



ARTIGO | ARTICLE

## Balço de massa N e P no sistema água-sedimento de uma lagoa costeira do baixo rio Doce, ES, Brasil

*N and P mass balance in the water-sediment system of a coastal lagoon at the rio Doce Valley, state of Espírito Santo, Brazil*

Fábio Marques Aprile<sup>1,2</sup>

Irineu Bianchini Júnior<sup>3</sup>

Reinaldo Lorandi<sup>4</sup>

### RESUMO

O balanço de massa do nitrogênio e fósforo foi estudado nos compartimentos água e sedimento da lagoa Dourada, planície do baixo rio Doce, na costa Atlântica do estado do Espírito Santo. Foram realizadas coletas de água e sedimento para análise de fósforo-total, nitrogênio-orgânico e matéria orgânica, e medições físicas e físico-químicas em seis pontos de amostragem, nos períodos de chuva e estiagem, entre 1993 e 1998. A homogeneidade da coluna de água foi atribuída à pequena profundidade da lagoa, sua morfologia com forma alongada e posição favorável à ação dos ventos, que são irregulares na zona costeira. Constatou-se incremento nutricional de origem alóctone em ambos os compartimentos na época das chuvas. Foram considerados como fatores relevantes nessas variações o aerossol e *spray* marinhos, como fontes de fósforo alóctone, e as chuvas e lixiviação como responsáveis pela presença de nitrogênio no sistema. As distâncias matriciais entre os parâmetros estudados mostraram maior equilíbrio entre as concentrações de fósforo-total. Foi aplicado teste "t" para as variáveis e os resultados confirmaram a evidência do fluxo contínuo de fósforo para a lagoa, bem como a sazonalidade do nitrogênio. Foi desenvolvido um modelo de balanço de massa para o ecossistema, que mostrou ser de interdependência para o fósforo e de independência para o nitrogênio. O modelo tem como princípio associar, com base em aspectos conceituais, tratamentos físicos, físico-químicos e químicos. Com base no estado trófico, a lagoa pôde ser classificada como mesotrófica a eutrófica.

**Palavras-chave:** Balanço de massa. Deposição atmosférica. Fósforo. Lagoa costeira. Modelo matemático. Nitrogênio.

<sup>1</sup> Universidade de São Paulo, Instituto Oceanográfico. R. Doralice P. Teixeira, 48/13, 05417-070, São Paulo, SP, Brasil. Correspondência para/Correspondence to: F.M. Aprile. E-mail: <aprilefm@hotmail.com>.

<sup>2</sup> Pesquisador Visitante, Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia. Manaus, AM, Brasil.

<sup>3</sup> Universidade Federal de São Carlos, Departamento de Hidrobiologia. São Carlos, SP, Brasil.

<sup>4</sup> Universidade Federal de São Carlos, Departamento de Engenharia Civil. São Carlos, SP, Brasil.

## ABSTRACT

*A study was conducted of the mass balance of nitrogen and phosphorus in the water and sediment compartments of the Dourada lagoon, located in the lower Doce river valley on the Atlantic Coast of the state of Espírito Santo, Brazil. During rainy and dry seasons between 1993 and 1998. Water and sediment samples were collected at six sampling stations to determine total phosphorus, organic nitrogen and organic matter. Physical and physical-chemical parameters were also measured. The uniformity of the water column was explained by the shallowness of the lagoon, its morphology with a lengthened shape and favorable location in terms of wind action, which is unpredictable in the coastal zones. There was a nutritional increment of allochthonous origin during the rainy season in both water and sediments. The following processes were considered important to the flux model: marine spray and aerosols, as sources of allochthonous phosphorus, and the rain and leaching as sources of nitrogen. The distance matrix between the studied parameters showed a greater equilibrium between the concentrations of total phosphorus. Test t was applied to the variables and the results confirmed a continuous flow of phosphorus into the Dourada lake, as well as the seasonality of nitrogen. A mass balance model was constructed for the lake. This showed interdependence for phosphorus and independence for nitrogen in the aquatic ecosystem. The principle of the model is to support the unified treatments of physical-chemical processes with the use of compartmental and conceptual techniques. Based on the parameters investigated, the lake can be classified as mesotrophic to eutrophic.*

**Key words:** Mass balance. Atmospheric deposits. Phosphorus. Coastal lagoon. Mathematical model. Nitrogen.

## INTRODUÇÃO

Dentre os nutrientes essenciais de um sistema aquático, destacam-se o nitrogênio (N) e o fósforo (P). O nitrogênio tem participação na formação das proteínas, um dos componentes básicos da biomassa dos organismos vivos. O fósforo é fundamental nos sistemas biológicos, participando da formação da molécula de DNA e da produção de energia (ADP e ATP). Tem prevalecido o conceito de que o nitrogênio, em baixas concentrações, pode ser um fator limitante à produção primária nas camadas eufóticas dos sistemas fluviais e marinhos, em particular em regiões pelágicas (Dugdale & Goering, 1967). O fósforo, entretanto, pode ser o principal nutriente limitante em ambientes lacustres e fluviais (Berman, 1988; Hecky & Kilham, 1988). Um grande suprimento de nutrientes inorgânicos, bem como altas concentrações de nitrogênio orgânico dissolvido e fósforo complexado à matéria orgânica, podem desencadear um crescimento desordenado da microflora aquática, denominado *bloom* de algas (Selkirk, 1982; Hessen et al., 1997; Glibert et al., 2001; Anderson et al.,

2002). Em zonas costeiras, tais fontes nutricionais são, na maioria das vezes, de procedência alóctone, contribuindo, fortemente, para a eutrofização dos sistemas lacustres e estuarinos (Aprile et al. 2001; Glibert et al., 2001).

Os mecanismos responsáveis pela dinâmica dos nutrientes nos ecossistemas aquáticos ainda são pouco conhecidos (Wollast, 1993), sendo necessário obter maiores informações sobre os vários compartimentos atuantes no ecossistema aquático e suas interações. Para isto, faz-se mister a aplicação de modelos matemáticos, cuja utilização para explicar a dinâmica dos nutrientes no ambiente aquático tem sido incentivada devido à vantagem de poderem ser propostos e aplicados em outros ecossistemas, mediante adequações às condições locais. Dentre os modelos utilizados em estudos de ecossistemas aquáticos, Patten (1971) e Maki & Thompson (1973) destacam os modelos de simulação espacial, crescimento, transferência de energia, fixos, estocásticos, estatísticos, compartimentais e conceituais.

Um dos primeiros trabalhos de balanço de massa em ecossistemas costeiros foi realizado por Redfield *et al.* (1963), que estudaram as relações C:N:P em organismos planctônicos e sua influência na composição da água do mar. Essa relação ficou bastante conhecida como razão  $C_{106}N_{16}P_1$ . Um dos primeiros modelos de balanço de massa para o fósforo total da água e sedimento foi desenvolvido por Chapra (1977), a partir de estimativas e simulações, e posteriormente modificado por Chapra & Sonzogni (1979) e Sonzogni *et al.* (1983). Smith & Atkinson (1983), estudando o metabolismo do C-orgânico na costa da Austrália, apresentaram um modelo de fluxo de massa envolvendo os compartimentos água e organismos fotossintetizantes. Outros modelos consideram na elaboração do balanço de massa os teores de P-total, compostos orgânicos e elementos-traço nos compartimentos água, sedimento e atmosfera, e seus aspectos sazonais asso-

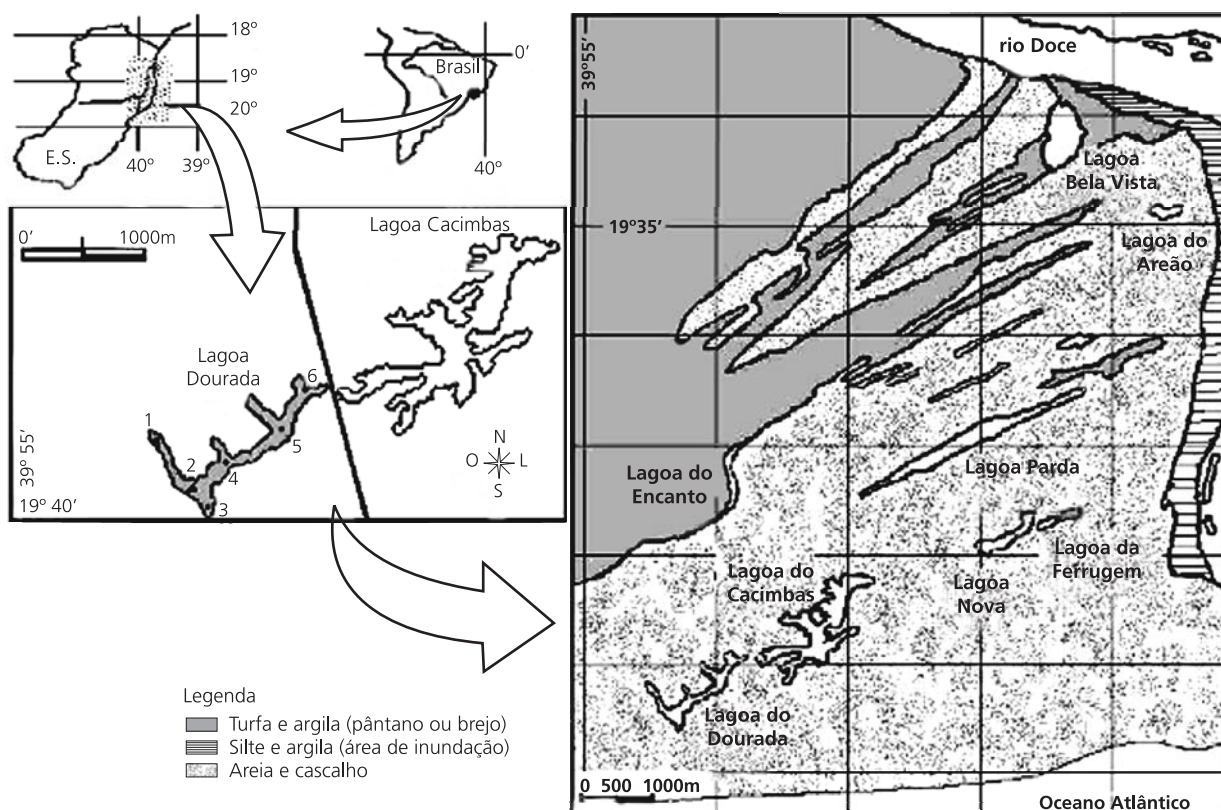
ciados aos ecossistemas aquáticos (Lesht, 1985; Lang & Fontaine, 1990; Lesht *et al.*, 1991 e Gustafsson & Franzén, 1996).

Estudos referentes à dinâmica do N e P na planície costeira do baixo rio Doce (ES) ainda são modestos. O objetivo deste trabalho foi elaborar um modelo compartimental e conceitual de balanço de massa para uma lagoa costeira tropical da planície do baixo rio Doce, a partir dos resultados limnológicos e teores de nutrientes (N e P) na água e sedimento, obtidos nos períodos de estiagem e chuvas de 1993 a 1998.

## MATERIAL E MÉTODOS

### Área de estudo

O estudo foi realizado na lagoa Dourada (Figura 1), que faz parte de um grupo de lagoas



**Figura 1.** Mapa litológico da planície costeira do baixo rio Doce, Espírito Santo (Brasil), com destaque para a lagoa Dourada e os pontos de amostragem.

costeiras as quais se estendem ao longo da planície do baixo rio Doce, na costa Atlântica, próximo à foz do rio de mesmo nome, e pertencem à Reserva Biológica de Comboios no Espírito Santo. A lagoa Dourada possuiu área de 44,5ha, profundidade média de 1,0m na estiagem e 1,3m no período de chuvas, e está localizada aproximadamente a 1 300m da costa, a uma altura de 16m acima do nível do mar. Os primeiros estudos sobre as condições limnológicas e climatológicas do ambiente foram realizados por Aprile *et al.* (1998a,b, 2001).

O solo encontrado da Reserva Biológica de Comboios à Foz do Rio Doce (Figura 1) está dentro de uma faixa que se estende desde Conceição da Barra até Barra do Riacho, pertencente à subprovíncia de Araçuaí. O embasamento desta subprovíncia está representado pelos complexos Caraíba-Paramirim e Paraíba do Sul. Evidências no terreno e dados estruturais e petrográficos sugerem principalmente uma origem sedimentar, provavelmente relacionada a material pelítico aluminoso retratado por metatexitos de composição kinzigítica e lentes de calcossilicatas (Suguió *et al.*, 1982; Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 1987).

Do ponto de vista fisiográfico, das três províncias geomorfológicas descritas por Suguió *et al.* (1982) para a zona costeira, cita-se a Região Serrana, Planície de Tabuleiros e Planície Costeira, e é nesta última que domina a área estudada. A Planície costeira apresenta-se com forma semi-lunar crescente, assimétrica e convexa em direção ao mar, com uma largura máxima na direção leste-oeste de 38km e um comprimento máximo norte-sul de cerca de 150km. É constituída de sedimentos arenosos e depósitos areno-argilosos fluviais, além de zonas baixas superficialmente turfosas (Figura 1).

Os terraços marinhos internos, mais antigos, são recobertos por uma floresta, enquanto que os mais externos e mais novos são ocupados por uma vegetação psamofítica. As zonas de sedimentos fluviais são ocupadas pela floresta e as zonas baixas pantanosas por gramíneas. A quase totalidade da área encontra-se destituída de sua vegetação original, em consequência de atividades de pecuária

e silvicultura. Nas áreas pré-cambrianas, próximas ao mar, há uma predominância de Floresta Ombrófila Densa, com ocorrência de cerrados em pequenos platôs de cobertura arenítica recente. A transformação pretérita do solo, na região, indica uma forte lixiviação, demonstrando com isso espécies xeromórficas incomuns a áreas ombrófilas (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 1987). A planície onde está localizada a lagoa Dourada, bem como outras lagoas costeiras formadas durante o último período de transgressão e regressão marinha, é ocupada hoje por inúmeras fazendas, cujas principais práticas são a pecuária extensiva e o plantio de mamão. Nas proximidades da lagoa Dourada encontra-se outra lagoa costeira (lagoa Cacimbas), não havendo, contudo, qualquer tipo de ligação superficial entre elas. Há ainda uma estrada não pavimentada atravessando exatamente entre as duas lagoas (Figura 1), que liga o distrito de Regência à Base do Tamar de Comboios e à zona litorânea. O clima da região é classificado como quente e úmido, com médias anuais superiores a 23°C, e chuvas com médias de 1232,3mm/ano (dados fornecidos pela Estação Experimental de Linhares).

## Procedimentos

Foram escolhidos seis pontos de amostragem de água e sedimento na lagoa Dourada (Figura 1). As coletas foram semestrais, considerando os períodos de chuva (jan-fev) e estiagem (ago-set), entre 1993 e 1998. As amostras de água foram coletadas com garrafa de Van Dorn e as de sedimento com draga de Ekmann. Na base do Projeto Tartarugas Marinhas (TAMAR), próxima ao município de Regência, as amostras de água foram acidificadas com  $H_2SO_4$  e os sedimentos foram secos em temperatura ambiente, para posterior preservação.

A profundidade (m) de cada ponto foi determinada com trena, a transparência da água foi medida com disco de Secchi ( $\phi=0,30m$ ) e a temperatura (Temp. °C) com termistor FAC 400 ( $\pm 0,1^\circ C$ ). A condutividade elétrica (CE  $\mu S.cm^{-1}$ ) e pH foram mensurados com potenciômetros digitais CD-2P e

DMPH-2 Digimed, respectivamente. O oxigênio dissolvido (OD mg.L<sup>-1</sup>) e a saturação do oxigênio (Satur. %) foram determinados com oxímetro WTW OXI-197 e pelo método de Winkler modificado pela azida sódica. A determinação do nitrogênio orgânico na água (NOA mg.L<sup>-1</sup>) e sedimento (NOS mg.g<sup>-1</sup>) foi realizada pelo método clássico de Kjeldahl, modificado por Aprile & Bianchini Jr. (2003a). O método é dividido em três etapas: 1º) a digestão ácida com H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> + catalisador misto (K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> - Se - CuSO<sub>4</sub>) em bloco digestor por 3 horas, a 300°C; 2º) destilação em destilador de Markan com NaOH (46%), sendo o material condensado coletado em erlenmeyer com 10mL de H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub> + indicador misto; e 3º) titulação feita com H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 0,01N (ponto de viragem verde-vermelho). O fósforo total na água (PTA mg.L<sup>-1</sup>) e sedimento (PTS µg.g<sup>-1</sup>) foi determinado pelo método do ácido ascórbico, com extração ácida (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 0,025N + HCl 0,05N) a frio e leitura em espectrofotômetro a 725nm, segundo procedimentos de Aprile & Bianchini Jr. (2003b). Os teores de matéria orgânica (MO) foram determinados pela incineração a 550°C em mufla por 4 horas, e o cálculo foi feito a partir da diferença entre massa inicial e final. As medidas na coluna de água foram realizadas a cada 0,5m da superfície ao fundo.

Foram calculadas medidas de tendência central e variabilidade (mínimo, máximo, média e desvio-padrão) para os parâmetros limnológicos, com objetivo de evidenciar as diversas características espaço-temporais presentes no lago. Foi determinado

o grau de similaridade entre as doze componentes estudadas por meio de análise de agrupamento, usando-se o método de ligação pela média não ponderada (UPGMA), objetivando gerar aproximações para um modelo de fluxo de caixa, e os resultados são apresentados na Tabela 1, pelos coeficientes de associação pela distância matricial (dmt). Foi aplicado Teste "t" para observações pareadas com objetivo de verificar se houve diferença nas concentrações de N e P entre os períodos de estiagem e chuvas, assegurando ou não a sazonalidade estabelecida no modelo.

O modelo aplicado neste trabalho é do tipo compartimental/conceitual. Trata-se de um modelo representativo da essência básica de um sistema que, segundo Maki & Thompson (1973), está relacionado à observação do ambiente real, de modo que um aperfeiçoamento do esquema representado no modelo conceitual influi sempre na elaboração de outro modelo. A aplicação desta técnica permitiu a geração de um fluxo de caixa para N e P, entre os compartimentos água e sedimento superficial, a partir do grau de similaridade com as respectivas distâncias matriciais e do índice de estado trófico entre as componentes mensuradas. O modelo foi baseado em estudos de Smith (1984), Santos (1986), Schäfer (1988), Lesht *et al.* (1991) e Gustafsson & Franzén, (1996). Foi possível estabelecer, ainda, o grau de interdependência e independência dos elementos nutricionais, com a aplicação de equações diferenciais para as fontes alóctone e autóctone.

**Tabela 1.** Distância matricial euclidiana para as variáveis estudadas na água e sedimentos da lagoa Dourada (Regência, ES) entre 1993 e 1998.

	Prof.	Secchi	Temp	CE	pH	OD	Satur.	NOA	NOS	PTA	PTS
Secchi	2,17										
Temp.	4,97	4,97									
CE	3,19	4,54	3,62								
pH	3,34	3,32	3,84	3,90							
OD	3,06	3,21	4,19	3,29	4,56						
Satur.	3,14	3,31	4,09	3,24	4,57	<b>0,21</b>					
NOA	3,97	3,88	3,53	4,00	<b>2,87</b>	4,69	4,63				
NOS	4,21	4,10	3,70	3,84	<b>2,88</b>	4,46	4,41	<b>2,10</b>			
PTA	4,24	4,15	3,95	3,36	4,58	3,31	3,28	3,42	<b>2,80</b>		
PTS	3,72	3,94	3,69	3,66	<b>2,91</b>	4,65	4,59	<b>0,59</b>	<b>1,74</b>	<b>1,47</b>	
MO	3,90	3,85	3,61	3,96	<b>2,88</b>	4,69	4,63	<b>0,17</b>	<b>1,67</b>	3,39	<b>0,48</b>

Distância matricial (dmt) significativa em negrito.



## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os valores médios (M) com os respectivos desvios-padrão (DP), mínimos e máximos das variáveis mensuradas na lagoa Dourada estão apresentados na Tabela 2. A transparência da água foi maior durante os períodos de chuvas, que coincidem com o verão na Região Sudeste do país e, portanto, com o período de maior insolação. A média foi de 0,76, DP=0,51m no período de chuvas e 0,34, DP=0,25m na estiagem. A temperatura da água também foi, em valores absolutos, maior durante as chuvas (M=29,1, DP=0,9°C), pelos mesmos motivos descritos anteriormente. Durante as fases de estiagem a temperatura média da água foi de 21,9, DP=0,4°C. O oxigênio dissolvido apresentou forte sazonalidade, passando de uma concentração média de 3,86, DP=0,47mg.L<sup>-1</sup> (49,9% de saturação) nas chuvas para 6,64, DP=1,06mg.L<sup>-1</sup> (75,7% de saturação) na estiagem, o que representou um acréscimo de 72,0%.

O potencial hidrogeniônico foi o que apresentou a menor variabilidade ao longo do período de estudo, com média de 6,69, DP=0,06 durante as fases chuvosas e 6,72, DP=0,06, nas fases de estiagem. Essa ausência de sazonalidade revela um sistema lacustre bem tamponado, como foi sugerido nos trabalhos iniciais de Aprile et al. (1998b). Há uma forte correlação entre o sistema hídrico e a biota

aquática, de modo que a biota pode vir a interferir no equilíbrio dos íons H<sup>+</sup> e OH<sup>-</sup>, da mesma forma que o pH interfere, de diferentes maneiras, no metabolismo das comunidades aquáticas.

A condutividade elétrica variou de 104,6 a 125,8μS.cm<sup>-1</sup> (M=115,3, DP=8,6μS.cm<sup>-1</sup>) durante as chuvas, e de 83,2 a 90,1μS.cm<sup>-1</sup> (M=84,9, DP=2,6μS.cm<sup>-1</sup>) nas fases de estiagem (Tabela 2). Observou-se, pelos desvios-padrão, maior variabilidade dos valores durante as chuvas, quando o volume de sedimentos marginais transportados para a lagoa foi visualmente maior, principalmente nos pontos mais próximos à estrada. Bozelli (1992) *apud* Gomes (1998) atribui a elevada condutividade das lagoas costeiras ao fornecimento de consideráveis quantidades de íons do mar pela ação do *spray* marinho e, em menor escala, ao lençol freático. Gomes (1998) corroborou a afirmação ao estudar a lagoa de Uruaú, no litoral oeste do Ceará, e encontrar valores para condutividade entre 1.200 a 3.650μS.cm<sup>-1</sup>.

Cargas de íons dissolvidos “enriquecem” a lâmina de água, refletindo no aumento da condutividade. Associado a esse processo, uma carga significativa de material particulado é transportada do ambiente marinho para os ecossistemas costeiros, pela deposição atmosférica seca e úmida de aerossóis e *spray* marinho, que enriquecem esses sistemas com

**Tabela 2.** Valores médios (M) desvios-padrão (DP) (mínimos - máximos) dos parâmetros limnológicos mensurados na lagoa Dourada durante as chuvas e estiagem de 1993-1998.

Parâmetros	Chuvas			Estiagem		
	M	DP		M	DP	
Profundidade (m)	1,25	0,78	(0,27 - 1,98)	1,03	0,72	(0,13 - 1,72)
Secchi (m)	0,76	0,51	(0,27 - 1,35)	0,34	0,25	(0,08 - 0,66)
Temperatura (°C)	29,10	0,90	(28,00 - 30,50)	21,90	0,40	(21,03 - 22,60)
Condutividade (μS.cm <sup>-1</sup> )	115,30	8,60	(104,60 - 125,80)	84,90	2,60	(83,20 - 90,10)
pH	6,69	0,06	(6,62 - 6,75)	6,72	0,06	(6,60 - 6,75)
O <sub>2</sub> dissolvido (mg.L <sup>-1</sup> )	3,86	0,47	(3,20 - 4,45)	6,64	1,06	(5,40 - 7,92)
Saturação do O <sub>2</sub> (%)	49,90	5,30	(42,20 - 55,80)	75,70	10,40	(62,80 - 87,90)
NOA (mg.L <sup>-1</sup> )	0,08	0,01	(0,08 - 0,09)	0,07	0,01	(0,06 - 0,08)
NOS (μg.g <sup>-1</sup> )	3436,00	448,60	(2 678 - 3 865)	2 792,00	650,90	(1 965 - 3 678)
PTA (mg.L <sup>-1</sup> )	0,07	0,02	(0,04 - 0,09)	0,08	0,04	(0,04 - 0,12)
PTS (μg.g <sup>-1</sup> )	3,81	1,40	(1,60 - 5,01)	3,49	2,17	(1,20 - 5,60)
MO (cmol+.kg <sup>-1</sup> )	0,65	0,20	(0,40 - 0,86)	1,38	0,36	(0,89 - 1,90)

diversos íons (McDonald *et al.*, 1982; Ohba *et al.*, 1990; Taylor & Wu, 1992; Allan, 1996; Aprile *et al.*, 1998b; Fitzhugh & Richter, 2004). Fontes externas de materiais, como o escoamento e o spray marinho, são parte de um conjunto de processos interdependentes que governam a ciclagem de nutrientes (Rörig, 2005). Apesar de o transporte de íons pelo aerossol e *spray* marinho ocorrer o ano todo, observou-se que este processo é mais intenso entre agosto-setembro e dezembro-janeiro, períodos em que os ventos são mais fortes em direção às lagoas da planície do baixo rio Doce. Vale ressaltar que as lagoas estão, em geral, situadas entre 1 e 1,5km de distância do oceano. Evidenciou-se o importante papel das chuvas, como fonte alóctone e transportadora de material particulado e/ou dissolvido para as lagoas costeiras.

De modo geral, os resultados revelaram um incremento da carga nutricional nos compartimentos água e sedimento com a chegada das chuvas (Tabela 2). Os incrementos foram de 27,2% para o NOA e de 23,1% para o NOS. As concentrações de fósforo aumentaram em 2,8% para o PTA e em 34,5% para o PTS. Esses percentuais sugerem haver uma importante fonte alóctone de N-orgânico em ambos os compartimentos, provavelmente em decorrência da ação das chuvas sobre os solos marginais onde há prática de pecuária extensiva. Estudos realizados por Aprile *et al.* (2001) em oito lagoas costeiras da planície do Baixo Rio Doce revelaram, pela análise de agrupamento, que as formas nitrogenadas (NOA e NOS) e a forma fosfatada PTS estiveram fortemente associadas à matéria orgânica. Os teores de MO, por sua vez, oscilaram entre 0,65, DP=0,20cmol+.kg<sup>-1</sup> durante as chuvas e 1,38, DP=0,36cmol+.kg<sup>-1</sup> durante os períodos de estiagem (Tabela 2).

As lagoas costeiras, quando bem preservadas, apresentam vegetação marginal formada por gramíneas e fanerógamas, além de extensos trechos de manguezais. O aporte de nutrientes de origem alóctone está diretamente associado a essa biocenose. A maior parte da vegetação natural localizada em torno da lagoa Dourada foi substituída por pastagens (Aprile *et al.*, 2001), de modo que a

principal entrada de nutrientes para a coluna de água se dá pela lixiviação dos solos marginais contendo matéria orgânica associada a compostos argilo-arenosos. Segundo Dahm (1981), a entrada de nutrientes para os sedimentos se dá, principalmente, por processos abióticos de adsorção às argilas e complexação química dos óxidos de Fe e Al, o que parece estar ocorrendo na lagoa.

Constatou-se que a elevada condutividade (salinidade), a baixa profundidade e a forte ação dos ventos litorâneos, características típicas de lagoas costeiras, são os principais fatores controladores dos ciclos biogeoquímicos da região. Estudos realizados por Esteves *et al.* (1983), em 14 lagoas costeiras do litoral norte do Rio de Janeiro, revelaram que a baixa profundidade e as altas temperaturas, associadas ao forte regime de ventos naquela região, são os principais fatores para a manutenção de uma coluna de água homogênea (sem estratificação), favorecendo os processos de mineralização dos nutrientes incorporados biologicamente.

Segundo os índices de estado trófico apresentados por Vollenweider (1968), Organisation for Economic Cooperation and Development (1982) e US Environmental Protection Agency (1995), a lagoa Dourada é classificada como mesotrófica a eutrófica, para os teores médios de fósforo e nitrogênio encontrados na água. Essa nomenclatura foi, originalmente, usada para descrever a fertilidade dos solos, levando em consideração os níveis de nitrato, nitrito, nitrogênio amoniacal e P-total. Contudo, ainda é muito aplicada em pesquisas limnológicas pela sua abrangência e volume de dados históricos. Schäfer (1988), estudando 38 lagoas costeiras do Rio Grande do Sul, propõe a inclusão de parâmetros morfológicos no cálculo do índice de estado trófico. Esta classificação torna possível demonstrar a qual categoria o corpo de água se refere, ou ainda, quais os efeitos dos nutrientes sobre a qualidade geral do ambiente. A situação de estado mesotrófico a eutrófico, na qual a lagoa se encontra, indica que a mesma está em fase de transição física e/ou química, de modo a apresentar uma elevação da concentração de nutrientes na coluna de água, especialmente de

nitrogênio na forma orgânica. O estado de transição trófica pelo qual passa a lagoa Dourada é confirmado pela forte ligação de similaridade entre as formas nitrogenadas e a MO mencionada anteriormente.

Com relação à distância matricial entre os parâmetros estudados (Tabela 1), as concentrações de fósforo PTA e PTS ficaram dentro de um mesmo grupo, com uma distância matricial (dmt) igual a 1,47 unidades, enquanto a dmt para a relação NOA-NOS foi de 2,66. Isso significa dizer que há maior equilíbrio entre as concentrações de P-total nos compartimentos pesquisados ao longo do regime hidrológico. A fonte de fósforo durante o período de estudo está mais próxima de ser contínua e não sazonal. Dessa forma, considerando os fatores climáticos (chuvas e ação dos ventos) e geomorfológicos da planície envolvidos, acredita-se que a deposição atmosférica proveniente do aerossol e *spray* marinho contribua significativamente como fonte alóctone de fósforo para o sistema lacustre costeiro. O nitrogênio orgânico apresentou comportamento sazonal, de modo que a principal fonte alóctone foram as chuvas associadas ao processo de lixiviação dos solos marginais. Atividades agropecuárias, próximas à lagoa, são fontes de matéria orgânica rica em compostos nitrogenados para o sistema aquático.

Processos autóctones, como a decomposição, não são contínuos. A velocidade das reações de decomposição é diretamente influenciada pela concentração de oxigênio dissolvido (produção primária) e temperatura da água, fatores que foram marcados pela influência sazonal das chuvas e estiagem.

Graham et al. (1979), após analisarem amostras de partículas atmosféricas coletadas através de filtros instalados na enseada de Narragansett, em *Rhode Island*, na Costa Nordeste dos EUA, concluíram que as diferentes frações de fósforo presentes no ambiente marinho podem ser importante fonte nutricional para as zonas costeiras adjacentes. Os resultados revelaram um alto fator de enriquecimento para as diversas frações de fósforo analisadas, e uma importante participação da ação dos ventos no transporte e deposição de fósforo. Deve-se considerar a possibilidade de que o rio Doce esteja contribuindo

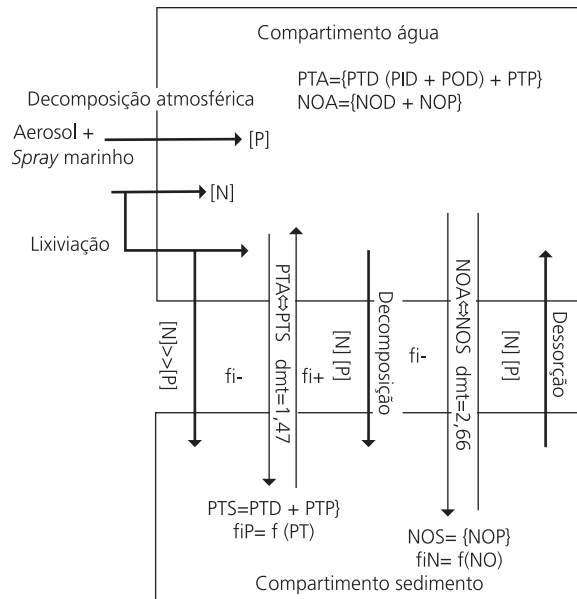
com massas de água enriquecidas por fósforo para a zona costeira, nas imediações da planície. Dessa forma, o fósforo poderia estar retornando à planície costeira devido à ação dos ventos.

Estudos sobre morfologia e produção de biomassa de plantas terrestres associadas ao processo de zonação em ecossistemas costeiros evidenciam espécies vegetais resistentes ao aumento da salinidade do solo e às altas concentrações iônicas provenientes do aerossol e *spray* marinho. O nível de tolerância à salinidade tende a diminuir em direção à zona de arrebentação, onde a carga de íons transportada é elevada. Segundo Gustafsson & Franzén (1996), a deposição seca e úmida de aerossol marinho tem um efeito fertilizante para diversos ecossistemas, suprimindo estes com macronutrientes e elementos-traço. Trabalhos morfológicos e taxonômicos desenvolvidos pelo *Smithsonian Marine Station*, em lagoas costeiras da Florida, mostram a forte influência do aerossol e *spray* marinho na redução do *habitat* da vegetação de restinga e mangue, pela baixa tolerância à concentração de íons, e pela instabilidade que estes causam nos solos e sedimentos (Vince et al., 1989; Lapointe et al., 1992; Gallegos & Kenworthy, 1996).

A aplicação do Teste "t" para observações pareadas mostrou que não há diferença sazonal significativa ( $p > 0,05$ ) para o P-total na água ( $t = -0,1022$ ;  $N = 72$ ) e no sedimento ( $t = -0,9854$ ;  $N = 71$ ), durante o período estudado. Esse resultado reforça a observação de que a fonte de P na lagoa Dourada está mais próxima de ser contínua. Já para o N-orgânico, os resultados estatísticos mostraram haver diferença significativa entre as médias na água ( $t = -9,9124$ ;  $N = 72$ ) e sedimento ( $t = -2,6245$ ;  $N = 69$ ), confirmando a sazonalidade, com contribuição significativa das chuvas associadas ao processo de lixiviação dos solos marginais.

Vários são os índices de trofia elaborados a partir da combinação de diferentes parâmetros, correlacionados a partir de cálculos matemáticos, que levam em consideração a distância matricial resultante de seus respectivos agrupamentos (Schäfer, 1988). O modelo aplicado nesta pesquisa levou em consideração o fluxo de nitrogênio e fósforo entre os

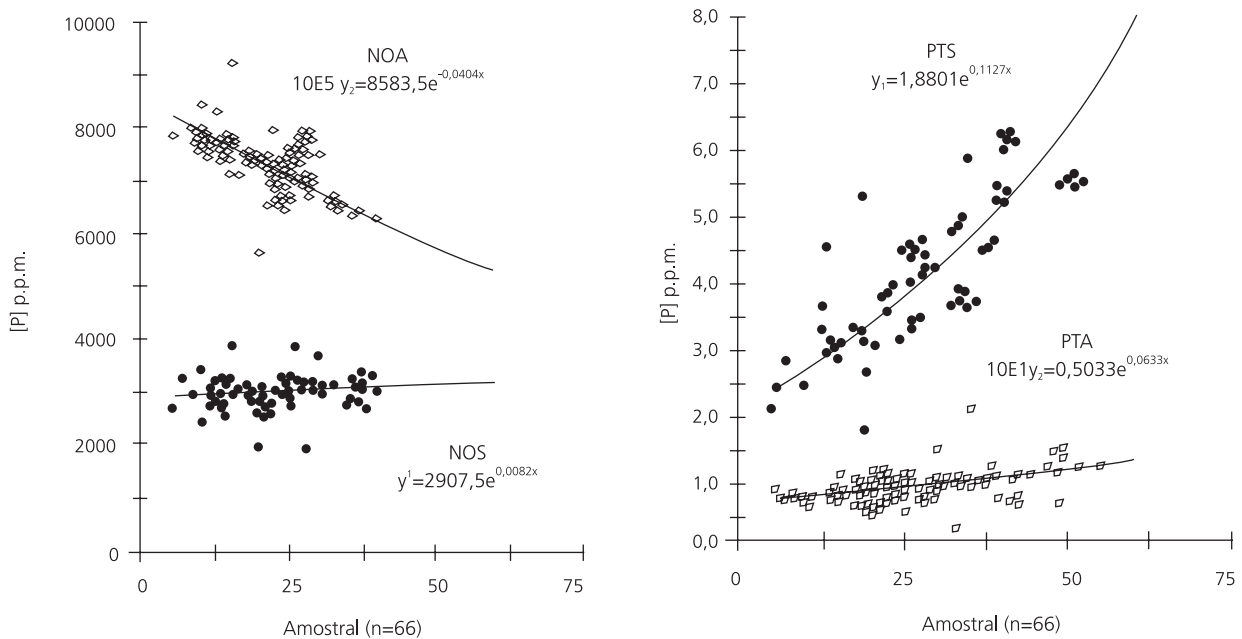




**Figura 2.** Modelo de fluxo de N e P para os compartimentos água e sedimento da lagoa Dourada (ES, Brasil).

compartimentos água e sedimento. Para chegar ao modelo apresentado na Figura 2, foram necessárias algumas etapas prévias. A primeira etapa da modelação foi a quantificação dos nutrientes nos aspectos espacial e temporal, apresentados na Tabela 2. A segunda etapa foi a identificação das fontes pontuais auto e alóctones. Neste aspecto, foi fundamental o reconhecimento da área de estudo, incluindo estudos dos regimes hidrológico e climatológico, uso e ocupação dos solos e caracterização hidrogeológica. O banco de dados gerado a partir das pesquisas desenvolvidas entre 1993 e 1998 por Aprile et al. (1998a,b, 2001) contribuiu para esse reconhecimento.

Um modelo conceitual suficientemente detalhado capaz de, hipoteticamente, explicar todo o funcionamento e comportamento estímulo/resposta de um sistema real, é dito modelo base. Em uma modelagem ou simulação realística, um modelo base



**Figura 3.** Dinâmica de fluxo de interdependência (SID) para o nitrogênio orgânico e de independência (SI) para o fósforo total da lagoa Dourada (ES, Brasil).

nunca pode ser totalmente conhecido e descrito, visto ser consequência do conhecimento que se tem do sistema (observação contínua). No entanto, segundo Maki & Thompson (1973), alguns de seus aspectos podem ser aceitos como conhecidos. Note que, em um modelo base como o aplicado neste trabalho, apesar da aproximação ao sistema real, há alguma dose de abstração, que neste caso foi sustentada nos conceitos limnológicos, geoquímicos e geomorfológicos da região.

Os resultados indicam que o sistema é pouco dinâmico, tendendo a não dinâmico, para os elementos nutricionais pesquisados (Figura 3), sendo que o fluxo de N-org apresentou uma função de interdependência (SID) entre os compartimentos água/sedimento, enquanto o fluxo de P-total se mostrou independente (SI) nas mesmas condições. Segundo os precedentes considerados neste modelo de fluxo, a interdependência se dá em situações de fluxo direto entre dois compartimentos limites. Já a independência tem como base uma fonte externa, que não depende do fluxo direto entre compartimentos limites. Deve-se lembrar que, para o modelo proposto, foram analisados o P-total e N-orgânico. A inclusão das frações orgânica e inorgânica dos elementos estudados poderia interferir nos resultados, alterando o comportamento do modelo de fluxo.

Um modelo compartimental é uma abstração nas quais os diversos componentes de interesse são interpretados como um todo, havendo atenção apenas para as variações do conteúdo dos diversos compartimentos e dos fluxos entre eles (Patten, 1971), sem detalhamento dos mecanismos que perfazem as alterações. Assim sendo, deve-se evidenciar a questão do incremento de nitrogênio em ambos os compartimentos durante as diversas fases de chuva, confirmando a sazonalidade, e o aporte contínuo de fósforo na coluna de água, confirmando a ausência de sazonalidade para esta variável.

Com base nos comportamentos gráficos apresentados na Figura 3, foram dimensionadas equações diferenciais que descrevem as fontes alóctones e autóctones de interdependência e independência (Equações 1 e 2).

Fonte Alóctone de NOA e Autóctone de NOS

$$SID \Rightarrow f(i) N = f(NO) \quad (\text{eq.1})$$

$$f(NO) = f(NOA) + f(NOS) \Rightarrow ae^x + ae^x = \frac{a^2 e^{2x} + 1}{ae^x}$$

$$f(NO) = \left( \frac{\partial^2 a}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 a}{\partial y^2} \right) + \left( \frac{\partial^2 a}{\partial x^2} - \frac{\partial^2 a}{\partial y^2} \right) \Rightarrow$$

$$f(NO) = 2 \frac{\partial^2 a}{\partial x^2}$$

Fonte Alóctone de P - total

$$SI \Rightarrow f(i) P = f(PT) \quad (\text{eq.2})$$

$$f(PT) = f(PTA) + f(PTS) \Rightarrow ae^x + ae^x = 2 ae^x$$

$$f(PT) = \left( \frac{\partial^2 a}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 a}{\partial y^2} \right) + \left( \frac{\partial^2 a}{\partial x^2} - \frac{\partial^2 a}{\partial y^2} \right) \Rightarrow$$

$$f(PT) = 2 \left( \frac{\partial^2 a}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 a}{\partial y^2} \right)$$

A condição de um lago não dinâmico reduz as vias de dessorção, dificultando a liberação de nutrientes do compartimento sedimento para a coluna de água. Essa situação confirma a importância das fontes alóctones para os processos biológicos do ecossistema lacustre. Por fim, com base no modelo de balanço de massa para nitrogênio e fósforo, definiu-se a lagoa Dourada, localizada na planície do baixo rio Doce (ES), como um sistema aberto não conservativo.

## A G R A D E C I M E N T O S

Aos Coordenadores do Projeto TAMAR de Comboios pela infra-estrutura oferecida; aos departamentos de Hidrobiologia e de Engenharia Civil da Universidade Federal de São Carlos pela utilização de suas dependências laboratoriais; e aos revisores deste artigo por suas valiosas e pertinentes sugestões.

## R E F E R Ê N C I A S

- Allan, J.D. (1996). *Stream ecology: structure and function of running waters*. London: Chapman & Hall.
- Anderson, D.M.; Glibert, P.M. & Burkholder, J.M. (2002). Harmful algal blooms and eutrophication: nutrient sources, composition and consequences. *Estuaries*, 25(4):704-26.
- Aprile, F.M. & Bianchini Jr, I. (2003a). Adequação metodológica para determinação de nitrogênio orgânico

- total em macrófitas aquáticas e sedimentos. *Revista Brasileira de Biociências*, 8:49-56.
- Aprile, F.M. & Bianchini Jr, I. (2003b). Adequação metodológica para determinação de fósforo total em macrófitas aquáticas e sedimentos. *Revista Brasileira de Biociências*, 8:57-64.
- Aprile, F.M.; Lorandi, R.; Bianchini Jr., I. & Shimizu, G.Y. (2001). Tipologia dos ecossistemas lacustres costeiros do estado do Espírito Santo, Brasil. *Bioikos*, 15(1):17-21.
- Aprile, F.M.; Shimizu, G.Y.; Lorandi, R. & Silva, L.A. (1998a). Lagoas Costeiras do Espírito Santo, Brasil: caracterização química do sedimento e água destes ecossistemas. *Anais do 8º Seminário Regional de Ecologia*, São Carlos. p.1361-71.
- Aprile, F.M.; Shimizu, G.Y.; Lorandi, R. & Silva, L.A. (1998b). Características físicas e químicas de alguns ecossistemas lacustres da região litorânea do Município de Regência, ES, Brasil. *Anais do 8º Seminário Regional de Ecologia*, São Carlos. p.1353-60.
- Berman, T. (1988). Differential uptake of orthophosphate and organic phosphorus substrates by bacteria and algae in Lake Kinneret. *Journal of Plankton Research*, 10(6):1239-49.
- Chapra, S.C. (1977). Total phosphorus model for the Great Lakes. *Journal of the Environmental Engineering Division*, 103(EE2):147-61.
- Chapra, S.C. & Sonzogni, W.E. (1979). Great Lakes total phosphorus budget for the mid 1970's. *Journal Water Pollution Control Federation*, 51(12):2524-33.
- Dahm, C.N. (1981). Pathways and mechanisms for removal of dissolved organic carbon from leaf leachate in streams. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 38(1):68-76.
- Dugdale, R.C. & Goering, J.I. (1967). Uptake of new and regenerated forms of nitrogen in primary productivity. *Limnology & Oceanography*, 12(2):196-206.
- Esteves, F.A.; Barbieri, R.F.; Ishii, I.M. & Camargo, A.F.M. (1983). Estudos limnológicos em algumas lagoas costeiras do Estado do Rio de Janeiro. *Anais do 3º Seminário Regional de Ecologia*, São Carlos. p.25-38.
- Fitzhugh, T.W. & Richter, B.D. (2004). Quenching urban thirst: growing cities and their impacts on freshwater ecosystems. *BioScience*, 54(8):741-54.
- Gallegos, C.L. & Kenworthy, W.J. (1996). Seagrass depth limits in the Indian river lagoon (Florida, U.S.A.): application of an optical water quality model. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 42(3):267-88.
- Glibert, P.M.; Magnien, R.; Lomas, M.W.; Alexander, J.; Fan, C.; Haramoto, E.; Trice, M. & Kana, T.M. (2001). Harmful algal blooms in the Chesapeake and coastal bays of Maryland, USA; comparison of 1997, 1998 and 1999 events. *Estuaries*, 24(6):875-83.
- Gomes, D.F. (1998). *Caracterização limnológica de um ecossistema lacustre tropical - Lagoa de Uruaú - planície costeira do Município de Beberibe - Ceará*. Dissertação - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Ceará.
- Graham, W.F., Piotrowicz, S.R. & Duce, R.A. (1979). The Sea as a source of the atmospheric phosphorus. *Marine Chemistry*, 7(4):325-42.
- Gustafsson, M.E.R. & Franzén, L.G. (1996) Dry deposition and concentration of marine aerosols in a coastal area, SW Sweden. *Atmospheric Environment*, 30(6):977-89.
- Hecky, R.E. & Kilham, P. (1988). Nutrient limitation of phytoplankton in freshwater and marine environment: a review of recent evidence on the effects of enrichment. *Limnology & Oceanography*, 33(4/2):796-822.
- Hessen, D.O.; Hindar, A. & Holtan, G. (1997). The significance of nitrogen runoff for eutrophication of freshwater and marine recipients. *Ambio*, 26:321-5.
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. (1987). *Levantamento de recursos naturais*. Rio de Janeiro. v.34, Folha SE. 24 Rio Doce.
- Lang, G.A. & Fontaine, T.D. (1990). Modeling the fate and trace part of organic contaminants in Lake St. Clair. *Journal of Great Lakes Research*, 16(2):216-32.
- Lapointe, B.E.; Littler, M.M. & Littler, D.S. (1992). Nutrient availability to marine macroalgae in siliciclastic versus carbonate-rich coastal waters. *Estuaries*, 15(1):75-82.
- Lesht, B.M. (1985). Time dependent solution of multi segment mass balance models of contaminants in the Great Lakes. *Journal of Great Lakes Research*, 11(2): 182-9.
- Lesht, B.M.; Fontaine, T.D. & Dolan, D.M. (1991). Great Lakes total phosphorus model: past audit and regionalized sensitivity analysis. *Journal of Great Lakes Research*, 17(1):3-17.
- Maki, D.P. & Thompson, H. (1973). *Mathematical models and applications*. New Jersey: Prentice-Hall, Englewood Cliffs.
- McDonald, R.L.; Unni, C.K. & Duce, R.A. (1982). Estimation of atmospheric sea salt dry deposition: wind speed and particle size dependence. *Journal of Geophysical Research*, 87(2):1246-50.
- Organization for Economic Cooperation and Development. (1982). *Eutrophication Control*. Paris: Environmental Directorate.
- Ohba, R.; Okabayashi, K.; Yamamoto, M. & Tsuru, M. (1990). A method for predicting the content of sea salt particles in the atmosphere. *Atmospheric Environment*, 24(44):925-35.
- Patten, B.C. (1971). *System analysis and simulation in ecology*. New York: Academic Press. v.1.

- Redfield, A.C.B.; Ketchum, B.H. & Richards, F.A. (1963). The influence of organism on the composition of seawater. In: Hill, M.N. (Ed.). *The Sea*. New York: Wiley. v.2, p.26-77.
- Rörig, L.R. (2005). *Usos múltiplos e qualidade das águas da bacia do baixo Itajaí-Açu, SC: elementos para um gerenciamento integrado*. Tese - Programa de Pós-Graduação em Ecologia e Recursos Naturais, Universidade Federal de São Carlos.
- Santos, J.E. (1986). Contribuição da fixação biológica do nitrogênio em um ecossistema aquático (Represa do Lobo - Brotas - Itirapina - SP). *Acta Limnologica Brasiliensia*, 1:243-70.
- Schäfer, A. (1988). Tipificação ecológica das lagoas costeiras do Rio Grande do Sul, Brasil. *Acta Limnologica Brasiliensia*, 2:29-55.
- Selkirk, W.T. (1982). An analysis by bioassay of the factors which limit algal growth in the P.K. le Roux Impoundment, Orange River, South Africa. *Hydrobiologia*, 97(2):151-6.
- Smith, S.V. (1984). Phosphorus versus nitrogen limitation in the marine environment. *Limnology & Oceanography*, 29(6):1149-60.
- Smith, S.V. & Atkinson, M.J. (1983). Mass balance of Carbon and Phosphorus in Shark Bay, Western Australia. *Limnology & Oceanography*, 28(4):625-39.
- Sonzogni, W.E.; Richardson, W.; Rodgers, P. & Monteith, T.J. (1983). Chloride pollution of the Great Lakes. *Journal Water Pollution Control Federation*, 55(5):513-21.
- Suguio, K.; Martin, L. & Dominguez, J.M.L. (1982). Evolução da Planície Costeira do Rio Doce (E.S.) durante o quaternário: influência das flutuações do nível do mar. *Atas do IV Simpósio do Quaternário no Brasil*. p.93-116.
- Taylor, N.J. & WU, J. (1992). Simultaneous measurements of spray and sea salt. *Journal of Geophysical Research*, 97(5):7355-60.
- US Environmental Protection Agency. (1995). *Regulatory determination on Cement Kiln Dust.*, n. 40, CFR Part. 261, Federal Register, February 7.
- Vince, S.W.; Humphrey, S.R. & Simons, R.W. (1989). *The ecology of hydric hammocks: a community profile*. *Biological Report*, 85(7.26): 82.
- Vollenweider, R.A. (1968). *Scientific Fundamentals of the eutrophication of lakes and flowing waters, with particular reference to Nitrogen and Phosphorus as factors in eutrophication*. Paris: OECD.
- Wollast, R. (1993). Interactions of carbon and nitrogen cycles in the coastal zone. In: Wollast, R., Mackenzie, F.T.; Chou, L. (Ed.). *Interactions of C, N, P and S Biogeochemical Cycles and Global Change*. New York: Springer-Verlag, NATO ASI Series I, 4:401-45.

Recebido em: 4/8/2005

Versão final reapresentada em: 28/6/2007

Aprovado em: 16/8/2007