0,1	-0,3	4,7	3,0	9,8
01.06.01	15	4,2	9,4	3,4	1,7	134,5	4,2	1,1	0,1	-1,0	4,6	3,0	9,8

Tabela 4.8 – Valores de pH, alcalinidade, OD e concentrações de amônia em função do tempo na lagoa de batelada com profundidade de 0,60 m (maio de 2001).
Operação sem limitação da fotossíntese.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Data	Tempo (dia)	Alc. Med (meq/L)	pH med	Ac "obs" (meq/L)	NH ₃ med (mg/L)	OD acc (mg/L)	OD acc (mmol/L)	R foto (mmol/L/dia)	Rd NH ₃ (meq/L/dia)	Rd CO ₂ (mmol/L/dia)	Alc Teor	Ac Teor	pH Teor
17.05.01	0	7,3	7,0	10,4	39,2	0,0					7,3	10,4	7,0
18.05.01	1	7,3	7,1	9,8	39,2	0,3	0,0	0,0	0,0	0,3	7,3	9,8	7,1
19.05.01	2	7,1	7,6	7,8	38,6	5,4	0,2	0,2	0,0	0,9	7,3	7,7	7,8
20.05.01	3	7,0	7,8	7,4	36,4	18,5	0,6	0,4	0,2	-0,2	7,1	7,3	8,0
21.05.01	4	6,7	8,1	6,8	29,1	24,6	0,8	0,2	0,5	0,3	6,6	7,0	7,8
22.05.01	5	6,4	8,4	6,4	28,6	50,1	1,6	0,8	0,0	-0,4	6,5	6,2	8,8
23.05.01	6	6,3	8,7	6,1	26,3	50,5	1,6	0,0	0,2	0,2	6,4	6,0	8,9
24.05.01	7	5,9	8,8	5,6	22,4	51,0	1,6	0,0	0,3	0,4	6,1	5,4	9,2
25.05.01	8	5,3	9,0	4,9	12,9	69,9	2,2	0,6	0,7	0,1	5,4	4,7	9,2
26.05.01	9	5,1	9,0	4,7	12,9	74,5	2,3	0,1	0,0	0,0	5,4	4,4	9,4
27.05.01	10	4,8	9,1	4,3	11,2	97,8	3,1	0,7	0,1	-0,4	5,3	3,8	9,6
28.05.01	11	4,5	9,2	3,9	8,4	97,4	3,0	0,0	0,2	0,4	5,1	3,3	9,8
29.05.01	12	4,2	9,3	3,5	5,6	98,6	3,1	0,0	0,2	0,3	4,9	2,8	9,9
30.05.01	13	4,5	9,2	3,9	5,6	98,7	3,1	0,0	0,0	-0,3	4,9	3,5	9,6
31.05.01	14	4,2	9,1	3,7	5,0	106,4	3,3	0,2	0,0	0,0	4,9	3,1	9,8
01.06.01	15	4,3	8,9	4,0	3,9	93,9	2,9	-0,4	0,1	0,2	4,8	3,5	9,6
05.06.01	19	4,4	8,8	4,2	3,9	91,1	2,8	-0,4	0,0	0,3	4,8	3,8	9,5
07.06.01	21	4,5	8,3	4,5	4,5	86,7	2,7	-0,3	0,0	0,2	4,8	4,2	9,2
08.06.01	22	4,5	8,0	4,6	3,9	90,9	2,8	0,1	0,0	-0,2	4,8	4,3	9,1
09.06.01	23	4,7	8,1	4,8	3,9	100,4	3,1	0,3	0,0	-0,5	4,8	4,7	8,7
10.06.01	24	4,6	8,3	4,6	3,4	95,4	3,0	-0,2	0,0	0,3	4,8	4,4	9,1
11.06.01	25	4,5	8,7	4,3	3,4	115,8	3,6	0,6	0,0	-0,4	4,8	4,0	9,3
12.06.01	26	4,6	8,8	4,4	2,8	103,1	3,2	-0,4	0,0	0,3	4,8	4,2	9,2
14.06.01	28	4,4	8,5	4,3	0,6	76,1	2,4	-1,7	0,0	1,7	4,8	3,9	9,4

**Tabela 4.9 – Valores de pH, alcalinidade, OD e concentrações de amônia em função do tempo na lagoa de batelada com profundidade de 0,80 m (maio de 2001).
Operação sem limitação da fotossíntese.**

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Data	Tempo (dia)	Alc. Med (meq/L)	pH med	Ac "obs" (meq/L)	NH ₃ med (mg/L)	OD acc (mg/L)	OD acc (mmol/L)	R foto (mmol/L/dia)	Rd NH ₃ (meq/L/dia)	Rd CO ₂ (mmol/L/dia)	Alc Teor	Ac Teor	pH Teor
17.05.01	0	7,3	7,0	10,4	39,2	0,0	0,0				7,3	10,4	7,0
18.05.01	1	7,4	7,1	9,9	39,2	0,2	0,0	0,0	0,0	0,2	7,3	10,0	7,1
19.05.01	2	7,1	7,4	8,3	37,5	0,1	0,0	0,0	0,1	1,0	7,2	8,2	7,5
20.05.01	3	7,4	7,3	9,0	37,5	0,1	0,0	0,0	0,0	-0,5	7,2	9,2	7,2
21.05.01	4	7,3	7,9	7,6	37,5	9,3	0,3	0,3	0,0	0,4	7,2	7,8	7,7
22.05.01	5	7,1	8,0	7,3	36,4	14,8	0,5	0,2	0,1	0,1	7,1	7,3	8,0
23.05.01	6	7,4	8,1	7,6	34,2	16,1	0,5	0,0	0,2	-0,3	6,9	8,0	7,4
24.05.01	7	6,9	8,2	7,0	31,4	20,6	0,6	0,1	0,2	0,4	6,7	7,1	7,8
25.05.01	8	6,6	8,3	6,6	26,3	17,7	0,6	-0,1	0,4	0,4	6,4	6,8	7,8
26.05.01	9	6,2	8,1	6,3	24,6	30,8	1,0	0,4	0,1	-0,1	6,2	6,3	8,3
27.05.01	10	6,2	8,6	6,0	23,0	40,0	1,2	0,3	0,1	-0,1	6,1	6,1	8,4
28.05.01	11	5,7	8,7	5,5	20,7	51,5	1,6	0,4	0,2	0,2	6,0	5,2	9,2
29.05.01	12	5,5	8,7	5,3	20,7	58,9	1,8	0,2	0,0	0,0	6,0	4,8	9,4
30.05.01	13	5,7	8,6	5,6	19,6	57,3	1,8	-0,1	0,1	-0,2	5,9	5,4	9,1
31.05.01	14	5,6	8,5	5,5	16,8	52,3	1,6	-0,2	0,2	0,2	5,7	5,4	8,8
01.06.01	15	5,4	8,4	5,4	14,0	49,9	1,6	-0,1	0,2	0,2	5,5	5,3	8,8
05.06.01	19	5,6	8,3	5,6	14,0	48,9	1,5	-0,1	0,0	0,1	5,5	5,7	8,0
07.06.01	21	5,5	8,1	5,6	15,7	44,2	1,4	-0,3	-0,1	0,3	5,6	5,5	8,6

Tabela 4.27 – Valores de pH, alcalinidade, OD e concentrações de amônia em função do tempo na lagoa de batelada com profundidade de 0,80 m (maio de 2001).
Operação sem limitação da fotossíntese (continuação).

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Data	Tempo (dia)	Alc. med (meq/L)	pH med	Ac "obs" (meq/L)	NH ₃ med (mg/L)	OD acc (mg/L)	OD acc (mmol/L)	R foto (mmol/L/dia)	Rd NH ₃ (meq/L/dia)	Rd CO ₂ (mmol/L/dia)	Alc Teor	Ac Teor	pH Teor
08.06.01	22	5,7	8,0	5,9	15,7	47,1	1,5	0,1	0,0	-0,3	5,6	6,0	7,8
09.06.01	23	5,7	8,0	5,9	15,1	48,1	1,5	0,0	0,0	0,0	5,6	6,0	7,7
10.06.01	24	5,7	8,0	5,9	14,6	51,2	1,6	0,1	0,0	-0,1	5,5	6,0	7,7
11.06.01	25	5,7	8,0	5,9	13,7	54,6	1,7	0,1	0,1	-0,1	5,5	6,1	7,6
12.06.01	26	5,4	8,1	5,5	13,4	59,0	1,8	0,1	0,0	0,2	5,4	5,5	8,3
14.06.01	28	5,1	8,1	5,2	10,6	55,6	1,7	-0,2	0,1	0,4	5,2	5,1	8,7
15.06.01	29	5,2	8,6	5,1	10,1	60,0	1,9	0,1	0,0	-0,1	5,2	5,0	8,7
16.06.01	30	5,1	8,6	5,0	9,0	81,8	2,6	0,7	0,1	-0,6	5,1	4,9	8,8
17.06.01	31	4,8	8,9	4,5	7,3	53,4	1,7	-0,9	0,1	1,3	5,0	4,3	9,3
18.06.01	32	4,6	8,8	4,4	5,0	89,3	2,8	1,1	0,2	-1,0	4,8	4,1	9,3
19.06.01	33	4,2	8,6	4,1	3,4	84,2	2,6	-0,2	0,1	0,5	4,7	3,5	9,6
20.06.01	34	4,2	8,3	4,2	3,4	83,3	2,6	0,0	0,0	0,0	4,7	3,7	9,5
21.06.01	35	4,1	8,3	4,1	2,8	75,8	2,4	-0,2	0,0	0,3	4,7	3,5	9,6
22.06.01	36	4,1	8,1	4,2	2,8	75,5	2,4	0,0	0,0	0,0	4,7	3,6	9,5
24.06.01	38	4,2	8,3	4,2	1,7	82,2	2,6	0,4	0,0	-0,4	4,6	3,8	9,4

**Tabela 4.10 – Valores de pH, alcalinidade, OD e concentrações de amônia em função do tempo na lagoa de batelada com profundidade de 0,40 m (outubro de 2001).
Operação com limitação da fotossíntese.**

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Data	Tempo (dia)	Alc.	pH med	Ac	NH ₃	OD	OD	R foto	Rd NH ₃	Rd CO ₂	Alc Teor	Ac Teor	pH Teor
		Med (meq/L)		“obs” (meq/L)	med (mg/L)	acc (mg/L)	acc (mmol/L)	(mmol/L/dia)	(meq/L/dia)	(mmol/L/dia)			
24.09.01	0	9,1	7,0	13,0	56,0	0,3	0,0				9,1	13,0	7,0
26.09.01	2	8,2	7,7	8,9	52,1	18,3	0,6	1,1	0,1	0,1	8,8	8,2	8,9
28.09.01	4	8,0	8,1	8,2	47,6	39,1	1,2	1,3	0,2	-1,1	8,5	7,7	9,1
29.09.01	5	7,4	8,2	7,5	33,0	45,3	1,4	0,2	1,0	0,4	7,5	7,4	8,4
30.09.01	6	7,0	8,6	6,8	19,6	114,3	3,6	2,2	1,0	-1,6	6,5	7,3	7,5
01.10.01	7	5,7	8,8	5,4	17,4	98,0	3,1	-0,5	0,2	1,9	6,3	4,8	9,6
02.10.01	8	5,2	9,2	4,5	9,5	201,1	6,3	3,2	0,6	-2,5	5,8	4,0	9,7
03.10.01	9	4,8	9,6	3,5	4,5	239,8	7,5	1,2	0,4	-0,5	5,4	2,9	10,0

**Tabela 4.11 – Valores de pH, alcalinidade, OD e concentrações de amônia em função do tempo na lagoa de batelada com profundidade de 0,60 m (outubro de 2001).
Operação sem limitação da fotossíntese.**

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Data	Tempo (dia)	Alc. Med (meq/L)	pH med	Ac "obs" (meq/L)	NH ₃ med (mg/L)	OD acc (mg/L)	OD acc (mmol/L)	R foto (mmol/L/dia)	Rd NH ₃ (meq/L/dia)	Rd CO ₂ (mmol/L/dia)	Alc Teor	Ac Teor	pH Teor
24.09.01	0	9,1	7,0	13,0	56,0	0,3	0,0				9,1	13,0	7,0
26.09.01	2	8,3	7,4	9,7	55,4	5,6	0,2	0,3	0,0	0,7	9,1	8,9	8,5
28.09.01	4	8,1	7,7	8,8	53,8	24,9	0,8	1,2	0,1	-0,9	8,9	7,9	9,2
29.09.01	5	7,7	7,9	8,1	44,2	27,7	0,9	0,1	0,7	0,5	8,3	7,5	9,1
30.09.01	6	7,6	8,2	7,7	39,2	67,5	2,1	1,2	0,4	-1,0	7,9	7,4	8,9
01.10.01	7	6,6	8,4	6,6	30,8	58,6	1,8	-0,3	0,6	1,3	7,3	5,9	9,4
02.10.01	8	6,4	8,6	6,2	26,3	135,1	4,2	2,4	0,3	-2,1	7,0	5,7	9,4
03.10.01	9	6,1	8,8	5,8	16,8	173,6	5,4	1,2	0,7	-0,8	6,3	5,6	9,2
04.10.01	10	5,5	9,0	5,1	16,2	203,1	6,3	0,9	0,0	-0,2	6,3	4,3	9,7
05.10.01	11	5,2	9,1	4,7	12,3	225,9	7,1	0,7	0,3	-0,4	6,0	3,9	9,8
07.10.01	13	5,0	9,3	4,2	9,5	245,0	7,7	0,6	0,2	-0,3	5,8	3,4	9,9

Tabela 4.12 – Valores de pH, alcalinidade, OD e concentrações de amônia em função do tempo na lagoa de batelada com profundidade de 0,80 m (outubro de 2001).
Operação sem limitação da fotossíntese.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Data	Tempo (dia)	Alc. Med (meq/L)	pH med	Ac "obs" (meq/L)	NH ₃ med (mg/L)	OD acc (mg/L)	OD acc (mmol/L)	R foto (mmol/L/dia)	Rd NH ₃ (meq/L/d)	Rd CO ₂ (mmol/L/d)	Alc Teor	Ac Teor	pH Teor
24.09.01	0	9,1	7,0	13,0	56,0	0,3	0,0				9,1	13,0	7,0
26.09.01	2	8,7	7,2	11,0	55,4	0,3	0,0	0,0	0,0	0,6	9,1	10,7	7,4
28.09.01	4	8,8	7,4	10,3	55,4	5,9	0,2	0,4	0,0	-0,2	9,1	10,0	7,6
29.09.01	5	8,5	7,4	9,9	50,4	10,5	0,3	0,1	0,4	0,2	8,7	9,7	7,6
30.09.01	6	8,2	7,7	8,9	50,4	22,5	0,7	0,4	0,0	0,3	8,7	8,4	8,7
01.10.01	7	8,3	7,8	8,8	45,9	15,3	0,5	-0,2	0,3	0,2	8,4	8,7	7,9
02.10.01	8	7,9	7,9	8,3	42,0	34,9	1,1	0,6	0,3	-0,1	8,1	8,1	8,4
03.10.01	9	7,7	8,1	7,9	36,4	48,0	1,5	0,4	0,4	-0,1	7,7	7,9	8,1
04.10.01	10	7,5	8,2	7,6	35,8	57,8	1,8	0,3	0,0	-0,1	7,7	7,4	8,7
05.10.01	11	7,4	8,2	7,5	31,4	66,8	2,1	0,3	0,3	-0,2	7,3	7,5	8,1
06.10.01	12	7,3	8,5	7,2	30,8	74,5	2,3	0,2	0,0	0,0	7,3	7,2	8,5
07.10.01	13	6,7	8,0	6,9	27,4	77,6	2,4	0,1	0,2	0,3	7,1	6,6	9,0
08.10.01	14	7,1	8,2	7,2	24,1	42,7	1,3	-0,6	0,2	0,3	6,8	7,5	7,7
09.10.01	15	6,4	8,5	6,3	22,4	58,6	1,8	-0,2	0,1	0,9	6,7	6,0	9,1
11.10.01	17	6,3	8,5	6,2	20,7	53,7	1,7	-0,2	0,1	0,3	6,6	5,9	9,1
13.10.01	19	6,2	8,4	6,2	16,8	46,7	1,5	0,4	0,1	-0,4	6,3	6,1	8,7
14.10.01	20	6,1	8,4	6,1	16,2	51,0	1,6	0,0	0,0	0,1	6,3	5,9	8,9
15.10.01	21	6,0	8,4	6,0	15,1	59,6	1,9	0,3	0,1	-0,2	6,2	5,8	8,9

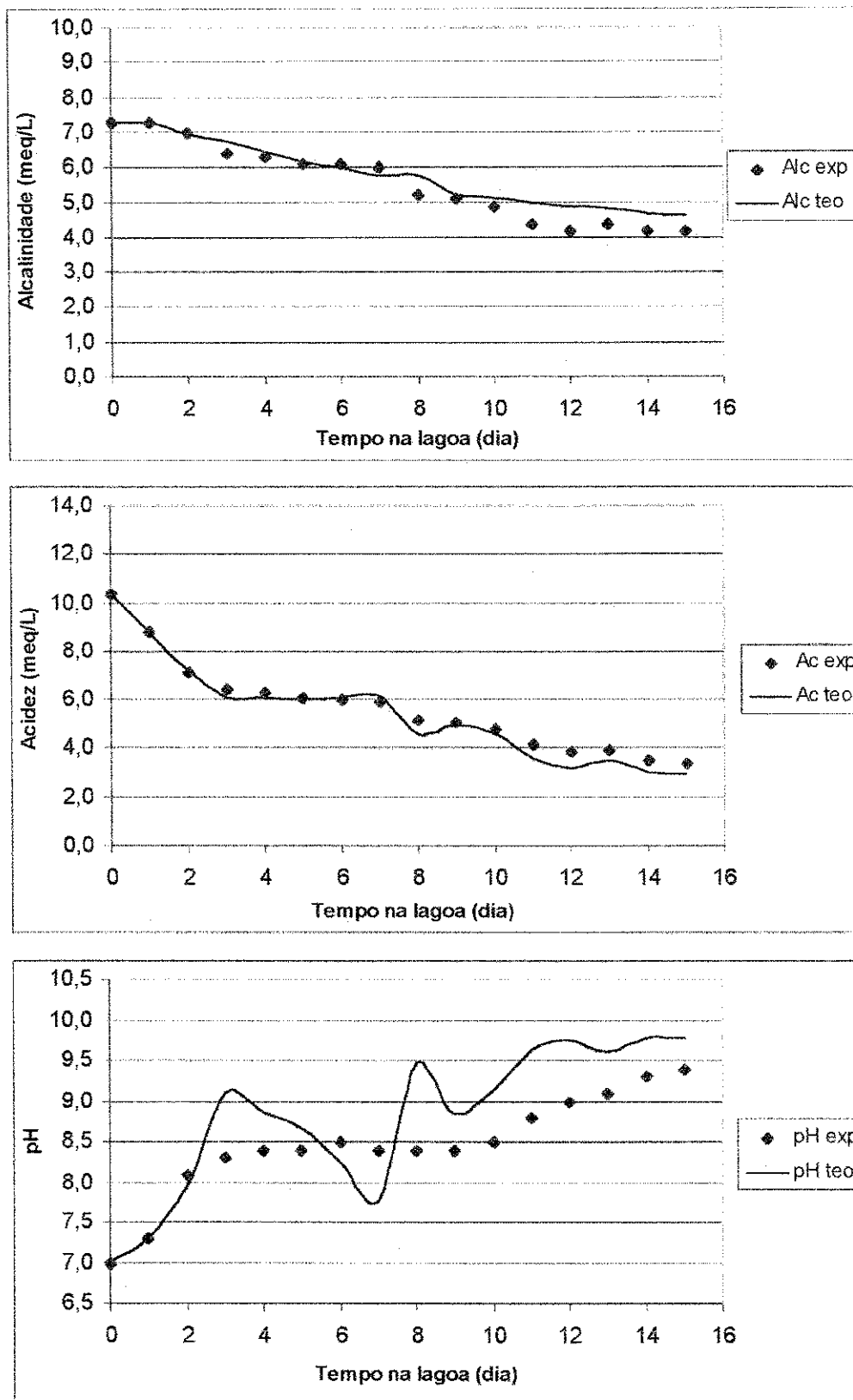


Figura 4.7 – Alcalinidade, pH e acidez experimentais e teóricos em lagoas de polimento sem limitação fotossintética em regime de batelada operada em maio de 2001 (dados da Tabela 4.25). Profundidade de 0,40 m.

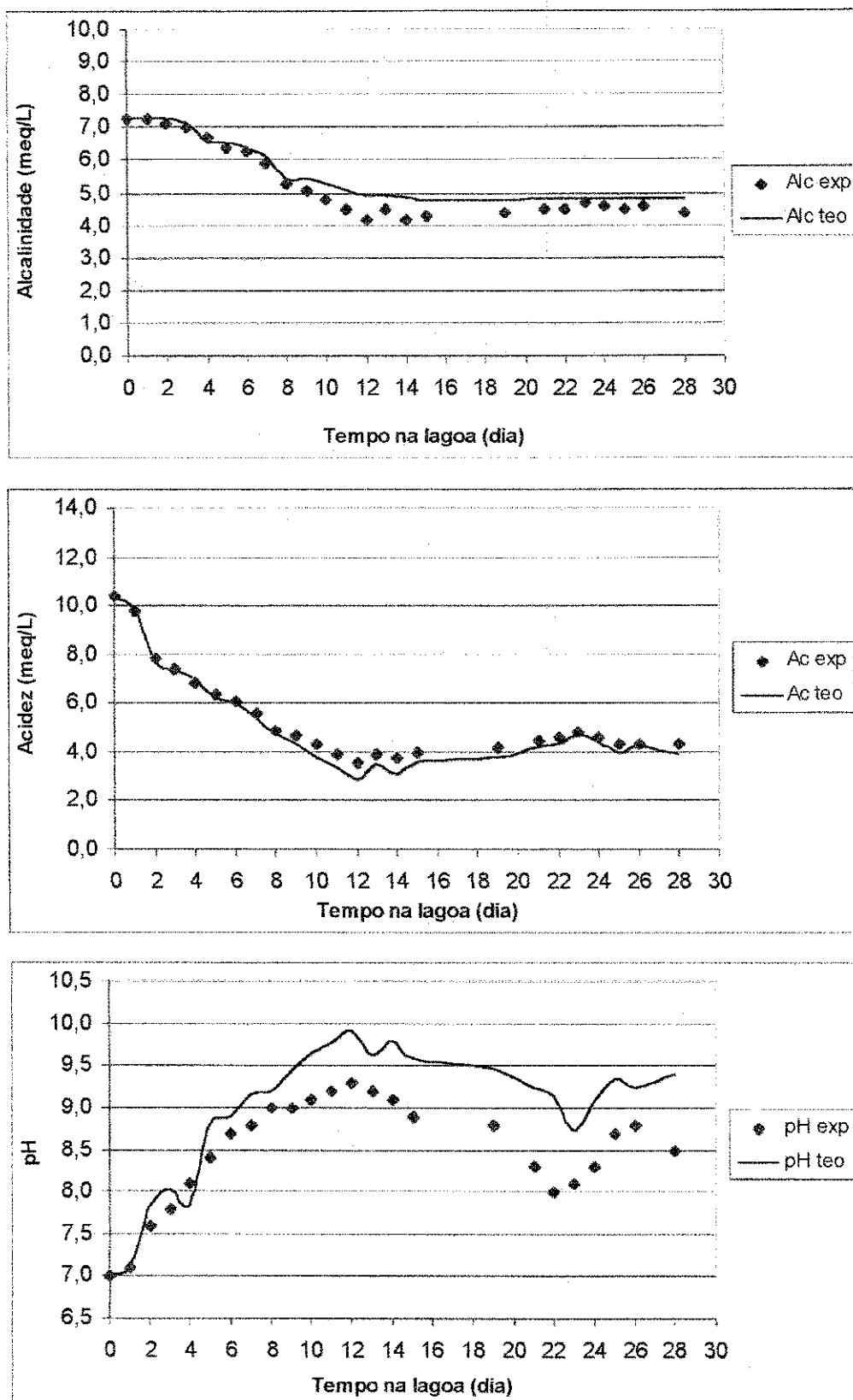


Figura 4.8 – Alcalinidade, pH e acidez experimentais e teóricos em lagoas de polimento sem limitação fotossintética em regime de batelada operada em maio de 2001 (dados da Tabela 4.26). Profundidade de 0,60 m.

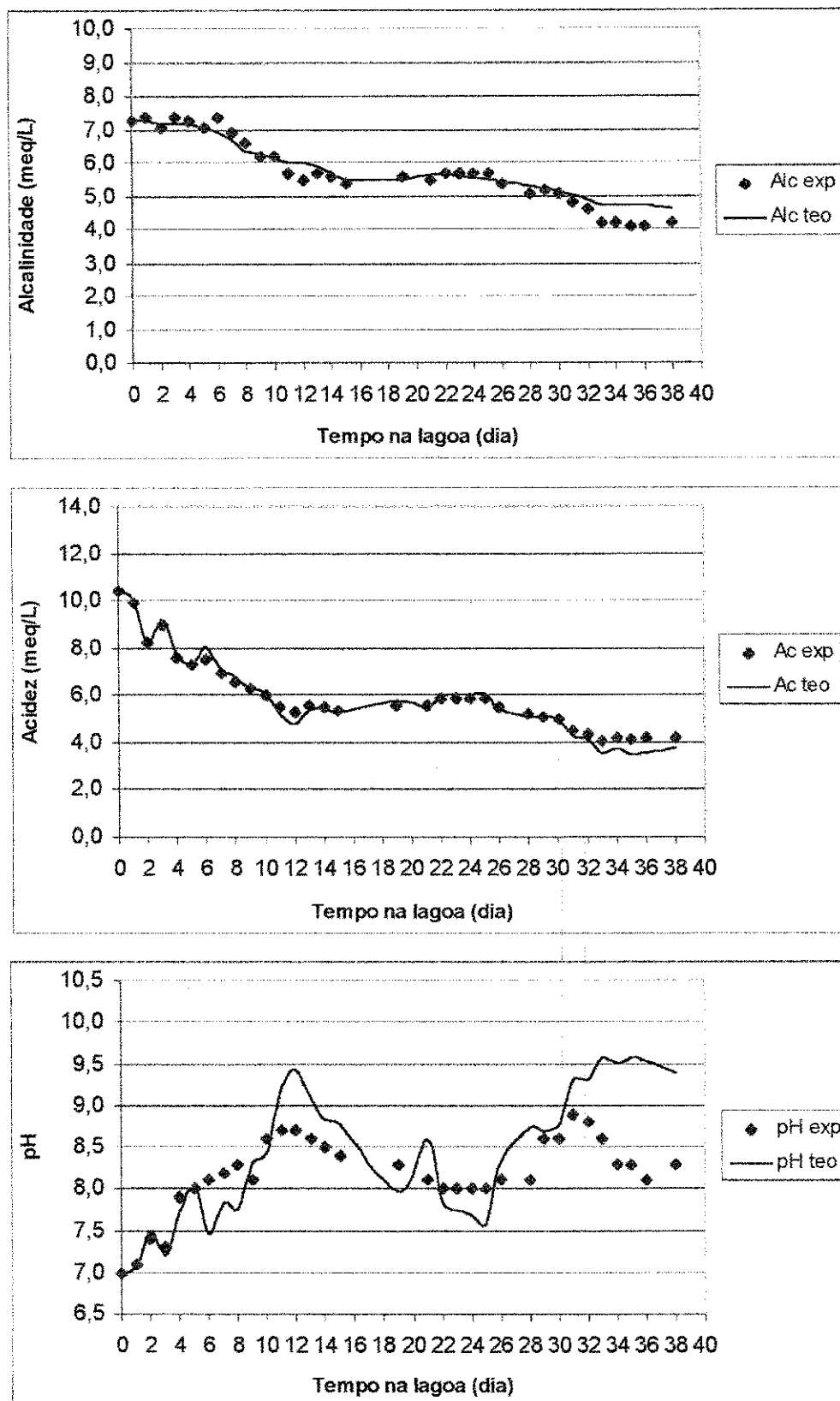


Figura 4.9 – Alcalinidade, pH e acidez experimentais e teóricos em lagoas de polimento sem limitação fotossintética em regime de batelada operada em maio de 2001 (dados da Tabela 4.27). Profundidade de 0,80 m

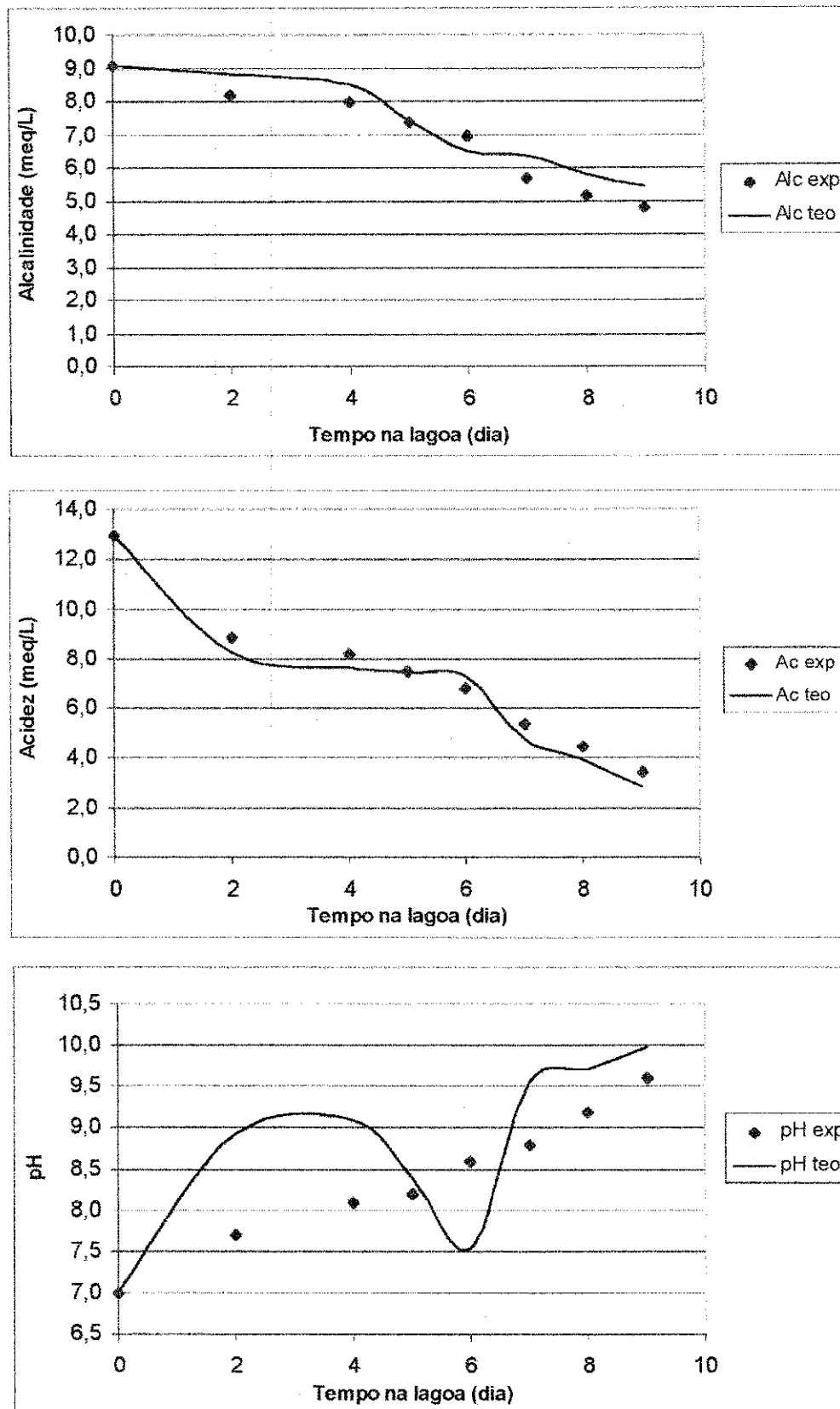


Figura 4.10 – Alcalinidade, pH e acidez experimentais e teóricos em lagoas de polimento sem limitação fotossintética em regime de batelada operada em outubro de 2001 (dados da Tabela 4.28). Profundidade de 0,40 m.

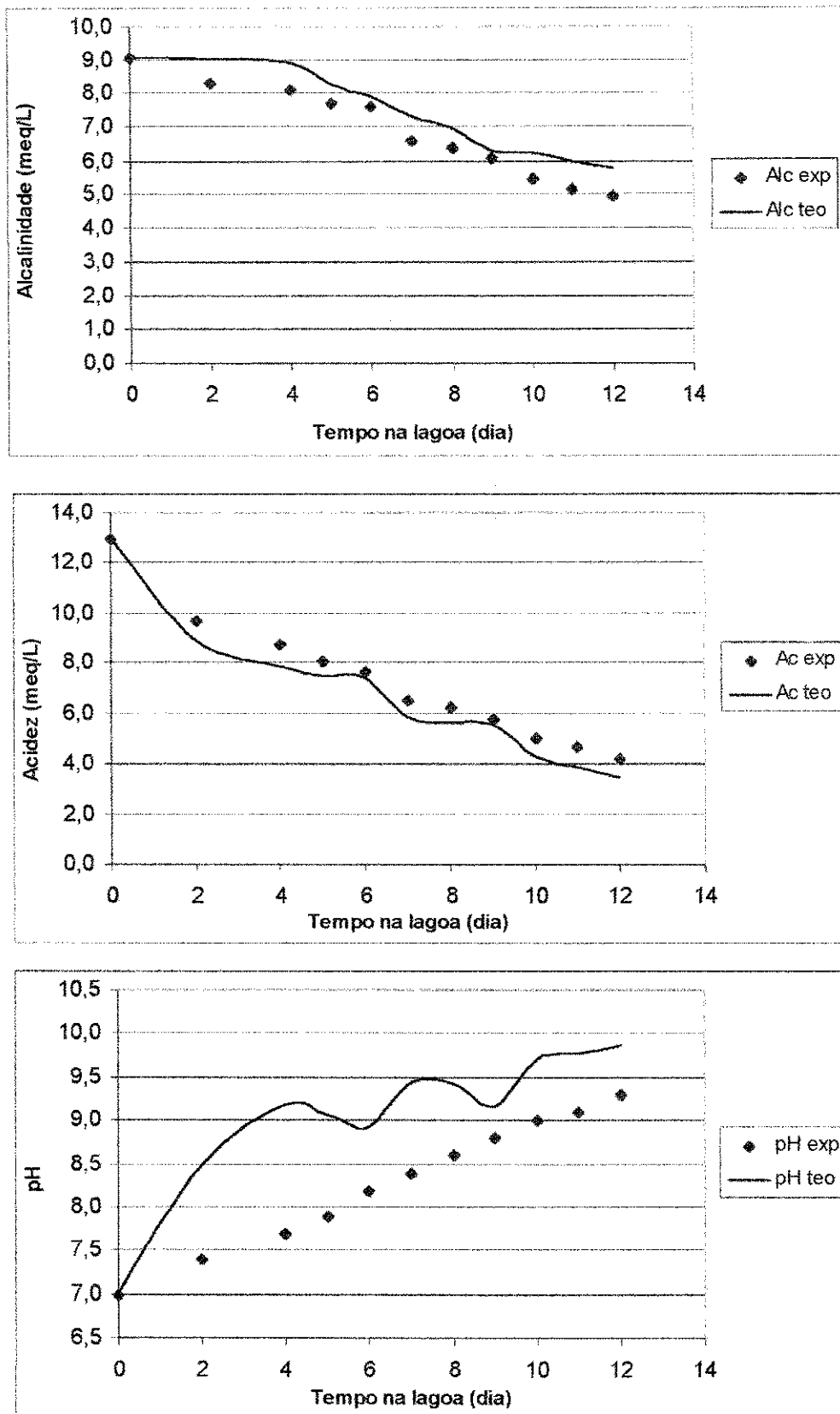


Figura 4.11 – Alcalinidade, pH e acidez experimentais e teóricos em lagoas de polimento sem limitação fotossintética em regime de batelada operada em outubro de 2001 (dados da Tabela 4.29). Profundidade de 0,60 m.

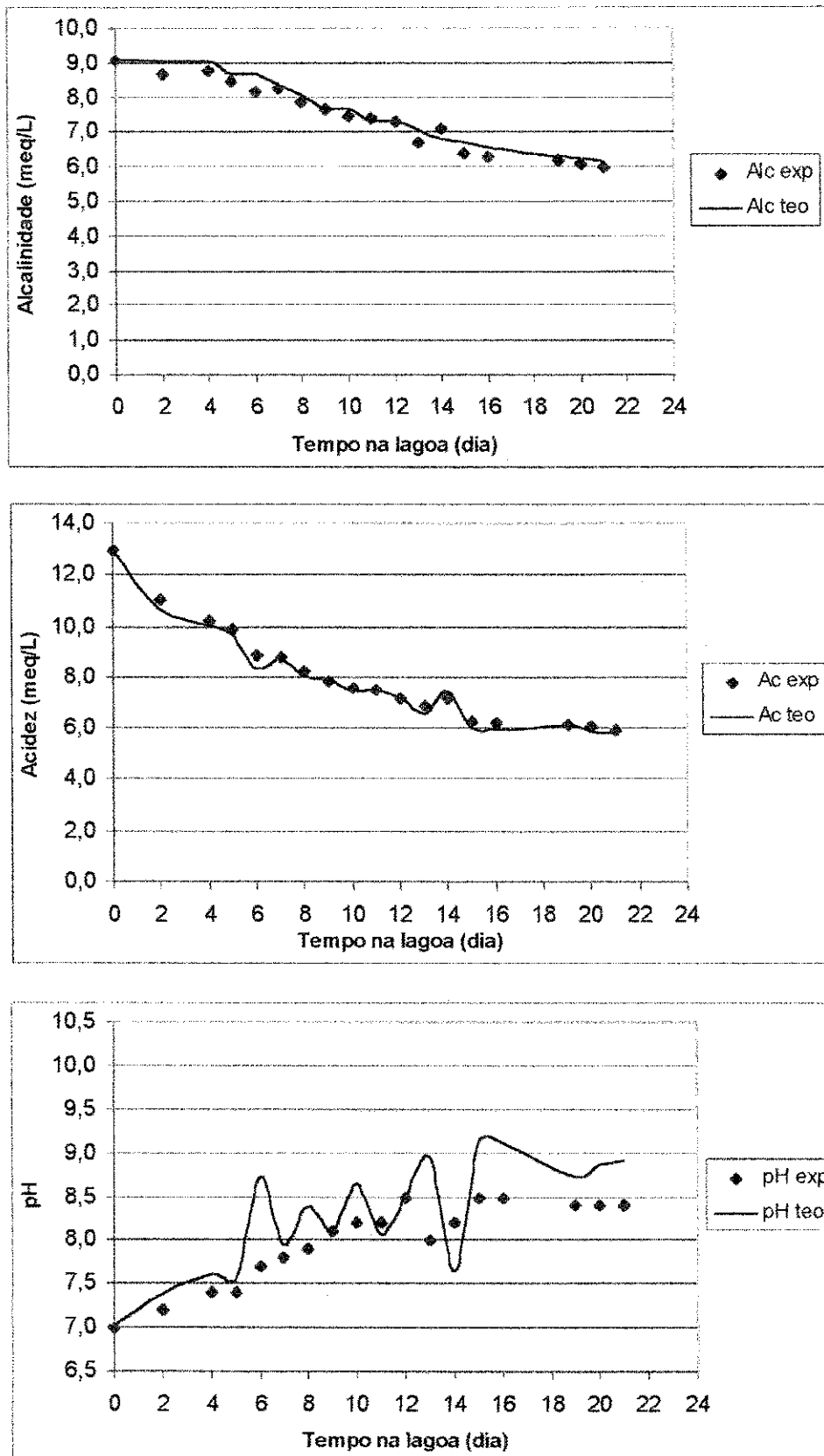


Figura 4.12 – Alcalinidade, pH e acidez experimentais e teóricos em lagoas de polimento sem limitação fotossintética em regime de batelada operada em outubro de 2001 (dados da Tabela 4.30). Profundidade de 0,80 m.

5 DISCUSSÃO

Os experimentos descritos nas secções anteriores serviram para estabelecer se há possibilidade de se prever a variação da alcalinidade, da acidez e do pH em lagoas de polimento a partir da velocidade dos processos de dessorção de CO_2 e de NH_3 e da produção de oxigênio. Para obter mais detalhes sobre os processos de dessorção de CO_2 e de NH_3 foram executados experimentos específicos. A seguir são discutidos os resultados obtidos destes experimentos bem como nos experimentos com lagoas estudando os três processos simultaneamente.

5.1 SOBRE A CONSTANTE DE DESSORÇÃO DE CO_2 DAS LAGOAS DE POLIMENTO

Os dados experimentais mostram claramente que há uma relação entre o valor da constante de dessorção e a profundidade das lagoas. Observa-se que, com boa aproximação, existe uma relação inversamente proporcional entre a profundidade e a constante de dessorção de CO_2 . Isto não é surpreendente, tendo-se em vista que a dessorção é um processo que é limitado pela área de contato entre as fases líquida (água na lagoa) e gasosa (atmosfera). Quanto maior a profundidade da fase líquida menor a área de contato e conseqüentemente menor a possibilidade do gás CO_2 dessorver. Os dados disponíveis sugerem uma relação inversamente proporcional entre a constante de dessorção e a profundidade:

(5.1)

Onde:

= constante de dessorção para uma profundidade h.

= constante de dessorção para uma profundidade de 1 m

h = profundidade da lagoa (em m)

Na Tabela 5.1 são observados os valores médios da constante de dessorção para as três profundidades pesquisadas e os valores calculados da constante bem como a média e o desvio padrão. O valor do desvio padrão mostra que não são significativas as diferenças entre os valores experimentais de para as três profundidades pesquisadas.

Tabela 5.1 – Valores experimentais médios da constante de dessorção de CO₂ nas lagoas experimentais, usando água.

Profundidade (m)	(dia ⁻¹)	para 1 m (dia ⁻¹)
0,40	0,70	0,28
0,60	0,48	0,288
0,80	0,41	0,328
Média		0,30
Desvio padrão		0,02

O valor da taxa de dessorção pode ser comparado com a taxa de fotossíntese, desde que a taxa de acumulação de OD por este processo seja conhecida. Os dados experimentais indicam que nas condições prevalentes durante as pesquisas a taxa de produção de oxigênio em lagoas de polimento variava fortemente devido à instabilidade de tempo e possivelmente também ao efeito tóxico de amônia não ionizada sobre a atividade das algas. Como uma primeira aproximação pode-se adotar a seguinte expressão empírica para a produção fotossintética de oxigênio em condições desfavoráveis (maio, Tabelas 4.25 a 4.27).

$$r_{O_2} = 0,25 \text{ (lagoas profundas) a } 0,35 \text{ mmol/L/dia (lagoas rasas)}$$

Para a estação de insolação intensa (outubro, Tabelas 4.28 a 4.30) foi observado:

$$r_{O_2} = 0,5 \text{ (lagoas profundas) a } 0,7 \text{ mmol/L/dia (lagoas rasas)}$$

Sabendo que a produção de 1 mmol de oxigênio leva ao consumo biológico de 1 mmol de CO₂ na fotossíntese, tem-se que a taxa de consumo biológico de CO₂ numericamente é

igual à taxa de produção de oxigênio nas lagoas. Na Figura 5.1, os valores empíricos da taxa de consumo biológico de CO_2 estão indicados.

Ao se comparar a taxa de remoção física de CO_2 devido a dessorção e à remoção biológica devido à fotossíntese, percebe-se que para pH baixo (<7 a 7,5, dependendo da profundidade da lagoa e da alcalinidade) o primeiro processo predomina enquanto o segundo processo é mais importante na faixa de pH elevado. Conclui-se que sempre a remoção fotossintética de CO_2 será necessária para elevar o pH a um nível onde a taxa de dessorção de amônia é expressiva e, portanto a remoção de nitrogênio é uma possibilidade.

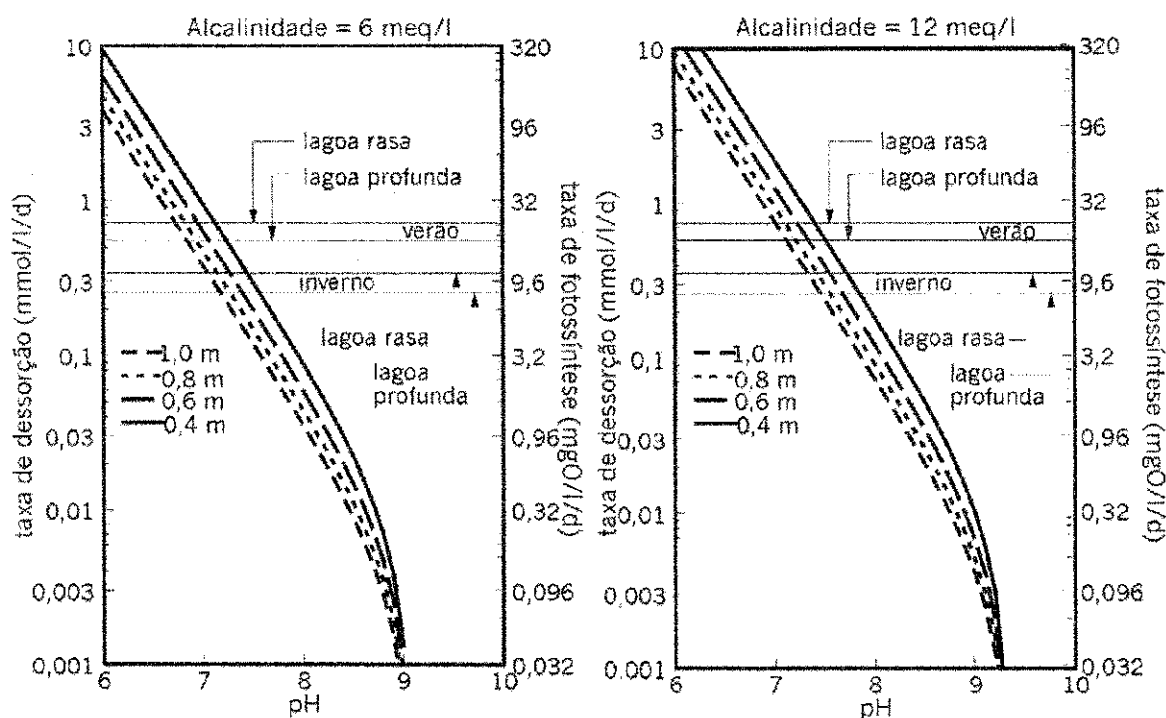


Figura 5.1 – Taxa de dessorção e de consumo fotossintético em lagoas para diferentes condições de alcalinidade, pH, intensidade solar e profundidade de lagoas.

A Figura 5.1 mostra bem claramente que sem um consumo biológico de CO_2 a obtenção de um pH elevado e remoção de nutrientes é inviável. Neste contexto é importante observar que uma das condições importantes para haver produção de oxigênio e consumo de CO_2 é que a concentração de material orgânico seja baixa, em outras palavras, quando se deseja a remoção de nutrientes em lagoas, um pré-tratamento anaeróbio eficiente é benéfico e muitas vezes indispensável.

5.2 SOBRE A CONSTANTE DE DESSORÇÃO DE NH_3 EM LAGOAS DE POLIMENTO

Os dados de dessorção de amônia podem ser tratados de uma maneira semelhante aos da dessorção de CO_2 . Foi estabelecido que a constante de dessorção também é inversamente proporcional com a profundidade e que a taxa de dessorção é proporcional com a concentração de amônia não ionizado dissolvido na fase líquida. Também há a possibilidade de se avaliar a influência da temperatura sobre o valor da constante porque há dados de abril (temperatura média de 23°C) e de agosto de 2001 (temperatura de 25°C). Na Tabela 5.2 observam-se os valores das constantes experimentais e também dos valores calculados, pressupondo-se uma relação inversamente proporcional com a profundidade.

Tabela 5.1 – Valores experimentais médios da constante de dessorção de CO_2 nas lagoas experimentais, usando água.

Profundidade (m)	(dia ⁻¹)		para 1 m (dia ⁻¹)	
	23°C	25°C	23°C	25°C
0,40	0,43	0,36	0,172	0,143
0,60	0,27	0,26	0,162	0,154
0,80	0,21	0,18	0,168	0,143
Média			0,17	0,15
Desvio padrão			0,01	0,01

Deste modo a taxa de dessorção de amônia pode ser descrita como:

$$(5.2)$$

onde:

= taxa de dessorção de amônia

= constante de dessorção para uma determinada profundidade da lagoa

= constante de dessorção de amônia = 0,18/dia

$[\text{NH}_3]$ = concentração de amônia não ionizada dissolvida

N_{am} = concentração totais de amônia (ionizada+não ionizada)

h = profundidade da lagoa

pK_a = antilog da constante de dissociação de amônia = 9,1

pH = pH na lagoa.

A Eq (5.2) mostra que a taxa de dessorção depende de três parâmetros operacionais: a concentração de amônia total (ionizada+não ionizada), o pH e a profundidade da lagoa. A equação mostra que a taxa de dessorção é diretamente proporcional com a concentração de amônia. A Figura 5.2 mostra a taxa relativa de dessorção (i.e. a fração da concentração de amônia total que é removida diariamente) em função deste, dois parâmetros. Foi observado que os dois fatores tem uma influência marcante.

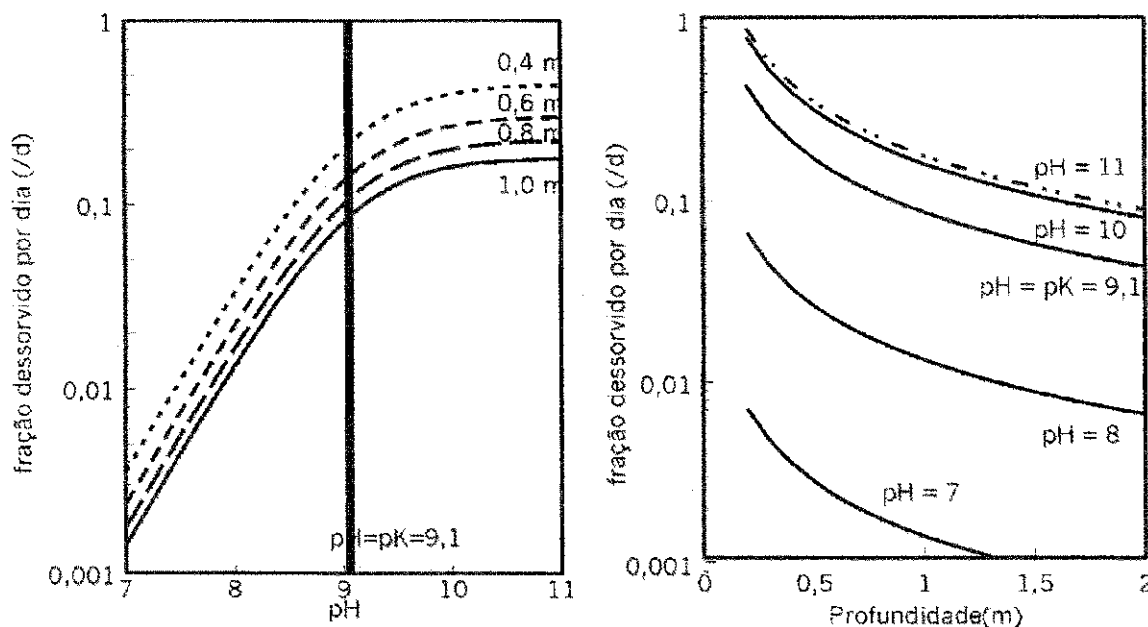


Figura 5.1 - A taxa relativa de dessorção de amônia em função do pH (esq) e da altura em lagoas de polimento.

Quando o valor do pH é muito menor que a constante pK_a (i.e. $pH < pK_a - 1$) a taxa de dessorção aumenta exponencialmente com o valor do pH. Para valores do pH acima do valor de pK_a a tendência é de se estabelecer uma taxa constante. Pode-se observar que não há mérito em tentar aumentar o pH acima de 10: a taxa de dessorção de $pH = 11$ é praticamente igual à de $pH = 10$.

Os dados indicam que a dessorção de amônia é um processo lento que, mesmo nas condições mais favoráveis, se estende por vários dias. Por exemplo, para um pH de 10 e uma profundidade de somente 0,40 m a taxa relativa de dessorção é de somente 0,44, ou seja nestas condições a taxa diária de dessorção é 44 % da massa de amônia presente na lagoa. Assim, foi calculado, que nestas condições o tempo mínimo para a remoção de amônia seria de $1/0,44 = 2,3$ dias.

A influência da temperatura pode ser avaliada pressupondo-se uma relação de Arrhenius para descrever o efeito da temperatura sobre o valor da constante.

$$K_t = K_{20} \Theta^{(t-20)}$$

onde

K_t, K_{20} constantes de dessorção a temperatura t e 20 (referência) respectivamente

Θ coeficiente de Arrhenius de dependência da temperatura

t = temperatura durante a dessorção

Tendo-se valores de 0,15 e 0,17 d^{-1} para temperaturas de 23 e 25°C, respectivamente, calcula-se um valor de Θ de 1,12. Numericamente, o valor da constante de dessorção é em torno de 30 % maior que o valor encontrado na literatura. Possivelmente isto se deve ao fato que as lagoas e bateladas eram misturadas suavemente duas vezes por dia para determinar o pH.

5.3 INTERPRETAÇÃO DOS DADOS

5.3.1 Estimativa da variação da alcalinidade, da acidez e do pH em lagoas de polimento.

As Figuras 4.1 a 4.12 do capítulo anterior mostram claramente que, de fato, é possível prever com um bom grau de precisão qual a variação da alcalinidade e da acidez em lagoas de polimento a partir da avaliação dos processos de remoção de dióxido de carbono por consumo biológico ou por dessorção e da dessorção de amônia. Tendo-se estabelecido a estequiometria destes processos, é possível interpretar os dados da operação de lagoas de polimento em

bateladas. Nesta interpretação, tem-se por um lado os valores observados da alcalinidade e do pH que permitem calcular um valor “observado” da acidez. Por outro lado, inteiramente independente destas observações foi possível estimar as variações da alcalinidade e da acidez e, conseqüentemente, do pH como resultado dos processos que se desenvolvem nas lagoas, porque se sabe tanto a velocidade destes processos a partir de medições, como seu efeito sobre alcalinidade e acidez a partir das relações estequiométricas.

As Figuras 4.1 a 4.12 têm alguns aspectos em comum:

- (1) Em geral a simulação da variação da alcalinidade e da acidez é boa no sentido que as diferenças entre os valores calculados e experimentais destes parâmetros em função do tempo são pequenas. Foi notado que em todos os casos a alcalinidade calculada é maior que a alcalinidade experimental enquanto que, para a acidez o contrário é verdade.
- (2) Em geral há uma grande diferença entre o pH calculado e o pH determinado experimentalmente. Isto se deve à particularidade da fórmula de Deffeyes: há erros sistemáticos nas estimativas dos valores da alcalinidade e da acidez, e estes erros são ampliados pela fórmula, levando a grandes erros na estimativa do pH.

5.3.2 Uso do diagrama de Deffeyes

O diagrama de Deffeyes pode ser usado para mostrar graficamente como o ponto de equilíbrio iônico se desloca por causa dos processos que afetam a alcalinidade e/ou a acidez. Na Tabela 5.3 foi observado o efeito estequiométrico dos processos.

Tabela 5.1 – Efeito da remoção de dióxido de carbono e de amônia sobre o valor da alcalinidade e da acidez.

Processo	ΔAlc (meq/mmol)	ΔAc (meq/mmol)
Remoção de CO_2	0	-2
Remoção de NH_3	-1	+1

O efeito dos processos sobre o deslocamento do ponto de equilíbrio iônico é mais bem mostrado com um exemplo. Tendo-se um esgoto digerido com uma alcalinidade de 8 meq/L (400 ppm CaCO_3) e um pH de 7,0, deseja-se efetuar a remoção de amônia em uma lagoa de polimento, tendo-se como pH final um valor de 9,6 e a remoção de 42 mgN/L (3 meq/L). Deste modo no efluente, após a remoção da amônia, a alcalinidade residual será $8-3 = 5$ meq/L. A Fig 5.3 mostra os pontos inicial (ponto 1) e final (ponto 2) do equilíbrio iônico. A seguinte análise pode ser feita:

- (1) A acidez inicial pode ser estimada em 11,5 meq/L (ponto 1 na Fig 5.3)
- (2) A remoção de amônia (3 meq/L) deverá causar uma redução da alcalinidade de 8 para 5 meq/L
- (3) O ponto 2 é determinado como o ponto de intersecção de Alc = 5 meq/L e pH = 9,6. A acidez final é lida como a ordenada de ponto 2: 3,5 meq/L.
- (4) A investigação experimental mostrou que a remoção de CO_2 por dessorção só tem importância enquanto o valor do pH é abaixo de 7,5, de modo que se estima que 2,3 (deslocando o ponto de equilíbrio verticalmente da posição inicial (ponto 1) até a intersecção com a reta de pH = 7,5).

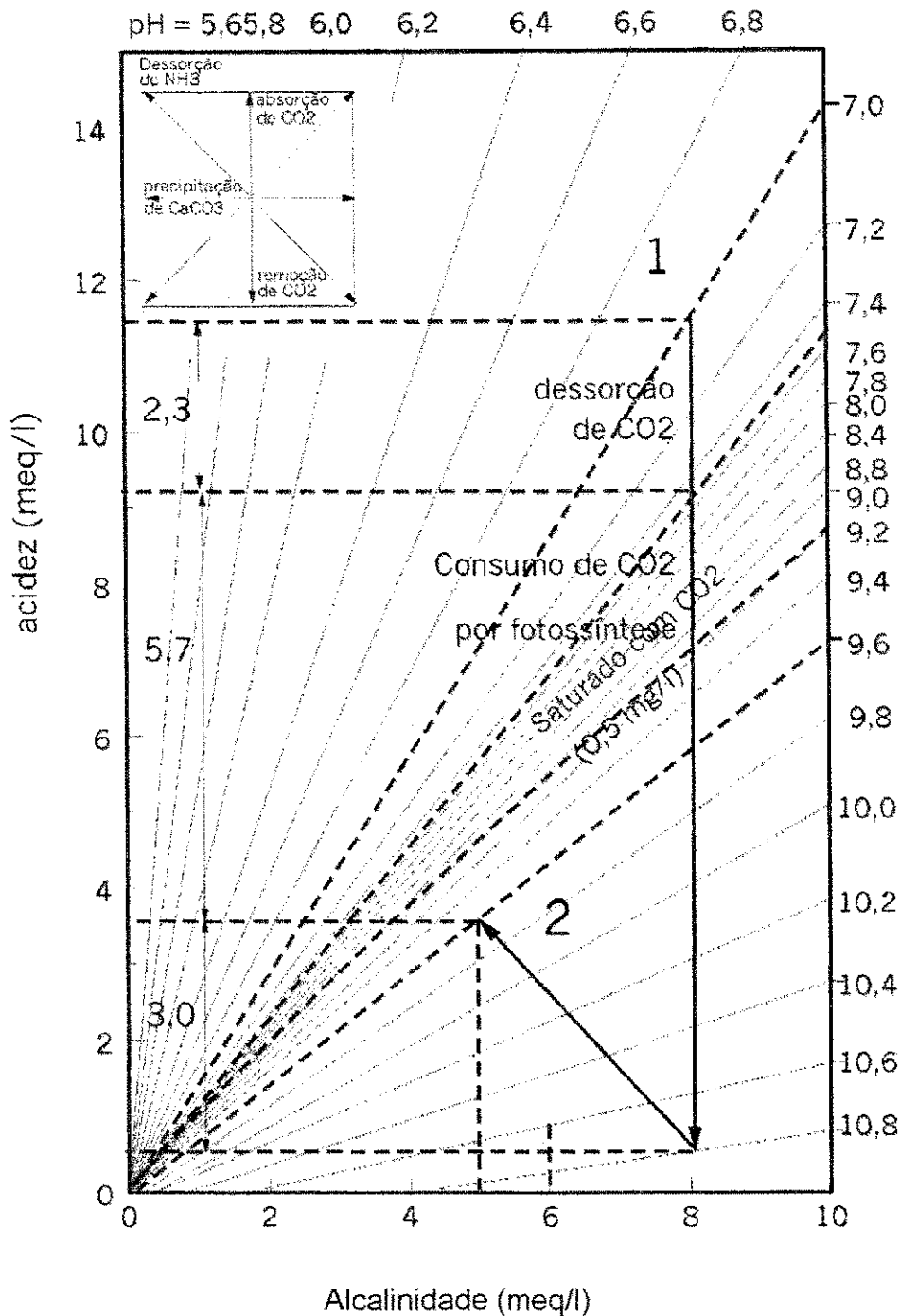


Figura 5.1 - Deslocamento do ponto de equilíbrio no diagrama de Deffeyes devido à remoção de amônia e de dióxido de carbono.

- (5) A variação total necessária de acidez é $11,5 - 3,5 = 8$ meq/L, mas devido à remoção de 3 meq/L de amônia há uma produção de 3 meq/L de acidez e a remoção total de acidez tem de ser $8 + 3 = 11$ meq/L. Como se estima uma remoção de 2,3 meq/L por dessorção, o restante $11 - 2,3$ meq/L = 8,7 meq/L deve ser removido através de remoção biológica de CO_2 . Conclui-se que é necessário que haja uma remoção de CO_2 por fotossíntese de $8,7/2 = 4,35$ mmol/L de CO_2 ou

equivalentemente as algas tem de produzir uma concentração de $4,35 \cdot 32 = 139$ mg/L de oxigênio na lagoa.

- (6) Os processos de remoção de CO_2 e NH_3 ocorrem simultaneamente de tal modo que o pH tende a aumentar gradualmente. Pode haver uma pequena redução do valor do pH durante a noite, quando não há remoção biológica, mas pelo contrário haverá produção de CO_2 .
- (7) Se a taxa de produção de oxigênio na lagoa for conhecida ou puder ser estimada, então pode se estimar o tempo necessário para que se obtenha a remoção de amônia e a elevação do pH. Por exemplo, no caso anterior, quando se sabe que em media há uma produção de 1 mgO/L/h ou 24 mg/L/dia então para produzir os 139 mg/L que se desejam o tempo necessário será $139/24 = 5,8$ dias.

6 CONCLUSÕES

- (1) Uma condição necessária para a remoção de nutrientes em lagoas de polimento é um aumento significativo do pH, permitindo a dessorção de nitrogênio na forma de amônia e a precipitação de fósforo como fosfato.
- (2) os processos que influenciam o pH em lagoas são: a dessorção de CO₂ e de NH₃, além da remoção biológica de CO₂ na fotossíntese.
- (3) os processos de remoção de CO₂ e NH₃ afetam a alcalinidade e a acidez, o que, por sua vez, afeta o valor do pH. Estequiometricamente, tem-se uma diminuição da alcalinidade e um aumento da acidez de 1 meq/L por mol/L de amônia dessorvida, enquanto a remoção de CO₂ (física ou biológica) resulta numa diminuição na acidez em 2meq/L por 1 mmol/L de CO₂ removido, sem afetar a alcalinidade.
- (4) A taxa de dessorção de CO₂ e de NH₃ pode ser descrita com auxílio da Equação de Chick que formula esta taxa como o produto de uma constante de dessorção pela diferença entre a concentração atual e a de saturação dos gases dissolvidos. Estabeleceram-se as seguintes expressões empíricas para as constantes de dessorção:

$$K_{CO_2} = 0,7/h \text{ a } 25^\circ C$$

$$K_{NH_3} = 0,15/h \text{ a } 25^\circ C$$

onde h é a profundidade da lagoa em m.

- (5) Foi estabelecido experimentalmente que as variações da alcalinidade e da acidez em lagoas de polimento operadas em regime de batelada podem muito bem ser simuladas quando se leva em consideração os processos de remoção de CO₂ e NH₃ nas lagoas. A simulação do valor do pH é menos precisa porque um pequeno erro na alcalinidade ou acidez simuladas repercutem em um erro considerável no valor do pH.
- (6) Ao fazer a análise do efeito quantitativo dos processos de dessorção de CO₂ e de NH₃ e de remoção biológica de CO₂ conclui-se que um aumento expressivo do pH

somente é possível quando o último processo se desenvolve bem, isto é uma pré-condição para um aumento significativo do pH em lagoas é que a taxa de fotossíntese deve ser bem maior que a taxa de oxidação do material orgânico nela.

- (7) Se esgoto for tratado anaerobiamente para a remoção eficiente de material orgânico, a remoção de amônia se realiza em menos de 1 semana em uma lagoa rasa quando as condições climáticas favorecem a fotossíntese.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

APHA – AWWA – WEF (1995). Standard methods for the examination of water and wastewater. 18th edition. American Public Health Association, American Water Works Association and Water Environment Federation, Washington, D.C.

Capri, M. G., Marais, G. V. R. (1974). Anaerobic filter treatment of wine distillery waste: Research Report WI. Dept Civil Eng. Univ. of Cape Town. – South Africa.

Cavalcanti, P. F. F., van Haandel, A. C. e Lettinga, G. (2000). Polishing ponds for post treatment of digested sewage – part I: flow – through ponds. VI Oficina e Seminário Latino – Americano de Digestão Anaeróbia, Recife – PE – Brasil.

Cavalcanti, P. F. F., van Haandel, A. C. e Lettinga, G. (2001). 9th World Congress Anaerobic Digested – Anaerobic Conversion for Sustainable part 1/2. Antwerpen-Belgium pp. 759-764.

Chernicharo, C. A. L. (2001). Pós – tratamento de efluentes de reatores anaeróbios. Belo Horizonte: [s.n.]. 544 p.: 1., Graf., tab. Projeto Prosab.

Chernicharo, C. A. L. (2001). Pós – tratamento de efluentes de reatores anaeróbios: aspectos metodológicos. Belo Horizonte: [s.n.]. 544 p.: 1., Graf., tab. Projeto Prosab. pp. 25-34.

Chernicharo, C. A. L. (2001). Princípios do tratamento biológico de águas residuárias: reatores anaeróbios. Belo Horizonte. Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental – UFMG, v.5.

Deffeyes, K. S (1956). Carbonate equilibria: a graphic and algebraic approach. *Limnol. Oceano.*, 10, 412.

Emerson, K., Russo, R. C., Lund, R. E., Thurston, T. T. (1975). Aqueous ammonium calculations: effect of pH and temperature. *Journal of the Fisheries Research Board of Canada*, 23, 2379-2383.

Esteves, F. A. (1998). Fundamentos de limnologia. Rio de Janeiro: Editora Interciência.

Lima, A. F. (1996). Problemas de Engenharia Sanitária. 2ª edição. Recife: Editora Universitária da UFPE.

Loewenthal, R. E. and Marais, G. V. R (1986): Carbonato chemistry of aquatic systems: Theory and application, Ann Arbor Sci. Publishers, Michigan, USA.

Metcalf and Eddy (1991). Wasterwater Engineering – Treatment. Diposal and reuse. 3rd Edition. New York: McGraw Hill Book Company, Inc..

Sawyer, C. N., McCarty, P. L., Parkin, G. F.(1994). Chemistry for environmental engineering. 4th edition. New York: McGraw-Hill Book Company.

Mota, S. A. (1997). Introdução à engenharia ambiental. Rio de Janeiro: ABES.

Van Haandel, A. C. & Lettinga, G. (1994). Tratamento anaeróbio de esgotos: Um manual para regiões de clima quente. Campina Grande – PB: Epgraf.

Van Haandel, A. C. & Marais, G. (1999). O comportamento do sistema de lodo ativado: Teoria e aplicações para projetos e operações. Campina Grande – PB: Epgraf.

Von Sperling, M. (1996). Princípios do tratamento biológico de águas residuárias: Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos. Belo Horizonte. Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental – UFMG, v.1.

Von Sperling, M. (1996). Princípios do tratamento biológico de águas residuárias: Lagoas de estabilização. Belo Horizonte. Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental – UFMG, v.3.

WPCF (1983). Nutrient control. Manual of practice FD.7. Water Pollution Control Federation, Washington, D. C.