



Universidade Federal do Pará
Centro de Geociências
Curso de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica

**“COMPORTAMENTO BIOGEOQUÍMICO DE NUTRIENTES NO
ESTUÁRIO DO RIO BACANGA ILHA DE SÃO LUIS-MA”.**

TESE APRESENTADA POR

ODILON TEIXEIRA DE MELO

Como requisito parcial à obtenção do Grau de Mestre em
Ciências na Área de GEOQUÍMICA E PETROLOGIA.

Data de Aprovação 08 / 10 / 98

Comitê de Tese:


.....
WATERLOO NAPOLEÃO DE LIMA (Orientador)


.....
JOSÉ FRANCISCO DA FONSECA RAMOS


.....
SÉRGIO ROBERTO BULÇÃO BRINGEL

BELÉM

À minha mãe **GERMANA e ao meu pai GREGORIO** (in memoriam)
Pela vida e dedicação ao trabalho

A minha esposa **ADALGISA** e filhas **JACYARA, FERNANDA e CHRISTIANE**; pelo amor,
carinho e compreensão nas horas ausentes.

AGRADECIMENTOS

A Universidade Federal do Maranhão (pela liberação) e, em particular, a todos os colegas do Departamento de Oceanografia e Limnologia que assumiram parte de minhas funções e pela confiança e estímulo.

Ao Centro de Geociências da Universidade Federal do Para – UFPA, pelo apoio e oportunidade para realização do curso de mestrado.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq, pela concessão de bolsa de estudos.

A Superintendência do Desenvolvimento da Amazônia – SUDAM, pelo apoio financeiro ao Projeto “ Caracterização Ambiental do Estuário do rio Bacanga, ilha de São Luís – MA”.

Ao Prof. Dr. Waterloo Napoleão de Lima, pela orientação, sugestões e estímulo durante a realização deste trabalho.

Ao amigo e doutorando Gundisalvo Piratoba Morales, pela ajuda indispensável e valiosa, com sugestões e informatização de figuras.

Ao motorista da lancha do Laboratório de Hidrobiologia, Davi Miranda, pela ajuda incansável durante os trabalhos de campo.

Aos professores do Curso de Pós-graduação em Geologia e Geoquímica, especialmente ao Dr. Matos, pelo apoio financeiro para as campanhas de campo, Basile e Vaquera pela confiança e apoio.

Aos funcionários do Centro de Geociências, especialmente, Gladys e Nilza pela colaboração durante a realização deste trabalho.

Aos estudantes de química da Universidade Federal do Maranhão-UFMA, Claudionor e Evandro, pela valiosa colaboração nos trabalhos de campo e análises químicas.

Aos professores Paulo Roberto S. Cavalcante e Maria Marlucia F. Correia pelo apoio logístico durante os trabalhos de campo.

Aos colegas do curso de mestrado Nestor Everton e Henrique Grahen pelo companheirismo e amizade.

A todos que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho, especialmente a Andréa , Teresa, Rosemary e Júlio.

S U M Á R I O

DEDICATORIA	I
AGRADECIMENTOS	II
RESUMO	1
ABSTRACT	4
1- INTRODUÇÃO	5
2- CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA FISIAGRÁFICA	7
2.1 – LOCALIZAÇÃO E ACESSO	7
2.2 – ASPECTOS FISIAGRÁFICOS	7
2.2.1 – Clima	7
2.2.2 – Vegetação	9
2.2.3 - Geologia e geomorfologia	10
2.2.4 – Hidrografia	11
2.2.5 - Ocupação e uso do meio físico	12
3- REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
3.1 – DEFINIÇÕES E CLASSIFICAÇÃO DE ESTUÁRIOS	14
3.2 – COMPORTAMENTO CONSERVATIVO E NÃO CONSERVATIVO	15
3.2.1 – Comportamento conservativo	19
3.2.2 – Comportamento não-conservativo	20
3.2.3 – Concentração e natureza do material dissolvido	22
3.2.4 – Concentração e natureza do material particulado	24
3.2.5 – Interações dissolvido-particulado	25
3.3 – BIOGEOQUÍMICA DOS NUTRIENTES ESSENCIAIS (N, P, C e Si)	26
4- METODOLOGIA	30
4.1 – TRABALHO DE CAMPO	30
4.2 – TRABALHO DE LABORATÓRIO	31
5- RESULTADOS E DISCUSSÃO	36
5.1 – ÁGUAS	36
5.1.1 – Temperatura, Transparência e Condutividade elétrica	36
5.1.2 - Material particulado em suspensão-MPS	39

5.1.3 - pH e salinidade	42
5.1.4 - Oxigênio dissolvido e gás sulfídrico	45
5.1.5 - Uréia e amônio	49
5.1.6 - Nitrito e nitrato	53
5.1.7 - Nitrogênio total	57
5.1.8 - Ortofosfatos e fósforo total	59
5.1.9 - Silicato	63
5.1.10 – Íons maiores (sódio, potássio, cálcio, magnésio e sulfato)	65
5.1.11 - Clorofila “a”	66
5.1.12 – Produção primária do fitoplâncton	69
5.1.13 – Demanda bioquímica de oxigênio	72
5.2 – SEDIMENTOS EM SUSPENSÃO	74
5.2.1 - Carbono orgânico particulado	74
5.3 – SEDIMENTOS DE FUNDO	77
5.3.1 - Carbono orgânico	77
5.3.2 - Fósforo nas frações trocável, orgânica e residual	78
5.4 - ESTRATIFICAÇÃO	79
5.5 – CORRELAÇÃO ENTRE PARÂMETROS	82
5.6 - CONSIDERAÇÕES FINAIS	91
6 – CONCLUSÕES	94
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	96
ANEXOS	101
ANEXO A - Tabelas com os parâmetros físicos e físico-químicos	102
ANEXO B - Tabelas com os valores de nutrientes	105
ANEXO C - Tabelas com os valores dos íons maiores	107
ANEXO D - Tabela com os valores de clorofila “a”	108
ANEXO E - Tabela com os valores de produção primária	108
ANEXO F - Tabela com os valores da demanda bioquímica de oxigênio	108
ANEXO G - Tabela com os valores de carbono orgânico particulado	108
ANEXO H - Tabela com os valores de carbono em sedimentos	109
ANEXO I - Tabela com os valores de fósforo em sedimentos	109

RESUMO

O rio Bacanga, constitui um sub-estuário da baía de São Marcos e está localizado na região metropolitana de São Luís. É uma região que tem uso múltiplo (pesca, captação de água potável, deposição de esgotos domésticos, recreação e lazer, etc.).

O ciclo dos nutrientes essenciais tem sido estudado em vários sistemas estuarinos; as interações com a biota (produção primária), com os sedimentos em suspensão e de fundo, a influência do escoamento fluvial, o enriquecimento das águas costeiras, a fertilização por esgotos domésticos, constituem as principais linhas de pesquisas nesses ambientes. No estuário do Bacanga, o enriquecimento de nitrogênio e fósforo tem contribuído para o processo de eutrofização da zona estuarina. Por outro lado, a construção de uma barragem à jusante (Figura 2.1), diminuiu a entrada das águas costeiras durante o fluxo e refluxo da maré e, de outro, uma barragem à montante reduziu o fluxo de água doce para a zona de mistura.

Este trabalho teve como objetivo principal caracterizar o comportamento biogeoquímico dos nutrientes essenciais (C,N,P e Si), através de uma distribuição espaço-temporal, interação com a produção primária e a biomassa do fitoplâncton (clorofila "a") e as suas relações com alguns parâmetros físicos, físico-químicos e químicos.

Foram realizadas 6 campanhas de campo durante o ano de 1997 sendo três no período chuvoso (fevereiro, abril e junho) e três no período seco (agosto, outubro e dezembro), com amostragem, em cada campanha, em doze estações de coleta num perfil horizontal e numa extensão de 12km entre a montante e a jusante. Também foi realizado um perfil vertical nas estações de coleta de número 2, 8 e 11 a fim de observar e existência de estratificação na zona estuarina. Em campo, mediu-se a temperatura, a condutividade e a transparência e coletou-se amostras de água para os diversos parâmetros físico-químicos e químicos. Em laboratório, utilizou-se métodos titulométricos clássicos, espectrofotometria do ultravioleta-visível e de absorção atômica.

Os resultados mostraram (à jusante) os seguintes valores para as espécies químicas: amônio 4 a 100 μ M, nitrito 0,6 a 9,7 μ M, nitrato 1,3 a 7,3 μ M, uréia 2 a 9 μ M, fosfato 2 a 14,5 μ M e silicato 19 a 89 μ M; e, à montante amônio 0,3 a 3 μ M, nitrito 0,2 a 1,2 μ M, nitrato 0,8 a 2,8 μ M, uréia 1 a 2 μ M, fosfato 0,15 a 1,96 μ M e silicato 82 a 196 μ M. Esses valores elevados, na parte jusante do sistema estuarino, mostram que a principal fonte desses nutrientes é o esgoto doméstico, pois, os pontos de lançamentos de esgotos estão concentrados nessa zona do estuário.

Os valores encontrados na parte montante podem ser considerados como naturais (background) para a região. O oxigênio dissolvido variou de 2 a 5,5ml/L, considerando o perfil longitudinal, da jusante para montante, em função dos processos biogeoquímicos dos quais participa. Na parte jusante, os valores são baixos (1,9 a 3ml/L) são devidos a fraca turbulência e baixa produção primária. Ao contrário, na parte jusante, a maior turbulência e a influência das águas costeiras mais rica em oxigênio, justifica aqueles valores mais elevados (acima de 4ml/L). O gás sulfídrico foi determinado somente nos meses de abril e outubro e variou de 1 a 3,4mg/L, também no perfil longitudinal.

A produção primária apresentou valores máximos (26 a 138mgC/m³/h) em agosto e considerando três níveis de profundidade (1, 50 e 100%) da zona eufótica e, a clorofila "a" de 10 a 44mg/m³ no perfil longitudinal. Essa produção primária elevada nessa zona do sistema estuarino, pode ser explicada por diversos fatores, como baixa turbulência, a disponibilidade de nutrientes e de luz solar nesse mês.

Os íons maiores (Na⁺, K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺ e SO₄²⁻) apresentaram os seguintes valores: sódio de 12 a 9400mg/L, potássio de 2,6 a 340mg/L, cálcio de 10 a 360mg/L, magnésio de 15 a 1143mg/L e o sulfato de 5,8 a 2375mg/L, considerando a variação entre os meses de abril e outubro que correspondem aos períodos seco e chuvoso. A salinidade variou de 0 a 32‰, a temperatura de 24,5 a 31,3°C, ambas no perfil longitudinal. Isso mostra que as águas das nascentes são frias e de salinidade zero. Os perfis verticais mostraram que existe uma estratificação térmica, halina e química (gases dissolvidos: oxigênio e sulfídrico) que pode levar as águas de fundo a uma deficiência ou ausência de oxigênio. Essa deficiência em oxigênio pode ser induzida por estratificação termo-halina e pela decomposição da matéria orgânica de origem natural (manguezal e do escoamento fluvial) e antropogênica (esgotos domésticos).

O comportamento conservativo foi evidenciado para a salinidade, temperatura, condutividade e os íons maiores e não-conservativo para os nutrientes essenciais (N, P e Si). A fertilização das águas estuarinas do Bacanga dá-se, principalmente, pelos esgotos domésticos, permitindo ao ambiente apresentar altas taxas de produção primária. Mas, uma fertilização excessiva pode conduzir a uma anoxia da coluna d'água com possível mortandade de peixe e de outras conseqüências para o sistema estuarino. Portanto, em trabalhos futuros, é necessário monitorar o oxigênio e as concentrações desses nutrientes e os processos de nitrificação e desnitrificação.

ABSTRACT

Bacanga River constitutes an sub-estuary of São Marcos bay and it is located in São Luís city urban area. It is a multiple use region (fishing, drink water tapping, domestic sewage, recreation and leisure, etc.).

The essential nutrients cycle has been studied in various estuary systems; the interaction with "biota" (primary prodction), with both bottom and suspended sediments, the river flow influence, the coastal water enrichment, the fertilization caused by the domestic sewage constitute the main branch of research in such enviromnents. In Bacanga estuary, the nitrogen and phosphorus enrichment has contributed to eutrophication process in the estuary zone. On the other hand, the construction of a downstream weir diminished the entrance of coastal water during the flood and ebb tides, another upstream weir reduced the fresh water flow tot he mixture zone.

This research main goal was to characterize the biogeochemical behaviour of the essential nutrients (C, N, P and Si), through a sapace-time distribution, primary production, and phytoplankton biomass (Chlorophyll a) interaction and its relations to some physical, physical-chemical, and chemical parameters.

Six field campaign were out during the year 1997, three of them were made in the rainy season (February, April and June) and other three were made in the dry season (August, October and December), with sampling from twelve stations made with horizontal outline and in a 12km extension between dowstream and upstream. A vertical outline was also realized in the sampling stations 2, 8 and 11, in order to observe the existence of stratification in the estuarine zone. Temperature, conductivity and transparency were measured in the area ande samples were collected for the various parameters. In na laboratory classic titrimetric, visible-ultraviolet and atomic absorption spectrometry were used.

The results revealed the following values for the essential nutrients (on dowstream): amonium 4 to 100 μ M, nitrite 0,6 to 9,7 μ M, nitrate 1,3 to 7,3 μ M, urea 2 to 9 μ M, phosphate 2 to 14,5 μ M and silicate 19 to 89 μ M, particulate organic carbon 1 to 2,5mg/L; and upstream: amonium 0,3 to 3 μ M, nitrite 0,2 to 1,2 μ M, nitrate 0,8 to 2,8 μ M, urea 1 to 2 μ M, phosphate 0,15 to 1,96 μ M, particulate organic carbon 2 to 5mg/L and silicate 82 to 196 μ M. These high values on

estuary system downstream, show that domestic sewage is the main source, since the sewage system is concentrated in that estuarine zone.

The values found in the upstream may be considered as natural levels (background) for that region. The dissolved oxygen varied from 2 to 5,5ml/L, longitudinal outline considered, from downstream to upstream, due to the biogeochemical process which it takes part or participates. On upstream, low values were found (1,9 to 3ml/L) due to weak turbulence and low primary production. On other hand, on downstream, great turbulence and coastal water influence which is richer in oxygen, justifies the high values (above 4ml/L). Sulfidric gas was determined only in April and October and ranged from 1 to 3,4mg/L, considering the longitudinal outline as well.

The primary production presented as maximum results (26 to 138mgC/m³/h) in August, considering three depth levels (1, 50 and 100%) from the euphotic zone and chlorophyll a from 10 to 44mg/m³, considering the longitudinal outline. This high primary production in such estuarine zone system can be explained through various factors, such as low turbulence, the nutrients, sunlight availability in this month in the medium estuarine zone (stations 5 and 6).

Sulfate, calcium, magnesium, sodium, and potassium ions presented the following values: Na 12 to 9400mg/L, K 2,6 to 340mg/L, Ca 10 to 360mg/L, Mg 15 to 1143mg/L and SO₄ 5,8 to 2375mg/L, considering the range between April and October which correspond to the dry and rainy seasons. Salinity ranged 0 to 32‰, temperature ranging from 24,5 to 31,5°C, both with longitudinal outline considered. This shows that waters from spring are cold and salinity level is zero. The vertical outlines showed there is a thermo-haline and chemical stratification (dissolved gases) which may cause the bottom waters either deficiency or lack of oxygen. This oxygen deficiency may be caused by thermo-haline stratification and by naturally originated organic material decomposition (from mangrove and river flow) and anthropogenic (sewage).

The conservative behaviour was detected in salinity, temperature, conductivity and to the major ions; non-conservative behaviour was detected in essential nutrients. The bacanga estuarine waters fertilization happens mainly due to domestic sewage, this provides the environment high primary production rates. However, an excessive fertilization may lead to a lack of oxygen in the water column, such fact may have consequences to the estuarine system such as: fish slaughter. Therefore, in the future researches it will be necessary to monitor the oxygen level, these nutrients concentrations and the nitrification-denitrification processes.

1 – INTRODUÇÃO

Os estuários tem uma importância histórica e contínua para o desenvolvimento de todas as atividades humanas. São ambientes de interesse das diversas sub-áreas (química, física, geologia e biologia) da oceanografia. Esses ambientes, apresentam elevada produção primária, constituem “habitat” natural, “maternidade” e local de reprodução para diversas espécies da flora e fauna aquáticas. Essa produção primária elevada dá-se, principalmente, pelo enriquecimento de nutrientes de origem natural (lixiviação e intemperismo do solo) e antropogênica (adubos usados na agricultura e esgotos domésticos). A entrada de elevadas concentrações de nutrientes e de outras substâncias no estuário, faz com que o mesmo atue como um filtro biogeoquímico, isto é, recicle essas substâncias antes de transferi-las ou exportá-las para a zona marinha costeira. Em alguns casos, pode ocorrer efeito de anoxia da coluna d’água, produção de gás sulfídrico e floração excessiva de algas tóxicas – o chamado bloom (CHESTER, 1993).

A ilha de São Luís possui uma extensão de 905km², e é formada por quatro municípios. São Luís, a capital, São José de Ribamar, Paço do Lumiar e Raposa (município recém-criado). A população da capital, duplicou nas últimas três décadas passando de 400 para oitocentos mil habitantes. Estima-se que o crescimento industrial, no mesmo período, tenha triplicado. As atividades portuárias, também, de um único porto (o de São Luís), hoje existem cinco portos principais, destacando-se aqueles da indústria de alumínio (ALCOA) e o terminal da ponta da madeira da Companhia Vale do Rio Doce (CVRD).

Os esgotos domésticos da cidade de São Luís, são lançados sem nenhum tratamento preliminar nos rios Anil e Bacanga. Esses esgotos além da poluição microbiológica, introduzem no estuário grande quantidade de matéria orgânica, nutrientes e diversos poluentes. A fertilização desses ambientes por nitrogênio e fósforo, faz com que os mesmos apresentem sinais de eutrofização. A bacia hidrográfica do Bacanga possui diversos afluentes e córregos de pequena extensão, numa área de drenagem de 110km² aproximadamente. Essa bacia está localizada dentro do Parque Estadual do Bacanga, que é uma área de preservação ambiental (APA) e, ainda, contribui com 30% do abastecimento de água da capital. Nessa região, não existem práticas agrícolas com utilização de adubos químicos e nem efluentes industriais, portanto, a principal entrada de nutrientes dá-se através dos esgotos domésticos.

A geoquímica estuarina dos nutrientes foi revisada por ASTON (1978). Estudos mais recentes incluem aqueles de SHARP et al. (1982), FISHER et al. (1988) e MEYBECK et al. (1988). Esses estudos têm mostrado várias características do comportamento dos nutrientes, tais como assimilação biológica, adsorção-dessorção, nitrificação-desnitrificação e trocas na interface água-sedimento. Esses processos podem ser influenciados por diversos parâmetros físicos e físico-químicos (temperatura da água, pH, oxigênio dissolvido, salinidade, etc.).

No estuário do rio Bacanga, existem poucos trabalhos sobre a biogeoquímica dos macronutrientes. Alguns trabalhos, foram realizados por PITOMBEIRA E MORAES (1977), sobre o comportamento sedimentológico e hidrodinâmico; por MELO (1994), sobre o comportamento dos nutrientes.

Além das reservas hídricas, a bacia do rio Bacanga apresenta uma área representativa de manguezal e é um ambiente estuarino produtor de alimentos (peixes, crustáceos e moluscos) e possui áreas de recreação e lazer. Duas obras de engenharia foram realizadas nesta bacia: a primeira, na montante, a barragem do Batatã, com a finalidade de acumular água da nascente principal para o abastecimento da capital, do que resultou numa diminuição do escoamento fluvial para a zona estuarina; a segunda, a barragem do Bacanga, para ligação rodoviária da capital com o Porto de Itaquí e instalação de uma usina maremotriz, portanto, um impedimento ao fluxo e refluxo das águas da maré. Além disso, foram construídas duas avenidas destruindo parte do manguezal. Atualmente, as invasões, a retirada de material de construção e os aterros constituem exemplos da ação antropogênica sobre a bacia hidrográfica.

Os trabalhos de LOPES (1994) e FERNANDES (1994) mostraram que o estuário do Bacanga é bastante rico em organismos planctônicos. E, sabe-se que um dos fatores para essa produção é a disponibilidade de nutrientes para esses organismos. A determinação dos níveis de produção primária e dos nutrientes essenciais, neste trabalho, comprova que o estuário do Bacanga, encontra-se fertilizado por esses nutrientes. A deficiência nas trocas de águas estuarinas e costeiras, devido à barragem do Bacanga, pode contribuir para que haja uma fertilização excessiva e, conseqüentemente, produção de gás sulfídrico, aumento ou diminuição brusca da salinidade e mortalidade de peixes. Portanto, há necessidade de monitoramento dos níveis de oxigênio dissolvido, dos nutrientes e controle sobre despejos de qualquer natureza.

2 – CARACTERIZACAO DA ÁREA FISIAGRÁFICA

2.1 – LOCALIZAÇÃO E ACESSO

O estuário do rio Bacanga está localizado na bacia hidrográfica do mesmo nome e pertencente ao Parque Estadual do Bacanga, que é uma Área de Proteção Ambiental (APA), com as seguintes coordenadas geográficas: 2° 31' – 2° 36' e 44° 16' – 44° 19'W. Essa bacia ocupa a área centro-oeste da ilha de São Luís e parte da zona central do município homônimo (Figura 2.1). O acesso à zona estuarina pode ser feito, a partir do centro de São Luís, pela avenida de ligação rodoviária ao porto de Itaqui; ao Parque, o acesso principal, dá-se pela avenida dos Franceses no portão de entrada da Estação de Tratamento de Água da Companhia de Águas e Esgotos do Maranhão (CAEMA).

2.2 – ASPECTOS FISIAGRÁFICOS

2.2.1 – Clima

Situado entre as regiões norte e nordeste, o Estado do Maranhão tem uma variedade climática de transição entre o nordeste semi-árido e o úmido amazônico. O clima, segundo a classificação de Köppen, é tropical úmido e do tipo Aw com inverno seco e com precipitação média, do mês mais seco, inferior a 60mm. Esse clima compreende toda faixa litorânea e a região da baixada maranhense. Neste tipo de clima, o período chuvoso ocorre de janeiro a junho, com as máximas de precipitação pluviométrica nos meses de março ou abril, o período seco ocorre de julho a dezembro, com as mínimas de precipitação ou ausência nos meses de outubro, novembro ou dezembro (Projeto RADAM folha SA 23 de São Luís). A precipitação anual para o ano de 1996, segundo dados fornecidos pela estação meteorológica da Companhia Vale do Rio Doce (CVRD) foi de 2.202,1mm, com o máximo de 555,5 mm em março e o mínimo de 0,6mm em dezembro e para o ano de 1997, segundo a mesma Companhia, foi de 1.806,8mm com a máxima de 436,8mm em abril e o mínimo de 0,3mm em outubro (tabela 2.1).

As temperaturas médias anuais são relativamente uniformes, e oscilam em torno de 26°C, com uma amplitude térmica anual sempre inferior a 13°C. Os meses mais quentes são os de novembro e dezembro, antecedendo o período chuvoso o mês mais frio coincide com a época mais chuvosa de verão (março ou abril), quando as precipitações abundantes contribuem para amenizar a temperatura. No ano de 1997 a temperatura máxima foi registrada em outubro (33,5°C) e a máxima do mesmo ano em abril (18,8°C) (CVRD).

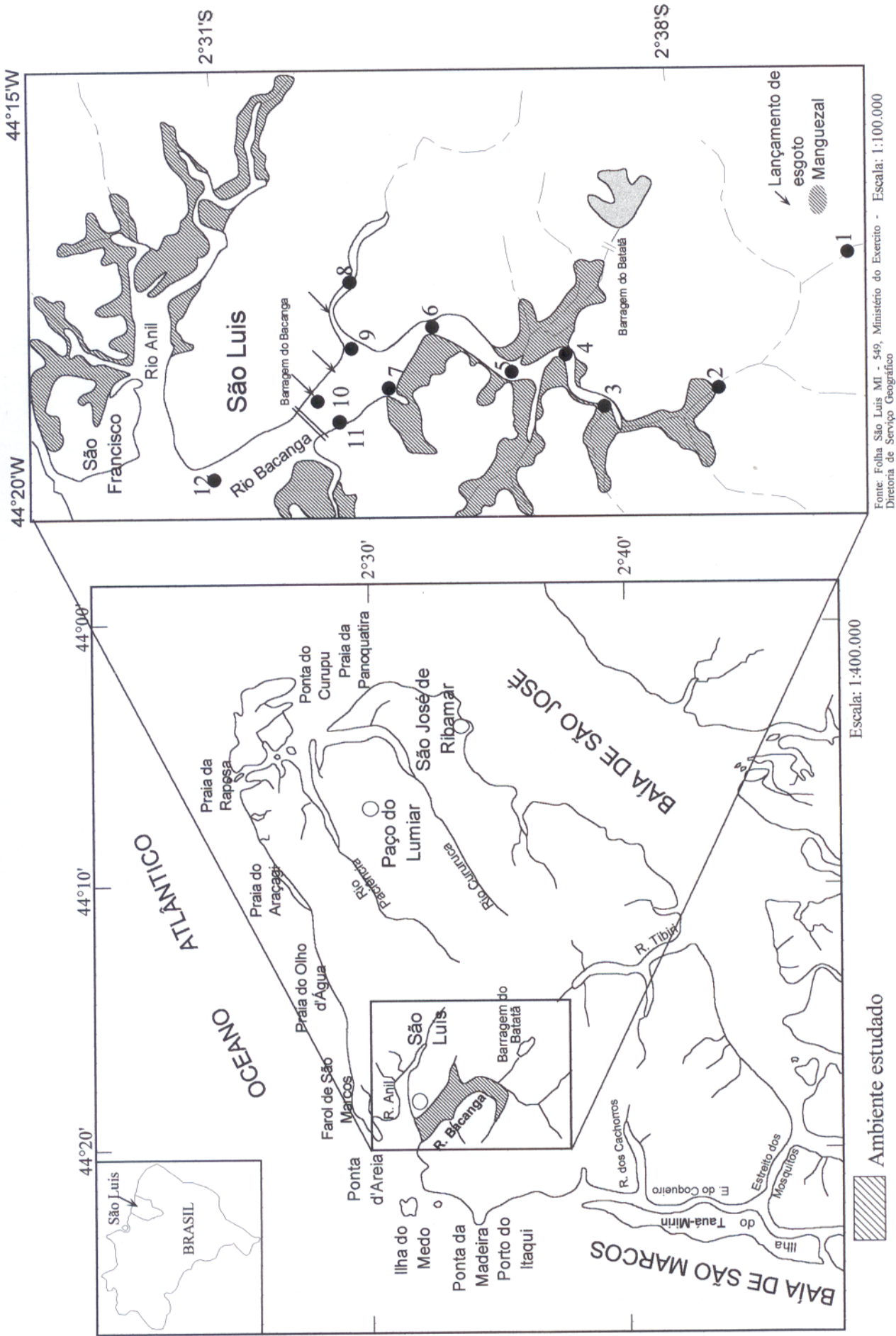


Figura 2.1 - Localização da área de estudo e dos pontos de amostragem, no estuário do rio Bacanga, ilha de São Luís - MA

A região encontra-se numa área de convergência dos ventos de NE, provenientes do hemisfério norte e dos alísios de SE e E, oriundos do hemisfério sul. A origem dos ventos é resultado do mecanismo de brisas terrestres e oceânicas, favorecendo a presença constante de uma boa ventilação. Os ventos alísios de NE são os dominantes, sendo difícil a incidência fora do quadrante N/E. As demais direções (S, SE, N e NW) contribuem com frequências inferiores a 1%, equivalendo a menos de 15 minutos/dia. Os ventos são de intensidade média (3 m/s), apresentam-se com maior frequência no período da tarde. As calmarias são mais frequentes nos períodos noturnos e na época das chuvas.

Tabela 2.1 – Valores de fatores ambientais (1997) na área do estuário do rio Bacanga, ilha de Luís - MA

Mês	T. Média do (°C)	Chuva (mm)	Evaporaçãc v. vento (mm)	(m/s)	Umidade (%)	Insolação (horas)	v. fluvial (m ³ /s)
J	27,3	235,4	129,8	1,2	85	179	
F	27,8	199,4	158,1	3,9	87	149	
M	27,6	555,5	124,4	3,1	89	179	
A	26,4	580,4	83,6	3,0	90	150	0,8
M	26,5	370,5	123,2	2,9	90	154	
J	27,6	290,4	123,2	2,7	87	207	
J	27,8	86,9	176,8	3,0	87	221	
A	28,4	43,2	151,5	4,3	85	277	
S	27,8	1,8	204,0	4,8	86	264	
O	29,2	0,4	195,8	5,7	84	284	0,2
N	29,1	0,6	161,4	5,3	80	227	
D	29,0	0,8	120,5	5,4	83	258	
		T= 2365	T=1752,3				

Fonte: CVRD (1987) T= total anual

2.2.2 – Vegetação

A ilha de São Luís, assim como o Estado do Maranhão, apresentam diversos tipos de vegetação. Isto faz com que, do ponto vista ecológico, esta região seja considerada um ecótono tropical. Pode-se encontrar floresta densa, característica da região amazônica (floresta hileana) com volumetria média inferior a 120m³/hectare, formação de palmáceas, principalmente o babaçu (*Orbignya martiana*) ocorrendo em estado puro, apresentando-se em alguns casos com formação densa e em outros casos associadas com vegetação do cerrado. Também é encontrado o buritizeiro (*Mauritia flexuosa*) e o acaizeiro (*Euterpa oleracea*) margeando as bacias hidrográficas (SEMATUR, 1993).

Outras formações, denominadas de “áreas pioneiras” (SUDAM - Projeto de Hidrologia e Climatologia da Amazônia, 1984) constitui as unidades de vegetação formada pelos manguezais. Estas formações são importantes no estudo biogeoquímico de vários elementos e/ou substâncias químicas e, em geral, para a ecologia. As principais espécies existentes são a *Rhizophora mangle*, *Laguncularia racemosa* e *Avicenia nítida* (DAMAZIO, 1979/80).

2.2.3 – Geologia e geomorfologia

A bacia sedimentar do Maranhão, abrange os Estados do Maranhão e Piauí, constituindo uma coluna geológica com mais de 3 mil metros de espessura que engloba rochas sedimentares do Paleozóico, rochas sedimentares e vulcânicas do Mesozóico e encerrando com os sedimentos de cobertura do Terciário e do Quaternário (Projeto RADAM, folha SA 23 de São Luís).

Os constituintes principais do Terciário são os calcáreos, margas, argilitos e arenitos e do Quaternário aluviões, coluviões e sedimentos de praia. Na região da bacia hidrográfica do Bacanga tem-se uma caracterização geológica constituída de rochas sedimentares representadas por arenitos e argilitos inconsolidados de idade terciária, basaltos alternados por aluviação. A estatigrafia mostra três camadas bem distintas que variam de dezenas de centímetros a mais de um metro, e possui as seguintes unidades: a – Pré – Cambriano, constituída de granitos e granodioritos, que constituem o “Horst de Rosário”; b – Cretáceo (fossilífero) constituída de arenitos, siltitos, argilitos e folhelhos da Formação Itapecuru; c – Terciária, com arenitos e argilitos mal consolidados da Formação Barreiras; d – Quaternário (recente) com aluviões, dunas e manguezais.

Os sedimentos cretácicos da Formação Itapecuru, acima referidos, possuem coloração amarelo-acinzentada a róseo-avermelhada com leitos argilosos e estratos de folhelhos com fácies não-litificados. O contato geológico entre essas formações é bem visível em pontos localizados da ilha de São Luís, no nível das preamares. Nos sedimentos do Quaternário têm-se as seguintes formações: a – **Dunas**, que são constituídas de sedimentos inconsolidados, recobrimo as formações mais antigas. As fontes de material, amplitudes de marés, baixa declividade da área e a existência de correntes litorâneas condicionam a gênese dos depósitos; b – **Aluviões**, constituídos por cascalhos, areia argilas escuras, inconsolidadas, formam verdadeiras faixas que margeam os rios e estuários ou originando depósitos de lama, praia e manguezais. Geologicamente, a Formação Barreiras domina quase que a totalidade da área, embora grandes

extensões tenham sido destruídas por agentes modeladores, dando origem aos vales e depressões. Na zona de manguezal e do estuário propriamente dito, os aluviões são compostos de cascalhos, areia e argilas escuras não consolidadas. Os sedimentos argilosos de coloração escura (rico em matéria orgânica) são constituídos basicamente, por caolinitas, ilitas e montmorilonitas (Projeto RADAM, folha SA 23 São Luís).

Esse ambiente de domínio oceanográfico, está sujeito ao regime de maré, o qual foi alterado, basicamente pela construção da barragem do Bacanga (impede o fluxo e refluxo da maré) e do aterro de mesmo nome.

2.2.4 – Hidrografia

A bacia hidrográfica do rio Bacanga fica situada no Parque Estadual do Bacanga, que é uma área de preservação ambiental (APA), sendo formada por diversos riachos e a barragem do Batatã, contribuindo com 30% do volume total de água potável para a cidade de São Luís. Existem vários afluentes pelo lado direito (rio das Bicas, Coroadinho, Saco e Fermenta) e pelo lado esquerdo (Piancó, Embratel). O volume total de água doce para o estuário é proveniente do escoamento fluvial, a precipitação pluviométrica no mesmo e, ainda, de águas subterrâneas. O fluxo fluvial de água doce provém do rio principal e de seus afluentes que são, na realidade, pequenas nascentes de água. Um cálculo preliminar indica, para o período seco, um fluxo de 0,2 a 0,3 m³/s e para o período chuvoso de 2 a 3 m³/s. O estuário está sujeito ao regime de marés semi-diurnas com duração de preamar e baixa-mar de 6:20h.

Essas marés possuem amplitudes relativamente elevadas, podendo chegar até o máximo de 7m. A entrada de águas marinhas costeiras é feita pela baía de São Marcos para os rios Anil e Bacanga. No caso do rio Bacanga, após 1km aproximadamente da foz deste e após passar pelo centro histórico de São Luís, encontra a barragem do mesmo nome que constitui um empecilho para o fluxo normal das águas costeiras. Segundo informações do administrador da barragem, a mesma é aberta uma vez por mês para entrada e saída de água do sistema estuarino propriamente dito. Isto faz com que o tempo de residência da água doce no sistema estuarino seja maior do que o normal e que haja acúmulo da mesma no período chuvoso. No período seco, o escoamento fluvial diminui consideravelmente, assim como aumenta a taxa de evaporação. Em ambos os períodos sazonais, a quantidade de água doce no sistema é importante para os processos físicos

de mistura e circulação, bem como para os processos biogeoquímicos que serão vistos mais adiante.

2.2.5 – Uso e ocupação do espaço físico

A bacia hidrográfica do rio Bacanga está situada na Floresta Protetora ou Área de Preservação Ambiental (APA) dos mananciais da ilha de São Luís. Esta área foi criada pelo Decreto – Lei Federal número 6.833 de 26 de agosto de 1944 pelo então Presidente da República, Getúlio Vargas e, Parque Estadual do Bacanga, pelo Decreto número 7.545 de 2 de março de 1980, pelo então Governador do Estado, Pedro Neiva de Santana. Possui uma extensão de 3.075hectares e ocupa a região centro-oeste da ilha de São Luís.

Desde sua criação até os dias atuais essa área tem sido submetida às mais adversas ações antropogênicas por parte da iniciativa privada e do poder público. Houve diversas invasões e construção de conjuntos residenciais (com a permissão do governo) formando-se diversos núcleos habitacionais, construção de avenidas (Médici, Franceses e Bacanga), desmatamentos, retirada de material de construção, aterramento e outras ações danosas ao meio ambiente. Em 1984, o Decreto número 9.550 de 10 de abril deste ano do Governo Estadual, estabeleceu novos limites para o referido Parque, dando nova destinação às áreas excluídas. Segundo a Secretaria de Meio Ambiente e Turismo (SEMATUR, 1993) devido a falta de medidas preventivas às novas invasões, encontram-se dentro dos atuais limites os seguintes bairros habitacionais: Coroadinho, Vila Conceição, Primavera, Vila dos Frades, Bom Jesus, Vila São Sebastião, COHEB, Vila Itamar, Vila Esperança, Vila Sarney Filho e parte do Maracanã. Somente 4 bairros dos acima citados (V. Esperança, V. Itamar, COHEB e Coroadinho) têm uma população estimada em 18.200 habitantes.

A Companhia de Águas e Esgotos do Maranhão (CAEMA), é a maior proprietária do Parque, uma vez que possui edificações administrativas e a estação de tratamento d'água (ETA) que ainda contribui com cerca de 25% do abastecimento de água potável para a capital de São Luís. Em suas propriedades a CAEMA conta com diversas nascentes de água e a represa do Batatã, das quais a água é bombeada para a ETA e, em seguida, tratada e distribuída para os domicílios. A construção dessa represa (à montante) diminui consideravelmente o fluxo de água doce para a região estuarina e a construção da barragem do Bacanga (à jusante) impediu o fluxo e refluxo da maré dificultando, portanto, a livre troca das águas costeiras da baía de São Marcos

com as água estuarinas da referida bacia. Também, a cobertura vegetal foi, consideravelmente, modificada pela construção das avenidas acima citadas, passagem das redes de transmissão da ELETRONORTE e CHESF. Após a construção da barragem do Bacanga, formou-se um lago de água salobra que teve denominação homônima. Nesse lago e no principal afluente (rio das Bicas) do rio Bacanga, são lançados, sem nenhum tratamento, cerca de 40% dos efluentes domésticos da cidade de São Luís.

Ainda, segundo a SEMATUR (1993), a atividade industrial está representada na área por quatro madeireiras, três metalúrgicas, uma mineral não-metálica e algumas de confecções. Logo, pode-se considerar que essa atividade é de pequena expressão e de menor impacto ambiental. Por outro lado, a deposição de restos de material de construção e de lixo doméstico das comunidades que vivem dentro do Parque e adjacências são altamente danosos ao meio ambiente. Também, a retirada de madeira e de outros materiais (areia, barro e pedra) para a construção civil têm contribuído para erosão e lixiviação do solo das áreas próximas marginais e carreando material particulado e dissolvido para a calha estuarina. E o que é importante ressaltar é que a madeira retirada faz parte do manguezal existente nas áreas marginais sob a influência das marés.

Uma utilização bastante expressiva da bacia hidrográfica é aquela dos recursos pesqueiros, embora não tenha sido encontrados dados na literatura sobre a produção dos mesmos. Diariamente, podem ser vistos várias dezenas de pescadores que usam as águas estuarinas para a pesca; não só retirando dali seu alimento mas utilizando como fonte de renda familiar. Observou-se também, que a produção de caranguejos, siris e sururús é bastante expressiva e em menor escala os camarões. A comercialização é feita no próprio local ou nas feiras livres da capital. Em resumo, essa utilização da bacia hidrográfica está dividida em três segmentos principais: o primeiro, uso das águas das nascentes para consumo humano; o segundo, na produção de peixes e outros frutos do mar e, o terceiro, a deposição de esgotos domésticos.

3 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 – DEFINIÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DE ESTUÁRIOS

O termo estuário provém do Latin *aestus*, significando calor, fervura ou maré. O adjetivo *aestuarium*, especificamente quer dizer *tidal* ou relativo a maré. A definição mais clássica de estuário é aquela que diz: “**estuário é um corpo d’água costeiro, semi-fechado o qual tem livre comunicação com o mar aberto e dentro do qual a água do mar é mensuravelmente diluída com água doce proveniente da bacia de drenagem**”. Esta definição tem como autores CAMERON & PRITCHARD (1963) e PRITCHARD (1967).

Uma outra definição mais atualizada e abrangente foi dada por FAIRBRIDGE (1980): “estuário é uma entrada do mar sobre o vale do rio estendendo-se ao seu limite superior durante a subida da maré, normalmente, dividindo-se em três partes: a- **estuário inferior** ou parte marinha em comunicação com o mar aberto; b – **estuário intermediário** sujeito a forte mistura de água doce com água salgada; c – **estuário superior** ou fluvial caracterizado pela água doce, mas sujeito diariamente à ação das marés. Os limites entre estes setores ou partes são variáveis e sujeitos às flutuações da descarga fluvial”.

Pode ser observado com mais atenção que ambas as definições mostram algumas características físicas e geológicas que são comuns aos sistemas estuarinos. Isto provém do fato de que os primeiros pesquisadores a definir e classificar esses ecossistemas eram oceanógrafos físicos ou geólogos.

A melhor classificação dos estuários está baseada na geomorfologia. Cada sistema estuarino apresenta pelo menos alguma semelhança no comportamento dinâmico em termos de mistura e circulação de massas d’águas. Geomorfologicamente, os estuários podem ser classificados em: a – **estuários de planície costeira**; b – **lagunas**; c – **fiords**; d – **estuários originados tectonicamente** (PRITCHARD 1952; DYER 1973). Outra classificação, chamada de classificação dinâmica, foi proposta por PRITCHARD (1967) e é baseada na circulação e estratificação, onde os seguintes tipos de sistemas estuarinos foram propostos:

-tipo A ou altamente estratificado, apresentando camadas adjacentes de água doce e salgada, mudança vertical de salinidade em função do rompimento de ondas internas ao longo da profundidade média da picnoclina e, em geral, mostra uma baixa variação de maré e médio a grande fluxo de água doce;

-tipo B ou parcialmente misturado, apresentando um gradiente vertical de salinidade na forma de curva co-tangente e diferenças médias de salinidade entre a superfície e o fundo da ordem de 2 – 10‰. É caracterizado por uma média a grande variação de maré e fluxo médio de água doce-

-tipo C ou bem misturado, este tipo de sistema estuarino pode ser subdividido em:

-tipo C1 ou verticalmente homogêneo com fluxo lateral líquido invertido e

-tipo C2 ou vertical e horizontalmente homogêneo.

PRITCHARD (1967), sugeriu que é possível, mudando as condições de circulação e mistura, um sistema estuarino do tipo A passar para o tipo B ou C. As alterações que podem levar às mudanças do sistema podem ser naturais ou artificiais; por exemplo o alargamento e aprofundamento por dragagem e aumento do fluxo de água doce que chega ao sistema estuarino podem fazer com que haja esta passagem de um sistema para outro.

A maioria dos estuários existentes são do tipo **positivo**, isto é, a perda de água por evaporação do sistema é menor do que a quantidade de água doce que entra, caso ocorra o contrário o estuário é chamado de **negativo**.

Baseado na classificação de PRITCHARD (1967), o estuário do rio Bacanga pode ser enquadrado naquele tipo parcialmente misturado ou tipo B. Embora possa apresentar-se, na parte intermediária (estações 4, 5, 6 e 7), horizontalmente homogêneo no período de estiagem. Na parte superior (a montante) na estação 2 foi evidenciada uma estratificação térmica e salina tanto no período chuvoso, quanto no período de estiagem.

3.2 – COMPORTAMENTO CONSERVATIVO E NÃO- CONSERVATIVO

Este conceito de filtro estuarino está baseado pelo fato de que a mistura de dois tipos de águas diferentes, pode resultar num forte gradiente físico-químico, no ambiente, que pode estar sujeito às variações contínuas no suprimento de **matéria e energia**. E, segundo CHESTER(1993) três pontos são importantes na compreensão de como os estuários atuam como filtros químicos, geoquímicos e biológicos:

a - filtro estuarino é seletivo na maneira pela qual ele atua sobre diferentes elementos, por exemplo, algumas espécies dissolvidas são simplesmente diluídas no estuário e em seguida transportada para o oceano costeiro; enquanto que outras sofrem reações químicas que levam à sua adição ou retirada da fase dissolvida;

b - os efeitos do filtro podem variar intensamente de um estuário para outro, o que torna difícil a identificação de processos estuarinos globais;

c - é necessário levar em consideração o "status" de um sistema estuarino antes de ser feita qualquer tentativa de extrapolação de sua dinâmica para escala oceânica.

O filtro estuarino atua sobre o material particulado e dissolvido, os quais fluem através do sistema, podendo tanto modificar, quanto aprisionar componentes transportados através dos rios dentro da zona de mistura. As modificações desses componentes ocorrem através de processos físico-químicos, geoquímicos e biológicos entre a fase dissolvida e particulada. O equilíbrio envolvido pode ir em qualquer direção, isto é, o material particulado pode atuar como uma fonte de componentes dissolvidos, os quais são liberados para a solução ou atuar como um sorvedouro (sink) para as formas dissolvidas, as quais são retiradas de solução. Desde que toda água de um sistema estuarino seja eventualmente escoada, o que normalmente ocorre em escala temporal de dias, semanas ou meses; neste caso, somente o sedimento pode atuar como um sorvedouro interno (i.e. estuarino) para os elementos que são despejados no sistema pelo escoamento fluvial e outras fontes.

Entretanto, os sedimentos não são reservatórios estáticos dentro do sistema estuarino, mas estão, na realidade, sujeito a uma variedade de processos físicos, físico-químicos, químicos, geoquímicos e biológicos (bioturbação e diagênese), os quais podem resultar na ciclagem e reciclagem de compostos depositados, retornando-os para a coluna d'água. Esses processos de reciclagem incluem: a) difusão quimicamente conduzida dos componentes oriundos da água intersticial; b) fluxo fisicamente conduzido saindo da água intersticial para a coluna d'água; c) ressuspensão de sedimentos pela ação das marés e, em alguns casos, seu transporte de uma zona para outra no sistema estuarino. O próprio sedimento pode desempenhar uma importante função biogeoquímica nos estuários e, de acordo com BEWERS & YEATS (1980), ele pode ser considerado como um terceiro membro final (terceira inter-face) nos processos de mistura estuarina, isto é, uma fonte adicional além da água marinha e fluvial.

Os processos físico-químicos, que controlam o filtro estuarino devem portanto ser considerados, para atuar em termos de uma rede, envolvendo a reciclagem entre o par dissolvido ↔ particulado; com três interfaces estuarinas, isto é, água fluvial, água marinha e o sedimento. Isto pode ser mostrado na Figura 3.1, de maneira simplificada. Dentro dessa rede o

filtro atua sobre o fluxo fluvial e mostra como o mesmo flui através do sistema e, em seguida, sai para o oceano costeiro.

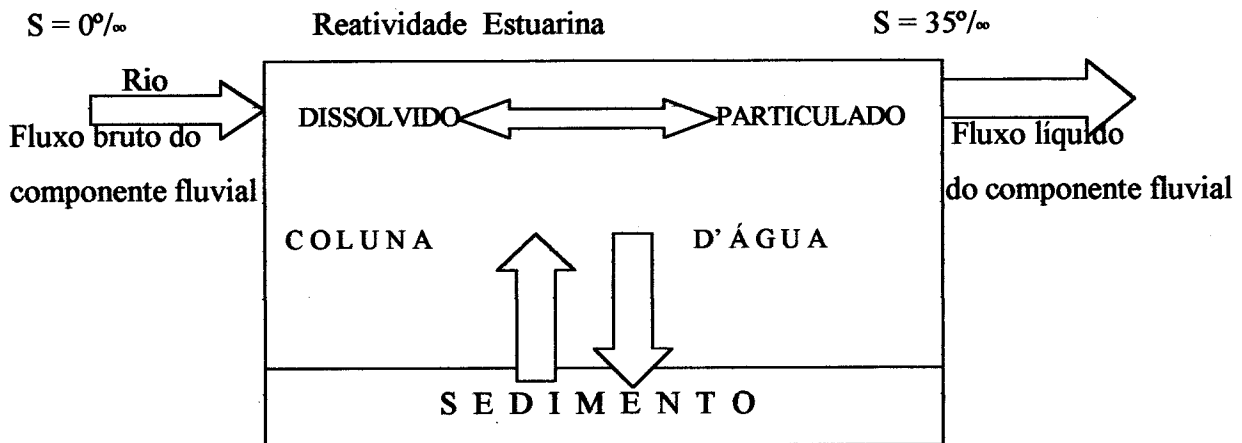


Figura 3.1. Representação esquemática simplificada de um ambiente estuarino, mostrando os principais processos biogeoquímicos envolvidos. Adaptado de CHESTER (1993)

A identificação da reatividade estuarina é feita, em geral, através dos diagramas ou gráficos de mistura (LISS, 1976). Um dos principais processos que altera os materiais transportados pelo rio para o estuário é a mistura física da água doce com a água salgada de composições diferentes, especialmente, com relação ao teor salino. Na ausência de qualquer processo biogeoquímico (reatividade), que contribua à adição ou à subtração de um componente material. Essa mistura física das águas doces e salgadas pode resultar numa relação linear entre as concentrações e as proporções do componente no qual as duas águas originaram a mistura (gradiente de salinidade); mostrando com isto que a composição resultante permanece constante ou inalterado durante o tempo de escoamento da água estuarina e que não existe outras **fontes ou sorvedouros** dos componentes (LISS, 1976).

Esta relação da mistura física oferece uma base fundamental para avaliar os efeitos dos processos biogeoquímicos sobre a distribuição de um componente no sistema estuarino. A técnica mais comumente empregada para isto, chama-se de “gráfico de mistura ou diagrama de mistura”. Nesse gráfico ou diagrama, a concentração de um componente numa série de amostras ao longo do gradiente salino (incluindo também a parte fluvial e marinha) é plotada em função de um “índice conservativo de mistura”, isto é, um componente em que sua concentração, no gradiente salino, seja afetado somente pelo processo físico de mistura. O índice mais largamente empregado é a salinidade, embora outro parâmetro possa ser utilizado (p.exemplo o silicato).

Os diagramas de mistura têm sido muito utilizados para os componentes dissolvidos e as relações teóricas são mostradas na Figura 3.2. Caso a distribuição de um componente seja controlado somente pelo processo físico de mistura, sua concentração ao longo do gradiente salino forma uma linha reta chamada de **linha de diluição teórica – LTD**, a qual relaciona a concentração de dois membros terminais (fluvial e marinha) numa série de mistura; em tais condições, o comportamento do componente é descrito como **conservativo** ou **não-reativo**.

Quando ocorre o contrário, isto é, o componente é envolvido ou participa de reações estuarinas que resulta na adição (ganho) ou na subtração (perda) do mesmo, da fase dissolvida, sua distribuição desvia-se da LTD e seu comportamento é dito **não-conservativo** ou **não-reativo**. Para esse componente a distribuição, na forma dissolvida, pode está acima ou abaixo da LTD, se o mesmo está sendo adicionado ou retirado desta forma ao longo da zona de mistura (gradiente salino). Portanto, o comportamento não conservativo conduz a curvaturas no gráfico de mistura assim que as concentrações desviam-se da LTD. Essas curvaturas podem ser restritas para certas regiões do gradiente salino podendo, portanto, permitir ao químico, geoquímico ou biólogo identificar a zona específica em que as reações ocorreram (Figura 3.2) (CHESTER, 1993)

O diagrama de mistura é uma abordagem relativamente simples para descrever o comportamento de um componente dissolvido durante a mistura estuarina. Na prática, porém, ela está sujeita a um grande número de problemas fundamentais. Por exemplo, embora seja geralmente simples identificar o comportamento conservativo, os desvios da LTD são mais difíceis de interpretação; uma vez que elas podem resultar da ação de outros fatores do que a reatividade estuarina, por exemplo, à adição de componentes não pertencentes aos dois membros finais principais (fonte fluvial e fonte marinha) (BOYLE et al. 1974).

Vários esforços foram realizados para racionalizar a interpretação dos gráficos de mistura estuarina. Por exemplo, BOYLE et al. (1974), deduziram uma relação matemática para a variação do fluxo de um componente dissolvido com relação à salinidade num sistema estuarino. Os autores fizeram isto, desenvolvendo um modelo geral para processos de mistura entre água fluvial e marinha, no qual foi estabelecido um critério geral para identificação do comportamento **não conservativo** entre os componentes dissolvidos. Neste modelo, a concentração do componente dissolvido é, por hipótese, função simples e contínua da salinidade e a seguinte relação foi desenvolvida para variação do fluxo do componente dissolvido com a salinidade:

$$dQ_c/dS = -Q_w(S - S_f) d^2C/dS^2, \quad (1)$$

Q_w é o fluxo de água doce, Q_c é o fluxo do componente dissolvido da fonte fluvial, S é a salinidade de superfície de um dado segundo do estuário e C a concentração do componente dissolvido no mesmo segmento.

Para o comportamento conservativo, não existe adição (entrada) e nem subtração (saída) do componente dissolvido durante a mistura, então:

$$dQ_c/dS = d^2C/dS^2 = 0, \quad (2)$$

e a plotagem da concentração do componente dissolvido em função da salinidade deve ser uma linha reta (Figura 3.2)

Para o comportamento não conservativo, a segunda derivada d^2C/dS^2 pode não ser igual a zero e a plotagem do constituinte dissolvido em função da salinidade deve ser uma curva obedecendo a equação 1.

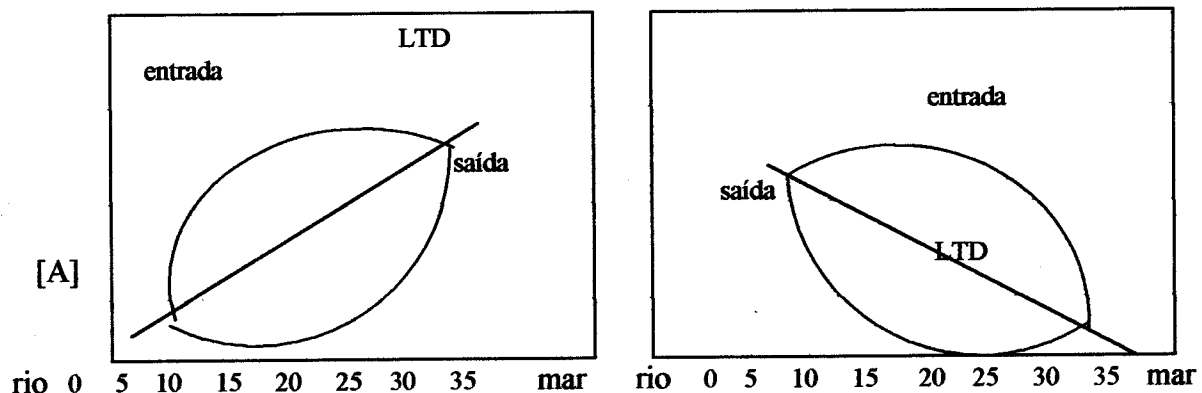


Figura 3.2. Comportamento de elementos dissolvidos nos estuários : (a) gráfico de mistura onde a concentração do componente [A] aumenta com a salinidade; (b) gráfico de mistura onde a concentração do componente [B] diminui com a salinidade. Adaptado de LISS (1976)

3.2.1 - Comportamento conservativo

Alguns elementos apresentam comportamento conservativo em todas as regiões estuarinas. Nesses estão incluídos os elementos maiores na forma dissolvida que contribuem para a salinidade da água do mar, por exemplo, os íons Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} e SO_4^{2-} . O boro e outros elementos maiores em muitos estuários, indicam comportamento conservativo (FANING & MAYNARD, 1978). LIDDICOAT et al.(1983) demonstraram isto para o estuário do rio Tamar (Inglaterra) e concluíram que o boro dissolvido em águas estuarinas é originado, quase totalmente, da água marinha (Figura 3.3). Este é um bom exemplo de comportamento conservativo durante a mistura estuarina.

3.2.2 - Comportamento não-conservativo

Os gráficos de mistura para o comportamento não-conservativo nos sistemas estuarinos podem apresentar-se de diferentes formas as quais podem mostrar adição (entrada) ou subtração (saída) do componente dissolvido e, algumas vezes, também indicar a zona na qual ocorreu a transformação biogeoquímica ou a reatividade estuarina. A seguir são mostrados diferentes tipos de gráficos de mistura estuarina como exemplos deste comportamento:

a - remoção (retirada) do componente dissolvido – para tal componente a sua concentração, ao longo do gradiente salino, fica abaixo da LTD. Um exemplo típico é dado para o ferro, que tem a sua maior remoção na região de baixa salinidade (Figura 3. 4);

b - adição (entrada) do componente dissolvido, para esta situação a distribuição da concentração dos componentes dissolvidos encontra-se acima da LTD. Um exemplo deste comportamento (Figura 3.4) é citada para o bário no estuário do Changjiang –Yantze, por (EDMOND et al.1985). Outro exemplo mais complexo é citado por WINDOW et al. (1983) para o comportamento do cobre no estuário do rio Savannah (Estados Unidos), no qual indica que houve entrada de cobre na região de baixa (<5‰) e de alta salinidade (>20‰);

c - adição e remoção combinadas – este tipo de distribuição foi identificada para o manganês dissolvido no estuário do rio Tamar – Inglaterra, por KNOX et al. (1981). A Figura 3.3 mostra que o manganês dissolvido é retirada na região de salinidade baixa, mas é adicionada na região de salinidade média.

Portanto, é evidente que, se algumas suposições simplificadoras possam ser aplicadas, ao gráficos de mistura ou diagramas de mistura podem ser utilizados para identificar:

- 1º - se um componente sofre ou não reatividade estuarina;
- 2º - que indicação, isto é, adição ou subtração na qual o componente dissolvido foi afetado;
- 3º - a região na zona de mistura, na qual a reatividade tenha sido predominante (CHESTER,1993).

Entretanto, os gráficos de mistura tem uma grande limitação que é a não informação do porquê de um componente comportar-se de tal maneira e a natureza das reações biogeoquímicas que originaram a reatividade estuarina. Com o objetivo de conhecer como opera o filtro estuarino, é necessário portanto, compreender a natureza das transformações que ocorrem na zona de mistura.

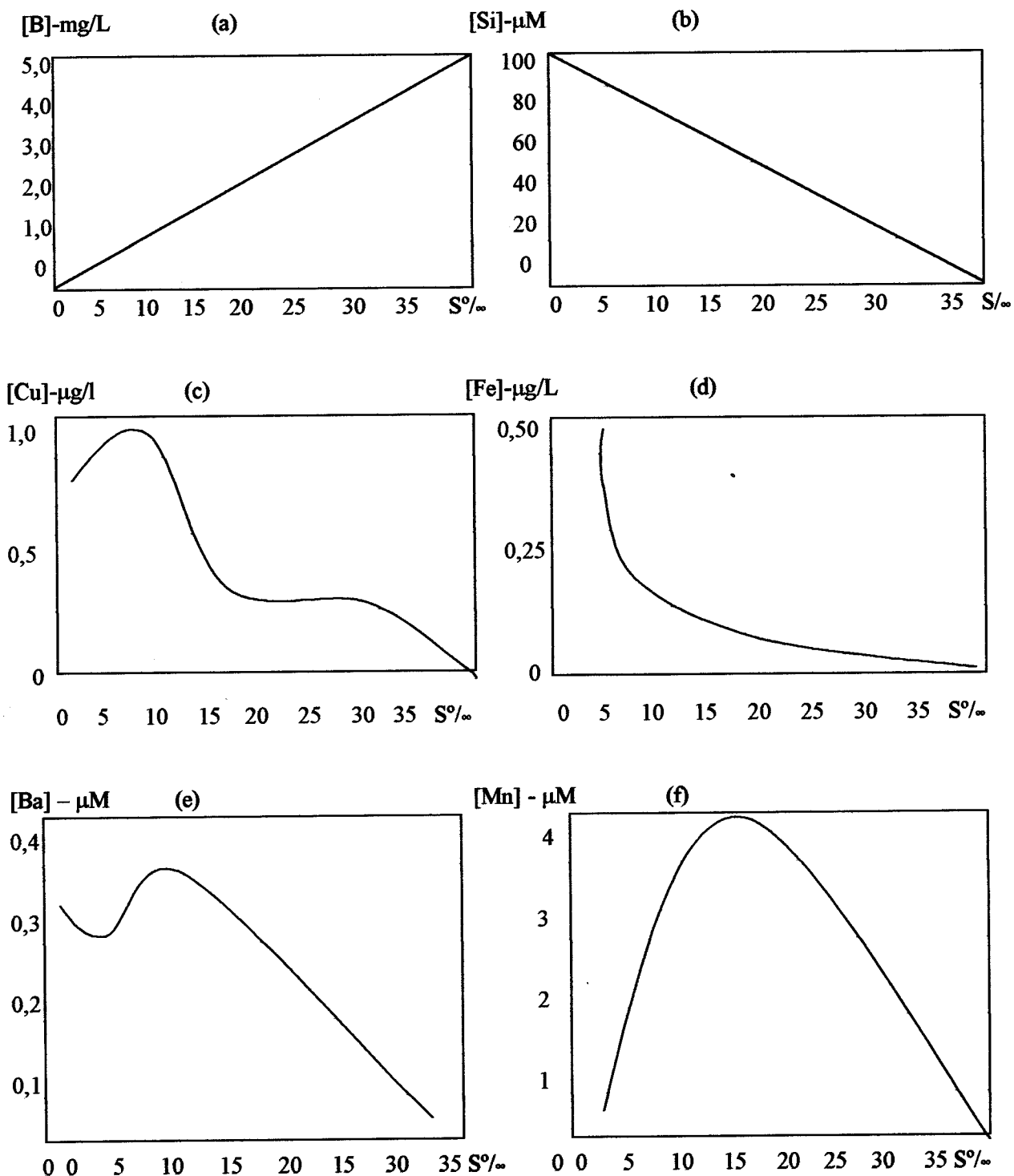


Figura 3.3. Gráficos representativos do comportamento durante a mistura estuarina e no perfil longitudinal para: a) boro dissolvido (Tamar, Inglaterra); b) Si – Silicatos (Amazonas, Brasil); c) cobre dissolvido (Savannah, Estados Unidos); d) ferro dissolvido (Beaulieu, Inglaterra); e) bário dissolvido (Changjiang, China) e f) manganês dissolvido (Tamar, Inglaterra). Adaptado de CHESTER (1993).

A reatividade biogeoquímica das águas naturais é controlada por diversos parâmetros físico-químicos e químicos, os quais incluem o pH, potencial redox, salinidade, concentração de ligantes complexantes, nutrientes, matéria orgânica e material particulado. Todos esses parâmetros sofrem grandes variações nos sistemas estuarinos como resultado de uma variedade de transformações entre as formas dissolvidas e particuladas que ocorrem na zona de mistura. Estas transformações são governadas por fatores físicos, químicos e biológicos; incluindo: adsorção de partículas em suspensão, precipitação, agregação-floculação e assimilação por processos biológicos. A extensão pela qual as transformações ocorrem dependem da concentração e a natureza dos componentes dissolvidos e particulados na zona de mistura.

3.2.3. – Concentração e natureza do material dissolvido

A maioria dos componentes dissolvidos tem concentrações mais elevadas na água fluvial do que na água do mar e como resultado as “concentrações iniciais” desses componentes dissolvidos nos estuários são reguladas pela amplitude ou extensão na qual as águas fluviais e marinhas são misturadas. A natureza ou “espécie” de um componente dissolvido é, também, afetado pela mistura acima referida. Isto é, a “especiação” de um elemento entre a forma dissolvida e particulada (por exemplo, íons pares, complexos orgânicos e inorgânicos), em vez da concentração total, é que controla a reatividade ambiental. A competição entre os complexantes inorgânicos principais (Cl^- , SO_4^{2-} , CO_3^{2-} , OH^-), ligantes orgânicos (material húmico) e o material particulado são os principais fatores que controlam a natureza das espécies inorgânicas nas águas naturais.

Do ponto de vista do comportamento durante a mistura estuarina de ambas formas dissolvidas e particuladas, três das mais importantes diferenças físico-químicas entre a água fluvial e marinha são aquelas relacionadas aos seguintes parâmetros: **força iônica** (salinidade) a qual varia de zero na água doce até 0,7M na água marinha; **composição iônica e concentração de complexos ligantes**, na água doce os íons mais importantes são o cálcio e bicarbonato; enquanto que na água salgada são predominantes, os íons sódio e cloreto; **pH**, na água fluvial ele é ácido e ligeiramente alcalino na água estuarina, portanto, com valores variando entre 5 e 8,2.

Nas zonas estuarinas, o pH de suas águas é similar àquela da água marinha (pH 8,2, em média). Portanto, as águas fluviais são, geralmente, mais ácidas do que a água marinha resultando

com que, na maioria das condições estuarinas, exista um gradiente de pH aumentando com a salinidade. O gradiente pode, portanto, depender do pH dos dois sistemas de águas (doce e marinha) e o comportamento padrão estuarino de alguns elementos (por exemplo, Mn), com relação à partição dissolvido \leftrightarrow particulado pode ser diferente dependendo, entre outros fatores, da variação do pH. Mudanças nos parâmetros acima citados podem afetar a especiação dos elementos quando da mistura dos dois tipos diferentes de águas.

O pH e o Eh são, freqüentemente, considerados como sendo as principais variáveis nas águas naturais. Eh é um meio conveniente de expressar o equilíbrio do potencial REDOX, o qual é um importante parâmetro na química estuarina, uma vez que nos estuários, os elementos podem estarem sujeitos às condições redutoras, tanto na coluna d'água quanto nas águas intersticiais e, em alguns casos, da complexação por sulfato, devem ser também consideradas na modelagem da especiação. De qualquer modo, uma vez existindo o conhecimento das variáveis principais, permanecem algumas incertezas envolvidas na compreensão da especiação dos elementos em águas naturais. Não obstante as dificuldades envolvidas na especiação, tem sido grandes os avanços no estudo da especiação dos elementos na zona de mistura estuarina.

MANTOURA et al. (1978) utilizaram um modelo de interação multi- elemento e multi- ligante para explicar as mudanças que existem na complexação metal-ácidos húmicos em águas estuarinas. Os dados obtidos por esses autores, são úteis no esclarecimento de vários fatores que afetam a especiação de metais nas interface água doce-salgada: a) a especiação dos metais-traço dissolvidos nas águas fluviais é governada, principalmente, pela atividade do íon hidrogênio, alcalinidade de carbonatos e a concentração de compostos orgânicos dissolvidos, tais como os ácidos húmicos; esses parâmetros variam consideravelmente entre a água doce e a salgada, resultando em mudanças na "especiação" e na mistura destes dois tipos de água; b) os ácidos húmicos exercem uma influência significativa sobre a especiação de alguns metais nas águas fluviais, especialmente a baixo valores de pH. Por exemplo, no modelo utilizado por MANTOURA et al. (1978), foi previsto que >90% do Cu e Hg no sistema fluvial é complexado pelo material húmico. A seqüência de aumento da força de ligação do metal-material húmico, obtida pelo autor acima, foi de modo concordante à série de Irving-Williams, isto é, $Mg < Ca = Cd < Mn < Co < Zn < Ni < Cu < Hg$; c) existindo um decréscimo no material húmico complexado com o aumento da salinidade, como ocorre no ambiente de mistura estuarina. Este decréscimo é rápido para o Mg, Ca, Zn, Cd, Mn e Co, porém menos para o Cu e Hg sendo isto

resultante, principalmente, da competição do Ca e Mg, os quais podem utilizar > 90% de sua capacidade complexante; d) em águas com salinidade > 10‰, as cloro-espécies são significantes (>5%) para todos os metais exceto o Cu e Co. Para uma visão mais detalhada a especiação em ambientes estuarinos deve-se recorrer aos trabalhos de SHOLKOVITZ (1978), DYRSSEN & WEDBORG (1980), os quais abrangem a ligação de metais traço com ligantes orgânicos e inorgânicos e, também, a complexação em águas anóxicas

Nessa etapa, por conseguinte, pode ser concluído que durante a mistura estuarina existe uma competição daqueles constituintes dissolvidos entre vários agentes complexantes como descrito acima e entre estes agentes e o material particulado que se encontra presente no sistema estuarino, formando a chamada “sopa estuarina” (CHESTER, 1993).

3.2.4 – Concentração e natureza do material particulado

A classificação do material particulado estuarino (MPE) está baseada num esquema geral proposto por SALOMONS & FORSTNER (1984) e as seguintes classes de MPE podem ser identificadas: a - **material particulado transportado pelos rios** – estes sólidos que chegam na interface rio-estuário incluem produtos de intemperismo crustal (por exemplo, quartzo, argilo-minerais), precipitados de oxí-hidróxidos (principalmente de Fe e Mn), compostos orgânicos terrestres (restos de plantas, animais e material húmico) e uma variedade de poluentes (poeiras, esgotos, etc.); b - **material particulado transportado pelo oceano costeiro** – o material particulado transferido para o estuário na interface estuário - oceano inclui componentes biogênicos de origem marinha (matéria orgânica e restos de animais e vegetais) e inorgânicos (sedimentos costeiros ou formado na água marinha costeira); c - **material particulado produzindo no próprio estuário** – este tipo de material particulado é produzido internamente (autóctone) e inclui componentes orgânicos e inorgânicos floculantes e precipitados e, ambos, são constituintes da matéria orgânica particulada viva e não viva; e os processos principais que conduzem à formação de material particulado nos estuário são: **floculação, precipitação e produção biológica de matéria orgânica.**

A floculação é um processo que dá origem a pequenas partículas (colóides e semi-colóides) que aumentando de tamanho, formam grandes unidades e têm sido citadas em detalhes por POSTMA (1967) e DREVER (1982). No sistema estuarino (elevada força iônica) a floculação é afetada tanto por componentes orgânicos como por componentes inorgânicos,

incluindo argilo-minerais transportados pelo rio, espécies coloidais de ferro e orgânicos dissolvidos (material húmico). A reunião de partículas em tamanhos maiores pode, também, ocorrer por via biológica (produção de pelotas fecais e organismos filtradores) (CHESTER, 1993).

Vários tipos de precipitação ocorrem nos estuários, as quais são precipitações heterogêneas na presença de enorme quantidade de partículas (máxima turbidez) que são, especialmente, importantes na retirada solução de Mn e outros metais traços.

A biomassa estuarina é resultante da produção primária e está relacionada diversos fatores, entre os quais, a concentração dos nutrientes e a turbidez. Cálculos realizados por WILLIAMS (1981), a produção fotossintética estuarina total é da ordem de $5,2 \times 10^{14}$ gC/ano, a qual é aproximadamente 1,5% da produção marinha total. Os rios transportam aproximadamente 2×10^{14} gC/ano para os estuários, a qual é da mesma ordem de grandeza que aquela resultante da produção primária. Entretanto, de acordo com REUTHER (1981), a maior parte do carbono importado é refratário, isto é, resistente à decomposição bacteriana, portanto, não entra no processo de reciclagem no sistema estuarino.

3.2.5 - Interações dissolvido \leftrightarrow particulado

A concentração dos diversos agentes complexantes (ácidos húmicos, entre outros) e do material particulado sofrem variações durante a mistura estuarina. Entretanto, somente o material particulado pode ser retido na zona de mistura e, isto, está associado ao material dissolvido através do equilíbrio dissolvido \leftrightarrow particulado (CHESTER, 1993).

Os processos que estão envolvido na adição ou subtração de componentes dissolvidos na “sopa química” estuarina são os seguintes:

- a - floculação, adsorção, precipitação e consumo biológico, os quais resulta na remoção dos componentes da fase dissolvida e sua transferência para a fase particulada. São tais processos que podem resultar na retenção de componentes nos estuários através do aprisionamento do particulado;
- b - dessorção da superfície de partículas e a decomposição de material orgânico, os quais resultam na adição de componentes para a fase dissolvida. Isto pode resultar num fluxo saindo do estuário para o oceano se eles permanecem nesta fase;

c - reações de quelação e complexação com ligantes orgânicos e inorgânicos, as quais “estabilizam” os componentes na fase dissolvida. Este componentes podem, também, ser escoado para oceano com as massas de águas.

3.3 - BIOGEOQUÍMICA DOS NUTRIENTES ESSENCIAIS (N, P, C e Si) NOS RIOS E ESTUÁRIOS

Alguns autores (CHESTER, 1993; KRAUSKOPF & BIRD, 1995) chamam a denominação acima de macronutrientes, outros (LISS, 1976; HEAD, 1985) de micronutrientes ou simplesmente de nutrientes essenciais, quando se referem às formas (espécies) dissolvidas do nitrogênio, fósforo, carbono e do silício no sistema aquático. O fósforo, assim como os outros dois, pode ser encontrado na forma dissolvida e particulada; os mesmos elementos, as espécies dissolvidas, podem ser encontrados nas formas orgânicas ou inorgânicas. A maioria dos dados encontrados na literatura denomina, a forma inorgânica do fósforo, de fósforo inorgânico dissolvido (PID), fósforo solúvel reativo (PSR) ou simplesmente de ortofosfatos solúveis. Neste caso, o fósforo solúvel reativo na faixa de pH das águas naturais, segundo CHESTER (1993), encontra-se nas formas inorgânicas ($\text{H}_2\text{PO}_4^- \cong 1\%$; $\text{HPO}_4^{2-} \cong 89\%$; $\text{PO}_4^{3-} \cong 10\%$), o fósforo orgânico dissolvido representa um fração pequena do fósforo total dissolvido (PTD) em sistemas aquáticos não-poluídos.

Em média, a concentração do fósforo total dissolvido para água fluvial é da ordem de $28\mu\text{g/L}$ e para o particulado total de $530\mu\text{g/L}$, sendo que deste último $320\mu\text{g/L}$ está na forma inorgânica e $210\mu\text{g/L}$ na forma orgânica. As fontes de fósforo inorgânico dissolvido para as águas fluviais incluem intemperismo de minerais da crosta (ortofosfatos de alumínio, apatita) e fontes antropogênicas (esgotos domésticos e produtos químicos usados na agricultura) (CHESTER, 1993).

O fósforo dissolvido é utilizado na produção biológica, portanto retirado da coluna d'água por este processo e constitui na maioria dos casos o nutriente limitante nos sistemas aquáticos. Ademais, por outro lado, as concentrações do PID na água dos rios são significativamente afetadas por processos químicos envolvidos no equilíbrio água-minerais; por exemplo, aqueles envolvendo adsorção para fases tais como argilo-minerais e oxi-hidróxidos férricos.

O nitrogênio inorgânico dissolvido (NID) é representado por três espécies principais: amônio (NH_4^+), nitrito (NO_2^-) e nitrato (NO_3^-), sendo que o nitrato é a forma mais estável e mais

abundante. O nitrogênio orgânico dissolvido é dominante em rios tropicais e sub-árticos. A origem dessas formas inorgânicas e orgânicas é resultante do fluxo terrestre, aportes antropogênicos e da produção biológica (N particulado) no sistema aquático. A concentração média de nitrogênio total dissolvido (NTD), em sistemas fluviais não poluídos, calculados por MEYBECK (1982) é da ordem $375\mu\text{g/L}$, dos quais $115\mu\text{g/L}$ está presente como espécies inorgânicas (principalmente, nitrato) e $260\mu\text{g/L}$, como nitrogênio orgânico dissolvido. Existem poucos dados na literatura para o nitrogênio particulado mas, MEYBECK(1981) calculou um valor aproximado de $560\mu\text{g/L}$, como média global para os rios. A retirada ou remoção do NID ocorre, principalmente, por processos biológicos.

O silício é o quarto elemento químico mais abundante na crosta terrestre. No sistema aquático ele se apresenta na forma do ácido ortossilícico – H_4SiO_4 e é originado, principalmente, pelo intemperismo de minerais de silicatos e aluminosilicatos. E, diferentemente do N e P, as fontes antropogênicas têm menor importância relativa na contribuição do Si para os rios. O silício dissolvido é um constituinte maior na água do rio, perfazendo um total aproximado de 10% dos sólidos totais dissolvidos e sua concentração média global (MEYBECK, 1979) foi calculada em $4,85\text{mg/L}$. O silício pode-se encontrar no sistema fluvial numa variedade de formas particuladas, as quais incluem minerais (quartzo, aluminosilicatos) e material biológico (opalina, frústulas de diatomáceas).

Uma variedade de exemplos de comportamento, tanto do ponto de vista biológico quanto químico e geoquímico, foram citados na literatura para o N, P, C e Si nos sistemas estuarinos(GESAMP, 1987). Com o objetivo de avaliar os efeitos que os maiores rios, globalmente importantes, têm sobre o fluxo de nutrientes para o oceano mundial é necessário uma melhor compreensão de princípios básicos, os quais governam a geoquímica dos nutrientes nos sistemas estuarinos. Mas, KAUL & FROELICH (1984) chamaram atenção para o fato de que esses princípios não são bem entendidos e com a finalidade de corrigi-los, desenvolveram um modelo para a geoquímica de nutrientes, num sistema estuarino simples e não-poluído (estuário e baía do rio Ochlockonee, Estados Unidos). Analisando e estudando uma variedade de modelos estuarinos padrões, eles foram capazes de descrever matematicamente perfis de longa duração para fostato, nitrato e silicatos por desdobramento em três funções constituintes: **mistura linear**, **regeneração** e **remoção pela produção biológica**. O modelo fornece cálculos quantitativos dos fluxos subsequentes para o oceano e os resultados podem resumidos: a - cerca de 29% do fluxo

da sílica dissolvida é retirada no estuário por atividades biológicas; mas, esse total é regenerado dentro do estuário e, quantitativamente, é devolvida para a coluna d'água. Isto resulta num fluxo de saída igual àquele de entrada no sistema estuarino e que pouca sílica é aprisionada nos sedimentos do sistema; b - em torno de 80% do fósforo reativo dissolvido entra no estuário; um terço do que entra na forma particulada é liberado após deposição no sedimento, sofre remoção biológica no estuário, mas grande parte deste é regenerado de tal sorte que, como a sílica, 100% aproximadamente do PID é transferido para o oceano; c - um balanço de massa para o nitrato não pode ser feito, uma vez que a maior parte do mesmo entra e sai do sistema em formas não determinadas, por exemplo, como amônia, ou através da desnitrificação como N_2 e N_2O ; d - os autores concluíram, por conseguinte, que os estuários são transformadores geoquímicos e que intensificam o fluxo fluvial de PID para o oceano através da liberação de fosfato do particulado e que o fluxo da sílica permanece inalterado.

Os estudos realizados por KAUL & FROELICH (1984) forneceram subsídios que puderam ser extrapolados para o estudo do comportamento dos nutrientes em sistemas fluviais de grande importância global. Estes estudos podem ser citados para os sistemas estuarino do Amazonas (EDMOND et al. 1981), Changjing (EDMOND et al. 1985) e Zaire (VAN BENNEKON et al. 1978). No Amazonas, a remineralização da fração móvel do material orgânico particulado, na zona de deposição do estuário, contribui para o aumento do nitrato e fosfato dissolvidos, os quais tiveram rendimentos que são de 75% aproximadamente superior ao suprimento pelo rio.

Os dados citados para a pluma do Amazonas, durante a floração de diatomáceas no verão (EDMOND et al. 1981) mostram que a atividade fotossintética começou quando o material particulado em suspensão decresceu para $\cong 1\text{mg/L}$, o que ocorreu na faixa de salinidade $\cong 7\text{‰}$ e com luz suficiente para que a produção primária fosse iniciada. A floração de diatomáceas ocorreu numa faixa de salinidade entre 7 a 15‰ e neste local foi total o consumo do nitrato e fosfato e com uma diminuição de 25% da sílica dissolvida. A parte superior da cunha salina torna-se enriquecida de nutrientes remineralizados a partir do material planctônico que vai se transformando e os cálculos do balanço de massa mostraram que: a - quase todo o carbono orgânico e fósforo orgânicos são remineralizados na cunha salina ou na superfície do sedimento; b - a re-mineralização do nitrogênio fixado é apenas parcial, com 50% sendo transformado em outras formas do que nitrito e nitrato; c - somente menor parte da sílica é dissolvida de modo que

o restante deve ser transferido para o sedimento como sorvedouro (sink) de diatomáceas. Estes são os diversos processos que afetam o fluxo líquido dos nutrientes para o oceano Atlântico no estuário do Amazonas.

4- METODOLOGIA

4.1 - TRABALHO DE CAMPO

O trabalho de campo foi realizado em seis campanhas durante o ano de 1997, sendo 3 no período chuvoso (fevereiro, abril e junho) e 3 no período seco (agosto, outubro e dezembro) A campanha de abril coincidiu com o máximo de precipitação pluviométrica e o mínimo de insolação, enquanto aquela de novembro com o máximo de insolação e ausência de precipitação. Resumindo, têm-se:

- 1a. campanha: 24 – 28.02.97 - início do período chuvoso
- 2a. campanha: 22 – 26.04.97 - pico do período chuvoso
- 3a. campanha: 23 – 27.06.97 - fim do período chuvoso
- 4a. campanha: 25 – 30.08.97 - início do período seco
- 5a. campanha: 20 – 25.10.97 - pico do período seco
- 6a. campanha: 08 – 13.12.97 - fim do período seco

As estações de coleta na região estuarina foram distribuídas ao longo da calha estuarina do rio Bacanga, com espaçamento de aproximadamente 1km e de 12 estações de coleta (Figura 2.1), sendo que a estação 1 fica localizada na parte montante (nascente) com salinidade zero (água doce) e a 12 à jusante (água marinha costeira) com salinidade elevada (aproximadamente 30‰). As estações de numero 8, 9 e 10 são consideradas pontuais uma vez que estão próximas aos pontos de lançamentos de esgotos domésticos. Essa amostragem somente foi possível durante a preamar, pois durante a baixa-mar não é possível a navegabilidade no estuário. As comportas da barragem se mantiveram fechadas durante as campanhas de campo acima mencionadas.

A metodologia de amostragem , em campo, obedeceu as recomendações de (HEAD 1985; STRICKLAND & PARSONS 1972; AMINOT & CHAUSSEPIED 1983). Utilizou-se garrafa amostradora de água tipo van Dorn e Nansen para obtenção das amostras. A primeira amostra a ser retirada desta garrafa foi para oxigênio dissolvido e, em seguida , para os demais parâmetros. O oxigênio foi imediatamente fixado com 1mL da solução de cloreto de manganês e 1 mL da solução de iodeto alcalino; em seguida, a amostra deste foi colocada sob proteção da luz solar até a chegada ao laboratório. Essa amostragem, foi feita a 30cm abaixo da superfície para evitar contaminação pelo filme de superfície. Para os demais parâmetros, as amostras foram

individualizadas em frascos de polietileno de $\cong 115\text{mL}$, algumas fixadas no campo com reagentes químicos, como é o caso da amônia (R1 e R2), P e N totais (reagente oxidante), uréia (acidificação a $\text{pH} \sim 2$) e, para os outros nutrientes, mantidas na ausência de luz e em isopor com gelo até a chegada ao laboratório. Foi feita medida em campo para a transparência (com o disco de Secchi), condutividade elétrica específica, profundidade do local e a temperatura da água.

Em todas as campanhas foi utilizada uma lancha voadeira com motor de popa de 15HP, de modo a se percorrer todas as estações no período de 3h, entre o início e o fim de cada amostragem. Nos meses de abril e outubro foi realizada a incubação “in situ” pelo método do oxigênio dissolvido durante o período de 4 horas para a determinação da produção primária no ambiente nas estações 5 e 6. A escolha dessas estações para os estudos da produção primária, foi baseada em ensaios preliminares levando-se em consideração a turbulência, transparência da água e a disponibilidade de nutrientes.

Após a coleta, as amostras para nutrientes foram imediatamente transportada para o laboratório da UFMA, Departamento de Oceanografia e Limnologia, onde foi iniciado o processo de filtração a vácuo, para separação do material particulado. Na Figura 4.1 é mostrado um fluxograma geral dos trabalhos envolvidos neste estudo.

4.2 - TRABALHO DE LABORATÓRIO

Em laboratório procedeu-se a filtração das amostras para separação e quantificação do material particulado, determinação da biomassa fitoplanctônica (clorofila - a), do carbono orgânico particulado e dos nutrientes dissolvidos. Paralelamente a essa filtração, fez-se a titulação para determinação do oxigênio dissolvido e determinação potenciométrica do pH. Os filtros para a clorofila “a” (filtros de fibra de vidro de $1,2\mu\text{m}$ de porosidade e 47 mm de diâmetro) foram colocados em acetona (25ml) a 90% para extração pigmentar; aqueles para o carbono orgânico particulado (COP) foram congelados para análise posterior. As amostra de nitrogênio amoniacal, fixadas no campo, foram colocadas em repouso e no escuro durante 20-24 horas, para a reação se completar. Na filtração acima referida, utilizou-se um sistema de filtração marca Sartorius, 3 conjuntos ligados em série para filtração simultânea de 3 amostras, membranas de acetato de celulose de $0,45\mu\text{m}$ de porosidade e 47mm de diâmetro para nutrientes dissolvidos e para o COP e clorofila “a”, filtros de fibra de vidro de $1,2\mu\text{m}$ de porosidade e com o mesmo diâmetro. O que

passa pelo filtro é considerado, por convenção como dissolvido, e o que fica retido como particulado.

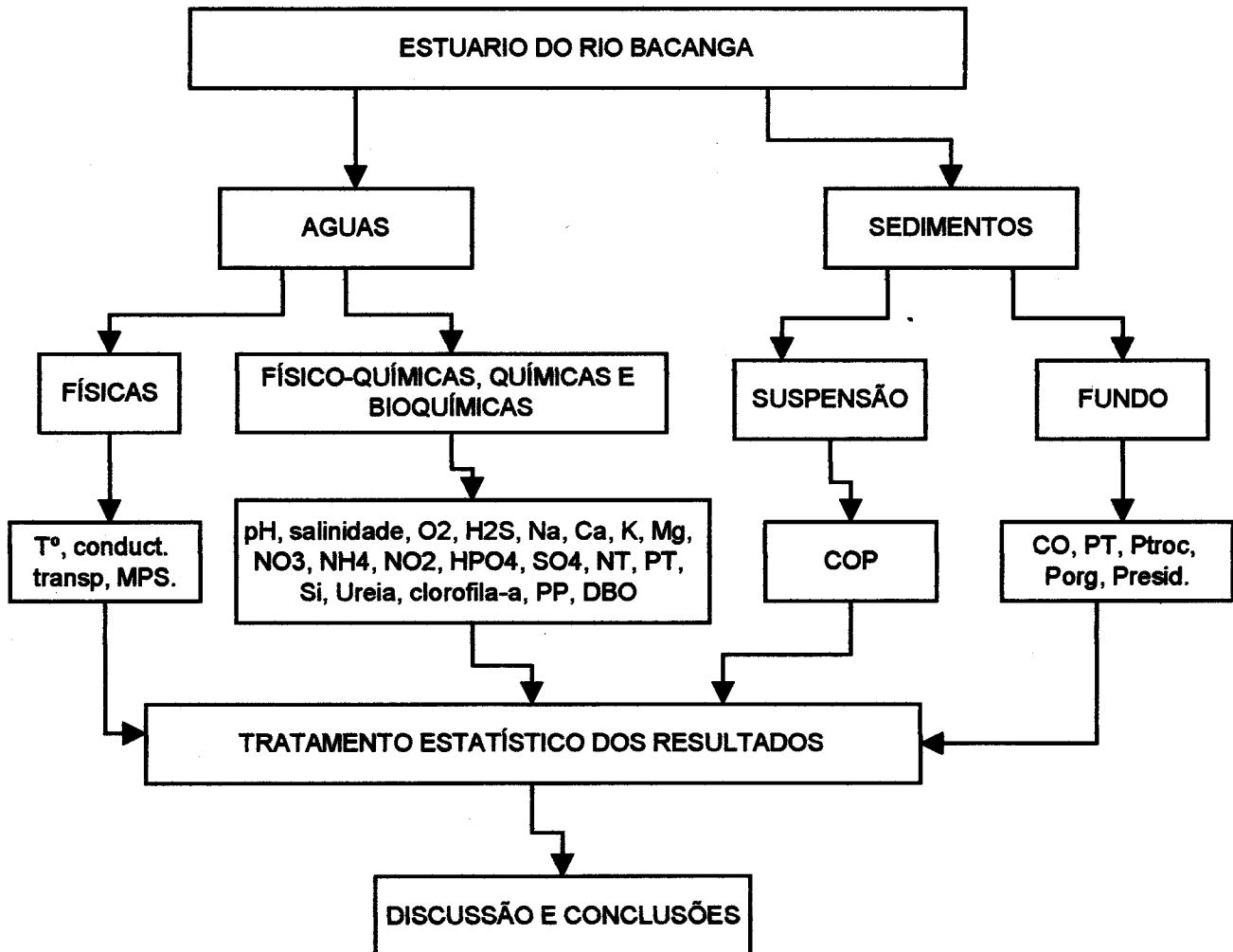


Figura 4.1. Metodologia geral de trabalho (ver texto para abreviaturas)

A seguir apresenta-se um resumo da metodologia analítica empregada para análise química dos diversos parâmetros estudados e, também, as referências bibliográficas correspondentes.

1 - Potencial hidrogeniônico - pH - método potenciométrico utilizando medidor de pH de campo marca Hanna, modelo 8316; medida feita “in situ” e em laboratório. Utilizou-se padrões de pH 7,00 e 9,15 respectivamente, para calibração do referido medidor, segundo AMINOT & CHAUSSEPIED (1983).

2 - Condutividade elétrica - método condutivimétrico usando-se medidor de campo marca Hanna modelo 3366. Para calibração utilizou-se água do mar padrão (Standard Sea-Water) com várias diluições, de modo a abranger a faixa de medida desse parâmetro para o ambiente estuarino estudado.

3 - Salinidade - método de Mohr-Knudsen citado por AMINOT & CHAUSSEPIED (1983), no qual (10ml) e titulado com solução de nitrato de prata (0,28N), utilizando-se água do mar padrão para padronizar a solução de nitrato e solução de cromato de potássio 0,35% como indicador.

4 - Oxigênio dissolvido - método de Winkler foi utilizado para determinar as concentrações de oxigênio dissolvido, citado por AMINOT & CHAUSSEPIED(1983). Conforme recomendação dos autores acima referidos, um frasco próprio e fabricado sob encomenda foi utilizado para amostragem, fixação em campo (sol. de manganês II e iodeto alcalino) e titulação em laboratório de modo a eliminar alguns erros e racionalizar esta determinação.

5 - Temperatura da água - utilizou-se um termômetro de mercúrio usado em laboratório.

6 - Transparência - método do disco de Secchi de 30cm de diâmetro e pintado em cores branca e preta, alternadas.

7 - Material particulado em suspensão - MPS – método gravimétrico, citado por AMINOT & CHAUSSEPIED (1983). Resumidamente consistiu em filtrar 250ml de amostra sobre filtro de membrana de acetato de celulose de 47mm de diâmetro e 0,45µm de porosidade previamente seco em estufa e pesado e, em seguida seca-se a 60°C por 2h e pesa-se novamente e, por diferença calcula-se o teor de MPS em função do volume utilizado.

8 - Cloretos - método volumétrico da titulação com solução de nitrato de prata (0,01N) e cromato de potássio (0,35%) como indicador segundo STANDAR METHODS-APHA(1980, 15ª ed.). Esta análise foi feita somente para as amostras da água de nascente.

9 - Demanda bioquímica de oxigênio – DBO – método da incubação por 5 dias a 20°C, segundo STANDAR METHODS-APHA(1980, 15ª ed.).

- 10 - Nitrogênio total** - método da oxidação com persulfato de potássio e ácido bórico em meio alcalino, a quente (110°C) durante 1 hora, segundo VALDERRAMA (1981).
- 11 - Uréia** - método da reação deste composto com diacetilmonoxima, semicarbazida e os íons manganês II, em meio fortemente alcalino, para formar um complexo orgânico de cor róseo, cuja absorbância foi medida a 520nm (GRASSHOFF et al. 1983).
- 12 - Nitrogênio amoniacal** - método do azul de indofenol, citado por AMINOT & CHAUSSEPIED (1983). Para este parâmetro as amostras foram fixadas em campo com os reagentes (R1 e R2) para evitar contaminação durante o processo de filtração das amostras e do armazenamento das mesmas.
- 13 - Nitrito**- método espectrofométrico de Bendschneider & Robinson, citado por AMINOT & CHAUSSEPIED (1983).
- 14 - Nitrato** - método da redução quantitativa em coluna de cádmio para nitrito (> 95%) segundo Wood et al. citado por AMINOT & CHAUSSEPIED (1983).
- 15 - Fósforo total** - método da oxidação com persulfato de potássio e ácido bórico, em meio alcalino, a quente (110°C), citado por VALDERRAMA (1981).
- 16 - Ortofosfatos (fósforo solúvel reativo)** – método espectrofotométrico de Murphy & Riley, citado por AMINOT & CHASSEPIED (1983).
- 17 - Silicato reativo dissolvido (ácido ortossilícico)** – método espectrofotométrico de Mullin & Riley, citado por AMINOT & CHAUSSEPIED (1983).
- 18 - Carbono orgânico particulado** - método de P. Le Corre, In: AMINOT & CHAUSSEPIED (1983). Consistiu resumidamente, na oxidação do COP com sol. 0,5N de dicromato de potássio em meio ácido e, em seguida, titulação do excesso de dicromato com solução de sulfato ferroso amoniacal utilizando solução 0,1% de difenilamina.
- 19 - Carbono orgânico em sedimento de fundo** - método de GAUDETTE et al.(1974).
- 20 - Especiação do fósforo em sedimentos de fundo** - método de RAMIREZ & ROSE(1992).
- 21 - Produção primária do fitoplâncton** - método do oxigênio dissolvido, com incubação em frascos brancos e escuros (100%, 50%, e 1% de penetração de luz) durante 04 horas, citado por STRICKLAND & PARSONS(1972).
- 22 - Clorofila a** - método espectrofotométrico (método de Lorenzen), citado por AMINOT & CHAUSSEPIED (1983).

23 - Metais alcalinos e alcalinos terrosos (Na, K, Ca e Mg) – método da espectrometria de absorção atômica, citado por GOLTERMAN et al.(1978).

24 - Sulfato - método turbidimétrico, segundo STANDARD METHODS-APHA (15a. Ed. 1980).

25 - Gás sulfídrico (H_2S) - método volumétrico de oxi-redução(Iodométrico), segundo STANDARD METHODS-APHA (1980, 15a. ed).

5- RES ULTADOS E DISCUSSÃO

5.1-ÁGUAS

5.1.1-Temperatura, Transparência e Condutividade elétrica

A temperatura nas águas estuarinas apresentou uma variação espaço-temporal bem característica do ambiente em estudo. Próximo às nascentes (à montante) nas estações 1 e 2 as águas são mais frias e os valores de temperatura ficaram na faixa de 24 a 26°C. À medida que se desloca para jusante a temperatura aumenta progressivamente até as estações 10, 11 e 12 cujos valores ficaram na faixa de 29 a 32°C (Figura 5.1; Anexo A1-6). A temperatura das águas superficiais acompanha aquelas variações da temperatura do ar atmosférico. Os valores baixos acima referidos podem ser explicados pela cobertura vegetal do manguezal existente e pela temperatura mais fria das águas das nascentes. Os valores altos, pela incidência maior da radiação solar e trocas com atmosfera e a entrada de água costeira marinha de temperatura mais elevada. Essa distribuição da temperatura refere-se às águas superficiais, isto é, a 30cm da superfície onde realizou-se as medidas e a coleta de amostras para os diversos parâmetros químicos.

Para avaliar a distribuição deste parâmetro na coluna d'água (estratificação térmica) foi realizado medições do mesmo nas estações 2, 8 e 11 no período chuvoso e seco e são apresentados mais adianta num capítulo aparte.

A transparência (Secchi) apresentou uma variação espaço-temporal importante e bem característica(Figura 5.2; Anexo A1-6). Nas estações 1, 2 e 3 os valores ficaram abaixo de 60cm, tanto no período chuvoso quanto no seco; e, nas demais estações, somente no período chuvoso os valores, também, ficaram nesta faixa. No período de estiagem, os valores de transparência aumentaram consideravelmente e nas estações de número 4 a 12 e foram superior a 60cm, apresentando um pico máximo de 200cm na estação 6 e 7.

No período chuvoso, a contribuição fluvial, os esgotos domésticos e a lixiviação das áreas adjacentes de manguezal contribuem com grande quantidade de material particulado para o ambiente estuarino. Por outro lado, nesse período, a insolação diminui com relação ao período de estiagem fazendo com que exista um efeito conjugado deste com aquele do material particulado sobre a diminuição da transparência nesse período. A partir de junho, quando as chuvas diminuem mais, a transparência começa a aumentar até atingir os máximos nos meses de outubro a dezembro. A transparência, portanto, está associada indiretamente, às variáveis atmosféricas

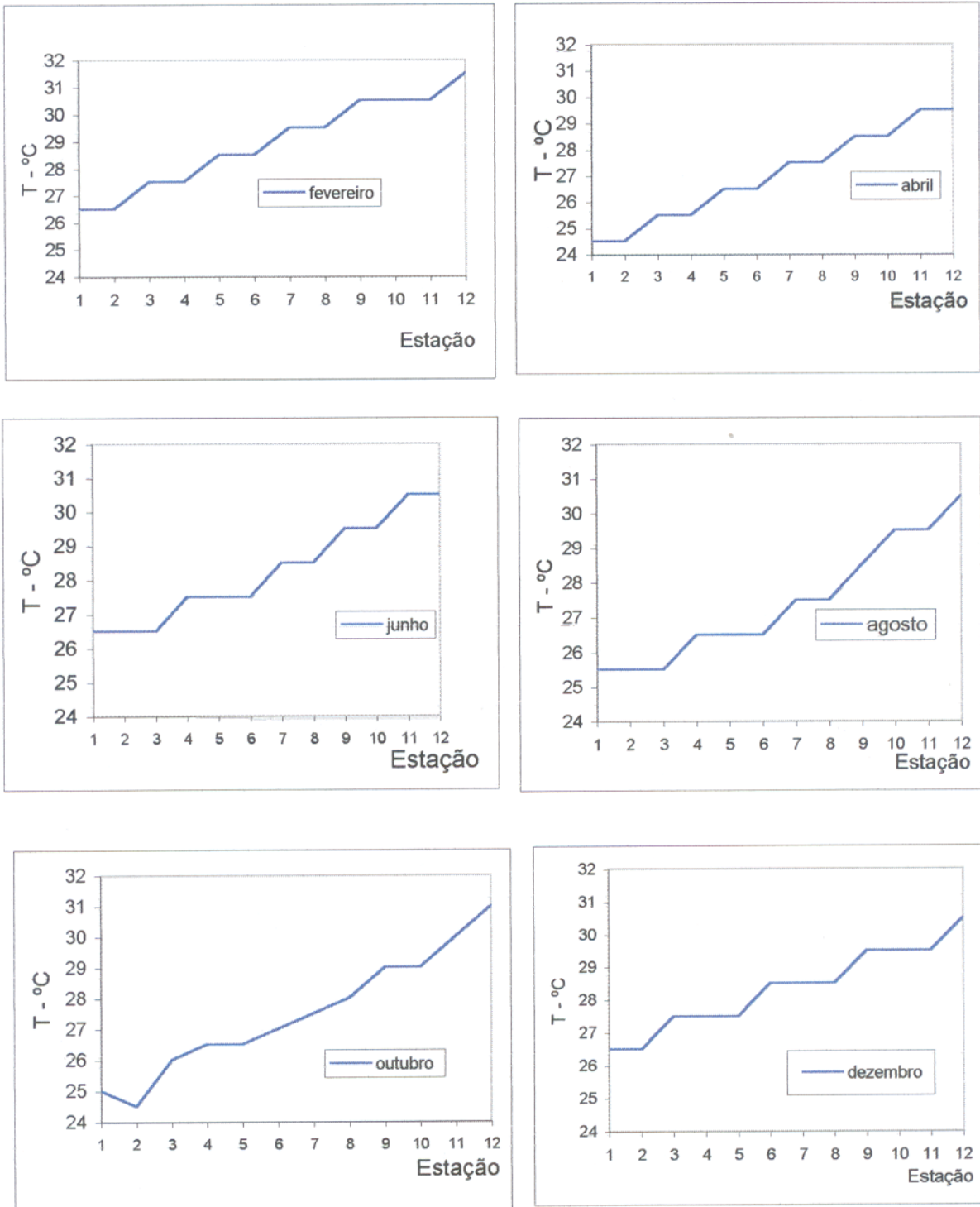
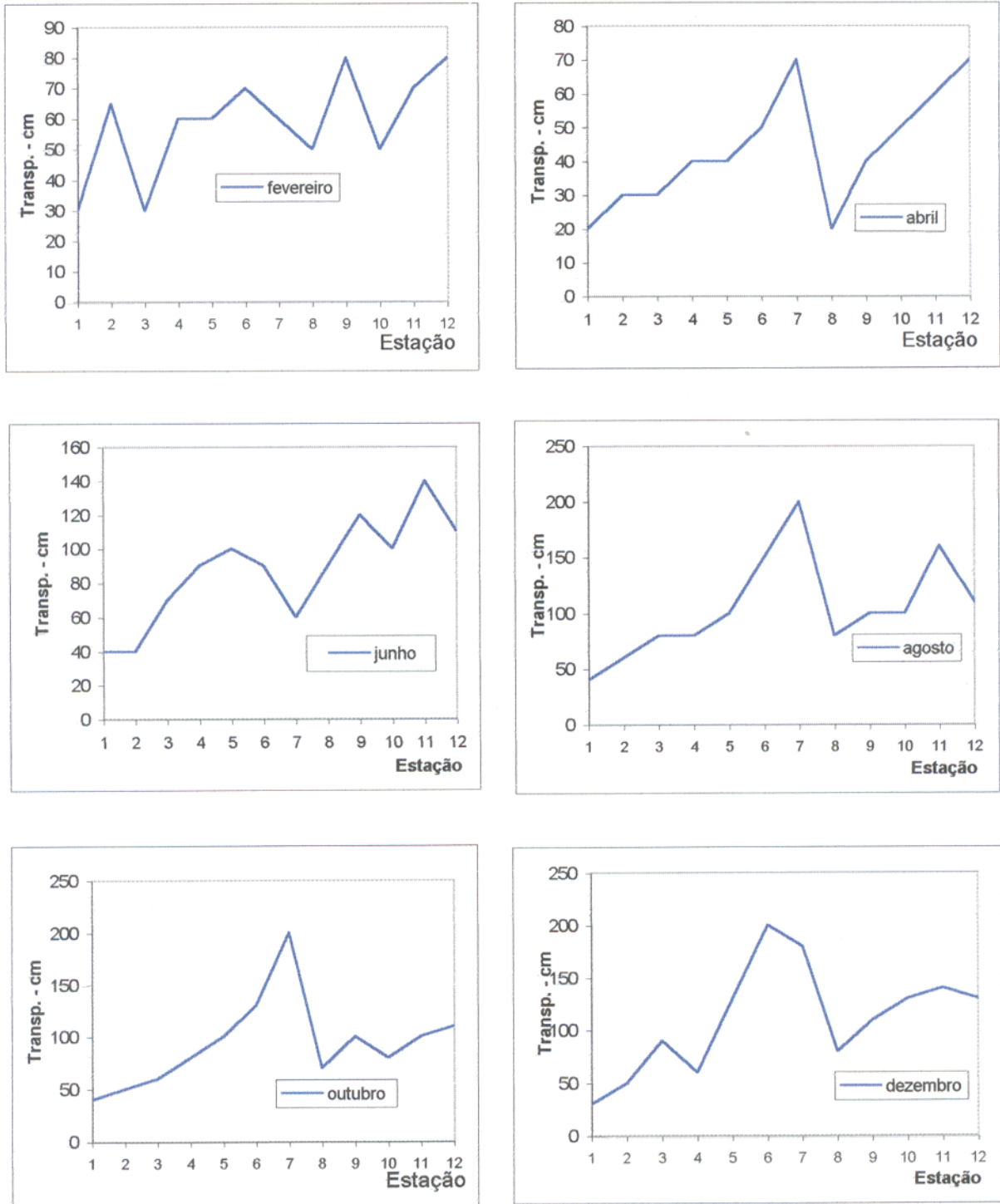


Figura 5.1. Distribuição espaço temporal da temperatura nas águas estuarinas superficiais do rio Bacanga, ilha de São Luis-MA



Montante -----> jusante

Figura 5.2 – Distribuição espaço – temporal da transparência nas águas superficiais do estuário do rio Bacanga, ilha de São Luís – MA, 1997.

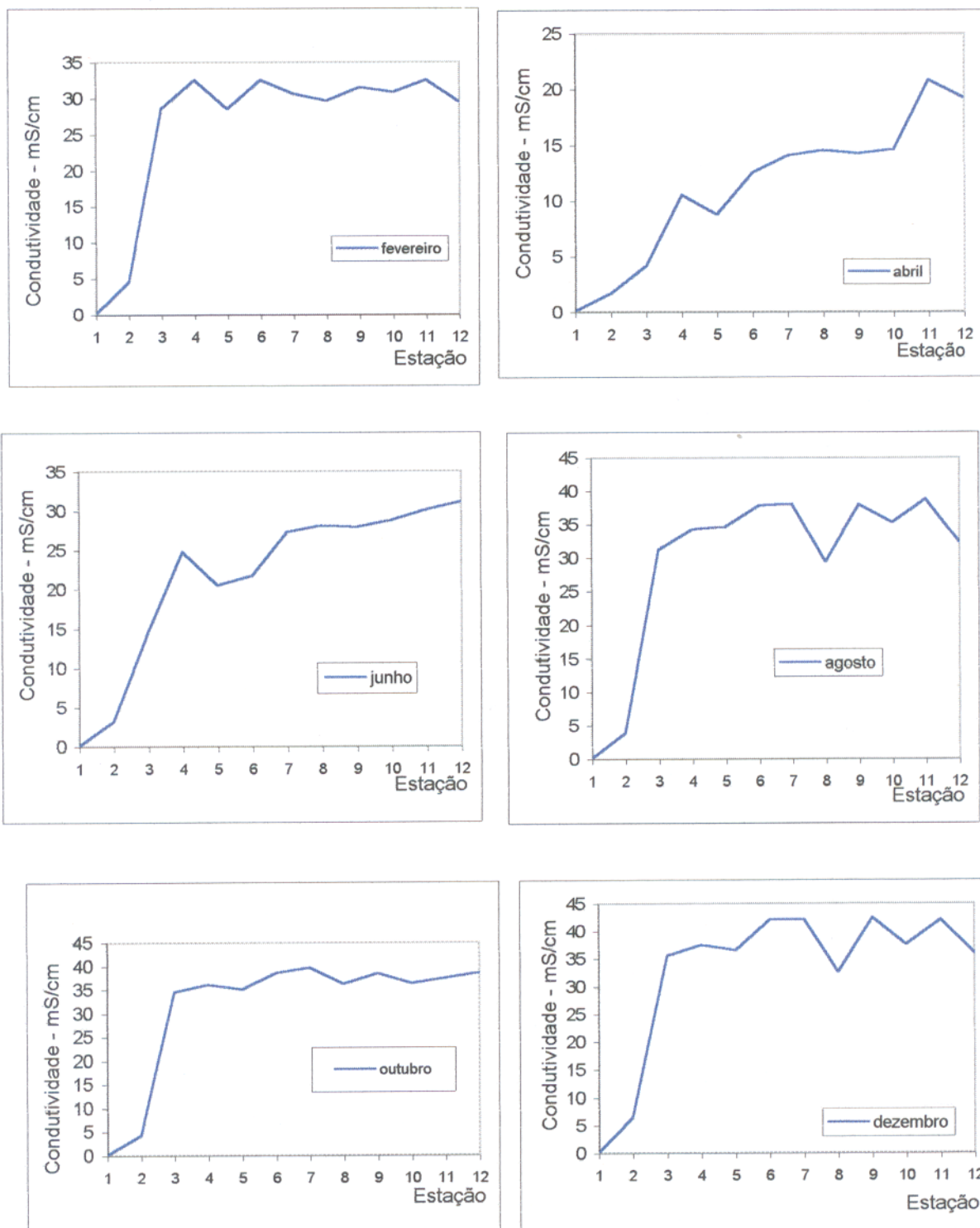
(precipitação pluviométrica e intensidade de radiação solar) e diretamente à presença do material particulado em suspensão(MPS). As águas costeiras da baía de São Marcos, podem contribuir para o aumento da transparência pelo fato de apresentar menores teores de MPS; mas, por outro lado, nas marés de sizígia devido a ressuspensão do sedimento pode contribuir para o aumento desse parâmetro. Essa influência foi observada apenas na estação 12 (foz do estuário, Figura 2.1) onde existe a influência direta das marés. Nas demais estações esse efeito não foi observado pois, como anteriormente citada em todas as campanhas a barragem encontrava-se fechada.

A condutividade elétrica está associada à presença de íons dissolvidos nas águas naturais. Nas águas estuarinas, a concentração dos elementos maiores são responsáveis, diretamente, pelo valores de condutividade e da salinidade. No rio Bacanga, a zona estuarina estende-se desde a estação 12 até a estação 2. Na estação 1, próximo à nascente do rio, os valores de condutividade foram normais para a região ($< 100\mu\text{S}/\text{cm}$) em todas as campanhas de medição. Em menos de 2km da nascente do rio, estação 2, ocorre um aumento brusco da condutividade elétrica apresentando valores que variaram de 1,69 a 6,45mS/cm durante de 1997. Os valores menores (0,08 a 20,82mS/cm) de montante para jusante, foram registrados no mês de abril quando ocorreu o máximo de precipitação pluviométrica e os maiores (0,08 a 38,51mS/cm) no outubro com a ausência de chuvas. Observou-se na distribuição longitudinal, pequenos picos que podem estar relacionados com a contribuição das águas intersticiais (Figura 5.3).

5.1.2 – Material particulado em suspensão - MPS

A distribuição do MPS, no estuário do rio Bacanga, é mostrada na Figura 5.4, Anexo A1-6, na qual observa-se os perfis longitudinais nas seis campanhas realizadas. No período chuvoso os valores são mais elevados (80 a 240 mg/L), devido ao aporte fluvial, rejeitos urbanos e à contribuição das áreas do manguezal adjacente. No período seco ocorreu uma diminuição considerável, fazendo que os valores ficassem na faixa de 20 a 50mg/L.

Esse material particulado no sistema em questão tem como fontes, além do aporte fluvial e a contribuição do manguezal, as águas da baía de São Marcos, os esgotos domésticos, lixo e os organismos planctônicos que são característicos desse ambiente. Observa-se valores altos de MPS nas estações 3 e 8 tanto no período chuvoso quanto no seco; na 3 (na parte montante), a contribuição fluvial e do manguezal é mais expressiva, enquanto que na estação 8 são os esgotos



Montante -----> jusante

Figura 5.3 – Distribuição espaço – temporal da condutividade elétrica nas águas superficiais do estuário do rio Bacanga, ilha de São Luís – MA, 1997.

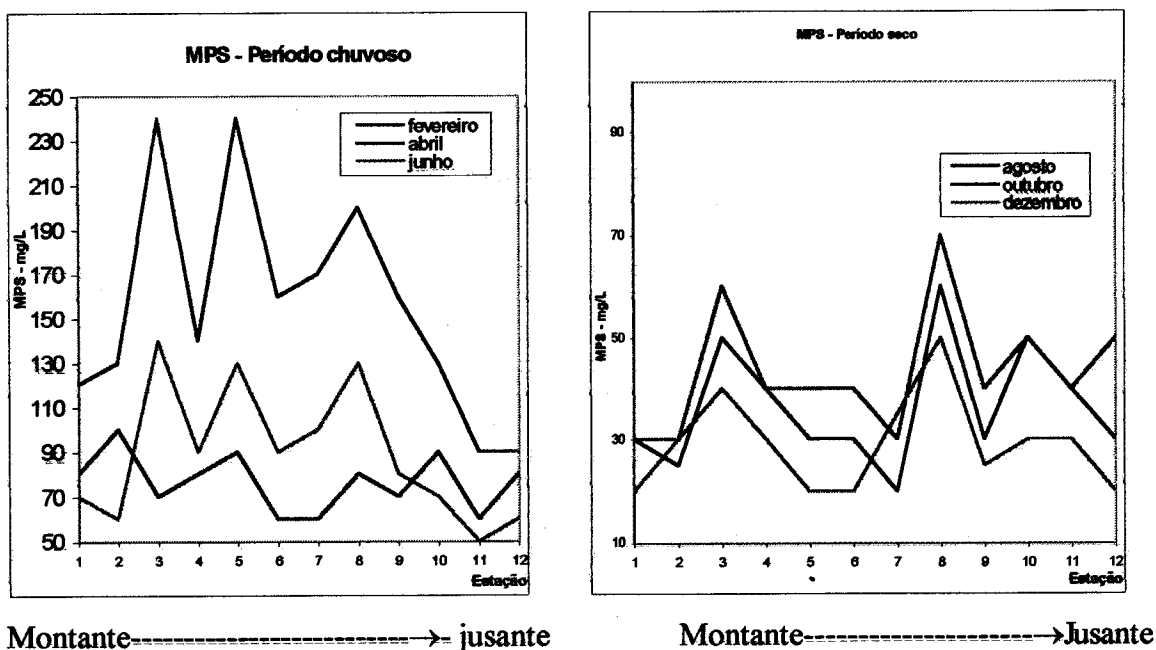


Figura 5.4- Distribuição espaço-temporal do MPS no estuário do rio Bacanga, Ilha de São Luís - MA, 1997.

domésticos, lixo e o manguezal. Em ambas as estações, os valores de transparência foram mais elevados devido à floculação desse material. Essa floculação ocorreu na zona estuarina de salinidade próxima a 5‰ (SHOLKOVITZ, 1978). Nas estação 3 acima citada a salinidade variou de $2,06\text{‰}$ (pico do período chuvoso - abril) para $22,94\text{‰}$ (pico do período seco - outubro) e na estação 8 de $4,08\text{‰}$ a $23,12\text{‰}$, no mesmo período. Portanto, nessas duas estações a floculação deve ser responsável pela manutenção de partículas em suspensão.

No período chuvoso a maior parte do material particulado é de origem alóctone enquanto que, no período seco, é de origem autóctone. Neste último caso os organismos planctônicos têm contribuição preponderante devido a grande produção primária e secundária do ambiente estuarino (LOPES, 1994; FERNANDES, 1994). Também o próprio sedimento de fundo, no período seco, contribui com partículas para a coluna d'água, através do processo de ressuspensão.

No estuário do rio Bacanga, o MPS pode ser um fator, indiretamente, limitante para a produção primária durante o período chuvoso, uma vez que impede a penetração de luz na coluna d'água. Mas, por outro lado, pode ser útil como fonte de alimento para vários organismos, principalmente os bentônicos. O próprio fitoplâncton, que constitui uma porção viva do MPS, atua na transferência de íons dissolvidos para a fase particulada (CHESTER, 1993). Outra função

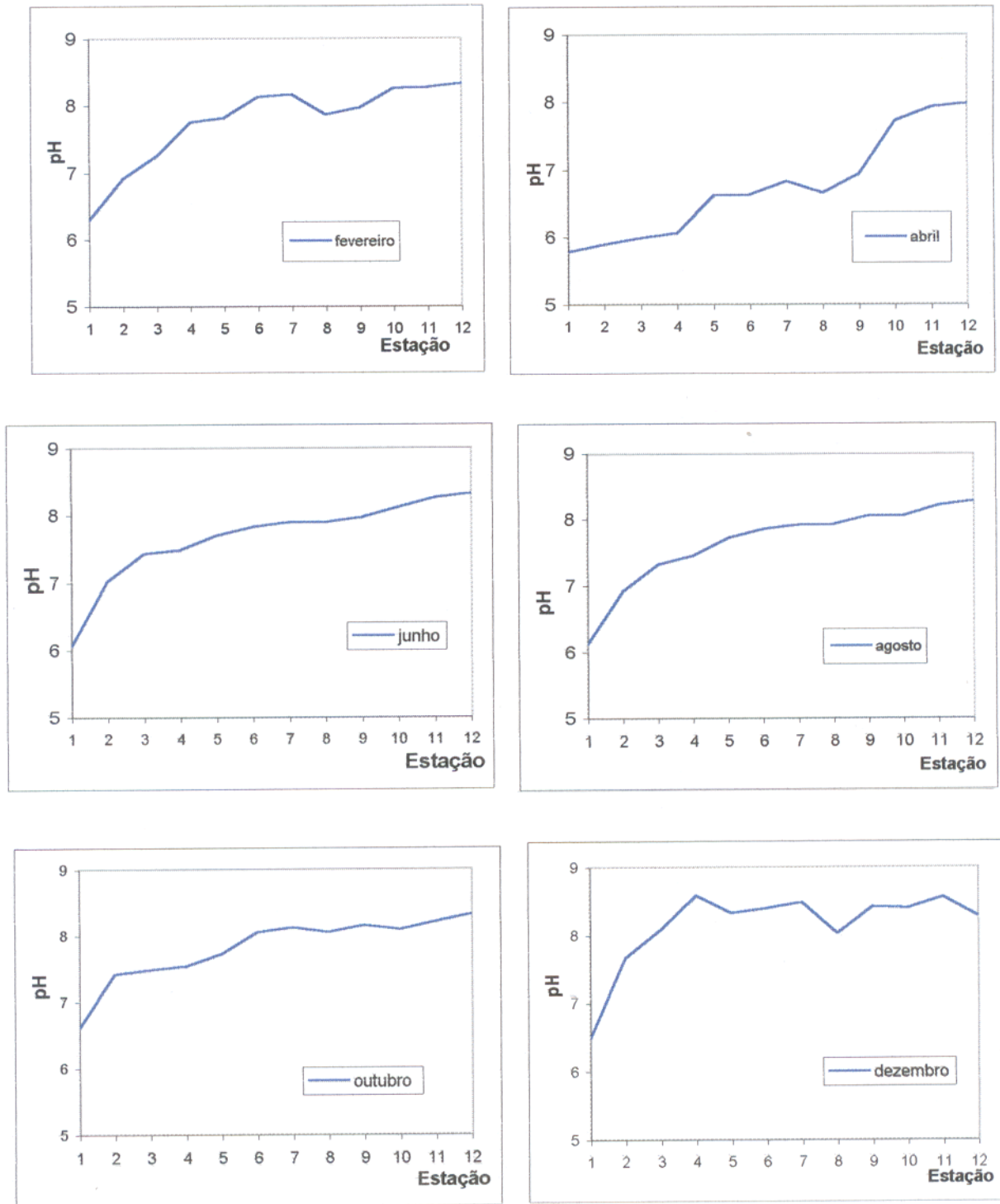
do MPS é a troca com os íons dissolvidos, isto é, transferência do dissolvido para o particulado através do processo de adsorção física ou química ou, ao contrário do particulado para o dissolvido através do processo de dessorção (conforme discutido em 3.2.5).

Observou-se que nas estações da parte intermediária para a zona inferior do estuário, onde os valores de salinidade são mais elevados, existe uma deposição desse material particulado. Entre as estações 4, 5 e 6 existe uma camada de lama fluida de cor escura de 1m de espessura cobrindo toda a calha estuarina originada no próprio local e da deposição de MPS proveniente da parte superior do estuário.

5.1.3 - Potencial hidrogeniônico - pH e Salinidade

O pH tem sua distribuição longitudinal representada na Figura 5.5 e Anexo A1-6. Os valores mais elevados (7 a 8,56) foram registrados na maior parte das estações de coleta e os menores (5,7 a 7,0) nas estações à montante e no mês de maior intensidade pluviométrica (abril). O pH deste sistema estuarino é concordante com outros sistemas onde existe a mistura de água doce com água salgada. Deste modo, o pH varia de uma faixa ligeiramente ácida devido à contribuição fluvial até aquela ligeiramente alcalina devido à contribuição marinha. A variação deste parâmetro no estuário em questão ocorreu de modo semelhante àquele da salinidade, e mostrou uma correlação positiva e significativa. Realizou-se medidas em campo e em laboratório (4, 6, 12, 24, 36 e 48 horas) para verificar possíveis mudanças com o tempo de armazenagem das amostras.

Poucas mudanças foram observadas durante esses períodos de armazenagem, principalmente, para as amostras mantidas em geladeira a 4°C. É bom salientar que os resultados aqui apresentados são para as águas superficiais, onde existe um equilíbrio no sistema gás carbônico- bicarbonatos - carbonatos, entre a água superficial e a atmosfera; conferindo ao mesmo um apreciável poder tampão. Esse parâmetro pode, neste caso, ser considerado como conservativo com valores baixos na parte fluvial e altos na parte marinha, obedecendo ao modelo teórico de LISS (1976). A decomposição da matéria orgânica libera gás carbônico que por sua vez reage com a água para formar o ácido carbônico e, conseqüentemente, baixar o pH do sistema aquático estuarino. Mas, para o sistema estuarino do Bacanga, essa decomposição com a produção de CO₂ não afeta de modo significativo a diminuição do pH.



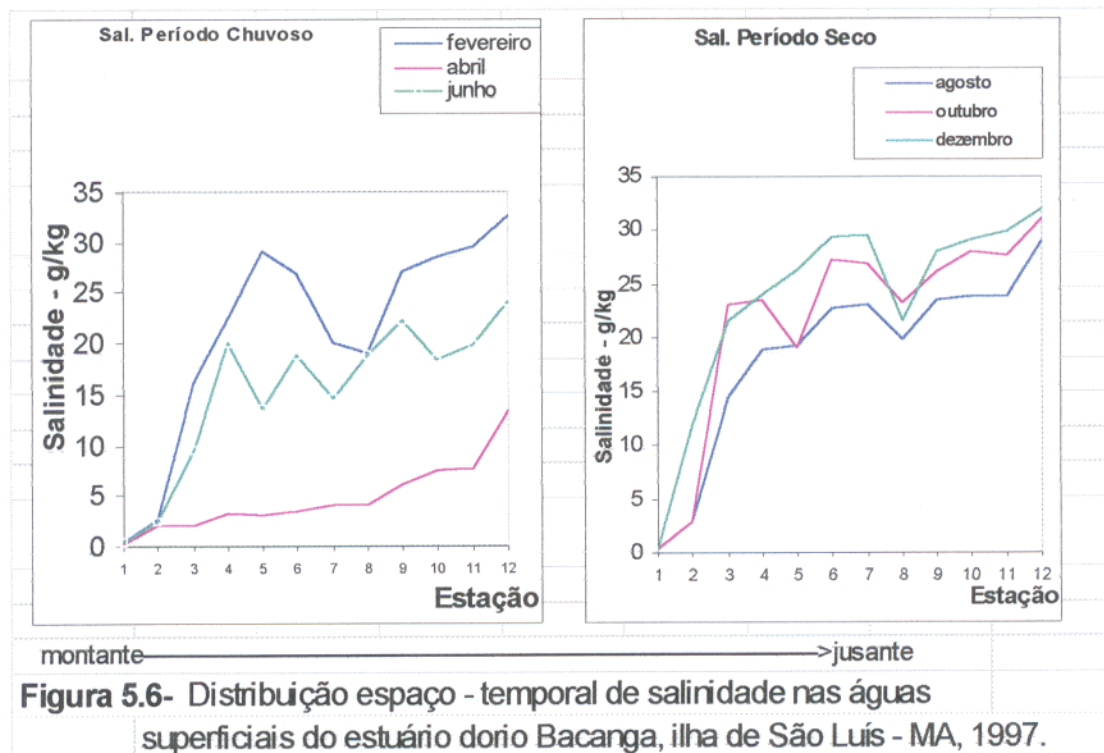
Montante-----> jusante

Montante-----> jusante

Figura 5.5 – Distribuição espaço – temporal do pH nas águas superficiais do estuário do rio Bacanga, ilha de São Luís – MA, 1997.

A salinidade tem sua distribuição representada na Figura 5.6 e Anexo A1-6, onde pode se observar o gradiente salino aumentando da estação 1 ($S = 0 ‰$) para a estação 12 ($S \cong 33 ‰$). Esse parâmetro é conservativo e é utilizado como índice de mistura praticamente em todos sistemas estuarinos pelos autores (BOYLE et al.1974; LISS,1976). É interessante observar, inicialmente, o aumento brusco no valor de salinidade da estação 2 para a estação 3 nas campanhas realizadas, com exceção daquela de abril onde os valores foram iguais.

Em outubro, na estação 2, a salinidade foi de $2,89 ‰$ e na estação 3, no mesmo mês aumentou para $22,94 ‰$. A distribuição de salinidade está sujeita às variações dos parâmetros ambientais, principalmente, da precipitação pluviométrica e da evaporação. Os menores valores de salinidade (0 a $13,45 ‰$) foram registrados em abril, coincidindo com o máximo de precipitação pluviométrica. Enquanto que os maiores valores foram obtidos em dezembro (0 a $32 ‰$) coincidindo com o máximo de evaporação.



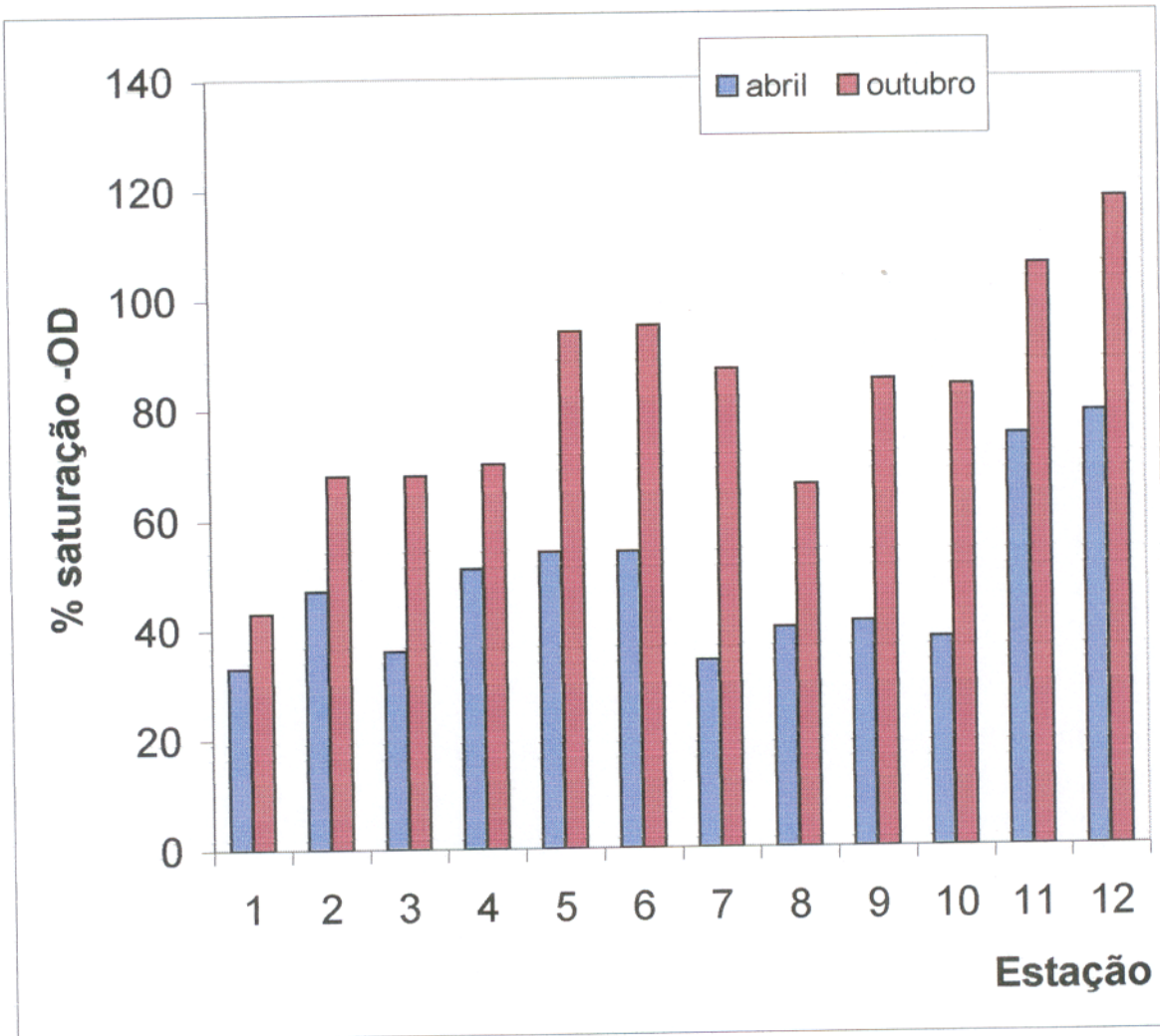
No estuário do rio Bacanga, a salinidade exerce funções importantes na distribuição de diferentes espécies da fauna e da flora. Pode-se citar dois exemplos bem característicos (conforme observações nas campanhas de campo): a - primeiro, a distribuição das espécies de manguezais que são características dessa região, sendo a *Rhizophora* mais exigente em teor

salino; b - segundo, a produção de mexilhão (conhecido localmente como sururu, do gênero *Mytella*) que só se desenvolve no período seco quando a salinidade aumenta. Observou-se que existe uma correlação positiva entre o pH e a salinidade. Algumas anomalias (picos) podem ser observadas no perfil longitudinal entre as estações 3, 4 e 5, provavelmente devido a existência de pequenos pântanos salinos e/ou à contribuição das águas intersticiais do sedimento. Também foi observada uma estratificação com relação a este parâmetro, mas será discutido mais adiante num item específico sobre estratificação halina.

5.1.4 - Oxigênio dissolvido e gás sulfídrico

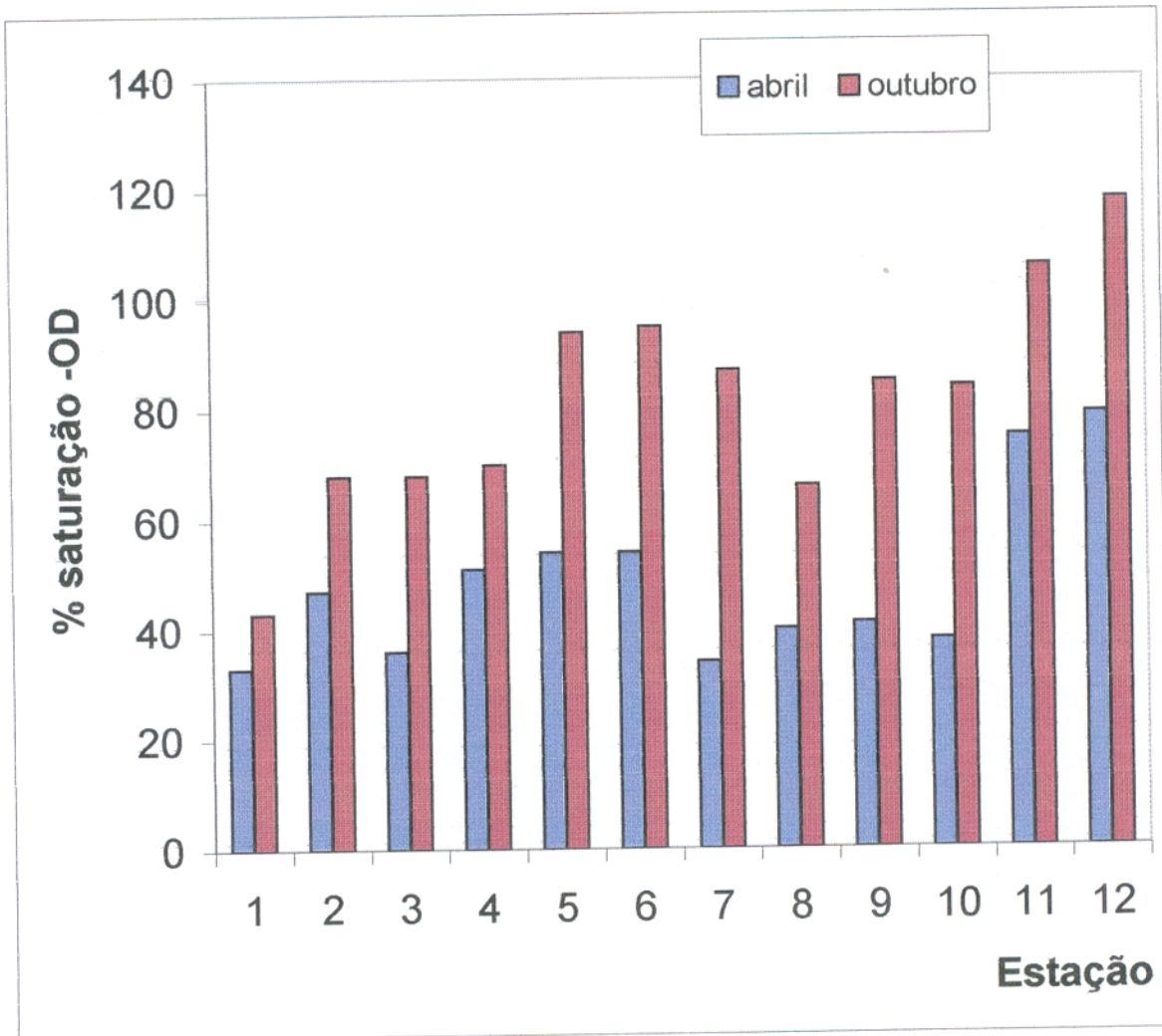
O oxigênio dissolvido é um dos gases mais importantes para o sistema aquático, tanto por ser vital aos organismos aeróbicos no processo de respiração, quanto na participação de vários processos biogeoquímicos (CHESTER, 1993). No estuário do rio Bacanga, a distribuição do oxigênio dissolvido acha-se compartimentada como se segue: a - parte superior fluvial com baixos (em torno de 2 a 3ml/L); isto ocorre devido à pouca turbulência e à baixa produção primária das águas; b - parte intermediária, com valores mais elevados (em torno de 3 a 4,5ml/L); nesta parte ocorre uma maior turbulência, e onde a produção primária é mais elevada com relação às demais estações; c - parte inferior, com valores baixos (1,6 a 4ml/L) próximos aos pontos de lançamento de esgotos domésticos e valores mais altos (3 a 5,9ml/L) do lado oposto (Figura 5.7; Anexo A1-6).

As principais fontes de oxigênio para o sistema estuarino dá-se pelas trocas com a atmosfera e a produção primária. As trocas com a atmosfera ocorrem com maior intensidade, nas estações 12, 11, 9 e 7 onde observou-se maior turbulência e formação de ondas. A contribuição em oxigênio, pelo processo de produção primária, é mais significativo nas estações 5 e 6 onde registrou-se, em média, os maiores valores desse gás. Nas estações 1, 2, 3 e 8 e 10; a baixa turbulência, a grande quantidade de material particulado em suspensão limita a penetração da luz solar e, conseqüentemente, a produção primária fazendo com que estas apresentem os baixos teores de oxigênio dissolvido do sistema estuarino em questão. O consumo de oxigênio dissolvido, pelo processo de decomposição da matéria orgânica, deve ser mais intenso nas estações 2, 3, 8 e 10 onde a concentração de carbono orgânico nos sedimentos em suspensão e de fundo é mais elevada. Nas estações 2 e 3 na parte superior do estuário, onde existe altas concentrações de MPS a matéria orgânica presente é originada do manguezal adjacente, enquanto na estações 8 e 10, além do manguezal, soma-se àquela dos esgotos domésticos. Calculou-se os



montante-----> jusante montante-----> jusante

Figura 5.7 – Distribuição espaço – temporal do oxigênio dissolvido nas águas superficiais do estuário do rio Bacanga, ilha de São Luís – MA, 1997.



Montante-----> jusante

Figura 5.8 – Distribuição espaço – temporal da percentagem de oxigênio dissolvido nas águas superficiais do estuário do rio Bacanga, ilha de São Luís – MA, 1997.

valores de percentagem de saturação de oxigênio em função da temperatura e de salinidade e, de acordo com estes, os “déficits” de oxigênio encontram-se naquelas estações onde o consumo é maior do que a produção (Figura 5.8; Anexo A1-6).

Foi realizado um perfil vertical nas estações 2, 8 e 11, a fim de se averiguar a distribuição vertical do oxigênio dissolvido nestas estações. Na estação 11, onde há grande turbulência e a maior profundidade da coluna d’água (~6m), obteve-se uma amplitude de variação nos teores de oxigênio de 0,8 a 1,2ml/L. Na estação 8, onde a turbulência é bastante reduzida e a profundidade é de apenas 2m, a variação entre superfície e fundo foi de 2ml/L, isto é, os valores de oxigênio dissolvido podem, segundo a estação do ano, variar de alguns mililitros por litro para zero ou próximo deste valor. Na estação 2, o comportamento é semelhante àquele da estação 8, com exceção de que, nesta última, existe a influência da matéria orgânica dos esgotos domésticos e na 2 a matéria orgânica é oriunda do manguezal adjacente. Isto mostra que o consumo nas estações 2 e 8 é maior do que nas demais estações do sistema estuarino.

O gás sulfídrico foi determinado somente nos meses de abril e outubro em função da maior variação sazonal do oxigênio dissolvido e das limitações operacionais em campo. Esse gás é produzido por bactérias do gênero *Sulfovibrio* que utilizam o sulfato como fonte de oxigênio, a nível de sedimento ao longo do sistema estuarino. A produção deste gás e a precipitação de sulfetos metálicos é um dos processos biogeoquímicos mais importantes em ambientes estuarinos com influência de manguezais (CHESTER, 1993). Os valores mais elevados (2,3 a 3,3mg/L) foram registrados nas estações 2 e 8, onde existe um “déficit” em oxigênio dissolvido. Nas demais estações, os valores variaram de 0,8 a 1,9mg/L (Figura 5.9; Anexo A2 e A5). A produção de gás sulfídrico, nas águas do estuário do rio Bacanga, ocorre a nível de sedimento nos locais sob influência dos esgotos domésticos e na zona de manguezal rica em matéria orgânica de origem animal e vegetal.

No sedimento de manguezal, com pouca oxigenação, é possível observar o odor característico do gás sulfídrico. Como se trata de uma região estuarina, o sulfato encontra-se em abundância, pois é considerado um íon maior dessas águas. Esse gás, além de ser tóxico para os organismos aquáticos, exala um odor bastante desagradável. Portanto, pode-se afirmar que a concentração elevada desse gás, é uma defesa do ambiente face à poluição orgânica e uma denúncia da má qualidade ambiental. O exemplo concreto desta situação encontra-se a poucos quilômetros do rio Bacanga – a Lagoa da Jansen, nas proximidades da praia de Ponta D’areia, em

São Luís, onde a construção de uma avenida transformou o igarapé homônimo numa lagoa, matando a maior parte da vegetação, e servindo de local para deposição dos esgotos domésticos dos conjuntos habitacionais vizinhos.

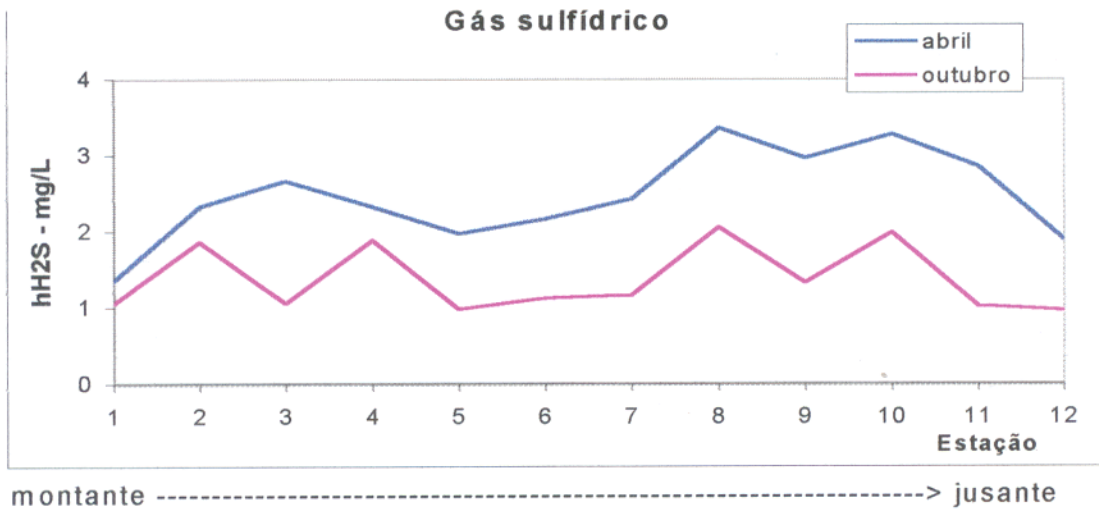


Figura 5.9 – Distribuição espaço – temporal de gás sulfídrico no estuário do rio Bacanga ilha de São Luís – MA, 1997.

Portanto, os dois gases, oxigênio e gás sulfídrico podem ser considerados como bons indicadores de qualidade ambiental. No caso do rio Bacanga, o seu afluente principal, o rio da Bicas, recebe diretamente grande quantidade de esgotos domésticos fazendo com que haja diminuição de oxigênio e seja produzido gás sulfídrico. Esse afluente, de acordo com os dados desse trabalho, já ultrapassou o limite para suportar um aumento na vazão dos esgotos domésticos.

5.1.5 – Uréia e amônio

A uréia ($\text{CH}_4\text{N}_2\text{O}$) é um composto orgânico é utilizado como fonte de nitrogênio por algumas espécies de algas e, também, pode ser utilizado como um traçador de poluição urbana por esgotos domésticos. A distribuição espaço-temporal da uréia no estuário do rio Bacanga é mostrada na Figura 5.10 e Anexo B1-6. O menor valor registrado de $1,0\mu\text{M}$ (estação 1, mês de junho) e o maior de $9,4\mu\text{M}$ (estação 8, mês de abril). Nas estações à montante (1, 2, 3 e 4) os valores são baixos (1 a $2\mu\text{M}$) e são considerados como os níveis naturais (background) do sistema. Nas demais estações, os valores ficaram acima de $2\mu\text{M}$, podendo-se considerar como

influência dos esgotos domésticos. Logicamente que os valores mais elevados foram registrados nas estações que ficam próximas aos pontos de lançamento dos esgotos domésticos, distribuindo-se, em seguida, na forma de pluma para as estações vizinhas. Na estação 12, apesar da influência dos esgotos domésticos, ocorreu uma maior diluição pela água do mar com baixo teor nesse composto.

O íon amônio é originado no primeiro estágio da oxidação da matéria orgânica nitrogenada, ou excretada diretamente para o meio aquático pelos organismos (CHESTER, 1993). Assim como a uréia é um bom traçador de poluição urbana recente. A distribuição do íon amônio é mostrado na Figura 5.11; Anexo B1-6. A variação sazonal mostrou um aumento considerável nos meses de agosto a outubro chegando a $100\mu\text{M}$ nas estações 8 e 10 onde ficam situados os principais pontos de lançamentos de esgotos domésticos. No período chuvoso (campanhas de fevereiro, abril e junho), foram relativamente menores, comparados com aqueles meses do período seco, embora possa se observar uma ligeira elevação no mês de abril. Em dezembro, houve uma queda com relação ao meses de agosto e outubro. De modo geral, observou-se uma maior influência, em todas as campanhas, dos esgotos domésticos sobre as concentrações do íon amônio nas estações 8, 9, 10 e 12, onde são desembocam grande quantidade de esgotos e menor naquelas estações (6, 7 e 11) do lado oposto.

Em águas não-poluídas e oxigenadas os teores de amônio, raramente excedem $5\mu\text{M}$; mas ocorrendo o contrário, essa espécie podem chegar a $100\mu\text{M}$ (GRASSHOFF et al., 1983). No processo de assimilação ou consumo pelo fitoplâncton o íon amônio é a preferencialmente utilizado para a síntese proteica. Compostos de nitrogênio orgânico na forma particulada e dissolvida, resultantes da morte de organismos (vegetais e animais) são rapidamente decompostos em nitrogênio amoniacal por várias espécies de bactérias proteolíticas (AMINOT & CHAUSSEPIED, 1983). Esses processos, indicam como ocorrem a produção e consumo de amônio no sistema aquático estuarino. Ademais, existem os processos de nitrificação onde o amônio é oxidado, inicialmente para nitrito e, finalmente, para nitrato. O processo contrário é a desnitrificação (reação inversa), onde o nitrato é reduzido para nitrito e amônio, segundo alguns autores ou transformado, diretamente, em nitrogênio molecular ou óxido nitroso segundo outros.

Esperava-se que os valores mais altos, para o amônio no estuário do rio Bacanga, fossem encontrados durante o período chuvoso e baixos no período seco, pois no período chuvoso existe a lixiviação das áreas marginais, maior fluxo de água doce e a contribuição da atmosfera pela

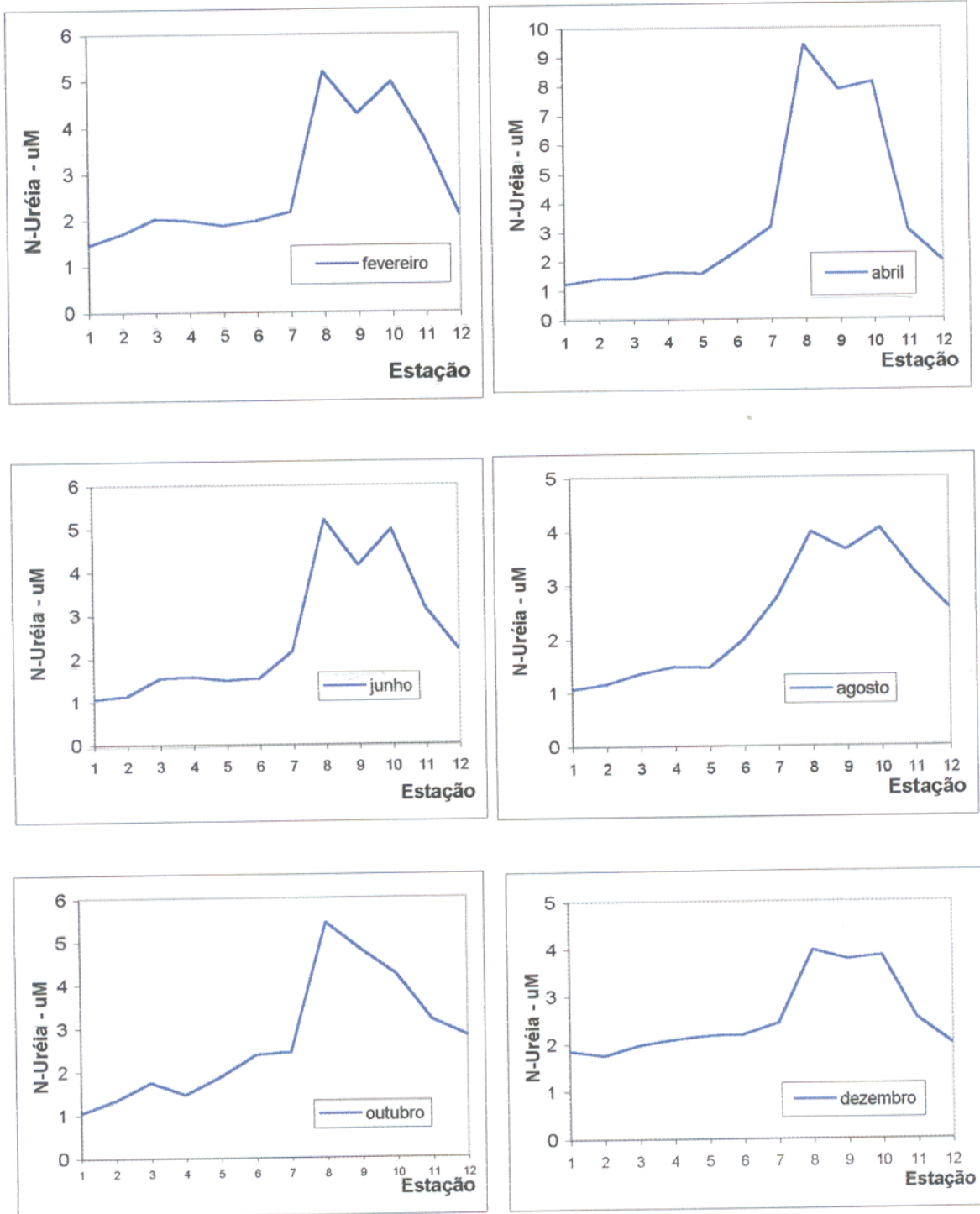
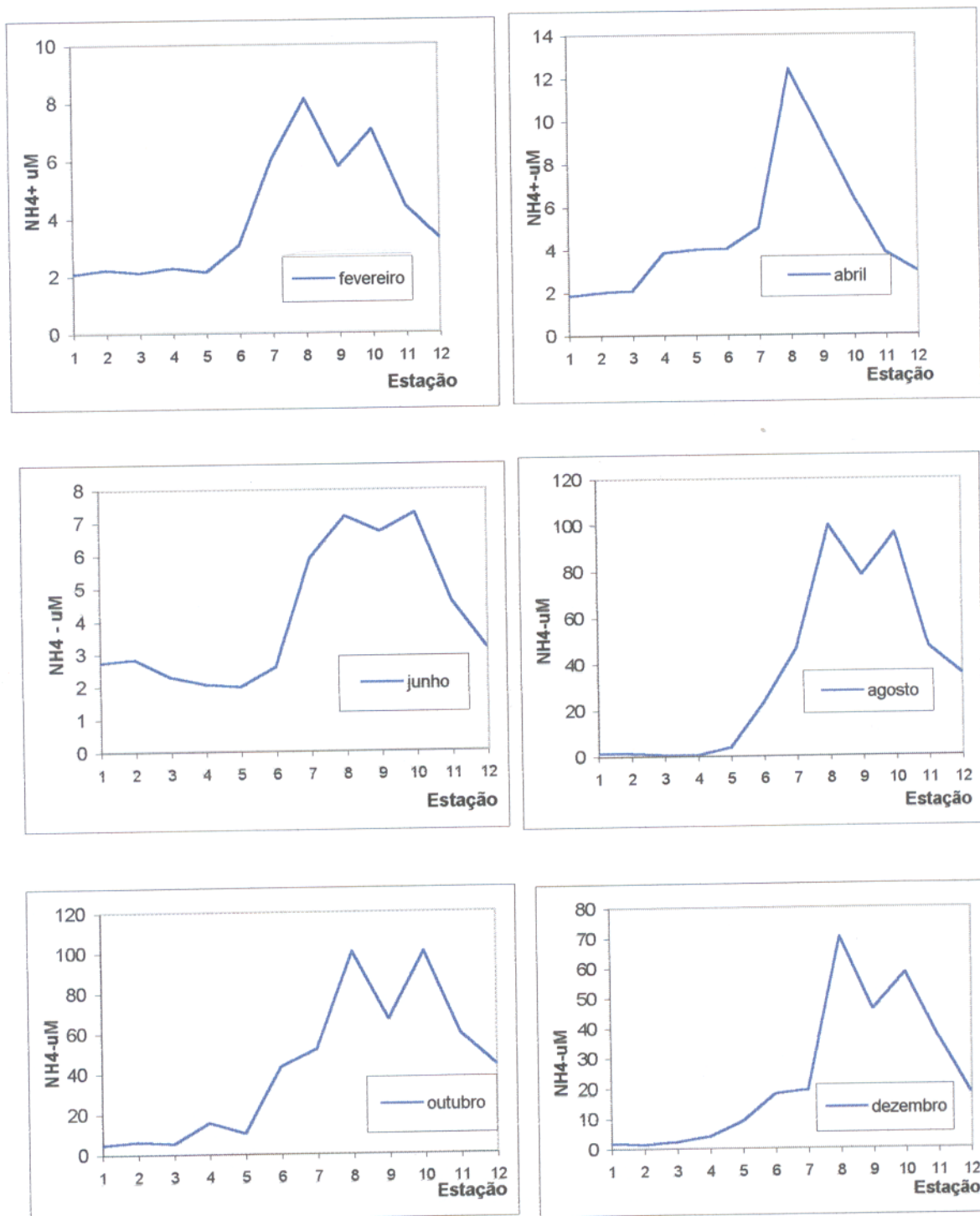


Figura 5.10 – Distribuição espaço – temporal da uréia nas águas superficiais do estuário do rio Bacanga, ilha de São Luís – MA, 1997.



Montante -----> jusante montante----->jusante

Figura 5.11 – Distribuição espaço – temporal do amônio nas águas superficiais do estuário do rio Bacanga, ilha de São Luís – MA, 1997.

precipitação pluviométrica. Mas, esta hipótese não se confirmou e, valores mais altos foram obtidos no período seco e baixos no período chuvoso, com exceção de um ligeiro aumento no mês de abril como anteriormente citado. Esses valores altos, no período seco são explicados devido ao efeito de concentração, isto é, diminuição do escoamento fluvial e, ainda, da contribuição das águas intersticiais (processo de difusão a partir do sedimento).

A seguir mostra-se (Tabela 5.1) valores de amônio em diversos rios do mundo com as respectivas referências. Observa-se, o Reno que é um rio europeu poluído, o valor máximo para o íon amônio foi de 90 μ M enquanto que para o rio Bacanga foi de 100 μ M. Entretanto, esse valor para o Bacanga foi obtido em amostras naquelas estações ditas pontuais, isto é, próximas aos pontos de lançamentos de esgotos domésticos e, não caracterizando que todo o sistema esteja poluído. Mas, concorda-se com a maioria os autores (ver Tabela 5.1) que valores de até 5 μ M sejam considerados normais, isto é, de ambientes aquáticos não poluídos. Nesse caso, têm-se os rios Zaire e Mississipi e algumas regiões dos rios Bermejo e Bacanga (ambos na América do Sul).

Tabela 5.1- Valores de amônio em diferentes sistemas estuarinos

Rio	Amônio - μ M	Referência
Zaire - África	0,5	VAN BENNEKON et al. 1978
Mississipi – Estados Unidos	<4	DEGENS et al. 1988
Ganges- Índia	10	“ “ “ “
Reno - Europa	90	CHESTER, 1993
Bermejo - Argentina	1 a 27,7	PEDROZO e BONETO, 1987
Bacanga – MA, Brasil	1 a 100	Este trabalho

5.1.6 – Nitrito e Nitrato

No processo de transformação do nitrogênio, o nitrito é uma espécie intermediária entre o íon amônio e o nitrato e é, geralmente, instável, pois é oxidado a nitrato ou reduzido à amônio dependendo das condições redox do ambiente. A distribuição longitudinal de nitrito, no estuário do rio Bacanga, é mostrada na Figura 5.12 e Anexo B1-6. Os valores variaram de 0,22 a 6,72 μ M, sendo que os mais baixos foram obtidos nas estações à montante (1,2, 3, 4, 5) com pouca ou nenhuma influência dos esgotos e os valores altos nas estações(7, 8, 9,10, 11 e 12) à jusante com maior influência antrópica. A variação sazonal é pouco pronunciada, isto é, encontrou-se valores baixos tanto no período chuvoso quanto no período de estiagem. Entretanto, houve uma tendência de aumento no mês de junho e somente nas estações de número 6 a 12 com os valores variando

de 4 a 6,72 μM respectivamente. Esses valores baixos de nitrito são explicados pelo consumo por algumas espécies de fitoplâncton e/ou bactérias e pelo processo de redução ou oxidação como acima referido; ao contrário, os valores elevados são pela desnitrificação -redução dos íons nitrato ou oxidação do amônio. Diferentemente do íon amônio, provavelmente, não existe contribuição das águas intersticiais do sedimento. É muito provável que o nitrito, juntamente com o amônio, durante o período chuvoso quando os teores de oxigênio são menores com relação ao período de estiagem, sejam consumidos pelo o fitoplâncton.

A concentração de nitrato nas águas estuarinas, é mais elevada do que o íon amônio e o nitrito; e, é também, a espécie mais estável. É produzido no sistema aquático pelo processo de nitrificação a partir da matéria orgânica nitrogenada. Além desse processo natural, a utilização de adubos nitrogenados na agricultura, na área de uma bacia hidrográfica, pode constituir-se de uma fonte antropogênica de nitrato para o ambiente estuarino; este, felizmente, não é o caso do estuário do rio Bacanga, pois, além das fontes naturais (fluxo fluvial e o manguezal), a única fonte antropogênica é o esgoto doméstico.

A distribuição do nitrato é mostrada na Figura 5.13 e Anexo B1-6, na qual pode-se observar a variação longitudinal. Os valores altos (2,2 a 7,4 μM) foram observados nas estações de número 5 a 12 e aqueles mais baixos (0,86 a 2,2 μM) e nas estações de número 1 a 4, à montante. A variação sazonal mostra valores elevados nos meses de fevereiro e abril, diminuição em junho, agosto e outubro; voltando a subir em dezembro. Esses valores menores em junho, agosto e outubro são atribuídos ao consumo maior pelo fitoplâncton, uma vez que os valores de produção primária obtida neste trabalho são mais elevados nesse período. Os valores mais elevados, por outro lado, são atribuídos à diminuição do consumo biológico e ao processo de nitrificação acima referido. Isto mostra que, apesar do período de estiagem apresentar maiores valores de oxigênio dissolvido com relação ao período chuvoso, o processo de produção de nitrato é maior nos meses em que as concentrações, desta espécie, são elevadas. As concentrações menores de nitrato, além do consumo pelo o fitoplâncton acima referido podem, também, estar associadas ao consumo por bactérias como uma segunda fonte de oxigênio. A seguir mostra-se alguns valores de nitrato em diferentes sistemas estuarinos (Tabela 5.2)

Na Europa e Estados Unidos, a maioria dos rios tem altas concentrações de nitrato, devido o uso intensivo de adubos nitrogenados na agricultura e, o Reno e o Mississipi são bons exemplos(Tabela 5.2)

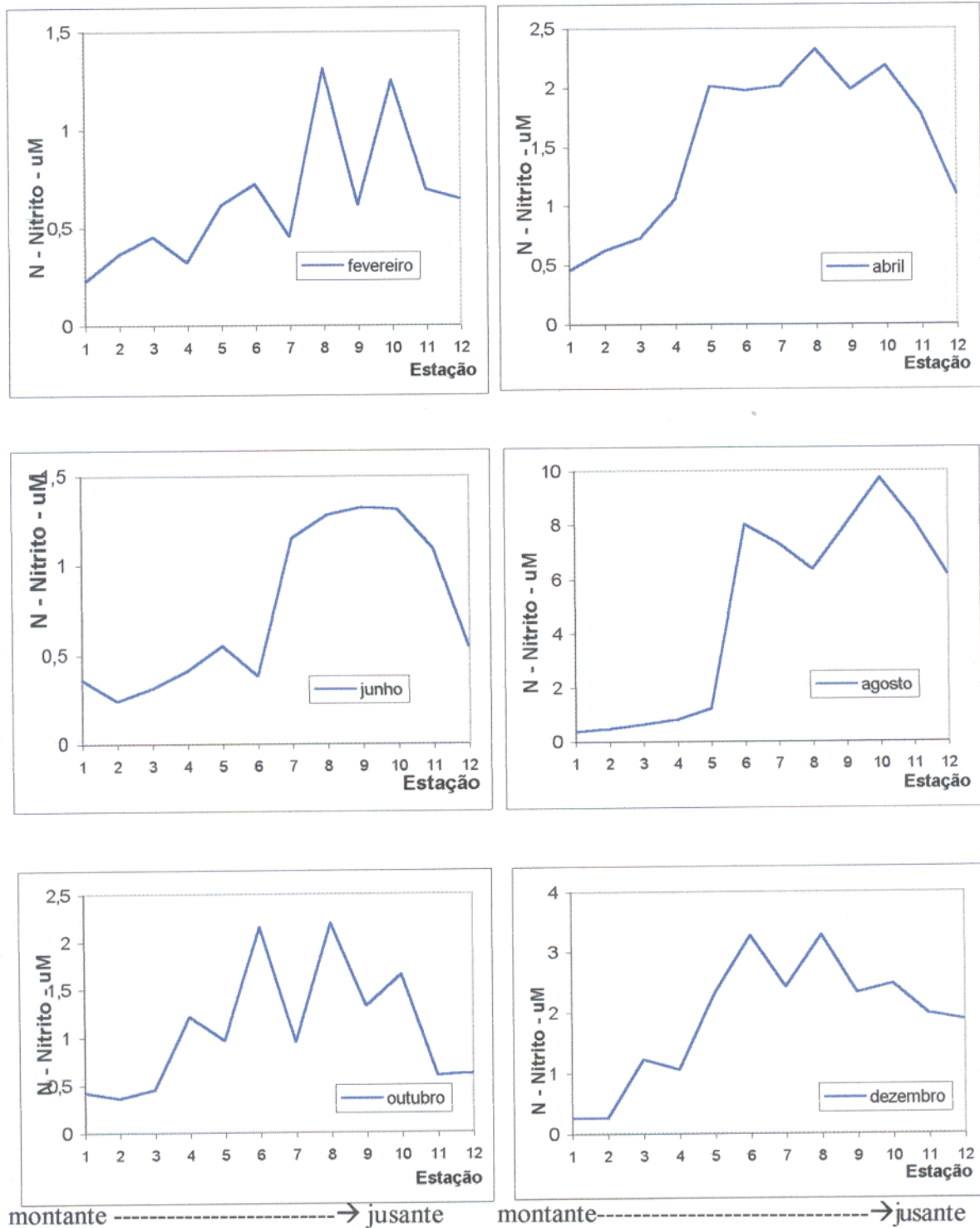
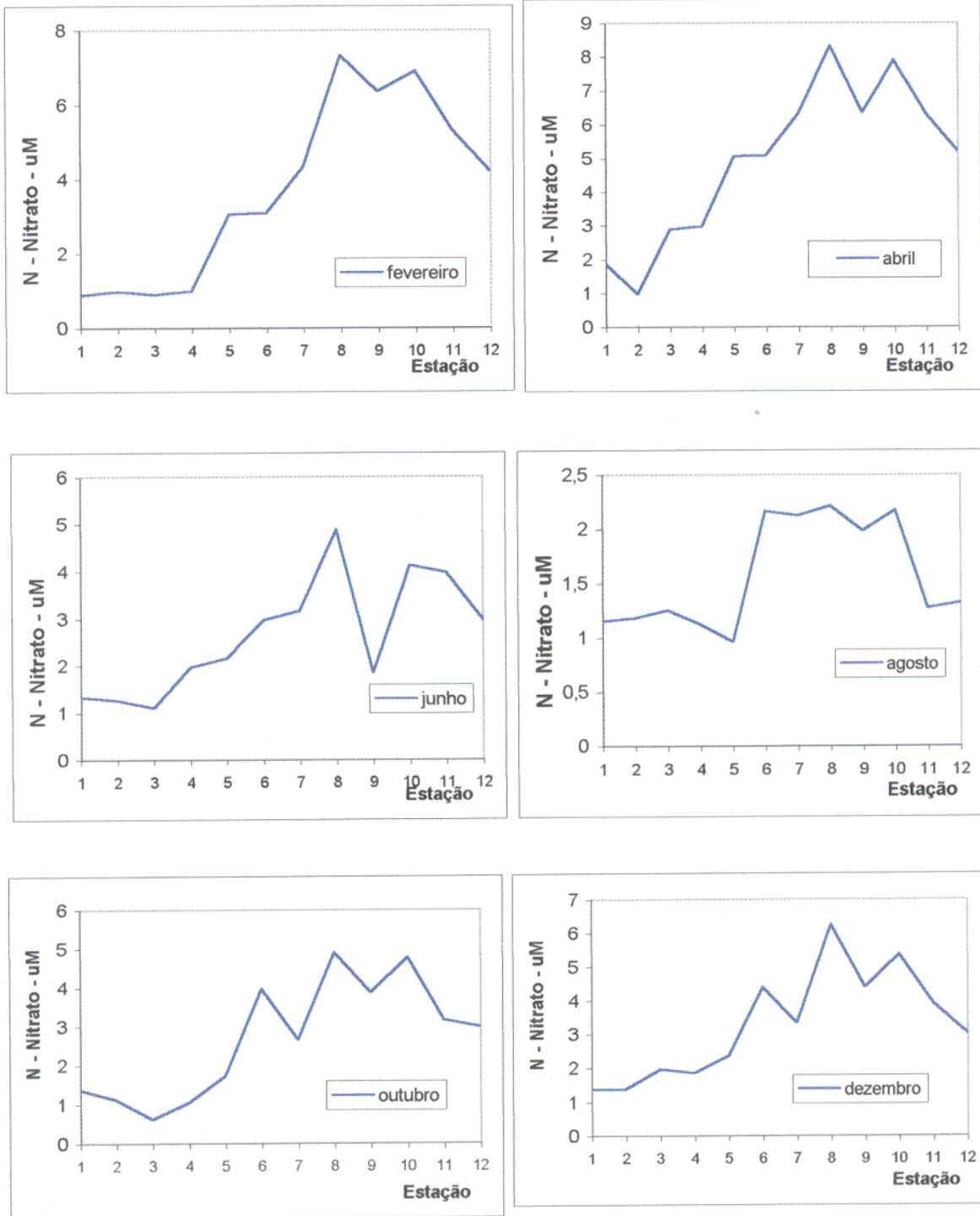


Figura 5.12 – Distribuição espaço – temporal do nitrito nas águas superficiais do estuário do rio Bacanga, ilha de São Luís - MA



montante -----> jusante montante-----> jusante

Figura 5.13 – Distribuição espaço – temporal do nitrato nas águas superficiais do estuário do rio Bacanga, ilha de São Luís – MA

No estuário do rio Bacanga não existe atividade agrícola com uso de adubos químicos, portanto, a contribuição antropogênica está restrita aos esgotos domésticos.

Apesar da contribuição dos esgotos domésticos, não existe um enriquecimento de nitrato no estuário do Bacanga como se esperava. Isto deve-se, principalmente, ao consumo pelo fitoplâncton como nutriente essencial e às bactérias como fonte alternativa de oxigênio.

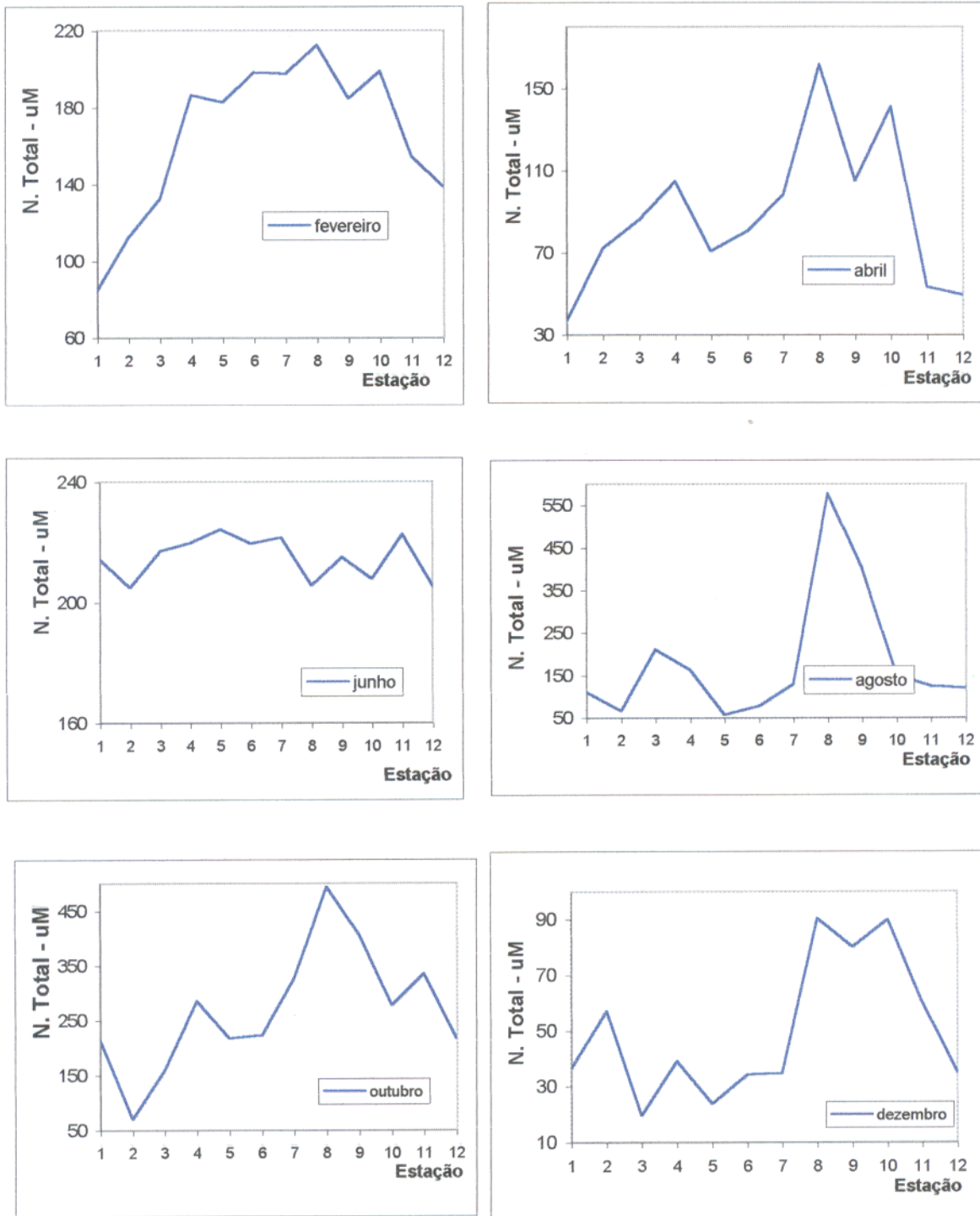
Tabela 5.2 – Valores de nitrato em diferentes sistemas estuarinos

Estuário	[NO ₃]-μM	Referência
Amazonas	3,0	GIBBS, 1972
Zaire	6,5	VAN BENNEKOM et al. 1978
Mississipi	160,0	DEGENS et al. 1988
Changjiang	10 a 75,0	EDMOND et al. 1985
Reno	290,0	DEGENS et al. 1988
Lagoa dos Patos	2 a 60,0	KANTIN et al. 1982
Estreito dos Coqueiros - MA	5 a 25,0	TEIXEIRA et al. 1988
Rio Bacanga - MA	0,9 a 7,41	Este trabalho

5.1.7 - Nitrogênio total

O nitrogênio total constitui-se da soma das espécies ou formas dissolvidas e particuladas. As formas dissolvidas são formadas pelos íons amônio, nitrito e nitrato como espécies inorgânicas e as orgânicas (uréia, aminoácidos, etc.). O nitrogênio particulado pode, também, dividir-se em espécies inorgânicas e orgânicas, fazendo parte de material vivo (algas, bactérias, fitoplâncton, zooplâncton, etc.) e inerte (pelotas fecais, colóides, restos de vegetais e animais). Essa divisão é considerada, como operacional e nem sempre corresponde à realidade ambiental. Mas, apesar das críticas, fornece indicações aproximadas para o estudo das diferentes espécies do nitrogênio em ambientes aquáticos.

A distribuição do nitrogênio total é mostrada na Figura 5.14, Anexo B1-6, no perfil longitudinal no estuário do rio Bacanga. Os maiores valores (36 a 213μM) nos meses de fevereiro, junho e outubro e os menores (19,5 a 128μM) nos meses de abril, agosto e dezembro. Portanto, uma variação sazonal com alternância, isto é, acréscimos e decréscimos em função de fatores internos e externos. A contribuição para o aumento do nitrogênio total, com relação aos fatores internos, cita-se o sedimento como fornecedor deste, na forma orgânica ou inorgânica e o fitoplâncton.



montante -----> jusante montante-----> jusante

Figura 5.14 – Distribuição espaço – temporal do nitrogênio total nas águas superficiais do estuário do rio Bacanga, ilha de São Luís – MA, 1997.

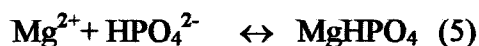
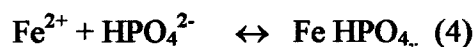
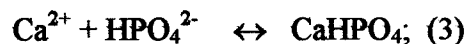
A contribuição externa ocorre com o aumento da descarga fluvial e da erosão ou lavagem das áreas do manguezal adjacente, tanto na forma dissolvida quanto particulada. Por exemplo, as concentrações elevadas no mês de abril estão, certamente, relacionadas com a grande quantidade de material particulado presente enquanto que as de junho e outubro com a contribuição das águas intersticiais do sedimento. As baixas concentrações, por outro lado, estão relacionadas ao consumo pelo fitoplâncton, das espécies biodisponíveis, e a diminuição do particulado (decomposição da matéria orgânica).

5.1.8 - Ortofosfato e fósforo total

O termo ortofostato é normalmente chamado, de fosfato, fósforo inorgânico dissolvido ou fósforo reativo solúvel e engloba as espécies H_2PO_4^- (1%), PO_4^{3-} (12%) e HPO_4^{2-} (87 %), (STUMN & MORGAN 1970; KRAUSKOPF & BIRD 1995; CHESTER 1993). Neste trabalho, será utilizada a notação da última espécie como representativa do fósforo reativo dissolvido e, também, por existir em maior porcentagem na faixa de pH das águas naturais. Mas, sabe-se que, em termos de metodologia analítica, as três espécies são determinadas simultaneamente.

O fósforo reativo dissolvido constitui-se, na maioria dos casos, de um fator limitante à produção primária dos sistemas aquáticos. No estuário do rio Bacanga, as concentrações mais elevadas (3 a $15\mu\text{M}$) e as mais baixas ($0,15$ a $3\mu\text{M}$).

A distribuição espaço-temporal é mostrada na Figura 5.15 e Anexo B1-6. Nas estações de coleta (1,2, 3 e 4), à montante, os valores de fósforo reativo ficaram abaixo de $3\mu\text{M}$ na maioria dos meses amostrados, enquanto que nas estações (8, 9 e 10), à jusante, os valores foram superiores a este valor. Nas estações 11 e 12 os valores desta espécie voltaram a diminuir em função da diluição pela água costeira marinha mais pobre em fósforo. Portanto, o comportamento do fósforo reativo está sujeito a fatores bióticos (consumo pelo fitoplâncton) e abióticos (reação com os íons cálcio, ferro e magnésio) conforme as equações químicas:



Essas equações mostram alguns exemplos das diferentes reações que podem ocorrer com as diferentes espécies iônicas do fosfato reativo acima referidas. É óbvio que estas reações dependem das concentrações presentes e de outros fatores, especialmente do pH.

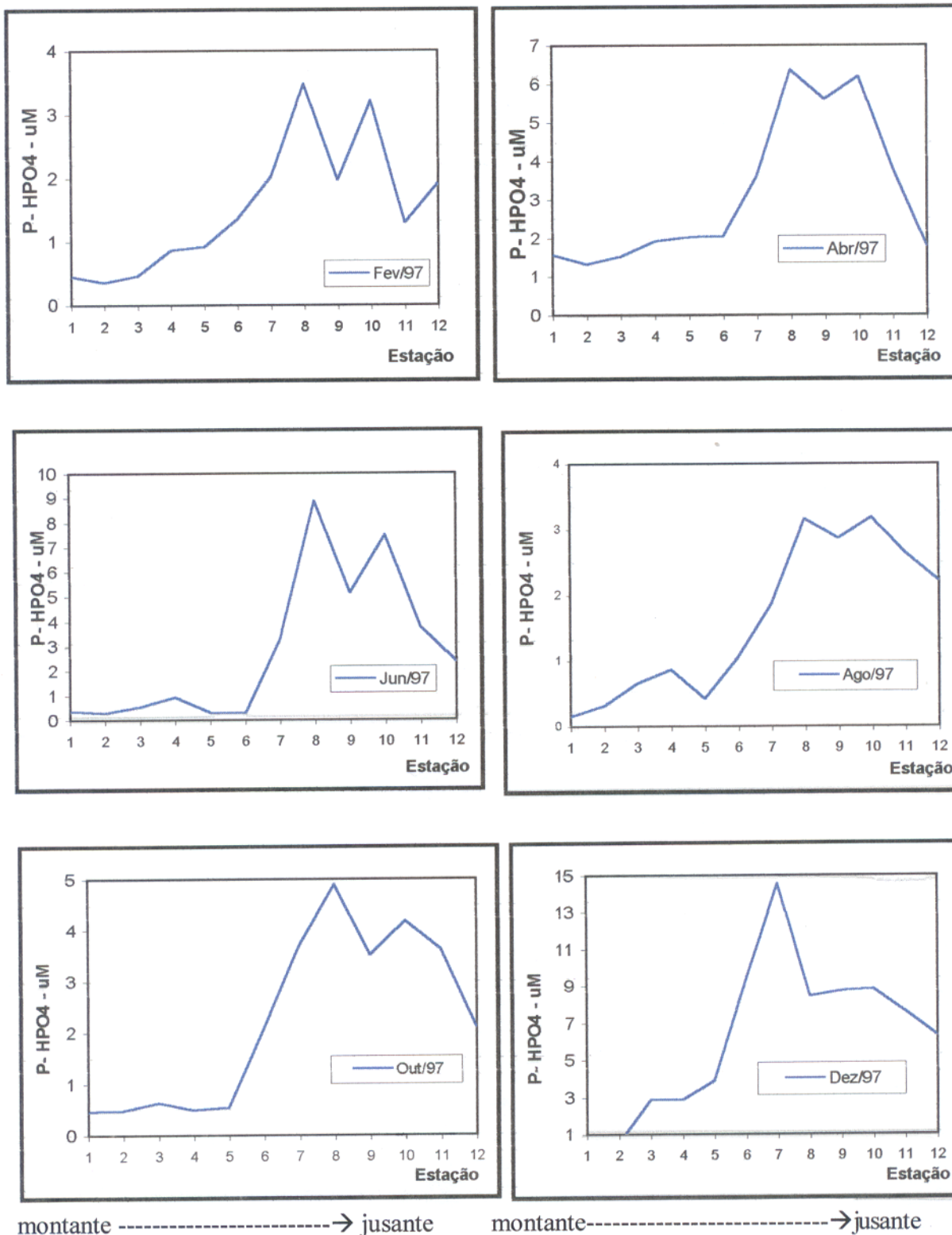


Figura 5.15 – Distribuição espaço – temporal do fosfato nas águas superficiais do estuário do rio Bacanga, ilha de São Luís - MA

O fósforo reativo solúvel, assim como as espécies do nitrogênio inorgânico solúvel, no estuário do Bacanga, tem nos esgotos doméstico sua maior fonte. Foi observado que nas estações 8, 9 e 10 que ficam mais próximas aos pontos de lançamentos de esgotos domésticos, concentrações mais elevadas (4 a 15 μ M) nos meses da amostragem.

A transferência das espécies dissolvidas, de fósforo reativo solúvel, para o particulado ocorre através do consumo pelo fitoplâncton e por processos físicos e químicos de adsorção. Uma vez ocorrida a transferência, o material particulado pode sedimentar, concentrar-se de fósforo os sedimentos superficiais que após sua decomposição e, por processos de difusão, voltar à coluna d'água (CHESTER, 1993). O fósforo total, assim como o nitrogênio total, reúne as formas particuladas e dissolvidas e cada uma destas as espécies inorgânicas e orgânicas. Este parâmetro por si só, não fornece as informações ou subsídios necessários à biodisponibilidade ou ao estudo mais detalhado do ciclo do fósforo num ambiente aquático. Mas, em conjunto com as formas dissolvidas e particuladas, são úteis para se avaliar o processo de ciclagem ou de reciclagem do mesmo. Como referido anteriormente, na maioria dos casos, essas formas ou espécies são definidas operacionalmente e a metodologia analítica é demorada quando se trabalha com um número de amostras relativamente grande.

No estuário do rio Bacanga a distribuição espaço-temporal do fósforo total é mostrada na Figura 5.16, Anexo B1-6. Observa-se que os valores variaram de 1,23 (mínimo) a 21 μ M (máximo) e que o ambiente apresenta 3 compartimentos distintos: 1° - a parte superior, correspondendo às estações 1, 2, 3, 4, 5, 6 e 7 com valores baixos (1,3 a 5,0 μ M); 2° - a parte intermediária, correspondendo às estações 8, 9 e 10; com valores elevados (6 a 21 μ M) e 3° - parte inferior, correspondendo às estações 11 e 12; com valores intermediários (3 a 12 μ M).

Observa-se que o fósforo total apresenta-se com valores elevados no período chuvoso devido à contribuição de particulado do escoamento fluvial e do manguezal adjacente, diminui no início do período seco e volta a aumentar do meio para o final deste último. Esse aumento no período seco é devido ao particulado de origem planctônica e à contribuição das águas intersticiais. A tabela 5.3 mostra valores de ortofosfatos em diferentes ambientes aquáticos. Coincidentemente os valores elevados desse parâmetro são iguais para o Reno e o Bacanga. Portanto, o estuário do Bacanga, apesar de não existir poluição industrial apresenta-se enriquecido de fosfatos e não de nitratos.

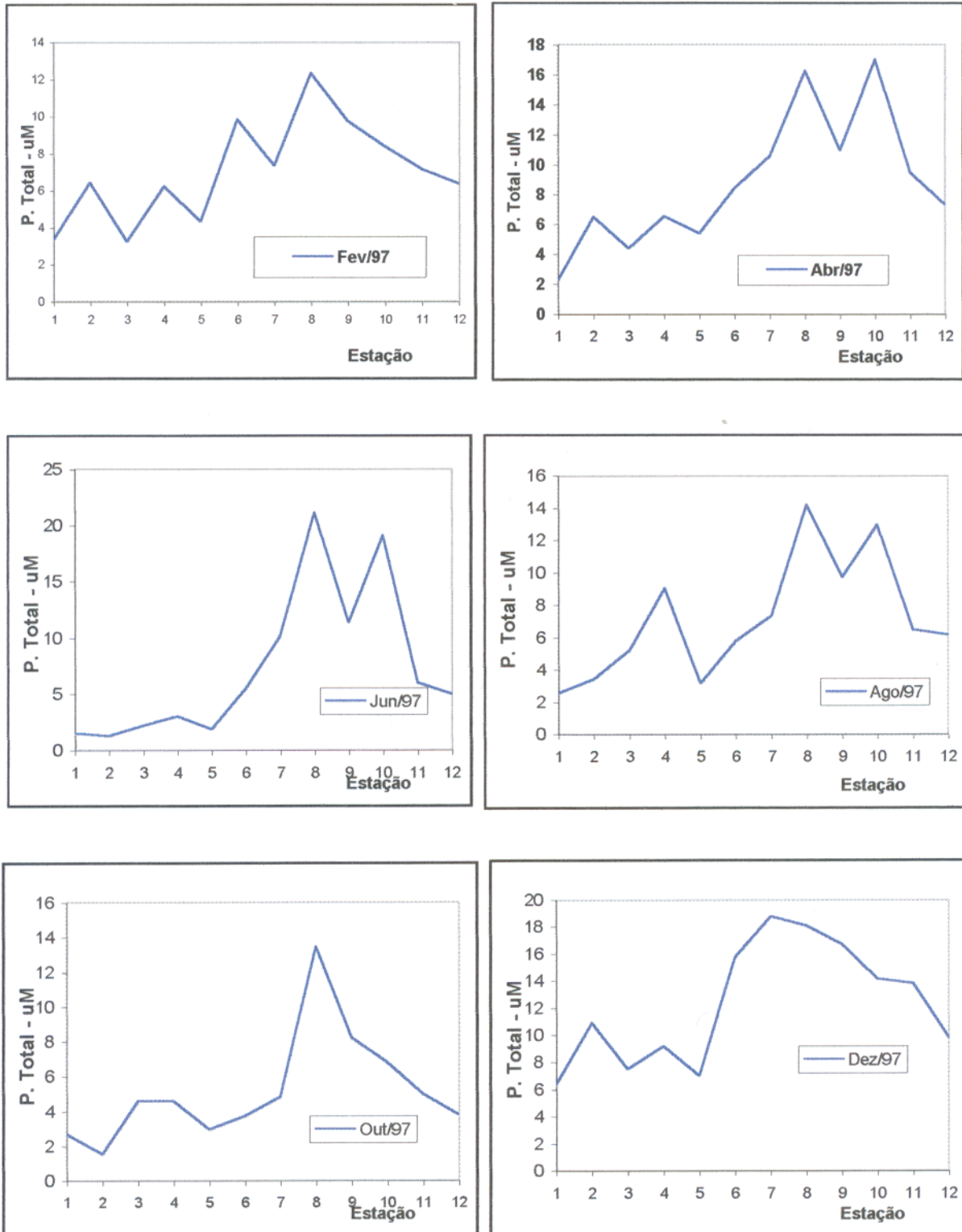


Figura 5.16 - Distribuição espaço-temporal de P-total nas águas do estuário do rio Bacanga Ilha de São Luis-MA

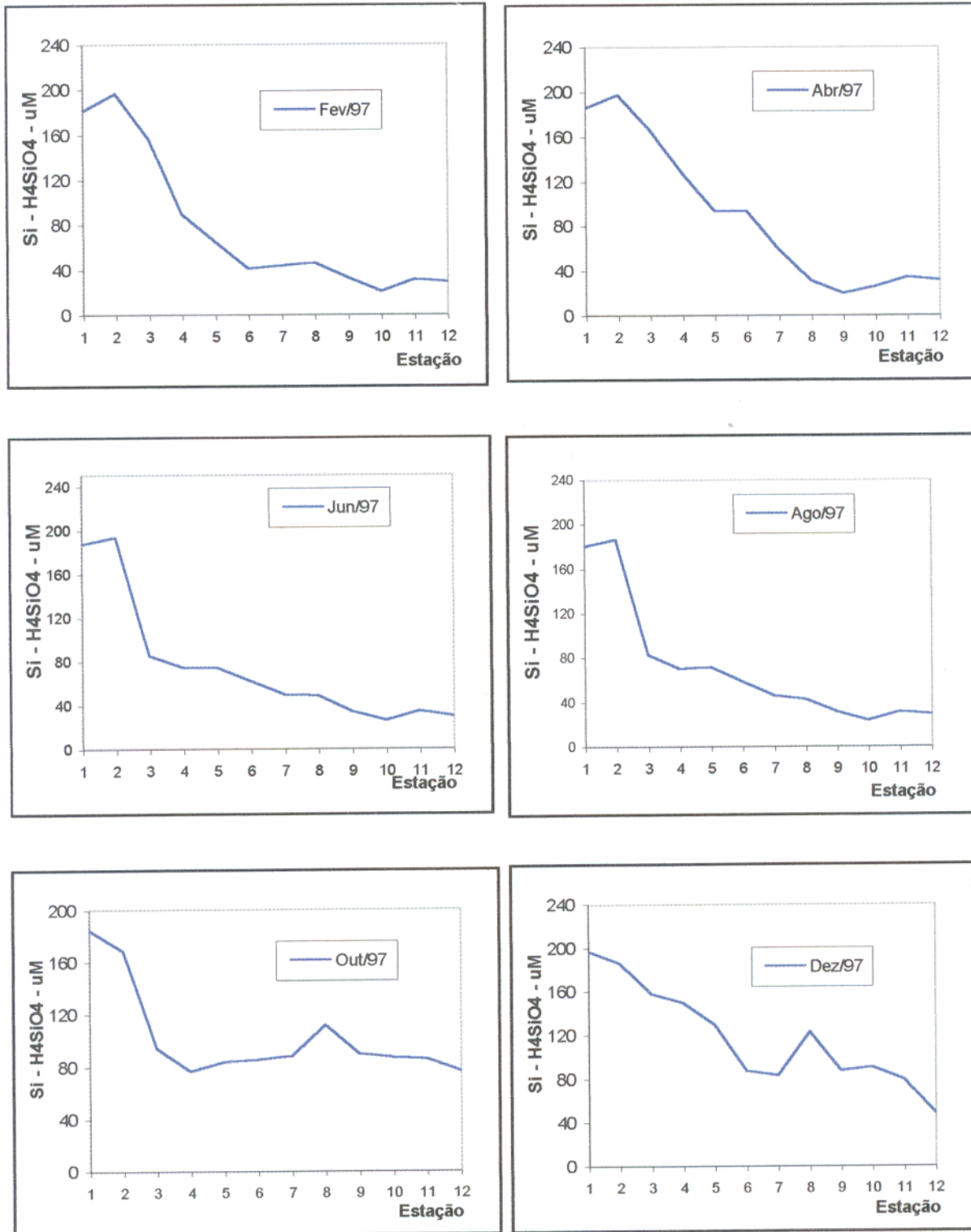
Tabela 5.3 - Valores de fósforo reativo solúvel (HPO_4^{2-}) em μM em diferentes sistemas estuarinos

Estuário	HPO_4^{2-} - μM	Referência
Amazonas	0,4	GIBBS, 1972
Reno	12,0	DEGENS et al. 1988
Zaire	0,7	VAN BENNEKOM, et al. 1978
Ganges	2 a 4,0	DEGENS et al. 1988
Mississipi	2,8	" " " "
Lagoa dos Patos	0,5 a 9,0	KANTIN & et al. 1982
Estreito dos Coqueiros - MA	0,5 a 2,0	TEIXEIRA et al. 1988
Bacanga - MA	0,15 a 12,0	Este trabalho

5.1.9 - Silicato

O silício dissolvido, no ambiente aquático, se encontra na forma de ácido ortossilícico (H_4SiO_4) e é denominado de silicato ou silício reativo solúvel. A distribuição espaço-temporal do silicato no estuário do Bacanga é mostrada na Figura 5.17 e Anexo B1-6. Observa-se que as concentrações são mais elevadas ($\cong 200\mu\text{M}$) na parte montante (estações 1 e 2) e diminuem a medida que aumenta a salinidade, atingindo os valores mínimos (20 a $50\mu\text{M}$), na parte jusante, estações 10, 11 e 12. O comportamento desse parâmetro é praticamente conservativo, isto é, está sujeito apenas aos processos físicos de diluição de águas fluviais de maior concentração em silício com águas costeiras marinhas de baixos teores do mesmo. Portanto, a correlação é negativa e alta quando comparada com a distribuição de salinidade e aquelas de nitrogênio e fósforo. A principal fonte de silício para o estuário são águas fluviais e a lavagem pela chuva das áreas adjacentes e do manguezal. Portanto, os esgotos domésticos não têm, praticamente, nenhuma contribuição em termo de silicato.

O comportamento conservativo não implica, somente no processo físico de mistura, porem existe um consumo biológico, na coluna d'água, o qual é compensado pelo fluxo a partir do sedimento no processo de reciclagem do silicato (CHESTER, 1993). No Bacanga, observam pequenos desvios na linha de diluição teórica, que podem ser atribuídos ao consumo por diatomáceas. Comportamento praticamente semelhante, foi observado para o silicato no estuário do rio Amazonas (EDMOND et al. 1983), onde o volume de água doce é incomparavelmente maior do que aquele do Bacanga. A seguir mostra-se os valores de silicato para diversos sistemas estuarinos (Tabela 5.4). Onde os valores para o Bacanga estão na faixa esperada para a região.



Montante -----→ jusante Montante -----→ jusante

Figura 5.17 – Distribuição espaço – temporal de silicato nas águas superficiais do estuário do rio Bacanga, ilha de São Luís – MA, 1997.

Os valores elevados para o Estreito dos Coqueiros (Golfão Maranhense) são explicados pela contribuição dos rios Mearim (e seus afluentes Pindaré e Grajau) e Itapecuru (TEIXEIRA et al. 1988).

Tabela 5.4– Valores de silicato em diferentes sistemas estuarinos

Estuário	H ₄ SiO ₄ - μM	Referência
Amazonas	2 a 187	EDMOND et al. 1983
Reno	100	DEGENS et al. 1988
Zaire	166	VAN BENNEKOM et al. 1978
Ganges	167	DEGENS et al. 1988
Mississippi	90	“ “ “ “
Lagoa dos Patos	5 a 65	KANTIN et al. 1982
Estreito dos Coqueiros - MA	30 a 280	TEIXEIRA et al. 1988
Bacanga - MA	19 a 196	Este trabalho

5.1.10- Íons maiores (Na⁺, K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺ e SO₄²⁻)

A distribuição espaço-temporal dos íons maiores estudados, no estuário do rio Bacanga, é mostrada nas Figuras 5.18, 5.19 e Anexo C1-5. Os valores mais elevados para esses íons foram obtidos à jusante (estação 11 e 12) e os menores à montante (estação 1 e 2).

Esses íons, por hipótese, apresentam comportamento conservativo nos sistemas estuarinos pois, o consumo pelo fitoplâncton é desprezível comparado com aquele do nitrogênio, fósforo e silício (CHESTER, 1993). Por esse motivo, optou-se pela determinação dos mesmos apenas nos meses de abril e outubro de 1997, eis as variações principais: o íon sódio na estação 1, variou de 12,4 a 18 mg/L e na estação 12 de 3.000 a 9.400mg/L; o íon potássio na estação 1, varia de 2,6 a 5,9mg/L e na estação 12 de 100 a 340mg/L; o íon cálcio na estação 1, variou de 10,5 a 15mg/L e na estação 12 de 92,5 a 359,6 mg/L; o íon magnésio na estação 1, variou de 15 a 23,5 mg/L e na estação 12 de 365 a 1.430mg/L; o íon sulfato na estação 1, variou de 5,8 a 9,4mg/L e na estação de 750 a 2.375mg/L, respectivamente nos meses acima citados. Observa-se que no mês de abril existe o efeito da diluição pelo escoamento fluvial diminuindo, proporcionalmente, os valores entre esses íons.

De acordo com a distribuição longitudinal desses íons, a predominância marinha se estende desde a estação 12 (foz do estuário) até a estação 2 (à montante) a 2km da nascente do rio

Bacanga. Portanto, a influência das águas marinhas costeiras, para o estuário, é bastante significativa principalmente para o sódio, cálcio, magnésio e sulfato.

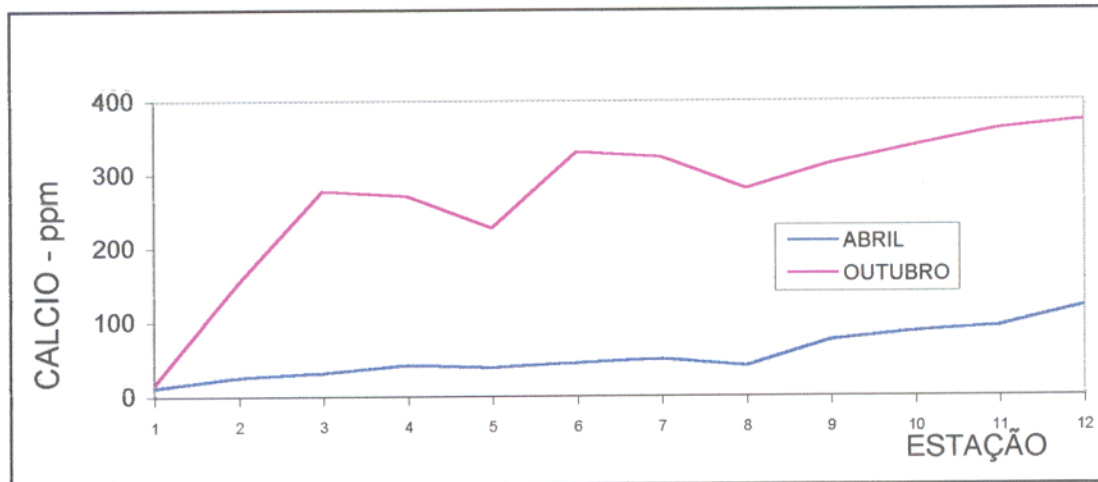
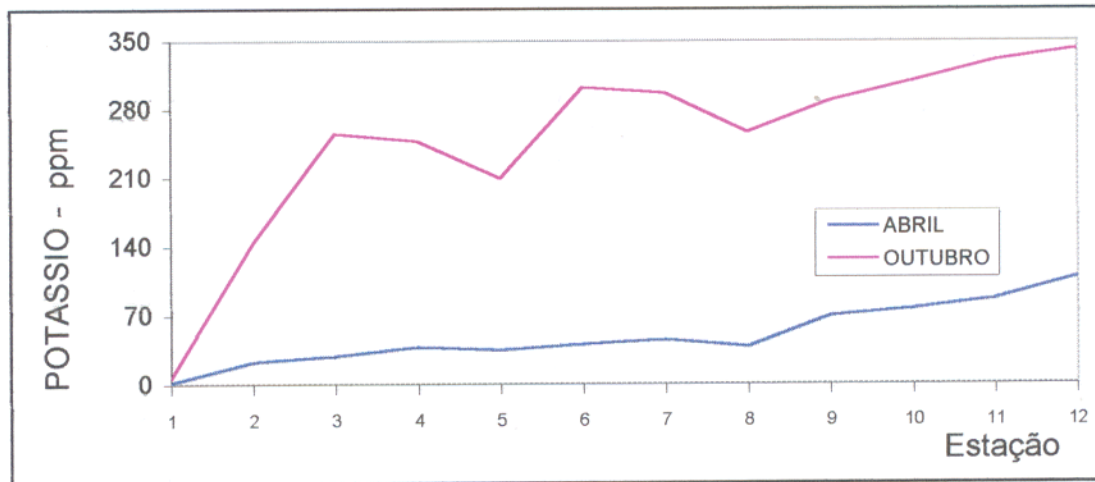
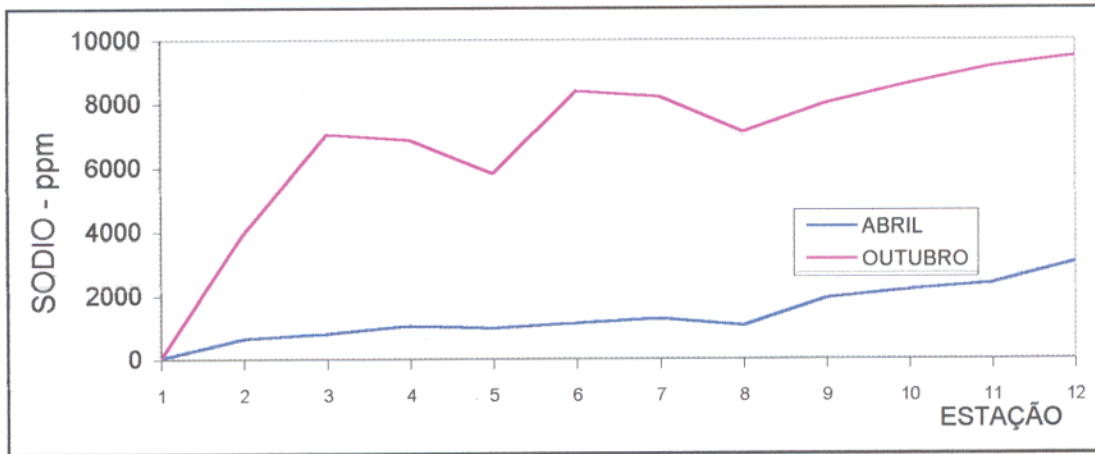
5.1.11 – Clorofila “a”

A clorofila “a” aqui referida é a clorofila do fitoplâncton presente nas águas superficiais do sistema estuarino. Ela fornece, com boa aproximação, a biomassa do fitoplâncton presente no sistema (AMINOT & CHAUSSEPIED, 1983). Teve-se o cuidado de eliminar-se, através de uma pré-filtração com rede de plâncton de 200µm de malha, as interferências (restos de vegetais) provenientes do fluxo fluvial e do manguezal adjacente.

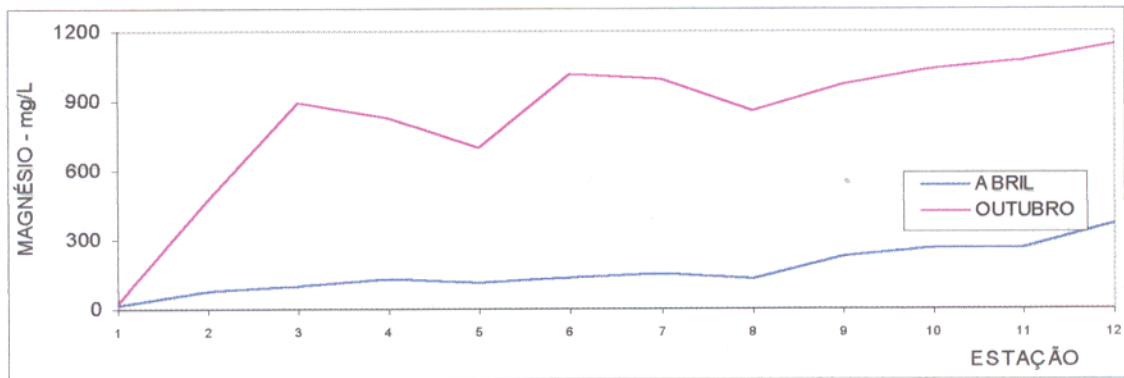
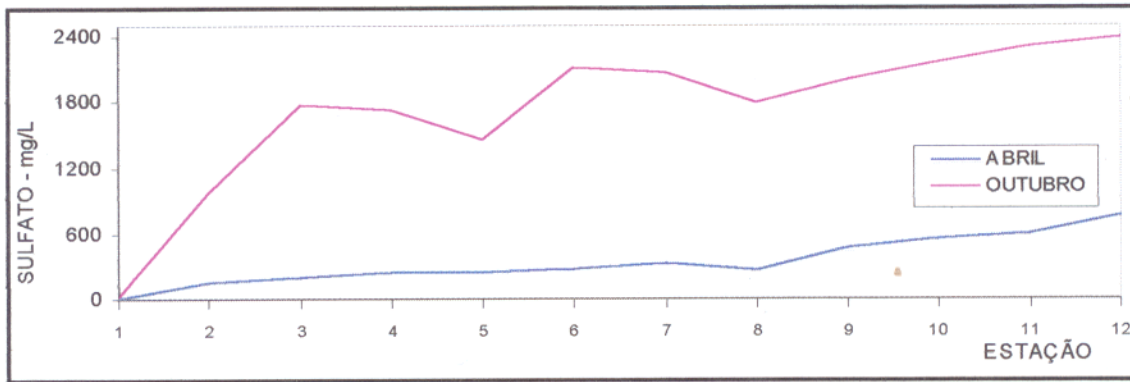
A distribuição espaço-temporal desse parâmetro é mostrado na Figura 5.20, anexo D. Observa-se também, neste caso, uma compartimentação com relação a distribuição da clorofila “a” no sistema estuarino do Bacanga. A parte superior (à montante) do estuário com valores baixos variando de 3,8 a 10,9mg/m³, a parte intermediária com valores mais elevados variando de 8 a 44 mg/m³ e parte inferior (à jusante) com valores próximos àqueles da parte montante variando entre 4,2 a 11 mg/m³.

Esses valores mais elevados foram registrados nas estações 4, 5 e 6 onde os valores de produção primária são mais elevados comprovando, desta maneira, que a origem da clorofila “a” é do fitoplâncton. Portanto, a clorofila “a” é um indicador do estado trófico do ambiente estuarino estudado. Os baixos valores, tanto na parte inferior e superior, são atribuídos à baixa produção primária. Observa-se que existe uma boa correlação (positiva) entre a clorofila “a” e a produção primária, a qual será discutida no próximo capítulo. Mostra-se a seguir a Tabela 5.5 com valores de clorofila em diferentes ambientes estuarinos e costeiros.

Observa-se a concordância dos resultados obtidos neste trabalho com aqueles da costa sudeste brasileira, onde estão incluídos dados da região de Cabo Frio onde existe o fenômeno da “ressurgência”. Na laguna Swamptool (Inglaterra), os valores elevados estão relacionados com a floração excessiva (bloom) das algas durante a primavera. Em ambos casos, ou seja, na costa sudeste brasileira e na Inglaterra, os valores elevados de clorofila “a” estão relacionados com a produção primária de suas águas (Tabela 5.5).

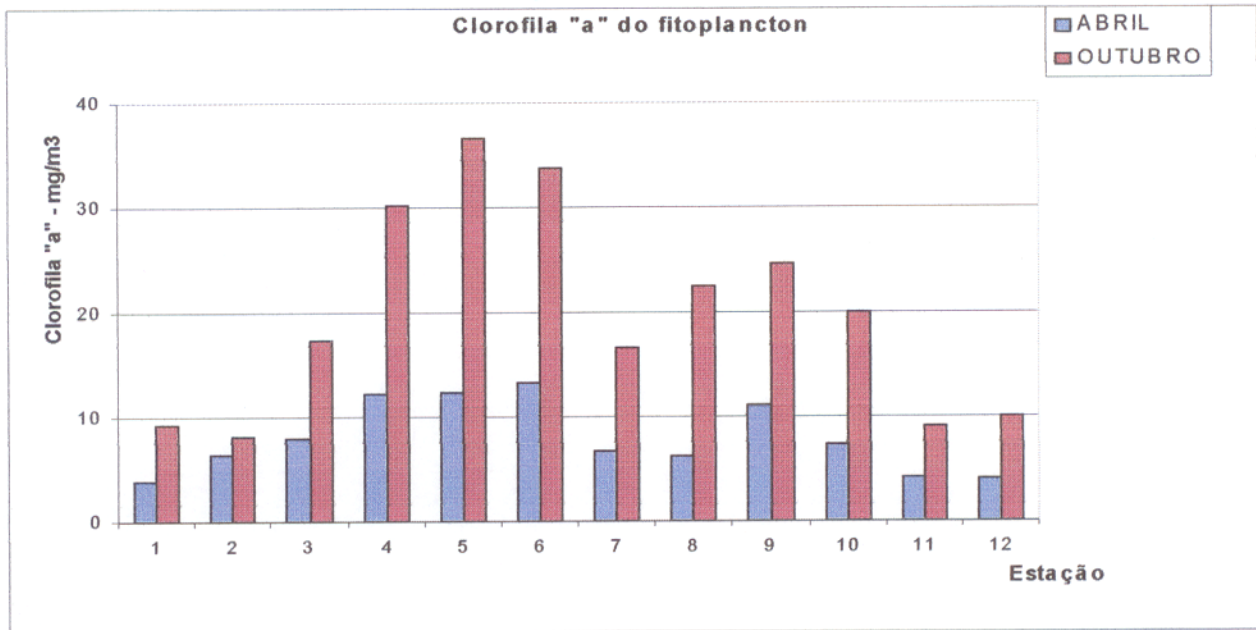


Montante -----> jusante
Figura 5.18 – Distribuição espaço – temporal de sódio, potássio e cálcio nas águas superficiais do estuário do rio Bacanga, ilha de São Luís – MA, 1997.



montante -----> jusante

Figura 5.19 – Distribuição espaço – temporal de sódio, potássio e cálcio nas águas superficiais do estuário do rio Bacanga, ilha de São Luís – MA, 1997.



montante -----> jusante

Figura 5.20 – Distribuição espaço – temporal da clorofila "a" nas águas superficiais do estuário do rio Bacanga, ilha de São Luís – MA, 1997.

Tabela 5.5– Valores comparativos de clorofila “a” em diferentes sistemas estuarinos

Estuário	Clorofila “a”	Referência
Costa sudeste do Brasil	1,5 a 30mg/m ³	AIDAR-ARAGÃO & TEIXEIRA, 1980
Estuário e pluma do Zaire	0,1 a 2 “	CADEÉ, 1978
Baía de S. Antônio - México	3,1 a 15 ”	SOSA-AVALOS et al. 1997
Laguna Swampool – Inglaterra	8,0 a 140 “	CRAWFORD et al. 1979
Estreito dos Coqueiros – MA	3,1 a 10 “	TEIXEIRA et al. 1988
Rio Bacanga – MA	3,8 a 44 “	Este trabalho

5.1.12 – Produção primária do fitoplâncton

O fitoplâncton do estuário rio Bacanga, segundo FERNANDES(1994) é constituído em grande parte por espécies de diatomáceas e, em menor proporção, por dinoflagelados. Esses organismos desempenham diversas funções importantes do ponto de vista ecológico e biogeoquímico. Por exemplo, como referido anteriormente, eles podem consumir íons nitratos, fostatos e silicatos, entre outros da coluna d’água no seu processo de crescimento e multiplicação; após a morte, esses organismos são decompostos tanto a nível de coluna d’água quanto a nível de sedimento. Portanto, eles são partes atuantes da ciclagem de muitos dos nutrientes essenciais e de outros elementos ou espécies químicas.

No estuário do Bacanga, após alguns testes iniciais e as observações de algumas características ambientais, verificou-se que as áreas de maior produção primária estavam localizadas entre as estações 4, 5 e 6 em maior intensidade e menor na estação 9. Essas observações foram feitas quanto à turbulência, à disponibilidade de nutrientes, à concentração de material particulado e à incidência de energia luminosa. Essas características ambientais, entre outras, podem controlar ou limitar a produção primária num determinado ambiente aquático.

A distribuição espaço-temporal da produção primária no estuário do Bacanga é mostrada nas Figuras 5.21 e 5.22 e Anexo E1-2. Observou-se que os maiores valores (26 a 150mgC/m³/h) da produção, foram obtidos nos mês de agosto e os menores em abril (3 a 59mgC/m³/h) nas estações 5 e 6, respectivamente. Observou-se observado, também, que a produção é máxima no mês de agosto, a seguir diminui até atingir um mínimo no mês de abril; em junho volta a subir até agosto. Esse comportamento sazonal da produção está relacionado à incidência e à penetração da radiação solar na coluna d’água. No mês de abril, têm-se o máximo de precipitação pluviométrica

e o máximo de MPS nas águas estuarinas e o mínimo de insolação; conseqüentemente, o mínimo de penetração luminosa nessas águas (Tabela 2.1). Em junho, com o fim ou a diminuição crescente da precipitação pluviométrica (diminuição, também, do MPS), a disponibilidade de luz é maior, então o processo de produção primária começa a aumentar, uma vez que existem nutrientes em excesso.

Em agosto, praticamente não existe precipitação pluviométrica (portanto, menos MPS), a produção atinge o seu máximo, seguida de um ligeira diminuição até atingir o mínimo novamente em abril, realizando, assim, o ciclo anual. Pode-se perguntar, por que esse máximo não coincide com o máximo do período seco que é o mês de outubro? A explicação mais provável é que, após um período de certa “inatividade relativa” durante os meses do período chuvoso (março, abril e maio, principalmente), os organismos fitoplanctônicos iniciando suas atividades de crescimento e reprodução em junho, atinjam o máximo destas atividades em agosto de acordo a lei de Michaelis-Menten (CHESTER, 1993).

Portanto, esse tempo, onde o patamar é o máximo da produção, é característico desses organismos e de suas condições ambientais. O oxigênio dissolvido, por exemplo, aumentou nas estações 5 e 6 devido a essa região do sistema estuarino apresentar produção primária máxima, enquanto que nas estações 11 e 12, principalmente, o aumento desse gás foi devido à turbulência do sistema e, conseqüentemente, às trocas com a atmosfera. Foi ser observado, também, que existe uma relação positiva entre os valores de produção primária mostrada na tabela 5.6 e aqueles de clorofila “a” da tabela 5.5, para os mesmos ambientes. Esses valores da produção primária obtidos neste trabalhos e os demais da tabela 5.6 confirmam a hipótese de que os ambientes estuarinos e costeiros são altamente produtivos.

Tabela 5.6 - Valores de produção primária em diferentes ambientes estuarinos e costeiros

Estuário	Produção primária	Referência
Costa sudeste do Brasil	0,1 a 220mgC/m ³ /h	AIDAR-ARAGÃO & TEIXEIRA, 1980
Estuário do Zaire - África	0,5 a 29 “ “ “	CADEE, 1978
Estreito dos Coqueiros – MA	2,1 a 140 “ “ “	TEIXEIRA et al. 1988
Baía de S. Antônio – México	6,6 a 89,6 “ “ “	SOSA-AVALOS et al. 1997
Laguna Swampool – Inglaterra	0,7 a 13,0 mg/L/O ₂ /dia	CRAWFORD et al. 1979
Rio Bacanga – MA	3,8 a 148,8 mgC/m ³ /h	Este trabalho

O principal fator limitante da produção primária no estuário do rio Bacanga é a penetração de energia luminosa na coluna d'água durante o período chuvoso, considerando a variação sazonal. A turbulência limita a produção nas estações 7, 11 e 12 no período seco (julho a dezembro) quando ondas, relativamente fortes, são originadas pela ação dos ventos.

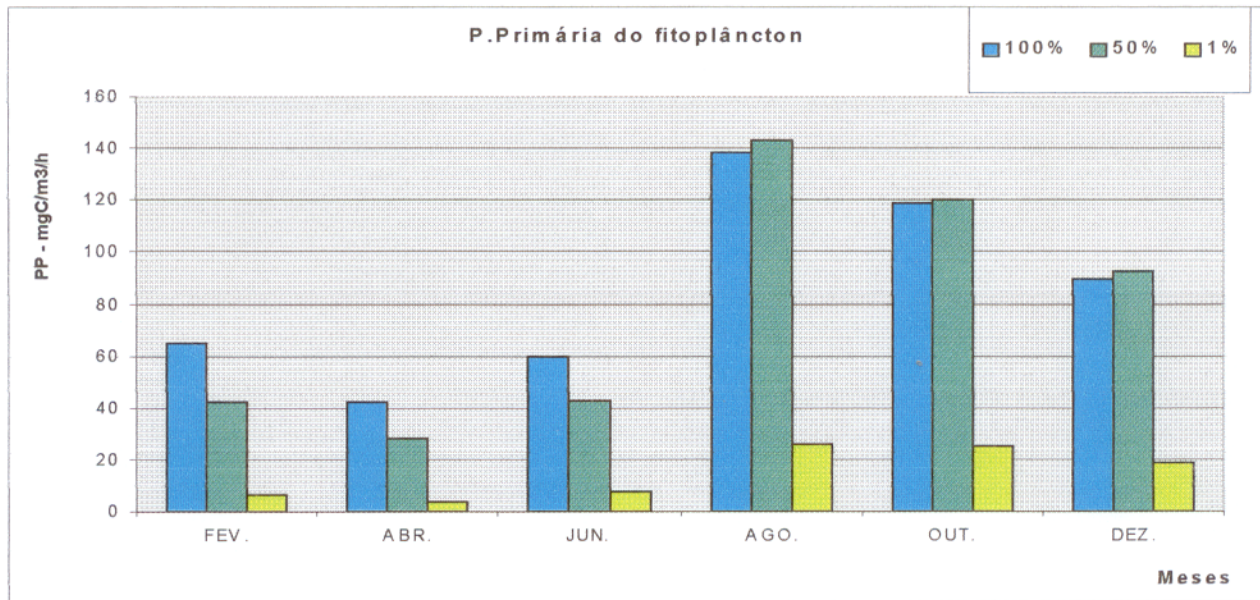


Figura 5.21 – Distribuição temporal da produção primária do fitoplâncton (estação 5 e a % de penetração de luz solar) nas águas do estuário do rio Bacanga, ilha de São Luís – MA, 1997.

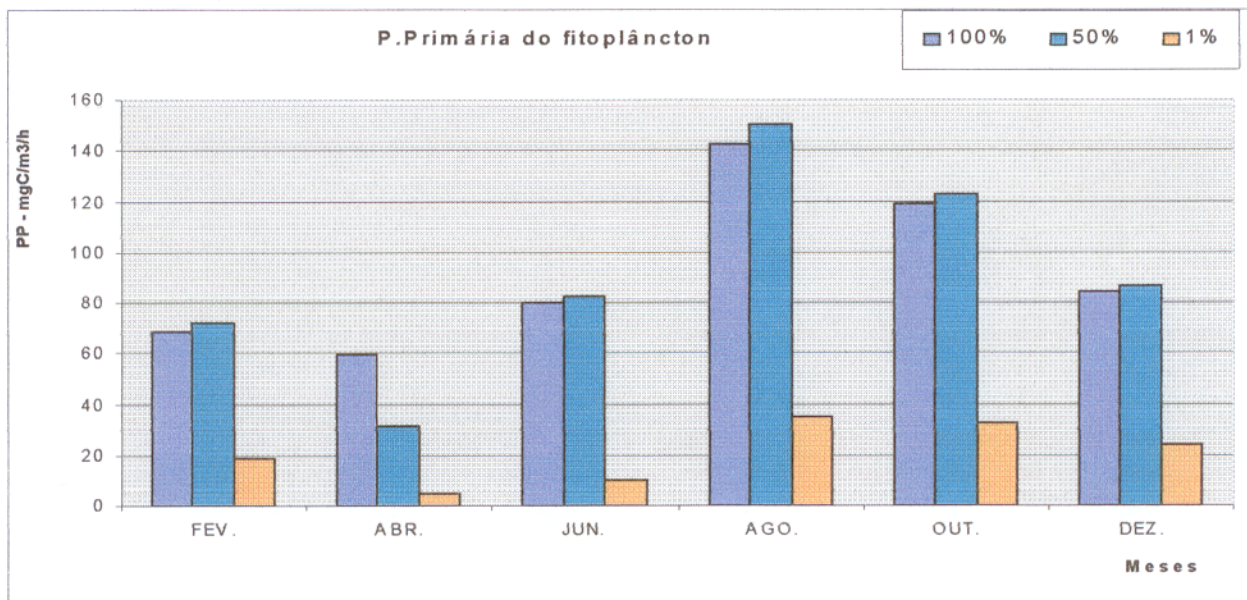


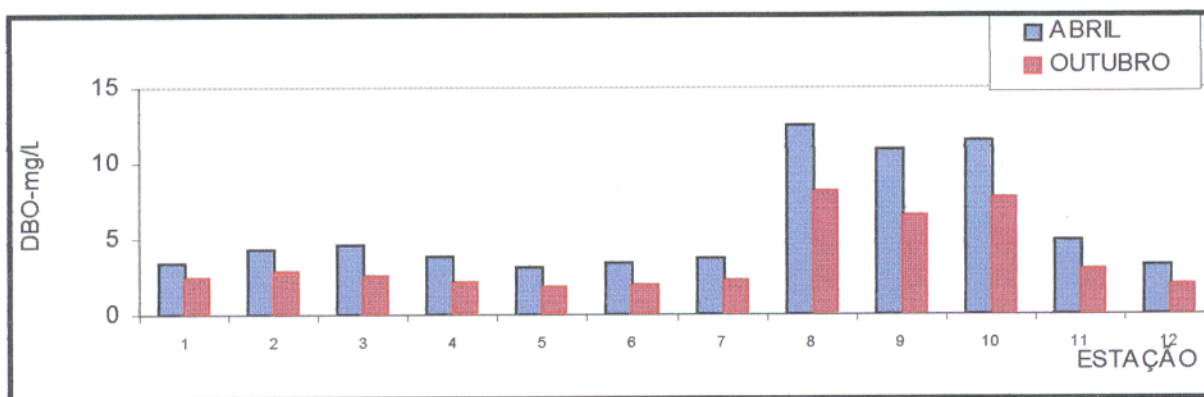
Figura 5.22 – Distribuição temporal da produção primária, no estuário do rio Bacanga (estação 6 e a % de penetração de luz solar), ilha de São Luís – MA, 1997.

Nas estações 1, 2 e 3 além da energia luminosa, a escassez relativa de nutrientes são os principais fatores limitantes dessa produção. Nas estações 8 e 10, próximas aos pontos de lançamentos de esgotos domésticos, a penetração de luz é fator limitante mais significativo na maior parte do ano. Na estação 9, a turbulência é limitante no período seco e a energia luminosa no período chuvoso.

5.1.13 – Demanda bioquímica de oxigênio

A demanda bioquímica de oxigênio – DBO foi determinada nos meses de abril e outubro, quando ocorreram as maiores variações de oxigênio dissolvido. A distribuição espaço-temporal desse parâmetro é mostrado na Figura 5.23 e Anexo F. Os maiores valores (6 a 12 mg/L) foram registrados nas estações 8, 9 e 10 que ficam situadas nas proximidades dos pontos de lançamento dos esgotos domésticos. Os valores intermediários (2,5 a 5 mg/L) nas estações 1,2 e 3 (à montante) e nas estações 11 e 12 (em abril), à jusante. Os menores valores (2 a 3mg/L), em todas as estações, com exceção de 8, 9 e 10, no mês de outubro.

Os valores elevados em abril e outubro nas estações sob influência dos esgotos já eram esperados para uma região com existência de grande quantidade de matéria orgânica de origem antrópica. Na parte superior do estuário, os valores, relativamente, elevados em abril devem estar relacionados à degradação da matéria orgânica de origem natural (fluxo fluvial e do manguezal adjacente).



montante -----> jusante
Figura 5.23 – Distribuição espaço – temporal da DBO nas águas superficiais do estuário do rio Bacanga, ilha de São Luís – MA, 1997.

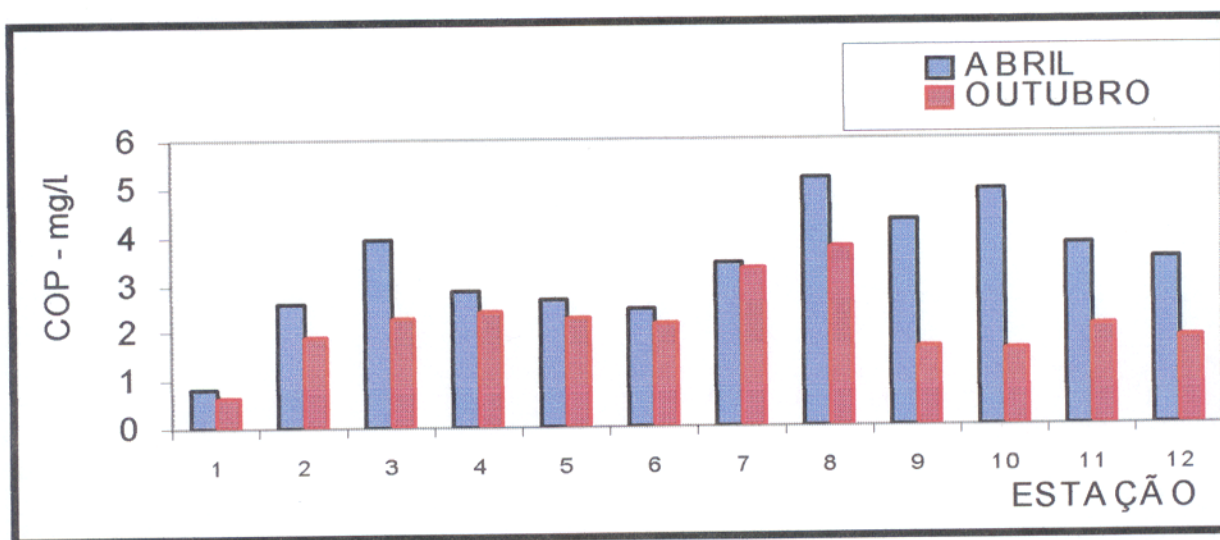
Na literatura mundial não existem, praticamente, dados sobre a demanda bioquímica em sistemas estuarinos, pois, segundo HEAD (1985), o estudo desse parâmetro, em sistemas estuarinos, é uma questão em aberto. Nos trabalhos estuarinos, esse parâmetro pode ser

substituído por uma avaliação do carbono orgânico e inorgânico dissolvidos e a utilização aparente do oxigênio (UAO) num perfil vertical da coluna d'água. A grande restrição a esse parâmetro é que a sua determinação, nas condições de laboratório, não se aproxima daquelas condições naturais. Portanto, o uso deste é mais difundido em águas continentais naturais, águas residuárias de origem urbana e industrial e em esgotos domésticos.

5.2 – SEDIMENTOS EM SUSPENSÃO

5.2.1 – Carbono orgânico particulado

O carbono orgânico particulado - COP foi determinado, também, somente nos meses de abril e outubro e sua distribuição espaço-temporal é mostrada na Figura 5.24, Anexo G. Os valores mais elevados (3,43 a 5,18 mg/L) foram obtidos nas estações 6 a 12 nos meses anteriormente referido, com os máximos nas estações 8, 9 e 10 (mês de abril), que estão sujeitas à influência dos esgotos domésticos. Os valores baixos foram registrados nas estações 1, 2, 4, 5, 6 e 7 (0,82 a 3,44mg/L) e os valores intermediários (2,16 a 2,82mg/L) nas estações 4, 5 e 6. As principais fontes de carbono orgânico particulado para o sistema estuarino são os esgotos domésticos e o manguezal adjacente. No período chuvoso, os valores são mais elevados do que no período seco, considerando o conjunto das estações amostradas. O COP é constituído de material inerte (restos de vegetais e animais) e vivo (organismos planctônicos, bactérias associada ao MPS e larvas da fauna aquática).



montante -----> jusante
Figura 5.24 – Distribuição espaço – temporal do carbono orgânico particulado (COP) no estuário do rio Bacanga (1997) ilha de São Luís – MA, 1997.

A riqueza em organismos planctônicos (fito- e zooplâncton) faz com que estes devem contribuir significativamente com o teor de carbono orgânico particulado, principalmente, nos meses onde a produção primária é mais elevada. Esse COP pode ser considerado como parte da produção de carbono “in situ”, ou seja o carbono de origem autóctone. Por outro lado, os valores

obtidos para esse parâmetro no período chuvoso, devem ser atribuídos à contribuição fluvial e do manguezal adjacente ou de origem alóctone. O COP, segundo (CHESTER, 1993) nos ambientes aquáticos em geral, o teor de COP pode representar acima de 80% do carbono total particulado, isto é, a fração de carbono inorgânico pode chegar ao máximo de 20% do COT.

Os valores de COP podem ser superiores a estes obtidos neste trabalho. Isto pode ser verdadeiro devido à produção primária elevada, e que esta é uma das fontes principais de COP; as outras duas, uma tem origem natural, que é o escoamento fluvial e o manguezal adjacente, e a outra os esgotos domésticos. Mas, os valores foram subestimados devido à porosidade do filtro de fibra de vidro utilizado (Whatman GF/C– 1,2 μ m). Esse filtro não retém grande parte do carbono orgânico coloidal que está compreendido na faixa de 0,1 a 1,2 μ m. Infelizmente, no Brasil, é difícil a aquisição de filtro ou membranas filtrantes com porosidade muito baixa em fibra de vidro. Na época da realização deste trabalho só foi possível adquirir filtros com a porosidade acima especificada, mesmo assim foi necessário importá-lo. O filtro de menor porosidade mais utilizado nesse caso seria o GF/F com porosidade de 0,7 μ m ou de 0,02 μ m, porém ambos são de custo mais elevado.

O COP é um importante parâmetro biogeoquímico, pois o carbono na forma inorgânica (CO₂) é incorporado ao fitoplâncton no processo fotossintético; após a morte do mesmo, é sedimentado, sofre a decomposição bacteriana produzindo novamente CO₂ e outros compostos orgânicos (proteínas, lipídios e carboidratos), que podem ser utilizados por diversos organismos heterotróficos. A Figura 5.25 mostra de forma simplificado o ciclo biogeoquímico do carbono num sistema estuarino. Pode-se observar os diversos compartimentos e modos de transferência entre os mesmos, de acordo com as seguintes etapas: 1a.) inicialmente, as trocas do gás carbônico entre atmosfera e a coluna d'água; 2a.) assimilação de CO₂ pelo fitoplâncton através do processo fotossintético; 3a.) trocas com o sedimento - sedimentação do COP, proveniente da morte e excreção de organismos; 4a.) decomposição do COP por bactérias (no reservatório sedimentar) produzindo CO₂ que, por difusão, volta à coluna d'água.

A Tabela 5.6 mostra a distribuição de COP em diferentes ambientes aquáticos (rios e estuários). Embora os valores obtidos neste trabalho sejam concordantes com a maioria dos autores, espera-se obter valores mais elevados para o COP num ambiente muito rico em matéria orgânica (contribuição do manguezal e esgotos domésticos). Mas, uma das razões está no tipo de filtro utilizado – como acima explicado e outra razão deve ser a intensa decomposição da matéria

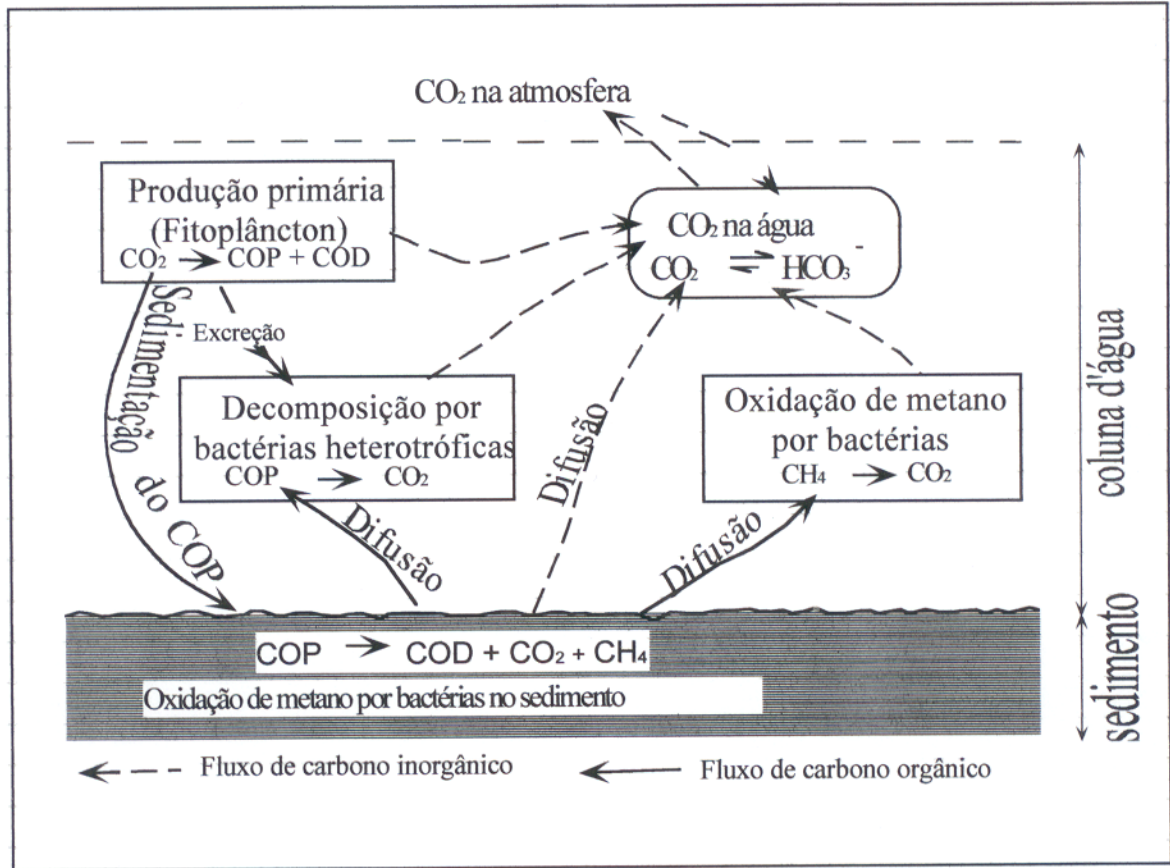


Figura 5.25 – Modelo simplificado do ciclo do carbono no estuário do rio Bacanga ilha de São Luís – MA, (adaptado de THURMAN ,1986).

orgânica a nível de coluna d'água (ambiente estuarino, que apresenta características de um lago).

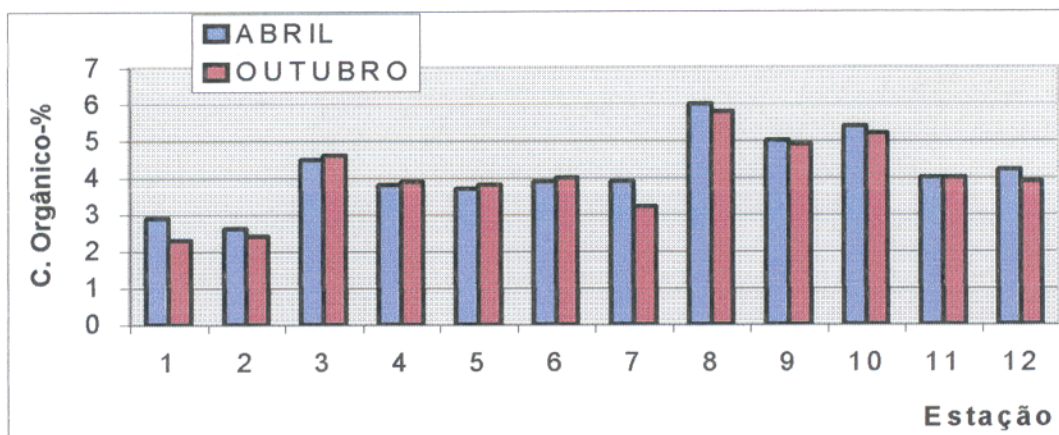
Tabela 5.6 – Valores de COP em diferentes sistemas estuarinos

Estuário	COP (mg/L)	Referência
Amazonas	5,0	DEGENS, 1982
Reno	3,0	“ “
Zaire	1,0	“ “
Loire	2,0	“ “
Mississipi	4,0	“ “
Missouri	20,0	“ “
Bacanga	0,65 a 5,18	Este trabalho

5.3– SEDIMENTO DE FUNDO

5.3.1 – Carbono orgânico

A distribuição longitudinal do carbono orgânico sedimentar é mostrada na Figura 5.26, anexo H. Mais uma vez têm-se os valores referentes ao meses de abril e outubro, correspondendo respectivamente, ao período chuvoso e seco. No período chuvoso, os valores (2,6 a 5,96%) foram, praticamente, iguais àqueles (2,3 a 5,72%) do período seco. Pode-se observar valores mais elevados nas estações 3, 8, 9, 10 e 11, acima de 4% e valores abaixo deste percentual, nas demais estações e no mês de outubro. O carbono orgânico no sedimento estuarino do Bacanga tem como fontes principais o escoamento fluvial, o manguezal adjacente, os organismos planctônicos e os esgotos domésticos. Como discutido sobre o COP, a produção primária contribui com relativa quantidade de carbono para o sedimento em suspensão e de fundo. Na estação 3 o carbono orgânico é originado, em grande parte, do manguezal adjacente devido a pequena contribuição da produção primária e dos esgotos domésticos. Nas estações 4, 5 e 6 existe uma maior contribuição da produção primária, manguezal e dos esgotos em menor proporção. Nas demais, principalmente nas estações 8, 9 e 10 a contribuição maior deve ser dos esgotos domésticos e, em menor proporção, da produção primária e do manguezal adjacente. Na parte superior do estuário (jusante) pode-se que os valores baixos podem ser atribuídos, basicamente, ao escoamento fluvial. A composição desse carbono orgânico segundo dados da literatura sobre sistemas estuarinos pode pertencer a diferentes classes de compostos orgânicos: compostos simples (carboidratos, lipídios, proteínas) e complexos (ácidos húmicos).



montante -----> jusante

Figura 5.26 – Distribuição espaço - temporal do carbono orgânico em sedimentos superficiais no estuário do rio Bacanga (1997) ilha de São Luís – MA

5.3.2 – Fósforo nas frações trocável, orgânica e residual no sedimento de fundo

O fósforo constitui um elemento indispensável à produção primária nos ecossistemas aquáticos em geral. Na coluna d'água, as espécies biodisponíveis são constituídas pelos íons ortofosfatos chamados de fósforo reativo solúvel. Mas grande parte do fósforo se encontra na forma particulada que, sob determinadas condições de pH e salinidade, pode depositar-se, aumentando o reservatório sedimentar desse elemento. No sedimento o fósforo pode estar, segundo a maioria dos autores, em diversas formas ou espécies (fósforo orgânico, inorgânico apatítico, não-apatítico, fósforo ligado ao ferro, etc.); alguns autores, em seus trabalhos sobre especiação do fósforo, chegam a identificar entre 5 e 6 frações desse elemento. Neste trabalho, optou-se em identificar-se as 3 frações mais importantes, embora seja difícil, do ponto de vista analítico, uma separação nítida e rigorosa entre as mesmas.

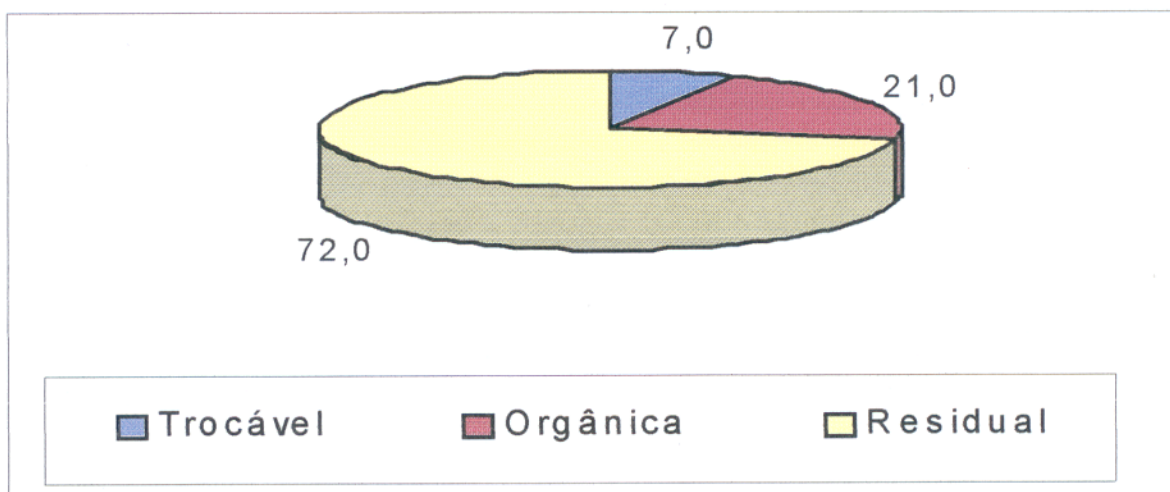


Figura 5.27– Distribuição espacial das espécies do fósforo (%) em sedimentos recentes superficiais no estuário do rio Bacanga ilha de São Luís - MA

A fração trocável é também chamada de biodisponível e é constituída de fósforo fracamente ligada às partículas do sedimento, na forma orgânica e inorgânica, a qual pode ser facilmente liberada por um abaixamento de pH (ataque com HCl 0,5 – 1M). Essa fração apresentou concentrações variando de 0,52 a 1,85 $\mu\text{mol/g}$ no perfil longitudinal no estuário do Bacanga. Os valores mais elevados foram registrados nas estações 8, 9 e 10 (1,85; 1,46 e 1,78 $\mu\text{mol/g}$; respectivamente), que ficam próximas aos pontos de lançamentos de esgotos domésticos. Os valores baixos foram obtidos nas demais estações (0,52 a 1,06 $\mu\text{mol/g}$), à montante e à jusante do sistema estuarino(Figura 5.27, I).

A fração orgânica do fósforo foi determinada pelo ataque do resíduo da fração trocável com ácido clorídrico 1M e água oxigenada concentrada (30%). Essa fração é constituída de ácidos nucleicos, fosfolípidios e fitina, sendo esta última a fração predominante (KAUL & FROELICH, 1984). A distribuição da fração orgânica do fósforo é mostrada na Figura 5.27. Os valores variaram de 1,94 a 5,85 $\mu\text{mol/g}$, com máximos nas estações 8, 9 e 10 (5,85; 4,08 e 4,81 $\mu\text{mol/g}$, respectivamente); os valores médios nas estações 2 e 3 (3,13 e 3,97 $\mu\text{mol/g}$) e mínimos nas estações 4, 5, 6, 7, 11 e 12, variando de 1,94 a 2,96 $\mu\text{mol/g}$. Observa-se que existe um acúmulo de fósforo orgânico nas estações 8, 9 e 10 por estarem próximas aos pontos de lançamento dos esgotos domésticos, e aqueles valores das estações 2 e 3 podem ser provenientes do manguezal adjacente ou das águas intersticiais do sedimento. Essa fração pode sofrer decomposição bacteriana, e originar fósforo inorgânico solúvel, portanto biodisponível para o fitoplâncton.

A fração residual do fósforo foi obtida por calcinação a 500°C do resíduo resultante da fração orgânica, em seguida solubilizada com ácido clorídrico a 6M. Essa fração é constituída de fósforo inorgânico (fósforo ligado ao ferro, cálcio, magnésio, etc) e muitos autores a dividem em fósforo inorgânico apatítico (PIA) e fósforo inorgânico não-apatítico (PINA). Os valores dessa fração foram mais elevados em relação aqueles duas frações anteriores e, variaram de 5,69 a 18,28 $\mu\text{mol/g}$. O comportamento foi semelhante àquele da fração orgânica, com valores mais elevados nas estações 8, 9 e 10 (15,22 a 18,28 $\mu\text{mol/g}$); intermediários nas estações 2, 3, 11 e 12 (8,84 a 11,26 $\mu\text{mol/g}$) e menores nas estações 4, 5, 6 e 7 (5,69 a 8,97 $\mu\text{mol/g}$). Essa fração é mais resistente à decomposição bacteriana e, portanto, mais difícil de tornar-se disponível para utilização pelo fitoplâncton e outras plantas aquáticas. A distribuição das frações do fósforo no sedimento foi obtida no período seco como mostra a Figura 5.28. Logicamente que essa distribuição pode ser diferente no período chuvoso, quando as condições de pH e oxigenação variarem.

5.4 – ESTRATIFICAÇÃO

Nos capítulos anteriores referiu-se à distribuição horizontal, a qual pode ser considerada, para os parâmetros estudados, como uma estratificação horizontal, uma vez que esta distribuição se acha compartimentada em função de diversos fatores ambientais, tais como, escoamento fluvial, manguezal adjacente, despejos de esgotos domésticos, morfologia estuarina, etc.

Objetivando observar a estratificação vertical, foi realizado medições a cada 40cm na coluna d'água nas estações 2, 8 e 11. Os parâmetros escolhidos foram a temperatura, salinidade, oxigênio dissolvido e gás sulfídrico.

A estação 2, tem uma profundidade é de 2m, largura de 10m e apresenta grande quantidade de matéria orgânica de origem do manguezal adjacente e do escoamento fluvial; praticamente não existe turbulência, correntes ou ondas de superfície. Nessa estação, foram observadas estratificações com relação à temperatura com inversão térmica (águas superficiais frias e de fundo quentes), à salinidade e aos gases dissolvidos (oxigênio e sulfídrico). Os resultados para estes parâmetros, no perfil vertical, são mostrados na Figura 5.28. A estratificação térmica pode ser atribuída à falta de circulação existente, à cobertura vegetal que impede, parcialmente, a passagem dos raios solares, às águas das nascentes mais frias e, ainda, à contribuição da estratificação salina.

A estratificação halina ocorre com valores de salinidade variando, na superfície, de 3 a 11‰ e de fundo variando de 12 a 22‰, essa estação fica a 8km, aproximadamente, da foz do estuário, portanto, sem justificativa aparente para valores elevados de salinidade a uma profundidade de apenas 2m. Uma das prováveis hipótese é subida, pelo fundo, de uma massa d'água mas salgada em direção a montante durante a abertura das comportas da barragem; outra, seria a contribuição das águas intersticiais do sedimento de fundo e das áreas laterais nessa parte do estuário. Nas áreas laterais dessa estação existem pântanos salinos e apicuns que durante o período chuvoso, e com abertura das comportas(aumenta o fluxo de montante) podem acumular água salobra; a seguir, no período seco, ocorre uma salinização e migração, pelo subsolo marginal, de águas mais salinas para a calha estuarina. Essa última deve ser a hipótese mais verdadeira para explicar a estratificação halina nesse ponto do estuário.

O oxigênio dissolvido variou na estação 2, na superfície e durante as campanhas realizadas de 1,82 a 3,67ml/L e no fundo ficou em 0,0ml/L em ambas as campanhas.

O gás sulfídrico variou de maneira inversa ao oxigênio, valores mais elevados no fundo de 2,5 a 4,8mg/L e na superfície de 1 a 2,4mg/L. Os valores de oxigênio foram zero nos meses de outubro e dezembro no fundo (2m de profundidade) nessa estação quando os valores de salinidade e temperatura foram máximos. Sabe-se que a solubilidade de um gás, em águas marinha e estuarina, é inversamente proporcional à temperatura e à salinidade, mas devido, também, existir grande quantidade de matéria orgânica advinda do manguezal adjacente e do

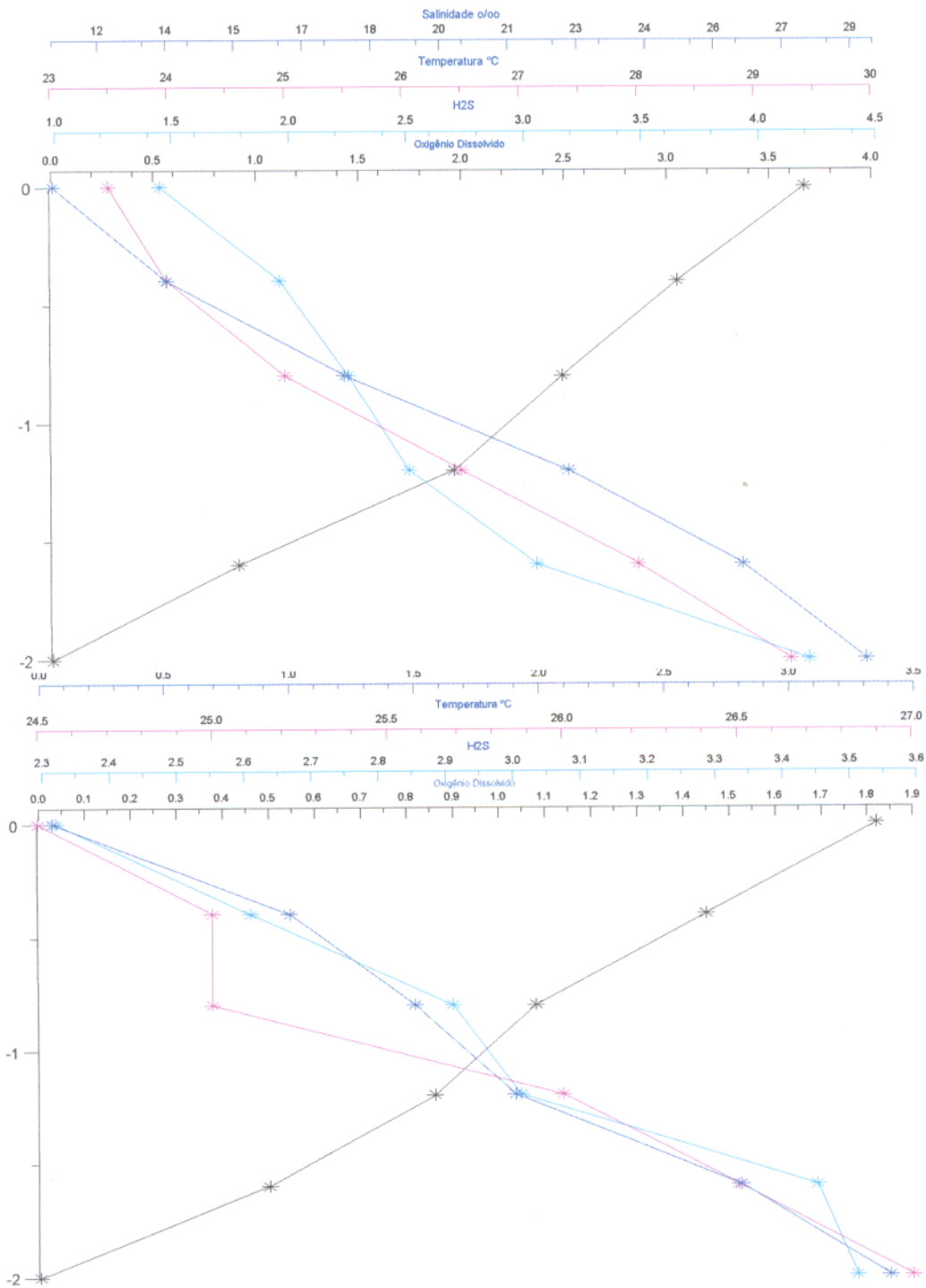


Figura 5.28- Distribuição vertical da salinidade, temperatura, oxigênio e gás sulfídrico dissolvidos na estação 2, no estuário do rio Bacanga ilha de São Luís - MA

escoamento fluvial essa anoxia acima citada, pode perfeitamente estar associada aos dois fatores citados e ao consumo bacteriano no processo de decomposição dessa matéria orgânica. O gás sulfídrico, por sua vez, é uma consequência da pobreza ou ausência de oxigênio, o que conduz as bactérias utilizar o sulfato como fonte alternativa desse gás.

A estação 8 fica localizada no afluente principal do rio Bacanga (o rio das Bicas), que recebe diretamente grande quantidade de esgotos domésticos; têm-se praticamente a mesma profundidade da estação 2 (1,94m), proximidade de um ponto de lançamento de esgotos domésticos, manguezal adjacente, escoamento fluvial de $0,1\text{m}^3/\text{s}$, deposição de lixo de invasões próximas e grande quantidade de material particulado em suspensão (MPS). O comportamento com relação à estratificação vertical é semelhante àquela da estação 2 para os gases dissolvidos, diferindo na estratificação termo-halina, que é menos acentuada (Figura 5.29). Também, na estação 8 a principal fonte de matéria orgânica são os esgotos domésticos. Houve um ligeiro aumento nos valores de gás sulfídrico (na superfície) nessa estação, o que pode ser explicado pela produção deste nas áreas a montante desse afluente e à contribuição dos esgotos domésticos.

A estação 11 fica localizada próxima à barragem do Bacanga, e tem uma profundidade de 6 metros no canal principal. Os processos de mistura e circulação são mais intensos do que em qualquer outra parte do estuário. Também, os processos de estratificação ocorrem com menor intensidade do que das duas outras estações acima referidas. As variações para os meses de abril e outubro entre a superfície e o fundo nessa estação, respectivamente, foram: a) salinidade de 7 a $11^\circ/\infty$ e 27 a $29^\circ/\infty$; b) oxigênio dissolvido de 3,05 a 2,68ml/L e 5,05 a 4,16ml/L; c) temperatura de 29,5 a 27,5°C e 30 a 28,5°C; d) gás sulfídrico de 2,85 a 3,24mg/L e 1,02 a 2,05mg/L. Essa estação, portanto, apresenta uma estratificação menos acentuada comparando-a com a estação 2 e 8.

5.5 – CORRELAÇÃO ENTRE PARÂMETROS

A matriz de correlação foi dividida em duas tabelas para os diversos parâmetros estudados. A primeira (Tabela 5.7) para os elementos maiores (sódio, potássio, cálcio, magnésio e sulfato), salinidade, temperatura, pH e condutividade; os quais se correlacionam positivamente e apresentam um comportamento conservativo (Figura 5.31 e 5.32). A segunda (Tabela 5.8) para os nutrientes (uréia, amônio, nitrito, nitrato, nitrogênio total, fosfato, fósforo total e silicato) e a

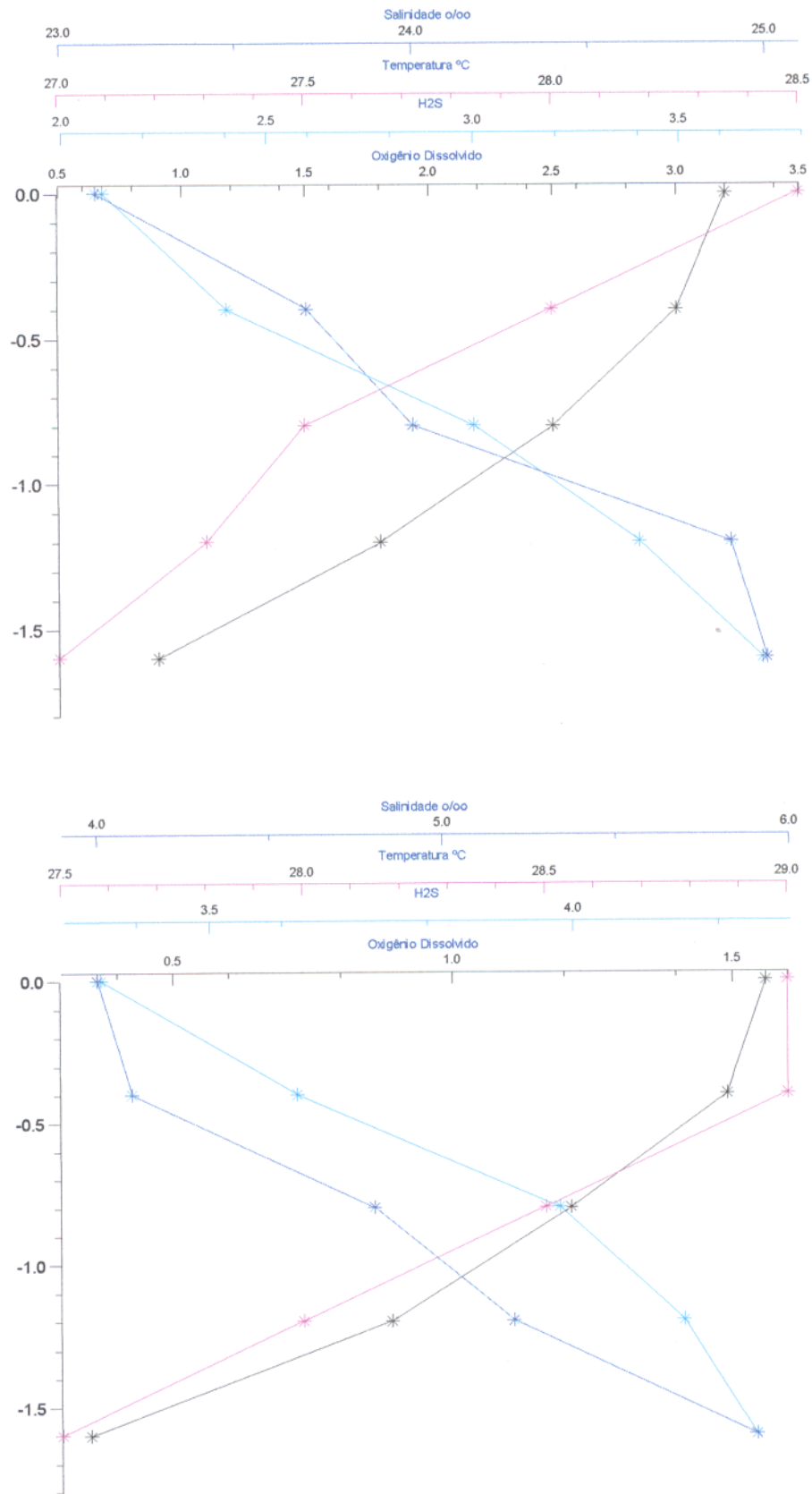


Figura 5.29- Distribuição vertical da salinidade, temperatura, oxigênio e gás sulfídrico dissolvidos na estação 8, no estuário do rio estuário do rio Bacanga ilha de São Luís – MA.

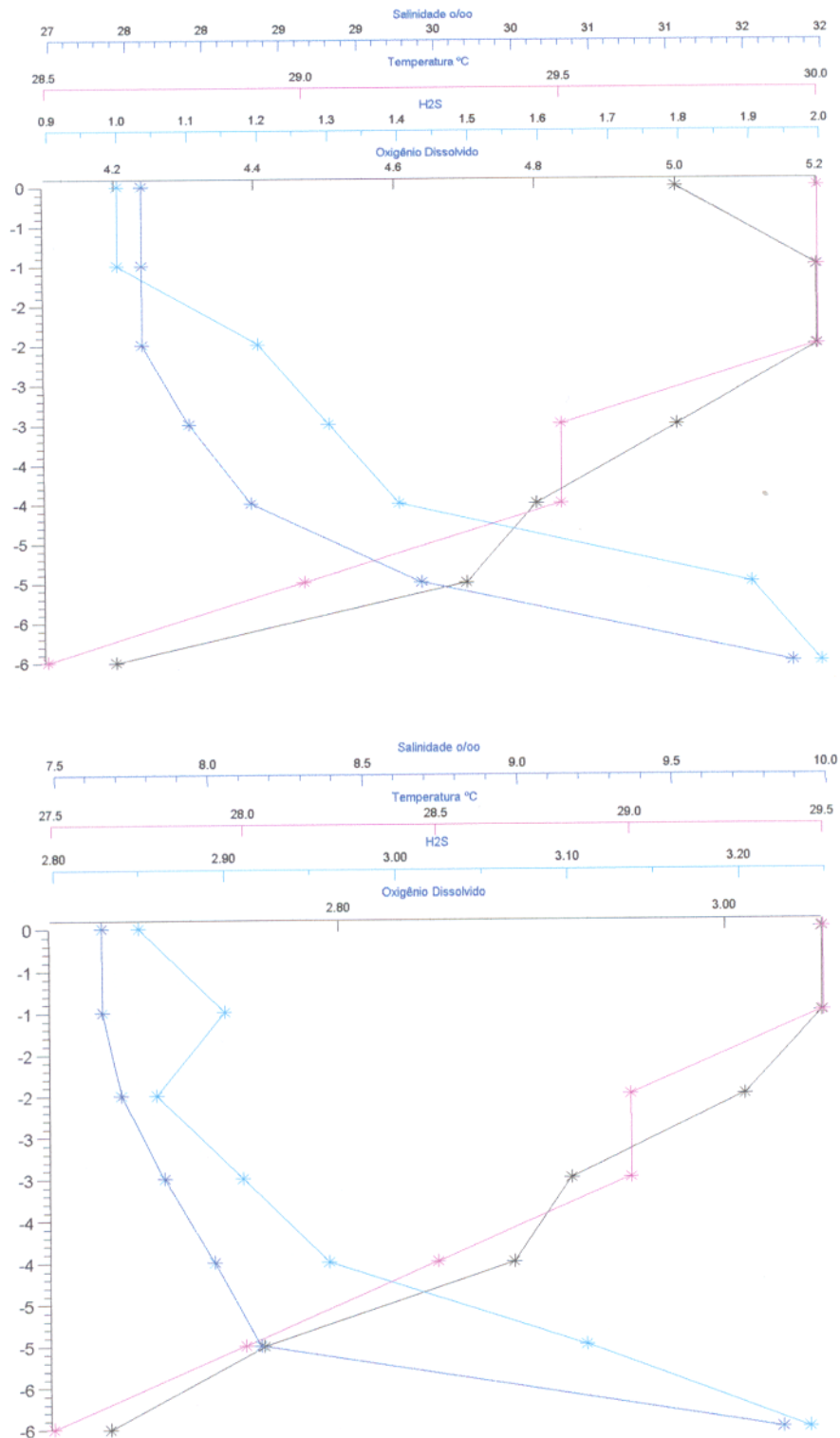


Figura 5.30- Distribuição vertical da salinidade, temperatura, oxigênio e gás sulfídrico dissolvidos na estação 11, no estuário do rio Bacanga ilha de São Luís - MA

salinidade (Figura 5.33 e 5.34). Esses nutrientes comportam-se de maneira não - conservativa, e estão distribuídos, indiretamente, em função da salinidade.

Foram construídos alguns gráficos de dispersão, principalmente, entre aqueles parâmetros que melhor se correlacionam, e os principais são: a) uréia - amônio, b) fosfato - nitrato; c) fósforo total - nitrogênio total, d) condutividade - salinidade, e) oxigênio - temperatura, f) silicato - salinidade, e g) salinidade - temperatura.

Pode-se observar as correlações entre a salinidade e os íons maiores (sódio, cálcio, potássio e sulfato) nos meses de abril e outubro, meses em que ocorrem as maiores variações sazonais. Como referido anteriormente esses íons comportam-se de maneira conservativa, isto é, estão sujeitos apenas aos processos de diluição e mistura da água salgada com água doce. Os nutrientes essenciais (N, P, Si) comportam-se de maneira não - conservativa, isto é, estão sujeitos ao consumo biológico pelo fitoplâncton e bactérias. As principais correlações foram para, amônio-uréia, nitrato-nitrogênio total, fosfato-fósforo total, nitrato-fosfato, nitrogênio total-fósforo total. O silicato apresentou correlação negativa com os demais nutrientes e com a salinidade e, os íons maiores entre si, mostraram a melhor correlação de todos os parâmetros estudados comprovando o que foi dito acima sobre o comportamento dos mesmos.

Tabela 5.7 – Matriz de correlação entre os principais parâmetros estudados no mês de Abril

	SAL.	COND.	T. ° C	pH	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	SO ₄ ²⁻
SAL	1,000								
COND	0,954	1,000							
T. ° C	0,901	0,884	1,000						
PH	0,941	0,931	0,976	1,000					
Na ⁺	0,999	0,961	0,900	0,941	1,000				
K ⁺	0,999	0,959	0,902	0,943	1,000	1,000			
Ca ²⁺	0,999	0,944	0,897	0,938	0,997	0,997	1,000		
Mg ²⁺	0,998	0,952	0,897	0,941	0,997	0,997	0,996	1,000	
SO ₄ ²⁻	0,999	0,960	0,901	0,942	1,000	1,000	0,997	0,997	1,000

	SAL.	COND.	UREIA	NH ₄ ⁺	NO ₃ ⁻	HPO ₄ ²⁻	N.TOTAL	P.TOTAL	H ₄ SiO ₄
SALIN	1,000								
COND	0,954	1,000							
UREIA	0,304	0,332	1,000						
NH ₄ ⁺	0,184	0,245	0,927	1,000					
NO ₃ ⁻	0,577	0,624	0,906	0,844	1,000				
HPO ₄ ²⁻	0,339	0,378	0,981	0,901	0,933	1,000			
N.TOTAL	0,020	0,182	0,811	0,803	0,680	0,793	1,000		
P.TOTAL	0,451	0,502	0,940	0,852	0,957	0,977	0,777	1,000	
H ₄ SiO ₄	(0,847)	(0,862)	(0,576)	(0,528)	(0,811)	(0,646)	(0,297)	(0,727)	1,000

Tabela 5.8 – Matriz de correlação entre os principais parâmetros estudados no mês de outubro

	SAL.	COND.	T.° C	pH	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	SO ₄ ²⁻
SAL	1,000								
COND	0,911	1,000							
T.° C	0,784	0,689	1,000						
PH	0,941	0,832	0,825	1,000					
Na ⁺	1,000	0,909	0,786	0,942	1,000				
K ⁺	1,000	0,909	0,788	0,941	1,000	1,000			
Ca ²⁺	0,999	0,911	0,795	0,940	1,000	1,000	1,000		
Mg ²⁺	0,999	0,913	0,774	0,931	0,999	0,999	0,998	1,000	
SO ₄ ²⁻	0,999	0,913	0,782	0,942	0,999	0,999	0,999	0,998	1,000

	SAL.	COND.	UREIA	NH ₄ ⁺	NO ₃ ⁻	HPO ₄ ²⁻	N.TOTAL	P.TOTAL	H ₄ SiO ₄
SAL.	1,000								
COND	0,911	1,000							
UREIA	0,532	0,510	1,000						
NH ₄ ⁺	0,578	0,522	0,952	1,000					
NO ₃ ⁻	0,540	0,492	0,894	0,943	1,000				
HPO ₄ ²⁻	0,496	0,441	0,967	0,974	0,905	1,000			
N.TOTAL	0,364	0,419	0,932	0,884	0,776	0,928	1,000		
P.TOTAL	0,351	0,412	0,921	0,870	0,756	0,918	0,999	1,000	
H ₄ SiO ₄	(0,874)	(0,962)	(0,338)	(0,354)	(0,331)	(0,272)	(0,234)	(0,228)	1,000

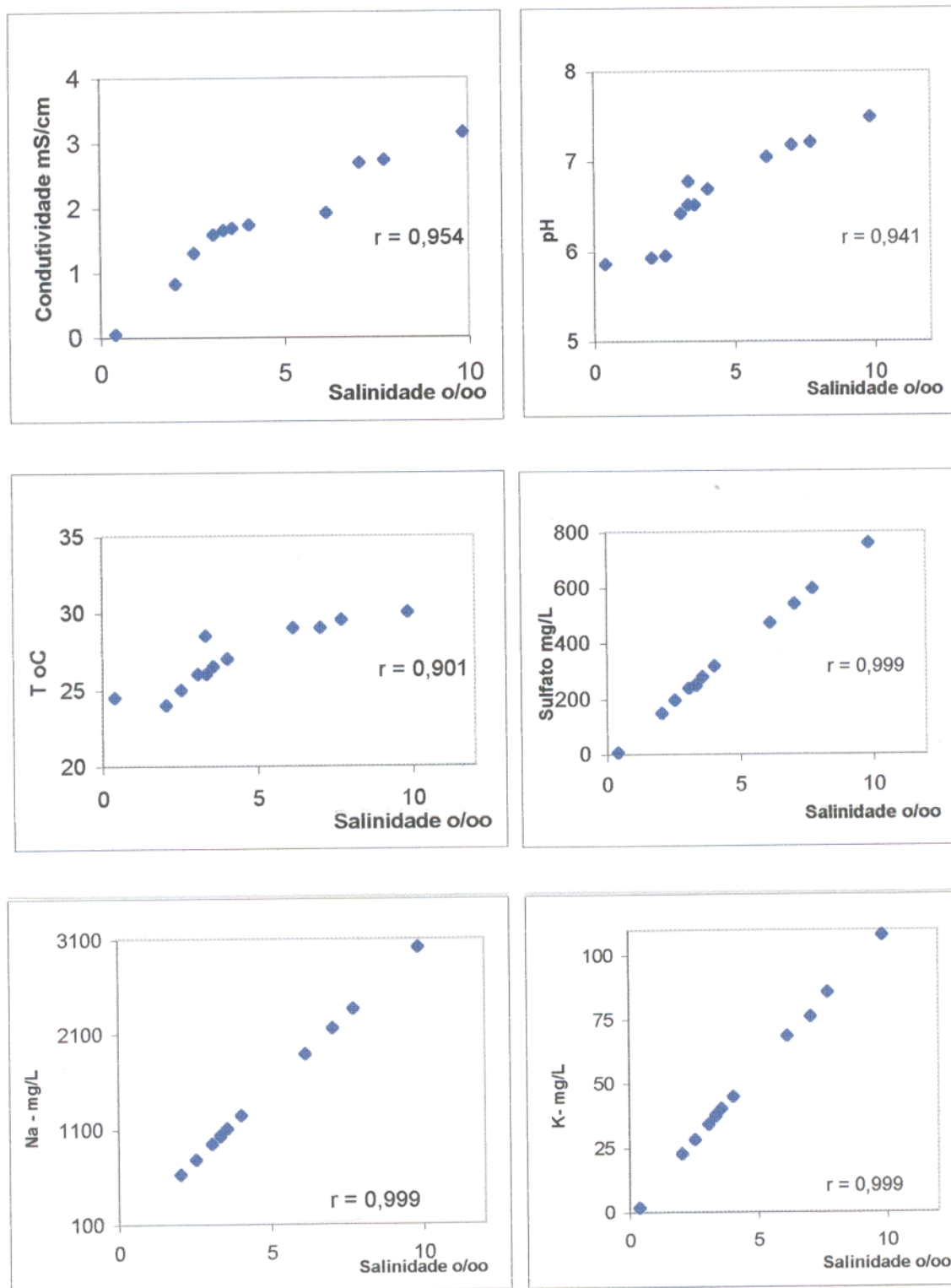


Figura 5.31 – Diagramas de correlação de algumas variáveis estudadas, correspondentes ao mês de abril / 1997, no estuário de rio Bacanga, ilha de São Luís - MA

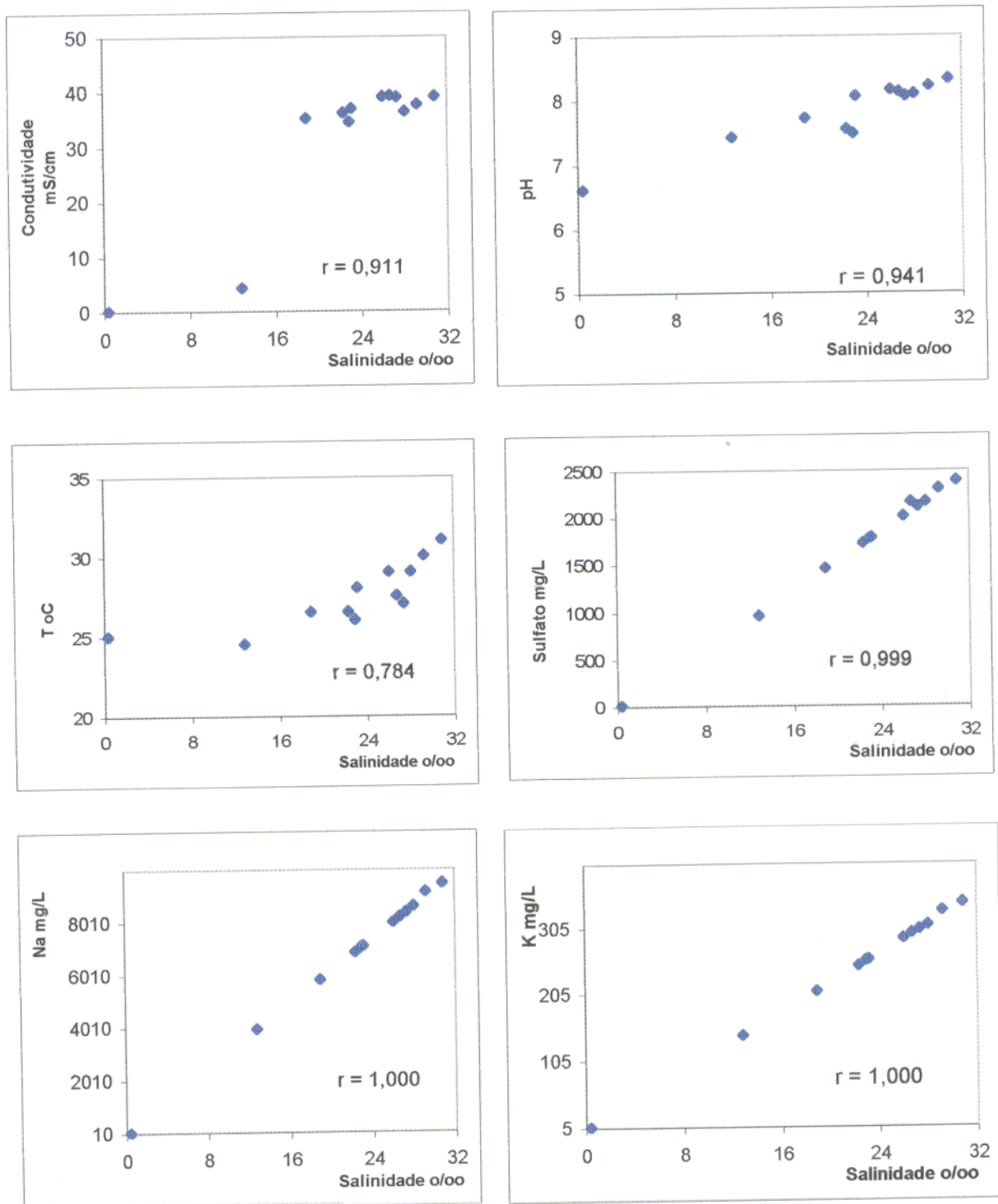


Figura 5.32 – Diagramas de correlação de algumas variáveis estudadas, correspondentes ao mês de outubro / 1997, no estuário de rio Bacanga, ilha de São Luís - MA

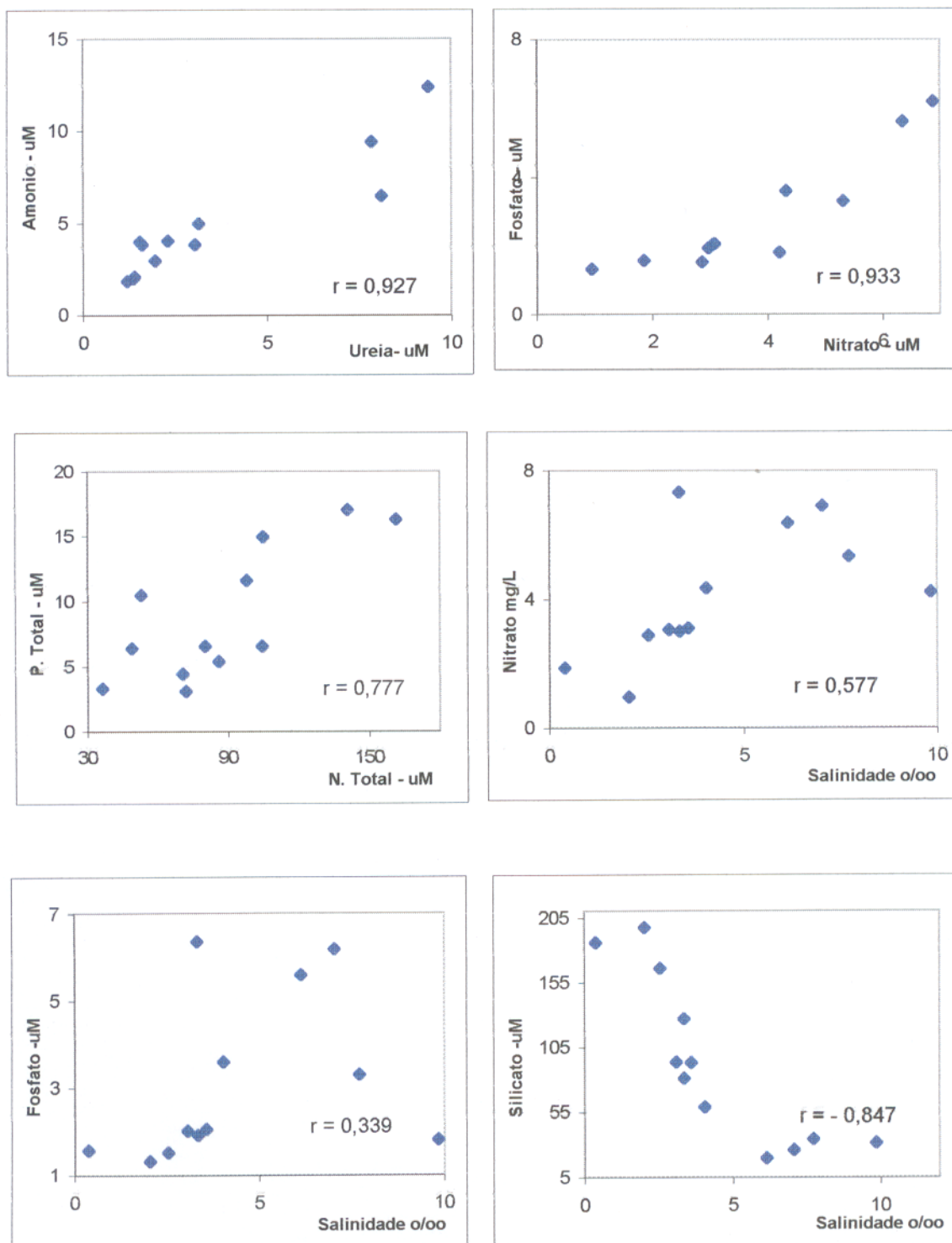


Figura 5.33 – Diagramas de correlação de algumas variáveis estudadas correspondentes ao mês de abril / 1997, no estuário de rio Bacanga, ilha de São Luís - MA

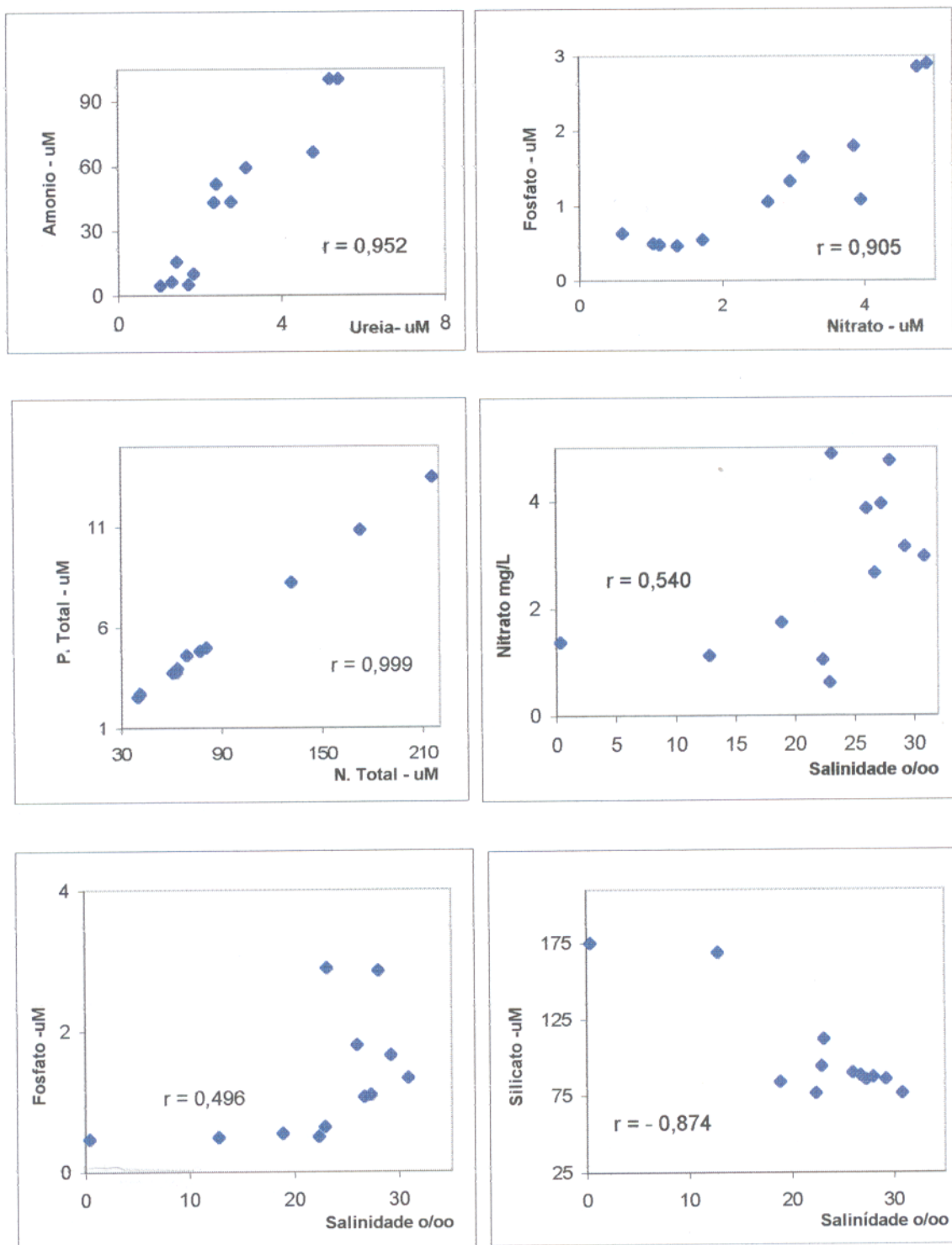


Figura 5.34 – Diagramas de correlação de algumas variáveis estudadas, correspondentes ao mês de outubro / 1997, no estuário de rio Bacanga, ilha de São Luís - MA

5.6 - CONSIDERAÇÕES FINAIS

O estudo do comportamento biogeoquímico dos nutrientes essenciais, realizado neste trabalho, foi baseado nos chamados “Diagramas de Mistura” (BOYLE et al. 1974; LISS, 1976; KAUL & FROELICH, 1984). Esse modelo, embora seja alvo de críticas, é muito utilizado nos estudos estuarinos numa primeira avaliação sobre o comportamento de diversas espécies químicas na zona de mistura (água salgada – água doce). Pode-se observar que os resultados apresentados e anteriormente discutidos, utilizando esse modelo, mostram a distribuição espaço-temporal dos diversos parâmetros estudados em perfis longitudinais e verticais. Os perfis longitudinais, diferentemente do modelo, estão indiretamente relacionados com a distribuição da salinidade, isto é, a distribuição horizontal no sentido da montante → jusante dos diversos parâmetros foi feita em função dos pontos de coleta neste sentido.

Nos estudos estuarinos, é importante a identificação e quantificação das fontes de entradas e saídas de materiais ou de espécies químicas na zona de mistura. No caso do Bacanga, identificou-se como fontes de entradas o rio (escoamento fluvial), o manguezal, os esgotos domésticos, águas costeiras da baía de São Marcos. Podem ainda, ser consideradas, no caso dos nutrientes essenciais, as entradas pela atmosfera (período chuvoso) e as águas subterrâneas, embora estas últimas sejam de menor importância. A quantificação ou a contribuição de cada uma dessas fontes não foi possível em virtude das limitações nos trabalhos de campo, mas é possível, com os dados obtidos, indicar que as maiores fontes de **nitrogênio** e **fósforo** para o Bacanga são os esgotos domésticos; para o **silício**, as águas fluviais e para o **carbono** a produção primária, o manguezal e os esgotos domésticos. Para os íons maiores **sódio**, **potássio**, **cálcio**, **magnésio** e **sulfato**, a principal fonte destes, é a água costeira marinha da baía de São Marcos; o **oxigênio dissolvido** é originado pelas trocas com atmosfera e pela produção primária.

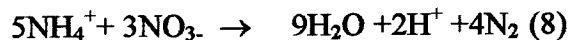
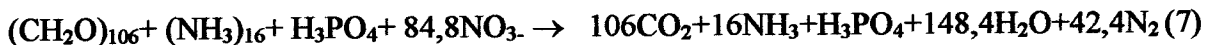
O sistema estuarino acha-se *segmentado* (estratificado horizontalmente) com relação aos principais parâmetros estudados: **à montante**, têm-se valores baixos de nutrientes, oxigênio dissolvido, salinidade, elementos maiores e valores elevados de carbono orgânico e MPS; **na parte intermediária**, a produção primária é mais elevada, valores médios de nutrientes e de transparência e MPS; **na parte inferior**, os valores são altos para os nutrientes, salinidade, carbono e fósforo orgânicos e transparência. Também, existe a *estratificação vertical* que foi

mostrada para a temperatura, salinidade, oxigênio dissolvido e gás sulfídrico nas estações 2 e 8 com maior intensidade e menos acentuada na estação 11.

A produção primária do fitoplâncton apresentou - se com maior intensidade nas estações 4, 5 e 6 onde a turbulência é menor, e existe disponibilidade de nutrientes para suportar altas taxas de produção. A luz solar deve ser o fator limitante dessa produção no período chuvoso, devido a menor intensidade de insolação e à grande quantidade de material particulado em suspensão neste mesmo período. Essa produção apresenta uma variação sazonal com um máximo em agosto e um mínimo em abril, e tem uma função importante na transferência de íons dissolvidos para o particulado. As espécies predominantes de fitoplâncton, segundo Fernandes (1993) são as diatomáceas e os dinoflagelados. Essas últimas são consideradas algas tóxicas e oportunistas para o ambiente em questão, mas constituem o primeiro nível trófico, que é a base da cadeia alimentar do ecossistema estuarino. O processo fotossintético realizado por esses organismos autotróficos, na síntese da matéria orgânica, pode ser representado de maneira simplificada pela a equação química (CHESTER, 1993).



A equação acima mostra os dois elementos, N e P, que são essenciais ao fitoplâncton no processo fotossintético. Mas, o nitrogênio além deste consumo, pode ser utilizado como nitrato na chamada *zona de redução do nitrato*, quando a concentração de oxigênio é muito baixa ou zero conforme a equações abaixo (CHESTER, 1993).



Essas equações mostram de maneira simplificada o processo de consumo de nitrato por bactérias que precisam de oxigênio para decomposição da matéria orgânica. No estuário do Bacanga, esse consumo ocorre a nível da superfície dos sedimentos, principalmente, nas estações (2 e 8), enquanto que o consumo de nitrato acontece na zona eufótica, como anteriormente discutido.

As concentrações carbono orgânico no sedimento superficial mostra que existe uma acumulação em determinadas estações, e a origem desta é a contribuição do manguezal, produção primária (assimilação de CO_2) e os esgotos domésticos. Portanto, o sistema estuarino do Bacanga pode atuar como uma bacia de concentração para o carbono fixado pelo fitoplâncton.

O oxigênio dissolvido, nesse ambiente, é um bom indicador da qualidade ambiental do mesmo e, um balanço desse gás será útil para mostrar que o lago do Bacanga está no limite de sua capacidade para receber esgotos domésticos.

O padrão ambiental apresentado pelo rio Bacanga, com relação a qualidade de suas águas indica que: a – o rio pode ser dividido em três segmentos principais, como anteriormente discutido em relação aos diversos parâmetros estudados; b – o ambiente não deve receber mais esgotos domésticos (enriquecimento excessivo de nutrientes); c – as defesas naturais constituídas pela vegetação de manguezal, macrófitas e o fitoplâncton e outras espécies aquáticas devem ser preservados; d – a pesca é desordenada e sem controle; e – existe um sítio histórico e grande potencial de recursos renováveis.

Espera-se que este trabalho possa contribuir para se avaliar a qualidade das águas estuarinas desse rio, fornecer subsídios para trabalhos futuros sobre a geoquímica ambiental e de ecologia em geral. Também foi possível, com este trabalho, fazer uma classificação das águas do Bacanga de acordo com a resolução do CONAMA de número 20 de 18.06.86 em água doce para consumo humano (Classe 2) e água salobra, para manutenção de características paisagísticas, da flora e fauna, recreação e lazer (Classe 7).

Finalmente, apresenta-se as seguintes sugestões: a – monitoramento das águas com relação aos teores de amônio, fosfato, nitrato, oxigênio dissolvido e salinidade por um período contínuo de cinco anos (com amostragens a cada dois meses); b – inventário quali-quantitativo das espécies de peixes e de outros “frutos do mar” que são produzidas no ambiente bem como um controle e gestão sobre a pesca; c – manejo mais adequado na abertura das comportas da barragem do Bacanga para que haja renovação e oxigenação das águas interiores; d – proibição da retirada de material de construção das áreas marginais, bem como do uso de práticas agrícolas nas mesmas.

6- CONCLUSÕES

Os parâmetros físicos (temperatura, condutividade e transparência) estudados apresentaram uma variação espaço-temporal dependentes apenas dos fatores ambientais com exceção da transparência que pode ser, também, influenciado pelo material particulado em suspensão e a composição do fitoplâncton presente. A salinidade, neste caso, pode ser considerada como um parâmetro conservativo e apresentar a mesma dependência.

Os gases dissolvidos oxigênio e gás sulfídrico são produzidos por processos antagônicos, e apresentaram uma relação inversa. O primeiro, tem como fontes a atmosfera e o processo de produção primária realizado na zona eufótica e, o segundo é fornecido junto com os esgotos domésticos, e produzido no sedimento e nas áreas estagnadas do manguezal.

Os elementos maiores apresentaram um comportamento conservativo e crescente no perfil longitudinal da montante para jusante. Não foi possível efetuar as medidas de sulfato no perfil vertical mas, certamente, sua concentração deve diminuir, principalmente, nas estações 2 e 8 onde é ser utilizado como uma terceira fonte de oxigênio.

Os nutrientes inorgânicos representados pelas espécies do nitrogênio (amônio, nitrito e nitrato) e do fósforo (ortofosfatos), têm sua distribuição, ao contrário da maioria dos sistemas estuarinos mais típicos, com valores menores à montante e maiores a jusante. Mas, em comum com a maioria destes sistemas, apresentaram um comportamento conservativo, isto é, suas distribuições são afetadas por diversos processos geoquímicos e biológicos. O nitrato, além de ser um nutriente essencial ao fitoplâncton é utilizado, também, como uma fonte alternativa de oxigênio por bactérias no processo de degradação da matéria orgânica. O nitrogênio, no sistema estuarino, apresenta um ciclo com algumas espécies gasosas de difícil medição, inviabilizando desta maneira uma balanço de massa. A uréia e amônio podem ser utilizado nesse sistema estuarino como um traçador da poluição urbana da cidade de São Luís. Os íons ortofosfatos apresentaram concentrações elevadas na parte jusante e em quantidades suficientes para suportar altas taxas de consumo no processo de produção primária, portanto, não se constitui de um fator limitante.

De acordo com os dados obtidos, a clorofila "a" e a produção primária apresentaram valores elevados para o ecossistema, caracterizando-o como um ambiente estuarino eutrofizado. Os experimentos, inicialmente, realizados em campo comprovaram a hipótese de que a região

estuarina de maior produção primária é aquela situada na parte intermediária, ou seja nas estações 5 e 6. Portanto, os valores da produção para as demais estações, são menores daqueles aqui apresentados. Como anteriormente discutido os principais fatores limitantes para a produção primária no sistema estuarino do Bacanga é a luz solar e o material particulado em suspensão (MPS) que atuam conjuntamente, com maior intensidade, principalmente, no período chuvoso.

A fertilização por nutrientes inorgânicos e compostos orgânicos de origem natural e antropogênica (esgotos domésticos) pode ser útil ao desenvolvimento dos macrófitas (principalmente das espécies de manguezais do Bacanga) e do fitoplâncton aquáticos. Mas, por outro lado, pode acarretar uma eutrofização excessiva com conseqüências danosas para o ambiente levando-o à anoxia; ou seja, para a decomposição da matéria orgânica alóctone e autóctone todo o oxigênio existente pode ser consumido e, em seguida, ocorre a produção de gases tóxicos (sulfídrico e metano).

O ambiente estuarino do rio Bacanga, tem demonstrado uma capacidade enorme de regeneração (recuperação) face à poluição orgânica, o que é comprovado pela quantidade de pescado e de outros frutos do mar que, diariamente, são dali são retirados e a exuberante quantidade de organismos planctônicos existentes. Mas, o aumento da vazão dos esgotos domésticos pode contribuir para que o balanço de oxigênio dissolvido seja negativo e acarretar o fenômeno acima citado. Portanto, é necessário o controle de novos lançamentos de esgotos domésticos e que os mesmos sejam, pelo menos, submetidos a um tratamento preliminar. Também, é necessário que haja um manejo mais adequado na abertura das comportas da barragem do Bacanga de modo a facilitar (o fluxo e refluxo da maré) os processos de oxigenação na zona estuarina de mistura.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AIDAR-ARAGÃO E. & TEIXEIRA, C. 1980. Produção Primária e Concentração de Clorofila-A na Costa Brasileira (Lat. 22°31'S – Long. 41°52'W a Lat. 28°43'S – Long. 47°57'W). *Bolm. Inst. Oceanogr.* **29**: 9 – 14.
- AMINOT, A. & CHAUSSEPIED, M. 1983. *Manuel des Analyses Chimiques en Milieu Marin*. CNEXO. BREST-FRANCE, 395p.
- ASTON, S.R. 1978. Estuarine Chemistry. In: RILEY, J.P. & CHESTER, R. (eds) *Chemical Oceanography*, London, Academic Press. v.7, p. 361 – 440.
- BEWERS, J.M. & YEATS, P. A. 1980. Behaviour of trace metals during estuarine mixing. In: BURTON, J.D. & EISMA, D. (eds) *River inputs to ocean system*. Paris, UNEP/UNESCO, p.103 – 115.
- BOPYLE, E. A. et al. 1974. On the Chemical mass-balance in estuaries. *Geochim. Cosmochim. Acta.* **38** 1719 – 1728.
- BRSIL. Departamento Nacional da Produção Mineral. Projeto RADAM. 1973. *Folha SA.23 São Luís e parte da folha SB. 24 Fortaleza*: Geologia, Geomorfologia, Solos, Vegetação, Uso potencial da terra. Rio de Janeiro. v. 3. (Levantamento de Recursos Naturais, 3).
- CADEE, G.C. 1978. Primary production and chlorophyll in the Zaire river, estuary and plume. *Neth. J. Sea Res.* **12**: 368-381.
- CAMERON, W.M. & PRITCHARD, D.W. 1963. Estuaries. In: HILL, M.N. (ed) *The Sea Ideas and observations on progress in the Study of the Seas*. N. York, Wiley. V.2, p. 306 –324.
- CHESTER, R. 1993. *Marine Geochemistry*. London, Unwin Hyman, 698p.
- CRAWFORD, R.M. et al. 1979. Ecology of Swanpool, Falmouth V. Phytoplankton and Nutrients. *Est. Coast. Mar. Sci.* **9**: 135 – 160.
- CVRD. 1997. *Mapa de dados climatológicos da área do Porto de Ponta da Madeira e adjacências, Ilha de São Luís-MA*.
- DAMÁZIO, E. 1979/80. Contribuição ao conhecimento da vegetação dos manguezais da ilha de São Luís-MA. Parte I. *Bol. Lab. Hidrob.* **3**: 57-76.
- DEGENS, E.T. 1982. *Transport of carbon and minerals in major world rivers: Part 1*, Proceedings of a Workshop arranged by Scientific Committee on Problems of the Environment (SCOPE) and the United Nations Environment Programme (UNEP) at Hamburg University, March 8 –12, 1982.
- DEGENS, E.T.; KEMPE, S.; RICKEY, J.E. 1988. *Biogeochemistry of Major World Rivers*. Wiley & Sons. Canada, Wiley & Sons, 356p (SCOPE, 42).

- DREVER, J.L. 1982. *The Geochemistry of Natural Waters*. Prentice Hall, 435p
- DYER, K.R. 1973. *Estuaries: A Physical Introduction*. N. York, Wiley-Interscience, 140p.
- DYRSSEN, D. & WEDBORG, M. 1980. Major and minor elements, chemical speciation in estuarine waters. In: OLAUSSON, E. & CATO, I (eds) *Chemistry and biochemistry of estuaries*. N.York. Wiley. p. 37 – 52.
- EDMOND, J.M. et al. 1981. Chemical mass balance in the Amazon plume I: the nutrients. *Deep-sea Res.* **28**: 1339 – 1374.
- EDMOND, J.M. et al. 1983. Biological uptake and accumulation of silica on the Amazon continental shelf. *Geochim. Cosmochim. Acta* **47**: 1713 - 1723.
- EDMOND, J.M. et al. 1985. Chemical dynamics of the Changyang estuary. *Cont. Shelf. Res.* **4**: 17 – 36.
- FAIRBRIDGE, R.W. 1980. The estuary: its identification and geodynamic cycle. In: OLAUSSON, E. & CATO, I (eds) *Chemistry and biochemistry of estuaries*. N. York. Wiley. p. 1 –36.
- FANING, K.A. & MAYNARD, V.I. 1978 – Dissolved boron and nutrients in the mixing plumes of major tropical rivers. *Neth. J. Sea. Res.* **12**: 345 – 354.
- FERNANDES, G. L. 1994. Sub-projeto fitoplâncton. In: LOPES, Maria José Saraiva; FERNANDES, Guacyra de Lavôr; MELO, Odilon Teixeira de. *Estudo do plâncton (fito e zooplâncton) e de Fatores Físicos e Químicos na região estuarina dos rios Anil e Bacanga, São Luís-MA*. São Luís: UFMA. FAPEMA 1994, p.37-56.
- FISHER, T. R. et al. 1988. Phytoplankton, Nutrients, and Turbidity in the Chesapeake, Delaware, and Hudson Estuaries. *Estuar. Coast. Shelf Sci.* **27**: 61-93.
- GAUDETTE, H.E. et al. 1974. An Inexpensive titration method for the determination of organic carbon in recent sediments. *J. Sed. Petrol.* **44**: 249-253.
- GESAMP. 1987. *Land – Sea boundary flux of contaminants from rivers*. Paris, UNESCO.
- GIBBS, R. J. 1972. Water Chemistry of the Amazon river. *Geochim. Cosmochim. Acta.* **36**: 1061-1066.
- GOLTERMAN, A. L. et al. 1878. *Methods for Physical and Chemical Analysis of Fresh Waters*. 2. ed. Great Britain, Billing & Sons Ltd, (IBP Handbook, 8).
- GRASSHOFF, K.; EHRHARDT, M.; KREMMLING, K. 1983. *Methods of Seawater Analysis*. 2. Ed. FRG, Verlag-Chimie, 419p.

- HEAD, P.C. 1985. *Practical Estuarine Chemistry; A Handbook*. London, University Press, 337p.
- KANTIN, R. et al. 1982. Observações Hidrográficas no Estuário da Lagoa dos Patos: Distribuição e Flutuações dos Sais Nutrientes. *Atlântica* 5: 76-92.
- KAUL, L.N. & FROELICH, P.N. 1984. Modelling estuarine nutrient geochemistry in a simple system. *Geochim. Cosmochim. Acta.* 48: 1417 – 1433.
- KNOX, S. et al. 1981. Statistical analysis of estuarine profile: application to manganese and ammonium in the Tamar estuary. *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 13: 357 – 371.
- KRAUSKOPF, K.B. & BIRD, D.K. 1995. *Introduction to Geochemistry*. N.York, McGraw-Hill, 647p.
- LIDDICOAT, M.I. et al. 1983. Conservative behaviour of boron in the Tamar estuary. *Estuar. Coast. Shelf. Sci.* 17: 467 – 472.
- LISS, P.S. 1976. Conservative and non-conservative behaviour of dissolved constituents during estuarine mixing. In: BURTON, J.D. & LISS, P.S.(eds). *Estuarine Chemistry*. London. Academic Press. p. 93 – 130.
- LOPES, M.J.S. 1994. Sub-projeto zooplâncton. In: LOPES, Maria José Saraiva; FERNANDES, Guacyra de Lavôr; MELO, Odilon Teixeira de. *Estudo do plâncton (fito e zooplâncton) e de Fatores Físicos e Químicos na região estuarina dos rios Anil e Bacanga, São Luís-MA*. São Luís: UFMA. FAPEMA 1994, p.57-88.
- MANTOURA, R.F.C. et al. 1978. The complexation of metals with humic materials in natural waters. *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 6, 387 – 408.
- MELO, O.T. 1994. Sub-projeto Fatores Físicos e Químicos. In: LOPES, Maria José Saraiva; FERNANDES, Guacyra de Lavôr; Melo, Odilon Teixeira de. *Estudo do plâncton (fito e zooplâncton) e de Fatores Físicos e Químicos na região estuarina dos rios Anil e Bacanga, São Luís-MA*. São Luís: UFMA. FAPEMA 1994, p.13-35.
- MEYBECK, M.1979. Concentration des eaux fluviales en éléments majeurs et apports en solution aux océans. *Rev. Geol. Dyn. Geogr. Phys.* 21: 215 – 246.
- MEYBECK, M.1981. Pathways of major elements from land to ocean through rivers. In: BURTON, J.D. & EISMA, D. (eds) *River Inputs to Ocean Systems*. Paris. UNEP/UNESCO. p. 18 – 30.
- MEYBECK, M.1982. Carbon, nitrogen and phosphorus transported by world rivers. *Am. J. Sci.* 282: 401 – 450.

- MEYBECK, M. et al. 1988. Nutrient (Organic C, P, N, Si) in the Eutrophic River Loire (France) and its Estuary. *Est. Coast. Shelf. Sci.* **27**: 595 – 624.
- PEDROZO, F. & BONETTO, C. 1987. Nitrogen and phosphorus transport in the Bermejo River (South America). *Rev. Hydrobiol. Trop.* **20**: 91-99.
- PITOMBEIRA, E.S. & MORAIS, J.O. 1977. Comportamento Hidrodinâmico e Sedimentológico do Estuário do rio Bacanga (São Luís, Estado do Maranhão, Brasil) *Arq. Cien. Mar.* **17**: 165-174.
- POSTMA, H. 1967. Sediment transport and sedimentation in the estuarine environment. In: LAUFF, G.H. (ed). *Estuaries*. N. York. p. 158-159.
- PRITCHARD, D.V. 1967. What is an estuary? Physical viewpoint. In: LAUFF, G.H.(ed) *Estuaries*. N. York. p. 3 – 5.
- PRITCHARD, D.V. 1952. Salinity distribution and circulation in the Chesapeake Bay estuarine system. *J. Mar. Res.* **11**: 106 – 123.
- RAMIREZ, A.J. & ROSE, A.W. 1992. Analytical Geochemistry of Organic Phosphorus and its Correlation with Organic Carbon in Marine and Fluvial Sediments and Soils. *Am. J. Sci.* **292**: 421-454.
- REUTHER, J.H. 1981. Chemical interactions involving the biosphere and fluxes of organic material in estuaries. In: BURTON, J.D. & EISMA, D. (eds) *River inputs to ocean systems*. Paris. UNEP/UNESCO. p. 239 – 242.
- RUTTENBERG, K.C. 1992. Development of a sequential extraction method for different forms of phosphorus in sediment. *Limnol. Oceanogr.* **37**: 1460 – 1482.
- SALOMONS, W. & FORSTNER, U. 1984. *Metals in the Hydrosphere*. Berlin, Springer – Verlag. 396p.
- SEMATUR. 1993. *Plano de manejo do Parque Estadual do Bacanga*. São Luís – MA.
- SHARP, J.H. et al. 1982. The Chemistry of the Delaware estuary: general considerations. *Limnol. Ocean.* **27**: 1015 – 1028.
- SHOLKOVITZ, E.R. 1978. The flocculation of dissolved Fe, Mn, Al, Cu, Ni, Co and Cd during estuarine mixing. *Earth Planet. Sci. Lett.* **41**: 77 – 86
- SOSA-ÁVALOS, R. et al. 1997. Productividad primaria del fitoplancton estimada con los métodos de oxígeno y carbono catorce en una estación de estero de Punta Banda, México. *Cien. Mar.* **23**: 361 – 375.
- STANDAR Methods; for the examination of water and wastewater. 1980. 15. Ed. New York, APHA, AWWPCF, 1134p.

- STRICKLAND, J.D.H. & PARSONS, T.R. 1972. *A Practical Handbook of Seawater Analysis*. 2. ed. Ottawa, Fisheries Research Board of Canada, 310p (Bulletin 167).
- STUMM, W. & MORGAN, J.J. 1970. *Aquatic Chemistry An Introduction Emphasizing Chemical Equilibria in Natural Waters*. N. York, Wiley-Interscience, 583p.
- SUDAM. 1984. *Projeto de Hidrologia e Climatologia da Amazônia*.
- TEIXEIRA, C. et al. 1988. Produção primária e clorofila-a do fitoplâncton e parâmetros físicos e químicos do Estreito dos Coqueiros-MA, Brasil. *Rev. Bras. Biol.* **48**: 29-39.
- THURMAN, E.M. 1986. *Organic Geochemistry of Natural Waters*. Neterlands, M. Nijhoff/W. Junk Publishers (ed.), 486p.
- VALDERRAMA, J.C. 1981. The Simultaneous Analysis of total nitrogen and total phosphorus in natural waters. *Mar. Chem.* **10**: 109-122.
- VAN BENNEKON et al. 1978. Nutrient distribution in the Zaire Estuary and river plume. *Neth. J. Sea. Res.* **12**: 296 – 323.
- WILLIAMS, J.D.H. et al. 1976. Forms of Phosphorus in the Surficial Sediments of Lake Erie. *J. Fish. Res. Board Can.* **33**: 413 – 429.
- WILLIAMS, P.J. 1981. Primary productivity and heterotrophic activity in estuaries. In: BURTON, J.D. & EISMA, D. (eds) *River inputs to oceans systems*. Paris. UNEP/UNESCO. p. 243 – 249.
- WINDOM, H.L. et al. 1983. Behaviour of copper in Southeastern United States estuaries. *Mar. Chem.* **12**: 183-194.

A N E X O S

Anexo A.1 - Valores dos parâmetros físicos e físico – químicos no estuário do rio Bacanga (fevereiro/97), ilha de São Luis-MA.

Estação	Temp.°C	Secchi(cm)	Cond.(mS/cm)	MPS(mg/L)	pH	O ₂ (ml/L)	Salin.(‰)
1	26,5	30	< 1,0	80	6,28	2,03	< 0,50
2	26,5	65	4,5	100	6,91	2,15	2,65
3	27,5	30	28,5	240	7,25	2,72	16,18
4	27,5	60	32,5	80	7,75	3,45	22,54
5	28,5	60	28,5	90	7,81	3,98	29,08
6	28,5	70	32,5	60	8,12	4,05	26,92
7	29,5	60	30,6	60	8,16	4,23	20,08
8	29,5	50	29,6	80	7,86	2,72	19,09
9	30,5	80	31,5	70	7,96	3,18	27,09
10	30,5	50	30,8	90	8,25	3,15	28,54
11	30,5	70	32,5	60	8,26	4,25	29,54
12	31,5	80	29,5	80	8,32	4,95	32,56

Anexo A.2- Valores dos parâmetros físicos e físico–químicos no estuário do rio Bacanga (abril/97), ilha de São Luis-MA.

Estação	Temp.°C	Secchi (cm)	Cond. (mS/cm)	MPS (mg/L)	pH	O ₂ (ml/L)	O ₂ (%Sat.)	Salin. (‰)	H ₂ S (mg/L)
1	24,5	20	< 1,00	120	5,78	1,75	33	< 0,50	1,35
2	24,5	30	1,69	80	5,89	1,82	47	2,05	2,32
3	25,5	30	4,16	70	5,98	2,15	36	2,06	2,65
4	25,5	40	10,52	70	6,05	2,95	51	3,26	2,32
5	26,5	40	8,75	240	6,62	2,98	54	2,96	1,96
6	26,5	50	12,51	160	6,63	2,96	54	3,52	2,16
7	27,5	70	14,05	170	6,82	2,15	34	4,05	2,42
8	27,5	20	14,51	200	6,65	1,56	40	4,08	3,35
9	28,5	40	14,22	160	6,93	1,98	41	6,08	2,96
10	28,5	50	14,61	130	7,72	2,85	38	7,49	3,27
11	29,5	60	20,82	90	7,92	3,05	75	7,65	2,85
12	29,5	70	19,25	90	7,98	4,35	79	13,45	1,89

Anexo A.3- Valores dos parâmetros físicos e físico – químicos no estuário do rio Bacanga(junho/97), ilha de São Luís-MA.

Estação	Temp. °C	Secchi (cm)	Cond. (mS/cm)	MPS (mg/L)	pH	O ₂ (ml/L)	Salin. (‰)
1	26,5	40	< 1,00	70	6,06	2,31	< 0,50
2	26,5	40	3,17	60	7,01	2,96	2,34
3	26,5	70	14,61	40	7,42	2,91	9,45
4	27,5	90	24,72	90	7,48	3,56	20,05
5	27,5	100	20,45	70	7,69	3,96	13,64
6	27,5	90	21,72	60	7,82	3,29	18,75
7	28,5	60	27,22	40	7,89	3,25	14,55
8	28,5	90	28,05	40	7,89	2,05	18,75
9	29,5	120	27,81	30	7,96	3,15	22,18
10	29,5	100	28,72	60	8,11	3,05	18,35
11	30,5	140	30,05	50	8,25	4,75	19,85
12	30,5	110	31,08	60	8,31	5,11	24,15

Anexo A.4 - Valores dos parâmetros físicos e físico – químicos no estuário do rio Bacanga(agosto/97), ilha de São Luís-MA.

Estação	Temp. °C	Secchi (cm)	Cond. (mS/cm)	MPS (mg/L)	pH	O ₂ (ml/L)	Salin. (‰)
1	25,5	40	< 1	30	6,12	2,05	< 0,50
2	25,5	60	3,92	30	6,91	3,15	2,82
3	25,5	80	31,22	60	7,31	2,65	14,52
4	26,5	80	34,25	40	7,45	4,64	18,76
5	26,5	100	34,62	50	7,71	4,42	19,12
6	26,5	150	37,81	40	7,85	3,63	22,66
7	27,5	200	38,05	30	7,91	3,15	23,02
8	27,5	80	29,36	70	7,92	3,92	19,83
9	28,5	100	37,92	40	8,05	4,41	23,37
10	29,5	100	35,25	50	8,05	3,25	23,72
11	29,5	160	38,78	40	8,21	5,05	23,72
12	30,5	110	32,35	50	8,27	5,04	28,92

Anexo A. 5 - Valores dos parâmetros físicos e físico – químicos no estuário do rio Bacanga(outubro/97) ilha de São Luís – MA.

Estação	Temp. °C	Secchi (cm)	Cond. (mS/cm)	MPS (mg/L)	pH	O ₂ (ml/L)	O ₂ (%Sat.)	Salin. ‰	H ₂ S (mg/L)
1	25,0	40	0,07	30	6,61	2,46	43	< 0,5	1,05
2	24,5	50	4,21	25	7,42	3,67	68	2,89	1,85
3	26,0	60	34,41	50	7,48	3,38	68	22,94	1,05
4	26,5	80	36,05	40	7,54	3,45	70	23,32	1,88
5	26,5	100	35,05	30	7,72	4,75	94	18,97	0,98
6	27,0	130	38,51	30	8,05	4,53	95	27,21	1,12
7	27,5	200	39,61	20	8,12	4,15	87	26,74	1,16
8	28,0	70	36,15	60	8,05	3,17	66	23,12	2,05
9	29,0	100	38,42	30	8,15	3,96	85	26,01	1,32
10	29,0	80	36,25	50	8,09	3,85	84	28,05	1,98
11	30,0	100	37,42	40	8,21	5,05	106	27,62	1,02
12	31,0	110	38,45	30	8,32	5,18	118	31,07	0,96

Anexo A.6 - Valores dos parâmetros físicos e físico – químicos no estuário do rio Bacanga(dezembro/97) ilha de São Luís-MA.

Estação	Temp. °C	Secchi (cm)	Cond. (mS/cm)	MPS (mg/L)	pH	O ₂ (ml/L)	Salin. ‰
1	26,5	30	< 1	20	6,49	2,05	< 0,5
2	26,5	50	6,45	50	7,66	2,62	11,85
3	27,5	90	35,51	20	8,08	3,85	21,55
4	27,5	60	37,42	30	8,58	5,55	24,06
5	27,5	130	36,51	20	8,32	4,85	26,22
6	28,5	200	42,01	20	8,39	4,65	29,26
7	28,5	180	42,02	35	8,48	3,96	29,45
8	28,5	80	32,56	30	8,02	3,82	21,55
9	29,5	110	42,42	25	8,42	3,35	28,01
10	29,5	130	37,52	30	8,39	4,52	29,09
11	29,5	140	42,05	30	8,56	5,85	29,95
12	30,5	130	36,01	20	8,28	4,96	32,05

**Anexo B.1 - Valores de nutrientes (μM) obtidos no estuário do rio Bacanga
(fevereiro/97) ilha de São Luís- MA.**

Estação	N-Uréia	N-NH ₄ ⁺	N-NO ₂ ⁻	N-NO ₃ ⁻	NT	P-HPO ₄ ²⁻	PT	Si-H ₄ SiO ₄
1	1,45	2,05	0,22	0,86	84,32	0,45	3,35	180,86
2	1,69	2,21	0,36	0,96	112,25	0,35	6,42	196,54
3	2,01	2,09	0,45	0,87	132,42	0,46	3,25	156,02
4	1,97	2,25	0,32	0,98	186,35	0,86	6,24	89,64
5	1,86	2,11	0,61	3,04	182,81	0,91	4,32	65,05
6	1,97	3,05	0,72	3,08	198,34	1,35	9,85	40,85
7	2,16	6,05	0,45	4,32	167,36	2,01	7,36	43,56
8	5,18	8,11	1,31	7,32	212,38	3,47	12,32	45,85
9	4,27	5,76	0,61	6,35	184,56	1,96	9,74	32,55
10	4,96	7,05	1,25	6,89	198,75	3,21	8,39	20,35
11	3,73	4,39	0,69	5,32	154,31	1,29	7,15	31,05
12	2,06	3,27	0,64	4,21	138,99	1,91	6,36	28,75

**Anexo B.2 - Valores de nutrientes (μM) obtidos no estuário do rio Bacanga(abril/97)
ilha de São Luís- MA.**

Estação	N-Uréia	N-NH ₄ ⁺	N-NO ₂ ⁻	N-NO ₃ ⁻	NT	P-HPO ₄ ²⁻	PT	Si-H ₄ SiO ₄
1	1,21	1,82	0,45	1,86	36,48	1,56	3,38	185,64
2	1,38	1,97	0,62	0,96	72,00	1,31	3,08	197,35
3	1,41	2,05	0,72	2,87	86,08	1,51	5,38	165,82
4	1,61	3,81	1,05	2,98	104,64	1,91	6,54	126,75
5	1,55	3,96	2,01	3,04	70,72	2,01	4,42	93,51
6	2,31	4,01	1,97	3,08	80,35	2,04	6,52	93,12
7	3,15	4,96	2,01	4,32	98,02	3,58	11,55	58,95
8	9,39	12,36	2,32	7,32	161,52	6,35	16,25	80,82
9	7,85	9,39	1,98	6,35	105,01	5,59	14,94	19,68
10	8,11	6,46	2,18	6,89	141,12	6,18	17,01	25,82
11	3,05	3,82	1,78	5,32	53,11	3,82	10,45	34,25
12	1,96	2,94	1,09	4,21	49,21	1,79	6,38	31,05

**Anexo B.3 - Valores de nutrientes (μM) obtidos no estuário do rio Bacanga(junho/97)
ilha de São Luís- MA.**

Estação	N-Uréia	N-NH ₄ ⁺	N-NO ₂ ⁻	N-NO ₃ ⁻	NT	P-HPO ₄ ²⁻	PT	Si-H ₄ SiO ₄
1	1,05	2,73	0,36	1,32	214,25	0,36	1,49	187,15
2	1,12	2,82	0,24	1,25	204,94	0,27	1,23	193,35
3	1,52	2,29	0,31	1,09	216,88	0,51	2,15	85,33
4	1,56	2,05	0,41	1,96	219,57	0,91	2,98	74,52
5	1,48	1,97	0,55	1,15	176,34	0,28	1,82	74,23
6	1,52	2,58	0,38	1,96	219,51	2,27	5,46	62,25
7	2,15	5,88	1,15	2,15	221,42	4,59	10,18	49,52
8	5,19	7,17	1,28	2,87	205,61	8,86	21,07	48,58
9	4,12	6,68	1,32	2,84	214,98	5,13	11,36	34,08
10	4,96	7,26	1,31	3,11	207,66	7,48	19,05	25,78
11	3,15	4,59	1,09	2,96	222,51	3,74	5,98	34,52
12	2,18	3,15	0,54	1,96	205,32	2,35	4,98	29,36

**Anexo B.4 - Valores de nutrientes (μM) obtidos no estuário do rio Bacanga(agosto/97)
ilha de São Luís- MA.**

Estação	N-Uréia	N-NH ₄ ⁺	N-NO ₂ ⁻	N-NO ₃ ⁻	NT	P-HPO ₄ ²⁻	PT	Si-H ₄ SiO ₄
1	1,05	3,06	0,36	1,15	110,51	0,15	2,53	180,05
2	1,15	1,15	0,46	1,18	65,64	0,67	3,38	186,04
3	1,35	0,32	0,62	1,25	210,31	0,65	5,19	82,51
4	1,48	0,34	0,79	1,12	162,08	0,86	9,03	70,06
5	1,46	3,49	1,21	0,96	56,59	0,42	3,14	71,02
6	1,98	23,04	8,01	2,16	77,36	1,06	5,77	58,04
7	2,76	46,22	7,31	2,12	128,35	1,86	7,33	45,64
8	3,98	99,52	6,36	2,21	576,66	3,15	14,19	42,32
9	3,64	47,85	8,01	1,98	402,53	2,86	9,71	31,05
10	4,05	39,14	9,72	2,17	150,03	3,18	12,92	23,12
11	3,22	46,89	8,17	1,27	123,91	2,64	6,46	31,05
12	2,56	35,06	6,15	1,32	118,34	2,21	6,13	28,36

**Anexo B.5 - Valores de nutrientes (μM) obtidos no estuário do rio Bacanga(outubro/97)
ilha de São Luís- MA.**

Estação	N-Uréia	N-NH ₄ ⁺	N-NO ₂ ⁻	N-NO ₃ ⁻	NT	P-HPO ₄ ²⁻	PT	Si-H ₄ SiO ₄
1	1,04	4,59	0,42	1,37	212,69	0,46	2,68	184,52
2	1,32	6,21	0,36	1,12	69,94	0,48	2,71	168,34
3	1,74	4,97	0,45	0,61	158,41	0,63	4,59	94,01
4	1,45	15,43	1,21	1,04	284,91	0,49	4,59	76,14
5	1,86	10,04	0,96	1,73	216,51	0,54	2,95	83,49
6	2,36	43,12	2,15	3,95	222,58	2,08	4,73	84,85
7	2,42	51,67	0,94	2,65	325,15	3,71	7,81	87,79
8	5,42	100,05	2,19	4,89	494,23	4,89	13,45	111,43
9	4,79	66,21	1,32	3,86	406,29	3,51	10,81	89,49
10	4,21	100,05	1,65	4,76	276,69	4,17	12,78	86,66
11	3,15	59,03	0,59	3,15	334,28	3,62	7,98	85,41
12	2,78	43,29	0,61	2,96	215,09	2,09	5,78	76,18

**Anexo B.6 - Valores de nutrientes (μM) obtidos no estuário do rio Bacanga
(dezembro/97), ilha de São Luís- MA.**

Estação	N-Uréia	N-NH ₄ ⁺	N-NO ₂ ⁻	N-NO ₃ ⁻	NT	P-HPO ₄ ²⁻	PT	Si-H ₄ SiO ₄
1	1,85	1,86	0,26	1,36	36,42	0,38	6,35	196,28
2	1,75	1,27	0,26	1,38	56,97	0,52	10,89	185,42
3	1,96	2,15	1,22	1,96	19,46	2,86	7,48	157,48
4	2,08	4,01	1,05	1,84	38,93	2,85	9,15	148,97
5	2,15	8,89	2,31	1,36	23,86	3,86	6,99	128,86
6	2,18	17,87	3,27	1,38	34,08	9,36	15,73	86,88
7	2,42	19,12	2,41	1,32	34,71	14,54	18,75	82,58
8	3,96	69,94	3,28	1,24	90,24	8,42	18,04	122,41
9	3,76	45,88	2,31	1,38	79,97	8,71	16,67	87,11
10	3,84	57,93	2,46	1,37	89,94	8,82	14,14	90,16
11	2,52	36,64	1,97	1,92	60,16	7,61	13,77	78,96
12	1,98	18,09	1,86	2,02	34,82	6,31	9,81	48,35

Anexo C.1 – Valores de sódio (mg/L) obtidos no estuário do rio Bacanga, ilha de São Luís – MA, 1997

Estação	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Mês												
Abril	12	627	780	1028	943	1103	1241	1026	1882	2158	2363	3015
Outubro	18	3924	7019	845	5791	8370	8187	7085	7985	8584	9139	9453

Anexo C.2 – Valores de potássio (mg/L) obtidos no estuário do rio Bacanga, ilha de São Luís – MA, 1997

Estação	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Mês												
Abril	3	23	28	38	34	40	48	37	68	76	85	107
Outubro	6	142	254	247	209	301	296	256	288	308	329	341

Anexo C.3 – Valores de cálcio (mg/L) obtidos no estuário do rio Bacanga, ilha de São Luís – MA, 1997

Estação	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Mês												
Abril	10	27	30	41	37	43	49	39	74	85	92	119
Outubro	15	152	277	269	226	329	322	279	313	337	360	371

Anexo C.4 – Valores de magnésio (ppm) obtidos no estuário do rio Bacanga, ilha de São Luís - MA, 1997

Estação	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Mês												
Abril	15	76	94	124	115	133	151	124	228	261	262	365
Outubro	23	475	894	828	702	1012	991	857	966	1038	1076	1144

Anexo C.5 – Valores de sulfato (mg/L) obtidos no estuário do rio Bacanga, ilha de São Luís - MA, 1997

Estação	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Mês												
Abril	6	149	195	247	238	278	318	252	473	540	595	759
Outubro	9	961	1071	1720	1457	2106	2060	1784	2007	2156	2300	2380

Anexo D – Valores de clorofila - a (mg/m^3) obtidos no estuário do rio Bacanga, ilha de São Luís - MA, 1997

Estação	Fev./97	Abril/97	Junho/97	Agosto/97	Outubro/97	Dez./97
1	6,32	3,82	4,92	10,89	9,25	8,01
2	8,82	6,42	7,78	10,34	8,06	8,20
3	12,75	7,98	9,89	18,12	17,21	13,15
4	22,71	12,15	18,25	39,89	30,15	25,32
5	23,21	12,32	21,11	43,91	36,62	27,18
6	24,82	13,29	24,00	40,22	33,72	29,05
7	10,32	6,74	7,15	19,71	16,52	12,15
8	18,08	6,17	8,96	25,00	22,46	19,15
9	22,15	11,12	13,15	26,05	24,61	23,37
10	18,45	7,34	9,86	25,05	19,91	19,20
11	10,18	4,21	7,31	12,17	8,95	9,16
12	9,32	4,05	6,94	11,06	10,00	9,05

Anexo E.1 – Valores de produção primária ($\text{mgC}/\text{m}^3/\text{h}$), estação 5 no estuário do rio Bacanga, ilha de São Luís-MA, 1997

% luz	Fev./97	Abril/97	Junho/97	Agosto/97	Outubro/97	Dez./97
100	64,82	42,25	59,76	138,24	118,91	89,95
50	42,26	28,32	42,59	142,76	120,32	92,72
1	6,32	3,78	7,82	25,98	25,03	18,76

Anexo E.2 – Valores de produção primária ($\text{mgC}/\text{m}^3/\text{h}$) estação 6 no estuário do rio Bacanga, ilha de São Luís-MA, 1997

% luz	Fev./97	Abril/97	Junho/97	Agosto/97	Outubro/97	Dez./97
100	68,41	59,32	79,87	142,81	119,21	84,24
50	72,35	31,15	82,15	150,11	122,84	86,85
1	18,52	4,71	10,18	35,15	32,75	23,98

Anexo F – Valores obtidos para demanda bioquímica de oxigênio (DBO- mg/L) no Estuário do rio Bacanga, ilha de São Luís – MA, 1997

Estação	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Mês												
Abril	3,4	4,2	4,6	3,8	3,1	3,4	3,7	12,5	10,9	11,5	4,9	3,3
Outubro	2,3	2,8	2,5	2,1	1,8	1,9	2,2	8,1	6,4	7,6	2,9	1,9

Anexo G – Valores de carbono orgânico particulado – COP (mg/L) no estuário do rio Bacanga, ilha de São Luís – MA, 1997

Estação	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Mês												
Abril	0,82	2,59	3,91	2,82	2,65	2,44	3,44	5,18	4,17	4,91	3,82	3,43
Outubro	0,65	1,92	2,26	2,42	2,25	2,16	3,29	3,71	1,64	1,58	2,11	1,81

Anexo H – Valores de carbono orgânico (%) em sedimentos superficiais no estuário do rio Bacanga, ilha de São Luís -MA, 1997

Estação	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Mês												
Abril	2,9	2,6	2,6	4,5	3,8	3,7	3,9	3,9	5,0	5,4	4,0	4,2
Outubro	2,3	2,4	4,6	3,9	3,8	4,0	3,2	5,8	4,9	5,2	4,0	3,9

Anexo I – Valores de fósforo ($\mu\text{mol/g}$) em sedimentos superficiais (abril/97) do estuário do rio Bacanga, ilha de São Luís – MA.

Estação	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Fração												
Trocável	Nd	0,5	0,9	0,9	0,9	1,0	1,1	1,8	1,5	1,8	1,0	0,9
Orgânica	Nd	3,1	3,9	2,3	2,4	2,6	1,9	5,9	4,1	4,8	2,9	2,9
Residual	Nd	8,8	10,7	8,4	8,9	7,4	5,7	18,3	15,2	18,1	11,3	9,4

ANEXO J – Fotografias da área estudada



Fotografia Nº 1 – Pode-se observar na parte superior, o centro da cidade de São Luís-MA; embaixo, observa-se a turbulência da água causada pela abertura das comportas da Barragem do Bacanga.

Nesse ponto, fica localizada a estação de coleta nº 11 referida no corpo deste trabalho. Observa-se ainda, a erosão das áreas marginais causadas pela hidrodinâmica do sistema estuarino, isto é, entradas pelo fluxo e saídas pelo refluxo das marés.

Nesse ponto, os processos de misturas são bastante intensos comparado-se com as demais estações de coleta. Têm-se, também, os maiores teores de oxigênio dissolvido, salinidade e pH.



Fotografia Nº 2 – Pode-se observar, as comportas fechadas da barragem do Bacanga e sem nenhuma turbulência. Nessa condição, observou-se somente uma diminuição dos teores de oxigênio dissolvido como acima referido na fotografia nº 1.

A coloração da água muda, isto é, torna-se mais transparente devido à sedimentação das partículas em suspensão. Também, favorece o processo de produção primária conforme discutido no corpo deste trabalho (5.1.12).



Fotografia Nº 3 – Esta fotografia, fica na parte montante do sistema estuarino (a 2km aproximadamente da nascente do Bacanga), no limite de penetração da maré salina. A estação 2, referida neste trabalho localiza-se 250m a direita desta foto.

Observa-se uma espécie de lagoa – represamento, causado por aterro das áreas marginais do rio.

Nessa área, existem atividades agrícolas e criação de gado leiteiro (vacarias). Parte da vegetação ciliar, foi retirada para o desenvolvimento dessas atividades.



Fotografia Nº 4 – Esta fotografia, mostra o rio e a vegetação esparsa. Essa área, fica próxima daquela mostrada anteriormente (Fotografia Nº 3). O rio é estreito, porém a profundidade média chega a 2m.

A vegetação maior observada, é formada na maioria por *Avicennia*. A vegetação menor é constituída de capim nativo que serve de alimentação para o gado.

Nessa área, pelo dados de salinidade, oxigênio e pH, obtidos ocorre uma estratificação com relação a estes parâmetros e, também, com relação à temperatura.



Fotografia Nº 5 – Esta fotografia, mostra a estação 7 com águas mais claras e menos poluídas com relação às estações 8, 9 e 10. Observa-se diversas canoas e os pescadores, dentro d'água, retirando mexilhão (*Mytella*) conhecido vulgarmente como sururú.

Nessa estação 7, os valores dos diversos parâmetros estudados neste trabalho foram semelhantes àquelas da estação 11 pois, ficam do lado oposto aos pontos de lançamento de esgotos domésticos.



Fotografia Nº 6 – Nesta fotografia, observa uma canoa quase cheia do sururú resultante da pesca efetuada por diversos pescadores da vizinhança e de outros pontos da periferia de São Luís.

Essa exploração, ocorre entre os meses de outubro a dezembro, coincidindo com os maiores valores de salinidade, quando esses organismos atingem o maior tamanho.

Segundo informações, colhidas junto aos pescadores a produção, no período acima citado, chega 10 toneladas e é comercializadas nos mercados e feiras da capital.

Os valores de salinidade, nessa área de ocorrência desses organismos, no período seco (julho a dezembro) varia de 10 a 34‰.