



UNIVERSIDADE CATÓLICA DE PERNAMBUCO
PRÓ-REITORIA ACADÊMICA
COORDENAÇÃO GERAL DE PÓS-GRADUAÇÃO
MESTRADO EM DESENVOLVIMENTO DE PROCESSOS AMBIENTAIS

Luiz Queiroz dos Santos

**Modelagem e Aproximação Numérica de Dados
de Nutrientes na Costa Pernambucana**

Recife
2010

Luiz Queiroz dos Santos

Modelagem e Aproximação Numérica de Dados de Nutrientes na Costa Pernambucana

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento de Processos Ambientais Universidade Católica de Pernambuco como pré-requisito para obtenção do título de Mestre em **Desenvolvimento de Processos Ambientais**.

Área de Concentração: Desenvolvimento em Processos Ambientais

Linha de Pesquisa: Informática, Modelagem e Otimização de Processos.

Orientador: Prof. Dr. Emerson Alexandre de Oliveira Lima

Recife

2010

S237m Santos, Luiz Queiroz dos
Modelagem e aproximação numérica de dados de nutrientes
na costa pernambucana / Luiz Queiroz dos Santos ; orientador
Emerson Alexandre de Oliveira Lima, 2010.
51 f. : il.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Católica de Pernambuco.
Pró-reitoria Acadêmica. Curso de Mestrado em Desenvolvimento de
Processos Ambientais, 2010.

1. Modelos matemáticos. 2. Água do mar - Análise. 3. Água do mar -
Composição. I. Título.

CDU 574.6

Santos, L. Q

Modelagem e Aproximação Numérica de Dados de Nutrientes na Costa Pernambuco, 2010, 51 p.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Católica de Pernambuco. Pró-reitoria Acadêmica. Curso de Mestrado em Desenvolvimento de Processos Ambientais, 2010.

1. Modelagem Matemática. 2. Nutrientes, 3. Aproximação de funções.
Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento de Processos Ambientais.

Modelagem e Aproximação Numérica de Dados de Nutrientes na Costa Pernambucana

LUIZ QUEIROZ DOS SANTOS

Examinadores:

Prof. Drº Emerson Alexandre de Oliveira Lima
Universidade Católica de Pernambuco – UNICAP
Orientador

Profº Drº Sérgio Murilo Maciel Fernandes
Universidade Católica de Pernambuco – UNICAP

Profº Drº Manuel de Jesús Flores Montes
Universidade Federal de Pernambuco – UFPE

AGRADECIMENTOS

A Deus.

A Profª Drª Alexandra de Amorim Salgueiro.

Será que vale à pena?

Tudo vale à pena se a alma não é pequena!

Se acreditarmos em nós mesmos, em nossos

Sonhos, em nosso trabalho, em nossos educandos.

Vale à pena se a vontade for grande e o medo pequeno.

Fernando Pessoa

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	iii
SUMÁRIO	v
LISTA DE FIGURAS	vi
LISTA DE TABELAS	vii
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	viii
RESUMO	ix
ABSTRACT	x
CAPÍTULO I	
1.1 Introdução	14
1.2 Objetivos	15
1.3 Revisão da Literatura	16
1.4 Referências Bibliográficas	32
CAPÍTULO II	
2.1 Introdução	37
2.2 Materiais e Métodos	38
2.3 Resultados e Discussão	47
2.4 Conclusão	47
2.5 Referências Bibliográficas	48
CAPÍTULO III	
Conclusões Gerais	51

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Densidade populacional da zona costeira brasileira.....	17
Figura 2 Zona costeira de Pernambuco.....	20
Figura 3 Principais resíduos das atividades antrópicas.....	22
Figura 4 Aspectos das conseqüências dos processos de eutrofização	23
Figura 5 Ciclo global da matéria.....	24
Figura 6 Ciclo do nitrogênio em ambiente marinho	26
Figura 7 Ciclo do fósforo em ambiente marinho	28
Figura 8 O silício em ambiente marinho	30
Figura 9 Diagrama de dispersão	40
Figura 10 Diagrama de dispersão.....	43
Figura 11 Diagrama de dispersão.....	45
Figura 12 Diagrama de dispersão.....	46

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 Zona costeira brasileira	18
Tabela 2 Distribuição de nitrogênio em ambientes marinhos	25
Tabela 3 Distribuição de fósforo em ambientes marinhos	27
Tabela 4 Distribuição de silício em ambientes marinhos	29
Tabela 5 Concentração de nutrientes em função da época do ano	39
Tabela 6 Dados de nitrato, fosfato e silicato em diferentes estações.....	43

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

REVIZEE = Recursos vivos da Zona Econômica Exclusiva

CNUDM = Convenção das Nações Unidas sob o Direito do Mar

CPRH = Agência do Estado de Pernambuco de Meio Ambiente e Recursos Hídricos

MMA = Ministério do Meio Ambiente

SMA = Secretaria de Coordenação dos Assuntos do Meio Ambiente

DEGAM = Departamento de Gestão Ambiental

IBGE = Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

PNMA = Programa Nacional de Meio Ambiente

μM = Micro-molar

NO_3^- = Nitrato

NO_2^- = Nitrito

NH_3 = Nitrogênio amoniacal (amônia ou amoníaco)

NH_4^+ = Nitrogênio amoniacal (íon amônio)

PO_4^{3-} , HPO_4^{2-} e H_2PO_4^- = Ortofosfatos

$(\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{OH})$ = Apatita

$[(\text{H}_4\text{SiO}_4)]$ ou $[\text{Si}(\text{OH})_4]$ = Ácido silícico

RESUMO

A zona costeira de Pernambuco compreende uma faixa de 187 km de extensão e abrange 21 municípios. Apresenta o maior aglomerado populacional do Estado, onde está concentrada aproximadamente 44 % da população. Pesca intensiva e poluição ambiental, aliadas a uma mudança de clima global conduzirão a um colapso de todos os pescados em 2048. Esses impactos ambientais alteram a concentração ou distribuição de nitrogênio, fósforo e silício (biolimitantes da produção primária) e interferem em seus ciclos biogeoquímicos. A aplicação de modelos numéricos a zonas costeiras pode indicar uma previsão melhor dos fluxos de nutrientes associados com suas transferências e consequência geoquímica. O objetivo deste trabalho foi estimar concentrações dos principais nutrientes dissolvidos: nitrogênio, fósforo e silício através de modelagem matemática. Na metodologia foram utilizados dados do Programa REVIZEE, coletados pelo Departamento de Oceanografia (UFPE) no verão pernambucano de 1997. As estimativas das concentrações dos nutrientes nitrogênio, fósforo e silício da costa marinha no estado de Pernambuco geram informações que dão suporte à atividades futuras de pesca artesanal. O apoio científico serve de suporte para o aumento da demanda pesqueira que é de produção econômica para a região, considerando ser a mesma uma zona costeira.

Palavras-chave: modelagem-matemática; nutrientes; aproximação de curvas

ABSTRACT

The coastal zone of Pernambuco comprises a range of 187 km and covers 21 cities. It presents the greatest agglomeration of the state, which concentrates approximately 44% of the population. Overfishing and pollution environment, coupled with global climate change will lead to a collapse of all fish in 2048. These environmental impacts change the concentration or the distribution of nitrogen, phosphorus and silicon (limiting production primary). It also interferes in their biogeochemical cycles. The application of numerical models in coastal areas may indicate a better estimate of nutrient fluxes associated with their transfer and geochemistry consequence. The objective of this study was to estimate concentrations of the major nutrients: nitrogen, phosphorus and silicon through mathematical modeling. In the methodology it was used the data Program REVIZEE, collected by the Department of Oceanography (UFPE) in the summer of 1997. The estimates of concentrations of nitrogen, phosphorus and silicon from the sea coast in the state of Pernambuco generated information to support the future activities of fishing. The scientific support for the increased demand of fishing is related to the economic production of the coastal area region.

Keywords: mathematical modeling, nutrients, approximation of functions.

CAPÍTULO I

1.1 INTRODUÇÃO

A humanidade possui nos oceanos, uma imensa fonte de recursos, seja a antiqüíssima atividade da pesca, suprimindo assim seu alimento, seja como: navegação comercial, defesa e expansão territorial, e nos tempos atuais, exploração de petróleo e utilização para produtos biotecnológicos (EDWARDS, LIPIATOU, 2002).

A legislação brasileira classifica a zona costeira como um exemplo de patrimônio nacional sendo considerado o espaço geográfico de interação do ar, mar e terra formada pelos municípios diretamente influenciados, mas não necessariamente por aqueles localizados no litoral. Também estão incluídos os municípios distantes até 50 km da costa. A definição de zona costeira inclui também o mar territorial de 12 milhas náuticas e a exploração das atividades de grande impacto para a zona costeira e seus ecossistemas (JABLONSKI, FILET, 2008).

O REVIZEE (Recursos Vivos da Zona Econômica Exclusiva) é um Programa de avaliação do potencial sustentável dos recursos vivos da zona econômica exclusiva, coordenado ao nível nacional pelo MMA (Ministério do Meio Ambiente, dos Recursos Hídricos e da Amazônia Legal), pela Secretaria de Coordenação dos Assuntos do Meio Ambiente (SMA), pelo Departamento de Gestão Ambiental (DEGAM) e ao nível da região nordeste, pelos Profs Drs. Fábio Hissa Vieira Hazin (UFRPE) e Sílvio José Macêdo (UFPE). Esse Programa teve como objetivo, o levantamento dos potenciais sustentáveis de captura dos recursos vivos na ZEE ou Zona Econômica Exclusiva. A execução desse Programa, calcado em dados científicos, enquadra o Brasil às disposições da Convenção das Nações Unidas sob o Direito do Mar (CNUDM) no que concerne aos recursos vivos, ao mesmo tempo em que, permite uma melhor gestão do setor pesqueiro nacional (MMA, 1996).

Neste trabalho, nosso objetivo foi comparar diversos modelos de interpolação de curvas multivariadas que, por projeção para a região costeira, interpoem dados superficiais dos nutrientes: nitrogênio (N), fósforo (P) e silício (Si), obtidos da Zona Oceânica de Pernambuco. Tal validação fornecerá uma base para escolha futura de um modelo preditivo totalmente adaptado às especificidades da temática estudada.

1.2 OBJETIVOS

Objetivo geral

Comparar diferentes modelos matemáticos capazes de interpolar os dados relativos à concentração de nutrientes, em particular, de nitrogênio, fósforo e silício na costa pernambucana determinando, com base nos dados coletados, previsões relativas à concentração espaço-temporal de tais nutrientes para pescados de interesse econômico local.

Objetivos específicos

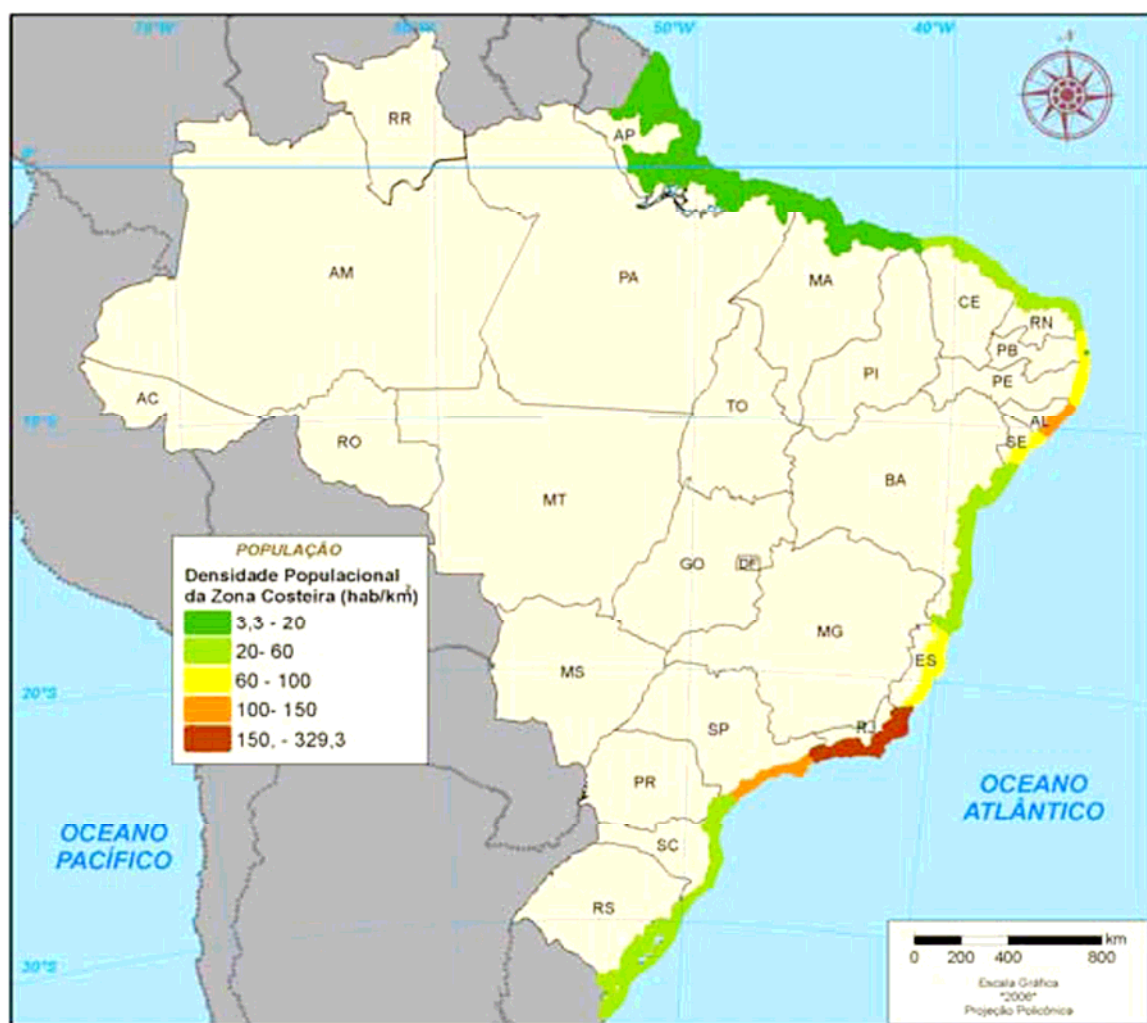
- Interpretar dados de nutrientes relativos a nitrogênio, fósforo e silício da costa marítima pernambucana;
- Comparar modelos, variáveis independentes e variáveis de controle relativas ao estudo da concentração de nutrientes na costa pernambucana;
- Estimar previsões de concentração espaço-temporal de nutrientes para pescados de interesse econômico local.

1.3 REVISÃO DE LITERATURA

Aproximadamente 71% ($361 \times 10^6 \text{ km}^2$) da superfície do planeta são ocupadas pelos oceanos, com profundidade média de 3795 m cujo volume líquido vem influenciando todos os aspectos da vida na Terra. A maior profundidade oceânica é 11500 m e, o seu volume médio estima-se em $1370 \times 10^6 \text{ Km}^3$. Os oceanos não se encontram uniformemente distribuídos no globo e constituem o maior repositório de organismos do planeta, uma vez que existe vida em maior ou menor escala em todos os domínios do ecossistema marinho. Cobrem em torno de 80% da área do Hemisfério Sul e somente 61% da área do Hemisfério Norte, onde se encontra as maiores concentrações de massas continentais (RE, 2000).

A zona costeira representa um contingente privilegiado do território brasileiro quanto aos recursos naturais, econômicos e humanos, apresentando-se como Patrimônio Nacional. Seus ecossistemas de fragilidade ambiental são frutos da interface de ambientes marinhos e terrestres caracterizados por recortes litorâneos e diversidade biológica que sofrem influência direta tanto de processos naturais quanto de antrópicos (STROHAECKER, 2009).

A zona costeira brasileira se estende por cerca de 8500 km, entre as latitudes $4^\circ 30' \text{ N}$ e $33^\circ 44' \text{ S}$ (Fig. 1); sua localização na zona intertropical e subtropical determina a presença de ambientes muito distintos de alta relevância ecológica e turística: recifes costeiros, manguezais, lagoas costeiras, restingas, praias e dunas. Os manguezais, uma das maiores manchas residuais da Mata Atlântica, cobrem uma área de cerca de 14.000 km^2 (JABIONSKI, FILET, 2008). A zona costeira brasileira possui uma superfície de cerca de 600 mil km^2 , dos quais aproximadamente 450 mil km^2 correspondem ao território dos 395 municípios distribuídos em 17 estados costeiros, os restantes 150 mil km^2 constituem o mar territorial. Aproximadamente 39 milhões de habitantes perto dos 40% da população total do país residem na zona costeira, perfazendo uma densidade demográfica de 88 hab/km^2 , portanto, bem superior à média nacional ($19,3 \text{ hab/km}^2$), concentrando-se principalmente em 16 das 28 regiões metropolitanas existentes no país (figura 1) (STROHAECKER, 2009).



Fonte: egal2009.easyplanners.info/area05/5560_Strohaecker_Tania_Marques.pdf. MMA, 2008

Figura 1 Densidade Populacional da Zona Costeira Brasileira (hab/ km²) do ano 2000

1.3.1 Caracterização e delimitação da área de estudo

A Zona Costeira de Pernambuco estende-se do município de Goiana, ao norte de Pernambuco, no limite com o Estado da Paraíba, até o município de São José da Coroa Grande, ao sul de Pernambuco na divisa com o Estado de Alagoas. Compreende uma faixa de 187 km de extensão e abrange vinte e um municípios, constituindo-se no mais importante aglomerado populacional do Estado, onde está concentrada aproximadamente 44% de sua população (tabela 1) (CPRH, 1995; IBGE, 2000).

Tabela 1 População da Zona Costeira Brasileira

Estados	Regiões Metropolitanas	População		Participação (%)
		2000		
		RM	ESTADO	
Pará	Belém	1 795 536	6 182 307	29,00
Maranhão	Grande São Luís	1 070 688	5 651 475	18,90
Ceará	Fortaleza	2 956 213	7 430 661	39,80
Paraíba	João Pessoa	892 650	3 623 215	24,60
Rio Grande do Norte	Natal	1 007 478	2 776 782	36,30
Pernambuco	Recife	3 337 565	7 918 344	42,10
Alagoas	Maceió	914 682	2 822 621	32,40
Sergipe	Aracaju	675 667	2 000 738	33,80
Bahia	Salvador	3 021 572	13 070 250	23,10
Espírito Santo	Grande Vitória	1 425 587	3 097 232	46,00
Rio de Janeiro	Rio de Janeiro	10 827 624	14 391 282	75,20
São Paulo	Baixada Santista	1 476 820	37 032 403	4,00
Santa Catarina	Florianópolis	691 455		12,90
	Foz do Rio Itajaí	319 389	5 356 360	5,96
	N/NE Catarinense	56 598		1,06
	Tubarão	111 285		2,07
Total		30 580 809	-	-

Fonte: IBGE, 2000

À exceção do promontório de Santo Agostinho, no Litoral Sul, de Barra de Catuama e de Pontas de Pedra, ao norte, a costa pernambucana apresenta-se baixa, chegando a atingir, em vários pontos cotas inferiores ao nível do mar. Essa região costeira apresenta uma multiplicidade de ecossistemas extremamente produtivos que incluem segmentos de planícies recobertas por coqueirais remanescentes da Mata Atlântica, estuários com extensos manguezais, recifes de arenitos e de corais, coroas, ilhas e restingas (CPRH/MMA, 1995).

Em Pernambuco a zona costeira foi dividida em três setores nos quais estão inseridos n os municípios litorâneos e estuarinos, como também, os municípios que pela contigüidade com os primeiros; exercem, e/ou recebem influência marcante dos mesmos ou que integrem região geoadministrativa, parcialmente localizada na faixa costeira do Estado, a exemplo da Região Metropolitana do Recife. Com base nesses critérios, a Zona Costeira de Pernambuco foi segmentada nos seguintes setores: o Setor 1 – Norte - compreendendo os municípios de Goiana, Itaquitinga, Itapissuma, Itamaracá, Igarassu, Abreu e Lima e Paulista; o Setor 2 - Núcleo Metropolitano - incluindo os municípios de Recife, Olinda, Jaboatão dos Guararapes, Camaragibe, São Lourenço da Mata e Moreno; e o Setor 3 - Sul - que abrange os municípios de Cabo de Santo Agostinho, Ipojuca, Sirinhaém, Rio Formoso, Tamandaré, Barreiros e São José da Coroa Grande (figura 2) (CPRH, 1995).



Fonte: CPRH (1995)

Figura 2 Zona costeira de Pernambuco

1.3.2 Nutrientes, sua importância econômica e implicações

Segundo Clark (1996, apud MELO, 2007), a área costeira, definida como a faixa de transição entre o continente e o mar, inclui alguns dos mais produtivos e valorizados habitats da biosfera, englobando estuários, lagoas, marismas e franjas de recifes de coral. Apresenta uma dinâmica natural bastante intensa, caracterizando um local com grande importância ambiental, cultural e comercial. Como a zona costeira é densamente povoada, a região sofre grandes problemas por modificações culturais e deterioração ambiental.

Segundo diversos pesquisadores como Tal (2009), as atividades antrópicas tais como a pesca intensiva, a poluição ambiental e a destruição marinha e litoral do habitat, junto com a mudança de clima global, foram ligadas adversamente a uma diminuição significativa na biodiversidade marinha. Segundo (SEM-FIM et al., 2006, apud TAL et al., 2009), a pressão humana sobre a diversidade marinha, conduzirá a um colapso de todos os pescados em 2048. Inverter esta tendência, restaurar a biodiversidade marinha e ainda, a demanda global crescente para o pescado, exigirão a integração do gerenciamento costeiro (PAULY et al., 2002, apud TAL, 2009). Segundo a FAO (2007), durante as últimas cinco décadas, a cultura aquática tem sido o setor do mundo que mais rápido cresceu na produção alimentar.

Segundo Barbieri et al. (1991) e Schultz et al. (2000, apud MELO, 2007), os estuários são áreas de transição entre os ambientes, continental e marinho; apresentam variações abruptas, especialmente na salinidade, representando a principal via de entrada de nutrientes para os oceanos. A entrada de nutrientes aumenta quando os estuários estão localizados em regiões populosas, devido ao aporte de efluentes domésticos, industriais e agrícolas. Esse aumento de concentração de nutrientes tanto na região estuarina, quanto na costeira, acarreta em aumento da produtividade.

Os ambientes estuarinos contribuem para as produções: primária e secundária, e possuem grande capacidade de suportar ações antrópicas por todo o mundo. Estima-se que tal característica de alta produtividade desses ambientes, esteja diretamente relacionada a presença constante de nutrientes, favorecida por várias fontes, que levam a essa dinâmica, ao mesmo tempo em que repõem nutrientes perdidos por morte, degradação e transporte (MONTES, 1996). De acordo com Kemp (1982), os estuários desempenham papel importante na produção primária e caracterizam-se pela diversidade de concentrações de nutrientes.

Segundo Gomes (2005), nutrientes são os elementos em parte responsáveis pela produtividade primária nos oceanos. Por causa do consumo e liberação destes por processos biológicos, as concentrações dos nutrientes variam na água do mar e são ditos não conservativos. Os organismos fotossintetizantes consomem nutrientes na forma de fosfato e nitrato. O silício é envolvido diretamente na produtividade primária, mas exerce um papel vital na precipitação da sílica, importante componente nos esqueletos de alguns organismos marinhos. Portanto, os nutrientes: nitrogênio, fósforo e silício funcionam como biolimitantes ou limitantes da produção primária (CHESTER, RILEY, 1989, apud ESCHRIQUE, 2007).

Bacelar et al. (2009), consideram que as águas marinhas e, sobretudo, as águas costeiras estão a uma exposição cada vez maior às pressões antrópicas. A entrada abusiva de nutrientes e contaminantes provenientes das atividades urbanas, agrícolas e industriais (interferem nos ciclos biogeoquímicos), como também pela exploração das zonas costeiras para a aqüicultura, pesca e turismo, o que torna os recursos da zona costeira vulneráveis à exploração por diferentes partes interessadas. De acordo com Bianchi (2007, apud BERBEL, 2008), desde os anos 80 uma crescente demanda humana nos entornos dos estuários, têm comprometido em grande escala esses ambientes e conseqüentemente sua capacidade regenerativa, e segundo projeções, em 2025, as áreas costeiras, abrigarão 75% da população humana. Portanto, é essencial que seja adquirido maior conhecimento sobre principalmente o ecossistema costeiro para que essas áreas sejam protegidas através de um sensato gerenciamento costeiro (figura 3).



Fonte: www.cfh.ufsc.br/~oceano/documents/ApostilaFISQUIM.pdf

Figura 3 Principais resíduos das atividades antrópicas

Segundo a literatura (ROSEVEL, 2005), a utilização dos ambientes costeiros, em especial, dos sistemas estuarinos, tem propiciado um enriquecimento excessivo de suas águas com altos níveis de material orgânico e nutriente inorgânico, alterações físicas, introdução de materiais tóxicos que são carregados para essas áreas com o fluxo e refluxo das marés. Por exemplo, um aumento da carga de nutrientes pode levar a um efeito direto do aumento da produção primária alterando a cadeia alimentar e, conseqüentemente, aumentar a concentração da matéria orgânica no sistema. A figura 4 ilustra perturbações ambientais que podem alterar substancialmente a dinâmica da estrutura dos ecossistemas costeiros e o efeito

pode produzir a ocorrência de uma cascata trófica (processo de eutrofização) e, eventualmente, a extinção de algumas espécies (BACELAR et al., 2009).



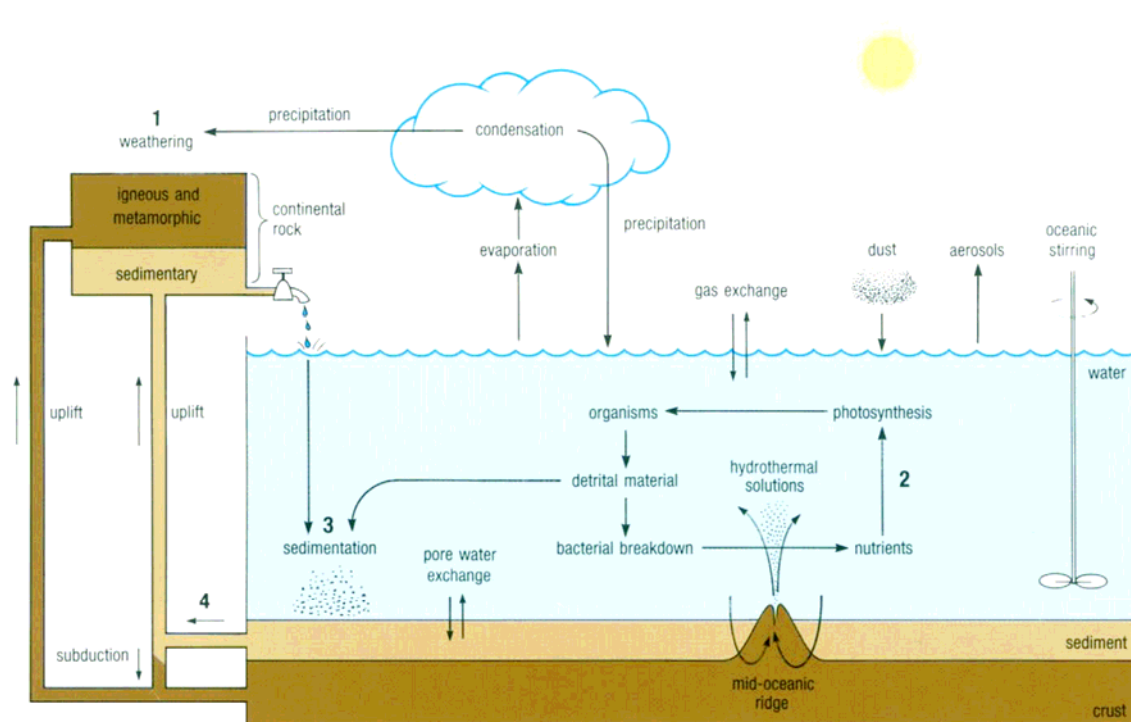
Fonte: www.cfh.ufsc.br/~oceano/documents/ApostilaFISQUIM.pdf

Figura 4 Aspectos das conseqüências dos processos de eutrofização.

Mesmo com toda descaracterização antrópica dos ambientes marinhos, segundo Ricklefs (1996), os ambientes marinhos naturais são os mais produtivos do planeta.

1.3.3 Os Ciclos Biogeoquímicos

Materialmente a Terra é um sistema quase fechado; muito pouca matéria entra ou sai; as transformações sobre ou dentro dela precisam vir de combinações de matéria já existente. Energeticamente, contudo, a Terra é um sistema aberto. Recebe energia constante do sol que precisa re-irradiar de volta para o espaço a fim de manter uma temperatura controlada. (FONTES, 2006). A matéria precisa fluir em ciclos. Os elementos necessários à vida como: água, carbono, oxigênio, nitrogênio, etc., passam por ciclos biogeoquímicos que mantêm sua pureza e a capacidade de serem aproveitados pelas coisas vivas (figura 5). Os nutrientes podem ser encontrados no ambiente marinho (oriundos do intemperismo das rochas e lixiviado para os rios) orgânica ou inorganicamente, dissolvidos e particulados, compondo seres vivos ou apenas em solução, onde cada elemento realiza um ciclo biogeoquímico (BRAGA, 2007).



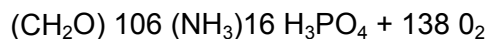
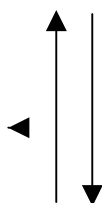
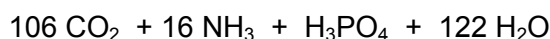
Fonte: Adaptado de: Seawater (1995)

Figura 5 O ciclo global da matéria

1.3.3.1 O ciclo do nitrogênio

O ar atmosférico é constituído por aproximadamente 78% de nitrogênio, portanto, a falta de nitrogênio é um limitante importante da produtividade na imensa maioria dos ecossistemas terrestres e marinhos. Parte integrante de todos os tecidos vivos, entre os biolimitantes, sendo considerado muito importante, pois é indispensável a todas as enzimas, proteínas e ao DNA (molécula que define os caracteres genéticos). Para Moreira e Siqueira (2002 apud ADUAN et al., 2004, a fixação biológica desse nutriente nos oceanos é de apenas 15×10^{12} g N/ano, e como os oceanos recebem 30×10^{12} g N/ano provenientes da precipitação e 36×10^{12} g N/ano dissolvidos em água originada de escoamento superficial. Essa disponibilidade (presença de nitrogênio através da deposição pelos rios) é um fator limitante da produção primária dos oceanos, áreas de estuário e plataforma continental.

Com a demonstração de Redfield (1958) que na composição química do plâncton, as proporções atômicas entre carbono (C), nitrogênio (N) e fósforo (P) são uma razão constante: C:N:P = 106:16:1 (estas concentrações podem variar de acordo com as adaptações das espécies) o que é condição indispensável para um ótimo crescimento fitoplanctônico no ambiente marinho, percebe-se facilmente que luz e nutrientes limitam a produção autotrófica nos ecossistemas aquáticos, o que faz sentido com a equação da fotossíntese:



Segundo Baumgarten (1996) e Montone (2008) no ciclo do nitrogênio (figura 6), encontram-se dissolvidos no oceano, nitrogênio amoniacal, nitrito e nitrato, entre outros (tabela 2).

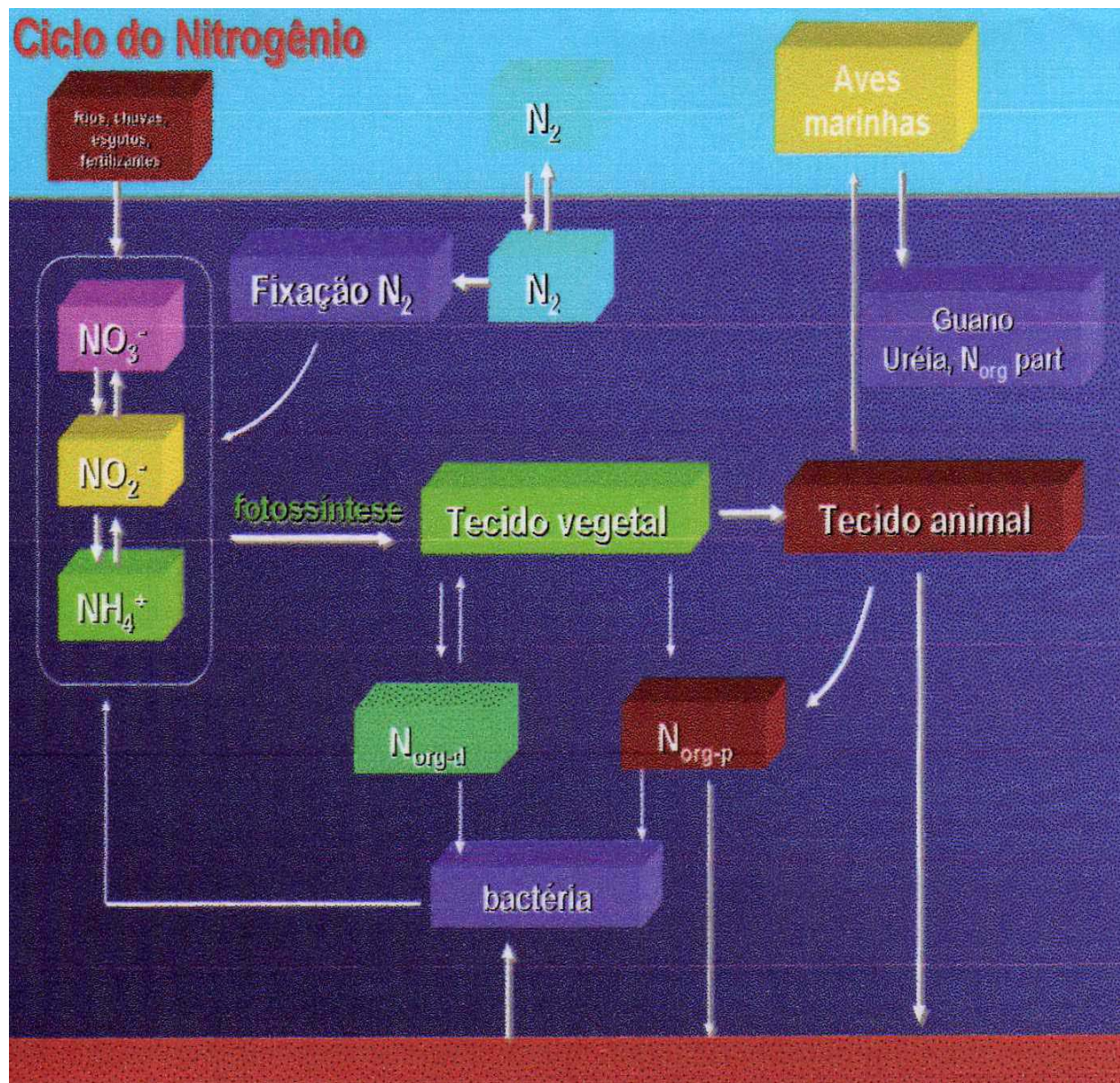
Tabela 2 Distribuição de nitrogênio em ambientes marinhos (μM)

	NO_3^-	NO_2^-	NH_3
Superfície	0,05	0,03	0,1
Fundo	15 - 45	0,03	0,05
Z. Costeira	0,1 - 15	0,1 - 1,0	0,1 - 10
Estuários	0,1 - 200	0,1 - 25	0,1 - 200

Fonte: Montone (2008)

O nitrogênio amoniacal está presente sob duas formas dissolvidas: o amoníaco ou amônia (NH_3) e o íon amônio (NH_4^+), cujas proporções relativas dependem do pH, da temperatura e da salinidade ocorrentes no ambiente. Nas águas marinhas e continentais, a forma predominante é a do íon NH_4^+ ($\text{NH}_3 + \text{HOH} \rightleftharpoons \text{NH}_4^+ + \text{OH}^-$). Como a forma NH_3 é a mais tóxica, as concentrações de NH_4^+ podem se elevar sem que sua toxicidade seja muito crítica, se o pH e a temperatura permanecem dentro de certos limites. Para Aminot, Chaussepied (1983 apud BAUMGARTEN et al., 1996) as concentrações de N - NH_4^+ , em águas costeiras não poluídas e no oceano, geralmente são da ordem de $1\mu\text{M}$. Já para DAY et al. (1987, apud BAUMGARTEN et al, 1996), $5\mu\text{M}$ de concentração, é um valor normal em estuários não poluídos. Em meios anóxicos e em locais próximos a efluentes urbanos, as

concentrações são elevadas, sendo esse parâmetro um bom traçador de contaminação orgânica.



Fonte: Adaptado de Montone, 2008.

Figura 6 Ciclo do nitrogênio em ambiente marinho

1.3.3.2 O ciclo do fósforo

Segundo Costa (2008), o fósforo no oceano contribui em torno de 45% na regulação da quantidade de oxigênio atmosférico, em dissolução nos oceanos (tabela 3), é um nutriente

essencial para a fotossíntese, sendo desta forma um fator limitante da vida, ou seja, há uma limitação do crescimento da população de organismos fotossintetizantes vinculada pela disponibilidade de fósforo dissolvido. A água do mar com pH em torno de 8,5 apresenta o fósforo na forma dos ortofosfatos PO_4^{3-} (10%), HPO_4^{2-} (90%) e H_2PO_4^- (1%). Em águas superficiais do oceano e em zonas costeiras não poluídas, os percentuais de fosfato são geralmente fracos, variando de 0 a $1 \mu\text{M P} - \text{PO}_4^{3-}$. Concentrações altas de fósforo, aliadas com disponibilidade de nutrientes nitrogenados propiciam processos de eutrofização e até de florações indesejáveis. Além, de servirem como indicadores de atividades antrópicas (AMINOT, CHAUSSEPIED, apud BAUMGARTEN et al., 1996).

Tabela 3 Distribuição de fósforo em ambientes marinhos (μM)

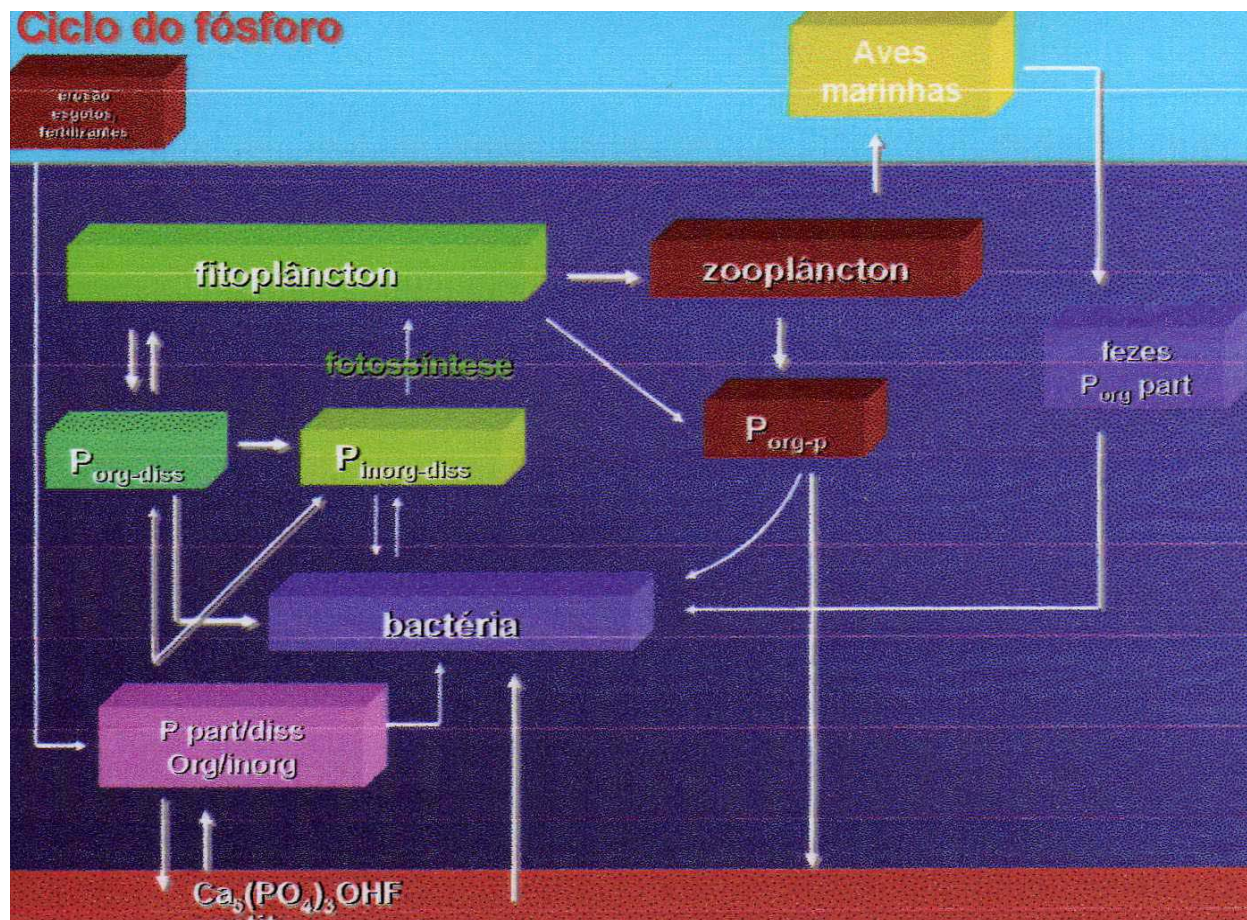
	P inorgânico
Superfície	< 0,05
Fundo	1,0 – 3,0
Zona Costeira	0,3 – 1,0
Estuário	0,3 – 3,0

Fonte: Montone, 2008.

O fósforo transita fracionado em águas naturais, sob os aspectos: dissolvido e particulado. Apresenta-se organicamente como (fosfatases, fosfolipídeos, etc., adsorvidos a agregados orgânicos e a organismos vivos) e inorganicamente como principalmente íons ortofosfatos e adsorvidos a minerais como a apatita ($\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{OH}$). São importantes todas as formas de fósforo, mas, os ortofosfatos, são os que apresentam certa relevância, por ser esta a principal forma de assimilação pelos vegetais aquáticos (ESCHRIQUE, 2007).

O fósforo tem importância para toda e qualquer forma de vida, como estruturador do esqueleto e na conversão de energia, pois processos fundamentais do metabolismo dos seres vivos como formação da molécula de ATP e estruturação da membrana celular (fosfolipídeos), (ESCHRIQUE, 2007).

Ainda, segundo, Esteves (apud ESCHRIQUE 2007), o aporte de fósforo no ambiente estuarino é carregado naturalmente devido a intemperismo de rochas fosfáticas, lixiviação, excreta de animais (figura 7).



Fonte: Adaptado de Montone, 2008.

Figura 7 O ciclo do fósforo em ambiente marinho

1.3.3.3 O silício

Na crosta terrestre, o Si é o segundo mais abundante, somente encontrado em formas combinadas, como a sílica e minerais silicatados. Aproximadamente, 80% dos minerais das rochas magmáticas e metamórficas são silicatos, porém seu teor em rochas sedimentares, é bem menor. (JACKSON, apud LIMA-FILHO et al., 1999). Os sais silicatos são o resultado da combinação da sílica com: O, Al, Mg, Ca, Na, Fe, K e outros e estão presentes nos meteoritos, em todas as águas, na atmosfera, nos vegetais e animais.

O ácido silícico $[(H_4SiO_4 \text{ ou } Si(OH)_4]$ está presente em solução nas águas doces e salgadas (oceanos) de todo mundo, com solubilidade de $2\mu M$ (Tabela 4). A dissolução e a deposição de sílica em água podem ser representadas por: $(SiO_2)_x + 2H_2O \rightleftharpoons (SiO_2)_{x-1} + Si(OH)_4$. (BIRCHALL, apud LIMA-FILHO, 1999).

Tabela 4 Concentração de silício em ambientes marinhos (μM)

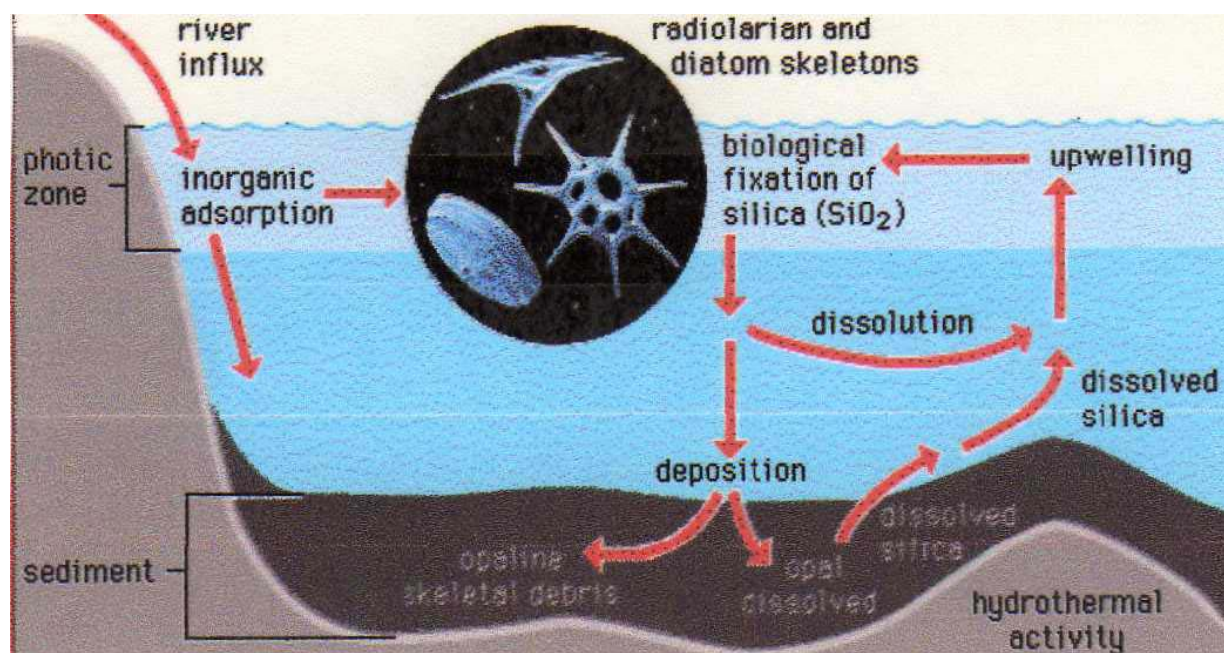
	Material Dissolvido
Superfície	1,0 - 5,0
Fundo	125 - 180 (Atlântico e Pacífico)
Zona Costeira	1 - 25,0
Estuários	1 - 150

Obs: Materiais particulados: areia, quartzo, mica e feldspato > 1 mg.L

Fonte: Montone, 2008

O silício apresenta drenos: abiótico (reação do ácido silícico com o Al formando os HAS (hidroxialuminossilicatos) e bióticos (organismos consumidores de sílica). Esses drenos têm contribuído com uma redução significativa na concentração de ácido silícico no ambiente) que o impedem de uma super abundância na biosfera (EXLEY, apud LIMA-FILHO et al., 1999).

Segundo Exley (1998, apud LIMA-FILHO et al., 1999), a presença do Si no oceano (figura 8), inclui os processos que ligam fontes e drenos do ácido silícico, os quais são conhecidos na produção e deposição de Si na biota. A fração sedimentar do silício inclui o material acumulado cuja dissolução ocorre lentamente num duplo processo, compreendendo etapas: terrestre e marinha. Os aportes terrestres, as águas doces, alimentam o ambiente marinho. Os rios contendo um valor médio de $0,15 \mu\text{M}$ de Si contribuem em torno de 80% do Si dissolvido que flui para os oceanos, totalizando $6,1 \pm 2 \times 10^{12}$ moles por ano. Uma parte deste Si é utilizada por organismos marinhos, como diatomáceas, radiolárias, silicoflagelados, (espécies planctônicas) e espongiários na construção de exoesqueletos que provavelmente é absorvido co-transportado com o Na, onde sua carência afeta drasticamente a síntese de clorofila nestes organismos, o que demonstra sua essencialidade como nutriente limitante da vida (WERNER, 1977, RAVEN, 1983, LIMA-FILHO et al., 1999). Nos oceanos, o Si é encontrado numa concentração baixa, cerca de $1 \mu\text{M}$, Porém, em zonas costeiras e em regiões estuarinas, apresenta concentrações maiores, em torno de $150 \mu\text{M}$ e não representa um poluente em potencial (BAUMGARTEN et al., 1996).



Fonte: Adaptado de Enciclopédia Britânica (1996 apud MONTONE, 2008).

Figura 8 O silício em ambiente marinho

1.3.4 Histórico da literatura sobre nutrientes em ambiente marinho

No âmbito do objetivo deste trabalho, poucas referências foram encontradas para a zona costeira de Pernambuco que serviram como parâmetros. Segue então, as que fazem menção às regiões oceânica e costeira do Nordeste do Brasil.

Segundo Montes (2003), no Nordeste do Brasil, a pesquisa oceanográfica se iniciou em 1952 com a fundação do Instituto de Biologia Marinha e Oceanografia em Pernambuco (atual Departamento de Oceanografia da Universidade Federal de Pernambuco-UFPE), com publicações dos resultados das pesquisas a partir de 1959.

Em 1996, Montes, dissertou sobre Variação Nictemeral do Fitoplâncton e parâmetros hidrológicos no Canal de Santa Cruz, Itamaracá, PE.

Em 2000, Advíncula, estudou sobre os elementos nutrientes na camada fótica da região oceânica entre Recife (PE) e Salvador (BA).

Em 2001, G. Albuquerque, relacionou a precipitação pluviométrica do setor leste do Nordeste do Brasil com anomalias de temperaturas da superfície do mar e ventos à superfície oceânica.

Em 2002, Pinto, Tosta et al., publicaram o artigo: Distribuição de Larva de *Katsuwonus pelamis* (Pisces, Scombridae), em larga escala na Zona Econômica Exclusiva do Nordeste do Brasil cujo objetivo foi delimitar a distribuição espacial e sazonal e analisar a influência de fatores oceanográficos (temperatura, salinidade, biomassas primária e secundária) sobre a densidade de larvas de *Katsuwonus pelamis*.

Em 2003, Montes defendeu a tese: Fatores que influenciam na produtividade dos oceanos - a importância do fluxo de difusão dos nutrientes para a biomassa do fitoplâncton na região oceânica do Nordeste Brasileiro, tendo por objetivo caracterizar a região oceânica correspondente à zona econômica exclusiva do nordeste brasileiro.

Em 2004, Mafalda Jr et al. publicaram o artigo: Distribuição e abundância do ictioplâncton na costa norte da Bahia, onde foram estudadas as variações espaciais e sazonais da distribuição e abundância do ictioplâncton na costa norte da Bahia.

Em 2005, Dias dissertou sobre Dinâmica do Sistema Estuarino Timonha/Ubatuba (Ceará-Brasil) – cujas considerações ambientais contribuíram com informações úteis para o uso adequado e sustentável da área. Também nesse mesmo ano, Lima, et al. publicaram, o artigo: Distance Approach to Cubic Splines on Irregularly Distributed Physical Data from the Brazilian Northeastern Coast.

Em 2006, Chaves e colaboradores publicaram o artigo: Biomassa planctônica e hidrografia na zona econômica exclusiva do Nordeste do Brasil cujo objetivo foi realizar uma avaliação da distribuição espacial e temporal da biomassa planctônica e suas relações com as condições oceanográficas e pluviosidade na zona econômica exclusiva do Nordeste Brasileiro.

Em 2007, Júnior e Souza, publicaram: Biomassa planctônica e massas d'água nas zonas costeira e oceânica do Nordeste Brasileiro. Eschrique dissertou sobre a Hidrogeoquímica do Fósforo no Estuário do Jaguaribe (CE) que avaliou a distribuição espacial do fósforo presente na coluna d'água e no sedimento de superfície do estuário do Jaguaribe e a sua dependência das influências antropogênicas e da variabilidade hidroquímica sazonal. Souza dissertou sobre Circulação hidrodinâmica na região costeira dos municípios de Recife e Jaboatão dos Guararapes durante o verão austral que teve como objetivo principal analisar a circulação e o potencial de transporte na região costeira dos referidos municípios.

Em 2008, Júnior e Souza publicaram o artigo: Distribuição e abundância de Carangidae (Teleostei, Perciformes) associadas com fatores oceanográficos ao longo da zona econômica exclusiva do Nordeste Brasileiro, onde foram estudadas a distribuição e a abundância da Carangidae larvae e análise da influência de fatores hidrológicos e biológicos na distribuição espacial e temporal da larva.

1.4 Referências Bibliográficas

ADUAN, R. E; VILELA, M. F; REIS-JÚNIOR, F. B. **Os grandes ciclos biogeoquímicos do Planeta**. Embrapa, 2004. 25 p.

BAUMGARTEN, M. G. Z. **Manual de análises em oceanografia química**, 1996. 132 p.

BERBEL, G. B. B. **Estudo do fósforo sedimentar e de suas especiações químicas em dois sistemas costeiros e Plataforma Continental Sudeste (Brasil) e Baía do Almirantado (região antártica) considerando suas relações biogeoquímicas**. p.102, 2008.

BRAGA, E. **Laboratório de nutrientes micronutrientes traços nos oceanos**. 2007.

BACELAR, F. S. **Joint effects of nutrients and contaminants on the dynamics of a food chain in marine ecosystem**. 2009, p. 24-32.

COSTA, C. G. R. **O fósforo no oceano**, 2008.

CPRH. Diagnóstico Socioambiental - Litoral Sul de Pernambuco, 1995.

EDWARDS, A. LIPIATOU, E. **Ocean forecasting: conceptual basis and applications**. 2002

ESCHRIQUE, S. A. **Hidroggeoquímica do fósforo no estuário do Jaguaribe**. CE, 2007

FAO. **Food and agricultural organization of the united nations**, 2007. 129 p.

FONTES, J. Disponível em: <http://ecounemat.blogspot.com/2006/10/ciclos-biogeoquimicos-4_28.html - 24k>. Acesso em: 10 fev. 2010.

MONTES, M. J. F. **Variação nictemeral do fitoplâncton e parâmetros hidrológicos no Canal de Santa Cruz, Itamaracá, PE**. Dissertação de Mestrado em Oceanografia Biológica, UFPE, 1996. 124 p.

MONTES, M. J. F. **Fatores que influenciam na produtividade dos oceanos**. Tese de Doutorado em Oceanografia, UFPE. 2003. 198 p.

GOMES, A. S. **Propriedades Físico-Químicas da Água**. Departamento de Biologia Marinha UFF. 2005.

IBGE, **Censo Demográfico** de 2000.

JABIONSKI, S.; FILET, M. **Coastal management in Brazil: A political riddle**. 2008.

KEMP, W. M. **Nitrogen cycling and estuarine interfaces: some current concepts and research directions**. p. 209-226. 1982.

LIMA FILHO, O.F.; LIMA, M.T.G.; TSAI, M.S. **O silício na agricultura**. 1999.

MELO, A. A. S. **Nutrientes dissolvidos e biomassa primária nos estuários dos rios Botafogo e Carrapicho – PE**. Dissertação de Mestrado em Oceanografia Biológica/UFPE. 2007. 93 p.

MONTONE, R. C. **Fundamentos de Oceanografia Química - Nutrientes no Oceano**, IOUSP, 2008.

MOREL, A.; BERTHON, J. F. **Surface pigments, algal biomass, profile, and potential production of the euphotic layer: relationships reinvestigated in view of remote sensing applications**. v. 34, p. 1545-1562. 1989.

RÉ, M. A. B. **Biologia Marinha**. Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, 2000.

RICKLEFS, R. E. **A Economia da natureza um livro texto em ecologia básica**. 3. ed. Rio de Janeiro. p. 470, 1996.

ROSEVEL, S. M. **Variação espacial e temporal da comunidade microfitoplanctônica em ecossistemas costeiros localizados no litoral Sul de Pernambuco**. p.147. 2005.

REVIZEE - Programa. **Coordenação Geral do Programa REVEZEE**. Ministério do Meio Ambiente dos Recursos Hídricos e da Amazônia Legal. Brasília, 1996. 32 p.

TAL, Y. **Environmentally sustainable land-based marine aquaculture**, 2009. p.28-35.

STROHAECKER T. M. **A dinâmica socioespacial da zona costeira brasileira**, 2009. Disponível em: <<http://www.cfh.ufsc.br/~oceano/documents/ApostilaFISQUIM>>. Acesso em: 19 jan. 2010.

CAPÍTULO II

2.1 Introdução

Segundo Fragoso (2004), o oceano é um ambiente hostil, o que torna seu estudo difícil e dispendioso. Os instrumentos oceanográficos requerem uma tecnologia mais avançada para realizar medições sob condições de agitação, causada por ondas na superfície que podem chegar a vários metros e sob pressões no fundo até centenas de vezes maiores do que a atmosférica. A partir dos anos 70, iniciou-se uma grande inovação tecnológica dos equipamentos, como a utilização dos fundeios (ancoradouros), equipados com correntômetros (medidores de correntes marinhas) adquirindo dados por períodos mais longos de tempo em toda a coluna d'água e a criação dos derivados de flutuação neutra. Aliado a isso, houve uma multiplicação exponencial do poder computacional e conseqüentemente, da capacidade de resolução e sofisticação dos modelos numéricos oceânicos. Com isso, passou-se a conhecer o oceano de maneira mais ampla, o que foi ainda mais enriquecido com o fornecimento em caráter operacional de dados obtidos por sensoriamento remoto.

Por sua complexidade, o ambiente marinho com suas regiões oceânicas e costeiras, vem mostrando que o emprego de recursos como a modelagem matemática, desponta como uma ferramenta de grande importância tanto na elaboração de projetos, como no auxílio à gestão dos sistemas naturais (SOUZA, 2007).

A aplicação de modelos numéricos a zonas costeiras pode indicar uma previsão melhor dos fluxos de nutrientes associados com suas transferências e transformações (JAY et al., 1997 apud HU, 2009).

Utilizando-se modelos matemáticos que considerem: temperatura, luz, nutrientes e concentrações de clorofila a, como variáveis de entrada, pode-se simular fluxos de nutrientes no oceano (LAWES et al., 2002)

Neste trabalho, utilizamos os modelos de interpolação de curvas multivariadas que, por projeção para a região costeira, interpolem dados superficiais dos nutrientes: nitrogênio (N), fósforo (P) e silício (Si), obtidos da Zona Oceânica de Pernambuco. Tal validação fornecerá uma base para escolha futura de um modelo preditivo totalmente adaptado às especificidades da temática estudada.

Os modelos utilizados foram: o método de Diagrama de Dispersão, que consiste em um gráfico que relaciona cada variável independente como função da variável de resposta (NIELSON, 1993). Como é pouco provável obter uma função que passe exatamente por todos os pontos do diagrama de dispersão, opta-se frequentemente pela obtenção de uma curva que melhor ajuste estes pontos (RIDGWAY, DUNN, 2002). O método mais comum de ajuste é conhecido como Método dos Quadrados Mínimos e faz parte de uma classe mais ampla de

métodos conhecidos como parametrizáveis que consistem em: dada uma função conhecida de aproximação dos pontos, obtém-se os valores de uma classe de números fixos ou parâmetros, cujos valores podem ser utilizados para se obter relações entre as diversas variáveis em estudo (CARLSON, FRITSCH, 1985 e 1989).

2.2 Materiais e Métodos

2.2.1 Caracterização do estudo de caso

Foram comparados diversos modelos de interpolação de curvas multivariadas que, por projeção para a região costeira, interpolem dados superficiais dos nutrientes: N, P e Si, obtidos da Zona Oceânica de Pernambuco através do REVIZEE – SCORE NE (limites: do rio Parnaíba a cidade de Salvador) no período: verão de 1997, validando-os conforme sua reprodução de dados chaves que, não utilizados na fase de modelagem, ainda assim sejam previamente conhecidos.

2.3 Resultados e discussão

2.3.1 Modelos matemáticos para interpolação e ajuste de curvas

É freqüente, em modelagem matemática, especificar como a variação de um conjunto de parâmetros interfere no valor de certa variável de resposta. Por exemplo, pode-se estabelecer que a concentração de um dado nutriente (variável de resposta) em uma dada região marinha depende da época do ano e da profundidade ao longo da região.

Uma forma comum de entender tal dependência consiste em comparar a relação entre os parâmetros e a variável de resposta (tabela 5).

E neste caso, estima-se qual a concentração esperada em uma profundidade não, necessariamente, tabelada – digamos 25 m no verão. Estimativas baseadas em valores intermediários aos extremos dos dados tabelados (como no exemplo anterior) são chamadas de interpolações. Se as estimativas forem sobre valores fora dos intervalos tabelados (0 a 40 m) tem-se o caso de extrapolações. Como era de se esperar, interpolações costumam, por exemplo, saber qual a concentração esperada no outono que são mais precisas que extrapolações. No que segue, discute-se a teoria relativa ao processo de interpolação e ajuste de curvas.

Tabela 5 Profundidade, concentração de nutrientes em função da época do ano

Época do Ano	Profundidade	Concentração (mg/m³)
Verão - 1997	10 m	0.2113249
Primavera - 1997	10 m	0.6653811
Outono - 1997	10 m	0.8782165
Inverno - 1997	10 m	0.7263507
Verão - 1998	20 m	0.7560439
Primavera - 1998	20 m	0.6283918
Outono - 1998	20 m	0.0683740
Inverno - 1998	20 m	0.1985144
Verão - 1999	30 m	0.0002211
Primavera - 1999	30 m	0.8497452
Outono - 1999	30 m	0.5608486
Inverno - 1999	30 m	0.5442573

Conforme anteriormente dito, é bastante comum em engenharia, a realização de testes de laboratório para a validação de sistemas reais. Os resultados são obtidos na forma de pontos cujo comportamento demonstra o relacionamento de uma variável independente (ou explicativa) com uma, ou mais, variável dependente (ou resposta). O gráfico destes pontos é chamado de diagrama de dispersão.

Entretanto, dado um diagrama de dispersão, é pouco provável que haja uma curva que passe exatamente por cada ponto e que descreva fielmente o sistema observado em laboratório. À razão disto, é que, à obtenção de dados experimentais possuem erros inerentes ao processo. Além do mais, algumas variáveis podem sofrer alterações durante o experimento, o que irá provocar desvios na resposta.

Dessa forma, para definir uma função analítica que descreva o sistema, em geral, não se deve optar por uma forma polinomial interpoladora dos pontos fornecidos, e sim, uma curva que melhor se ajusta a estes pontos levando em consideração a existência de erros que, em geral, não são previsíveis (figura 9).

Uma das vantagens de se obter uma curva que se ajusta adequadamente a estes pontos é a possibilidade de prever os valores da função (variável dependente) para valores da variável explicativa que estão fora do intervalo fornecido. Ou seja, é possível fazer uma extrapolação com uma aproximação razoável.

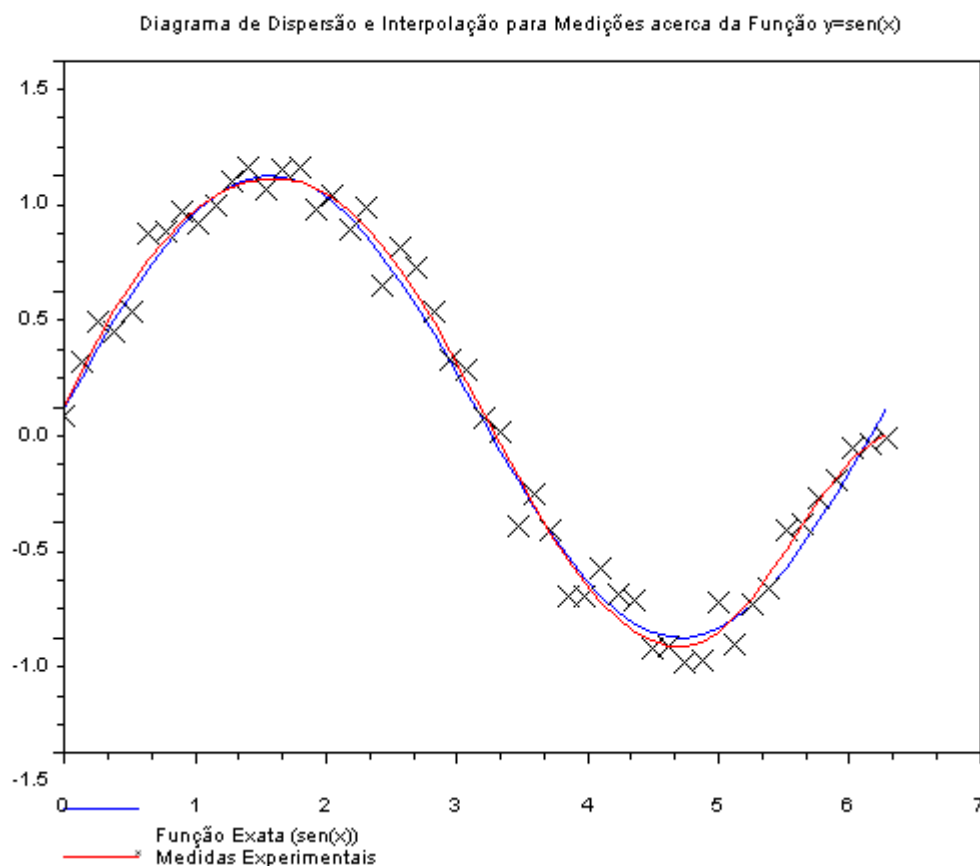


Figura 9 Diagrama de dispersão para medidas (X) de valores da função $y = \text{sen}(x)$ feitas em papel milimetrado. Observe o erro experimental da medida com relação ao real valor da função (curva contínua azul). A curva contínua vermelha refere-se ao ajuste dos pontos por polinômio interpolador de grau 3 (cúbica).

Como o sistema do experimento é descrito por um conjunto de pontos, então a abordagem a ser apresentada será válida para os casos discretos. Assim, o problema de ajuste de curvas no caso em que se tem uma tabela de pontos $(x_1; y_1), (x_2; y_2), \dots, (x_n; y_n)$, com x_i pertencentes ao intervalo $[a, b]$, consiste em dadas $m + 1$ funções $g_0(x), g_1(x), \dots, g_m(x)$, contínuas em $[a, b]$, obter $m + 1$ coeficientes f_0, f_1, \dots, f_m de tal forma que

$$f(x) = f_0g_0(x) + f_1g_1(x) + \dots + f_mg_m(x)$$

se aproxime de $y(x)$, que fornece os valores y_1, y_2, \dots, y_n dos pontos tabelados.

Este é um modelo matemático linear do sistema real onde os coeficientes f_i a serem determinados aparecem linearmente arranjados, embora as funções $g_i(x)$ possam ser não-lineares, como, por exemplo, $g_0(x) = e^x$ e $g_1(x) = 1 + x^2$.

O grande problema é como escolher adequadamente estas funções. Para isto, normalmente faz-se a observação do diagrama de dispersão para ver a forma geral dos pontos, ou então deve basear-se em fundamentos teóricos do experimento que fornece a tabela.

Uma idéia para que a função $f(x)$ se ajuste aos pontos y_i é fazer com que o desvio, ou erro, $d_i = |y_i - f(x_i)|$ seja mínimo para todo $i = 1, 2, \dots, n$. Assim, definindo uma medida mais abrangente que envolve a soma destes desvios elevados ao quadrado tem-se:

$$D = \sum_{i=1}^n |y_i - f(x_i)|^2$$

O que se busca então é determinar os f_i para que D seja mínimo. Este processo de minimização é chamado de Método dos Mínimos Quadrados, uma vez que D é definido por uma soma de quadrados.

Do cálculo diferencial, sabe-se que para determinar o valor mínimo de uma função (ou o seu valor crítico) deve-se derivar parcialmente esta função em relação às variáveis obtendo, após a resolução do sistema formado por cada equação assim obtida, o valor dos parâmetros f_i .

2.3.2 Ajuste Linear

O modelo mais simples de relacionar duas variáveis é através de uma equação de reta, caracterizando um comportamento linear do sistema que foi submetido ao experimento. Se a distribuição dos pontos no diagrama de dispersão assumir uma aparência de uma reta, então é conveniente afirmar que:

$$g_0(x) = 1$$

$$g_1(x) = x$$

$$g_2(x) = g_3(x) = \dots = g_m(x) = 0$$

o que faz com que o modelo matemático que se ajuste aos pontos do diagrama de dispersão seja uma equação de reta, dada por:

$$f(x) = A_0 + A_1x$$

O problema então é determinar A_0 e A_1 . Sabe-se, porém, que para diferentes valores destes coeficientes (ou parâmetros) haverá diferentes retas que se ajustam aos pontos.

Derivando parcialmente a equação para a função de desvio quadrático

$$D = \sum_{i=1}^n (y_i - f(x_i))^2 \text{ para os coeficientes } A_0 \text{ e } A_1 \text{ da função } f(x) = A_0 + A_1x \text{ obteremos}$$

$$\frac{\partial D}{\partial A_0} = -2 \sum_{i=1}^n (y_i - f(x_i)) = 0$$

$$\frac{\partial D}{\partial A_1} = -2 \sum_{i=1}^n x_i (y_i - f(x_i)) = 0$$

o que pode ser resolvido, lembrando que $f(x_i) = A_0 + A_1 x_i$ como um sistema linear encontrando as chamadas **equações normais**:

$$A_0 = \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n} - A_1 \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$$

$$A_1 = \frac{n \sum_{i=1}^n x_i y_i - \left(\sum_{i=1}^n x_i \right) \left(\sum_{i=1}^n y_i \right)}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2}$$

A “qualidade” deste ajuste pode ser estimada pelo coeficiente de correlação (r) cuja expressão matemática é dada por

$$r = \frac{n \sum_{i=1}^n x_i y_i - \left(\sum_{i=1}^n x_i \right) \left(\sum_{i=1}^n y_i \right)}{\sqrt{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2} \sqrt{n \sum_{i=1}^n y_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n y_i \right)^2}}$$

E cujo valor quadrático, isto é, r^2 , varia entre zero – que significa um ajuste idêntico ao que seria obtido se feito em variáveis completamente não correlacionadas – a um – que significa um ajuste no qual as variáveis, de fato, exibem forte dependência linear uma com relação à outra.

O exemplo a seguir ilustra os conceitos.

A tabela 6 é relativa aos dados coletados durante o verão de 1997 dos nutrientes: N, P e Si segundo o projeto REVIZEE-SCORE-NE.

Tabela 6 Dados coletados de concentração de nitrato, fosfato e silicato em diferentes estações durante o verão de 1997 na Costa Pernambucana.

Estação	latitude	longitude	nitrato	fosfato	silicato
			$\mu\text{mol.L}^{-1}$	$\mu\text{mol.L}^{-1}$	$\mu\text{mol.L}^{-1}$
32	7,47957	34,536	0,293	0,001	16,735
33	7,56297	35,55025	0,338	0,015	12,929
34	7,51499	33,17069	0,360	0,015	12,929
182	8,12367	34,7025	0,557	0,098	9,123
183	8,21017	34,073	0,294	0,059	16,063
184	8,9665	34,33917	0,321	0,049	10,298
185	8,74983	34,94267	0,489	0,123	3,862

Fonte: REVIZEE (1996).

Verifica-se neste caso, se há correlação entre as concentrações do nitrato e do fosfato. Mas especificamente, se o valor da concentração do fosfato depende de alguma forma do valor da concentração do nitrato. O diagrama de dispersão destas duas grandezas está ilustrado na figura 10.

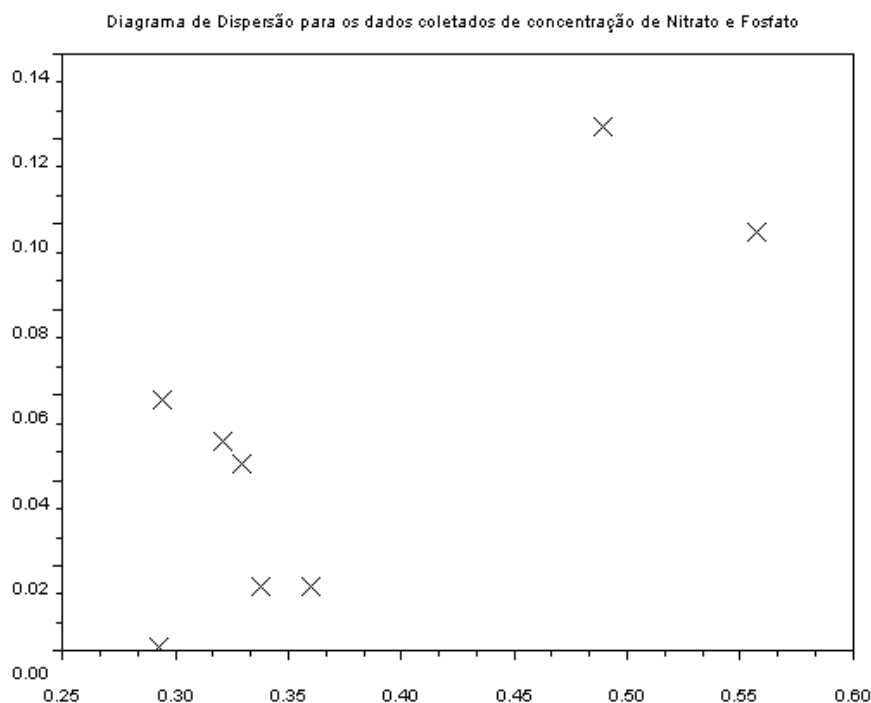


Figura 10 Diagrama de dispersão para os dados relativos à concentração de Nitrato (eixo X) e fósforo (eixo Y) em diferentes estações durante o verão de 1997 na Costa Pernambucana.

Calculando os valores necessários obteve-se os seguintes resultados:

$$\sum_{i=1}^n x_i = 2.981$$

$$\sum_{i=1}^n y_i = 0.404$$

$$\sum_{i=1}^n x_i^2 = 1.176$$

$$\sum_{i=1}^n x_i y_i = 0.173$$

$$\sum_{i=1}^n y_i^2 = 0.033$$

$$\left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2 = 8.886$$

$$\left(\sum_{i=1}^n y_i \right)^2 = 0.163$$

Outros valores determinados: $A_0 = -0.077$, $A_1 = 0.341$ e $r^2 = 0.609$.

O valor do erro acumulado do ajuste foi obtido, utilizando a seguinte equação:

$$D = \sum_{i=1}^n (y_i - f(x_i))^2 = 0.05.$$

A figura 11 ilustra como a reta obtida representa os pontos dados. Note que o coeficiente de correlação (em torno de 61%) indica algum grau de dependência entre as duas variáveis. A figura 12 mostra o valor do desvio ponto a ponto.

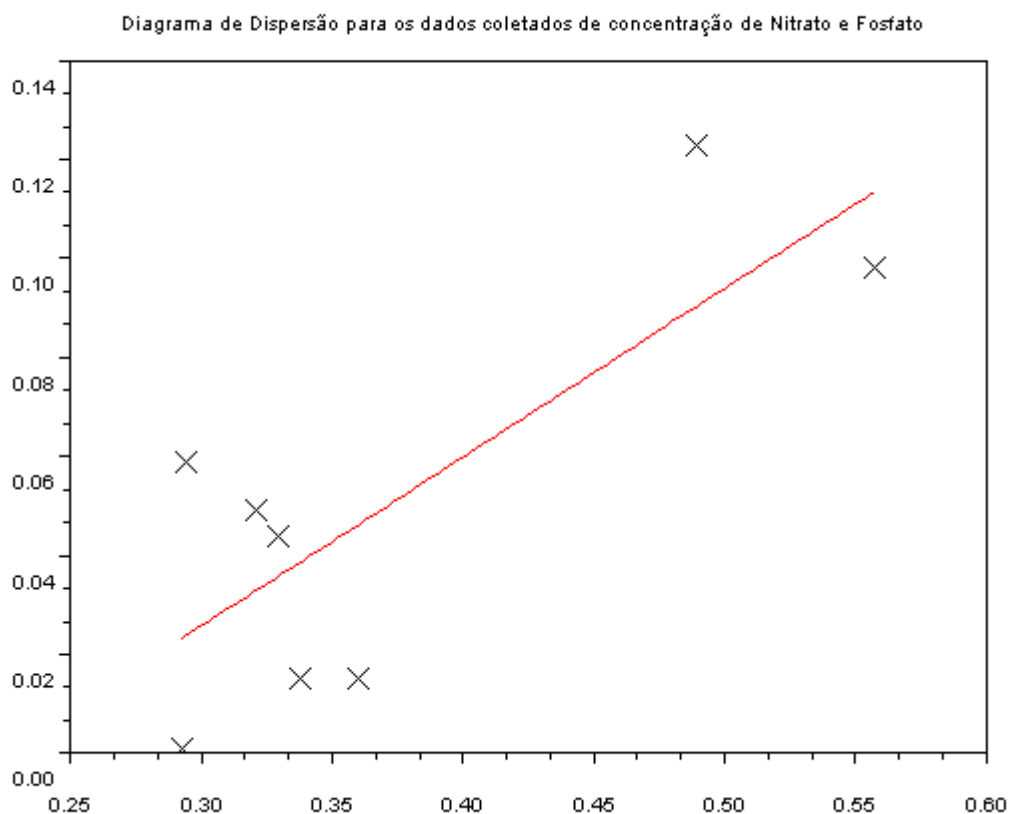


Figura 11 Diagrama de dispersão para os dados relativos a concentração de Nitrato (eixo X) e fósforo (eixo Y) em diferentes estações durante o verão de 1997 na Costa Pernambucana. A reta (vermelha) foi obtida pelo ajuste linear dos pontos.

Diagrama de Dispersão para os desvios entre as concentrações coletadas e estimadas de Fósforo e a concentração de Nitrato

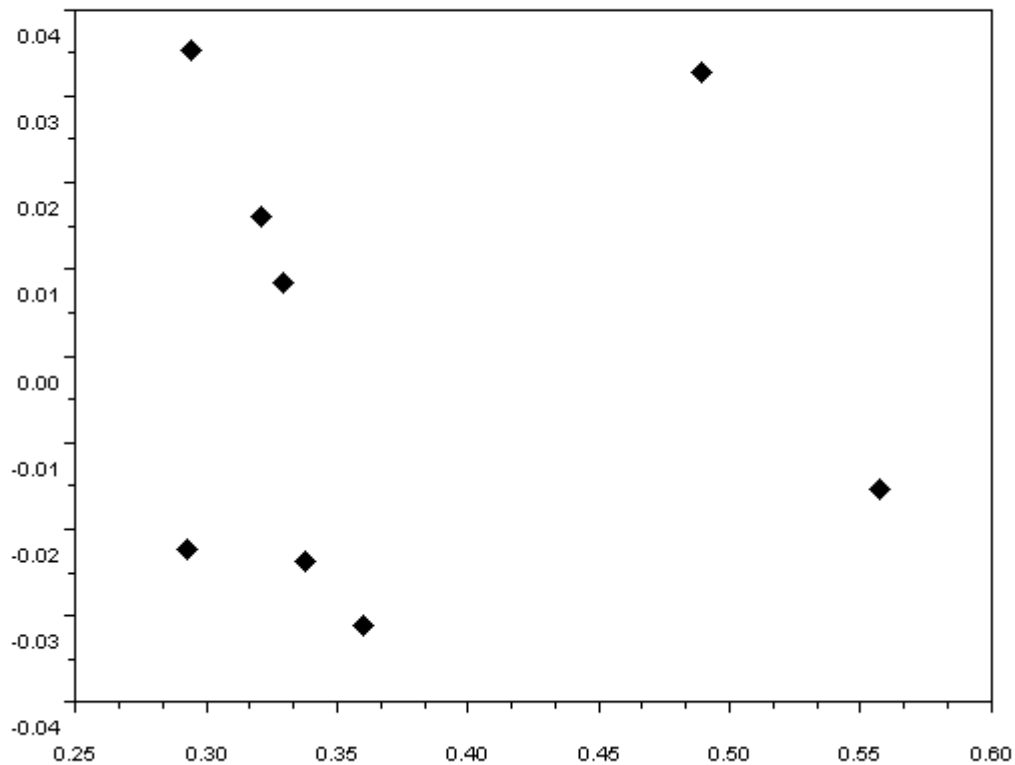


Figura 12 Diagrama de dispersão para os dados relativos a concentração de nitrato (eixo X) e fósforo (eixo Y) em diferentes estações durante o verão de 1997 na costa pernambucana. Cada ponto marcado refere-se à diferença encontrada entre o valor real coletado da concentração do fósforo e o valor estimado pelo ajuste linear.

2.3.3 Ajuste Linear Múltiplo

Quando, em uma experiência, a variável resposta depende de duas ou mais variáveis explicativas e o gráfico de dispersão apresenta um comportamento linear, pode-se então aplicar o ajuste linear múltiplo.

Para estes casos tem-se:

$$\begin{aligned}
 g_0(x) &= 1 \\
 g_1(x) &= x_1 \\
 g_2(x) &= x_2 \\
 &\dots \\
 g_m(x) &= x_m
 \end{aligned}$$

onde x_i , com $i = 1, 2, \dots, m$, são variáveis distintas entre si.

Isto resulta na seguinte equação:

$$f(x) = A_0 + A_1X_1 + A_2X_2 + \dots + A_mX_m$$

Pode-se mostrar de maneira análoga ao ajuste linear simples, que as estimativas de A_j que minimizam a soma dos quadrados dos desvios são a solução do seguinte sistema de equações lineares:

2.3.4 Ajuste Polinomial

Um caso especial de ajuste de curvas ocorre quando, o diagrama de dispersão não apresenta as características lineares presentes nos outros tipos de ajuste. Nestas situações pode-se realizar o ajuste polinomial utilizando as seguintes funções $g_i(x)$:

$$g_0(x) = 1$$

$$g_1(x) = x$$

$$g_2(x) = x^2$$

$$g_3(x) = x^3$$

...

$$g_m(x) = x^m$$

Deste modo, tem-se a seguinte equação:

$$f(x) = A_0 + A_1x + A_2x^2 + \dots + A_mx^m$$

ou seja, $f(x)$ é um polinômio de grau m . Do estudo de interpolação polinomial, sabe-se que estes polinômios são apropriados para aproximar funções de maneira satisfatória (como exemplo tem-se a Série de Taylor). É possível ainda perceber que o ajuste polinomial é um caso particular do ajuste linear múltiplo, porém utilizando uma única variável independente.

2.4 Conclusão

As estimativas das concentrações dos nutrientes N, P e Si da costa marinha no Estado de Pernambuco geraram informações que darão suporte a atividades futuras de pesca artesanal. O apoio científico serve de suporte para o aumento da demanda pesqueira que é de interesse econômico para a região, considerando ser uma zona costeira.

2.5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CARLSON, R. E.; FRITSCH, F. N. Monotone Piecewise Bicubic Interpolation, **SIAM J. Numer. Anal.** v. 22, n. 2, p. 386, 1985.

CARLSON, R. E.; FRITSCH, F. N. An Algorithm for Monotone Piecewise Bicubic Interpolation, **SIAM J. Numer. Anal.** v. 26, n. 1, p. 230, 1989.

FRAGOSO, M. R. **Um modelo Numérico da Circulação Oceânica para as Bacias Leste e Sudeste do Brasil** – Tese de Dissertação de Doutorado, UFRJ, p.173. 2004.

HU, J.; LI, SHIYU. Modeling the mass fluxes and transformations of nutrients in the Pearl River Delta, **China**. p. 146-167. 2009.

LAWS, E.; SAKSHAUG, E.; BABIN, M.; DANDONNEAU, Y.; FALKOSWSKI, P.; GEIDER, R.; LEGENDRE, L.; MOREL, A., SONDERGAARD, M., TAKAHASHI, M., WILLIAMS, P.J. **Photosynthesis and primary productivity in marine ecosystems: practical aspects and application of techniques**. 2002. 89 p.

NIELSON, G. M. A Method for Interpolating Scattered Data Based upon a Minimum Norm Network, **Math. Comp.** v. 40, 1983, 253 p.

REVIZEE. Programa. **Coordenação Geral do Programa REVEZEE**. Ministério do Meio Ambiente dos Recursos Hídricos e da Amazônia Legal. Brasília, 1996. 32 p.

RIDGWAY, K. R.; DUNN, J. R. Ocean Interpolation by Four-Dimensiona Weighted Least Squares – Application to the Waters around Australasia. **J. of Atmosph. and Ocean. Techn.**, v. 19, n. 9, 2002, p. 1357.

SOUZA, P. F. R. **Circulação hidrodinâmica na região costeira dos municípios de Recife e Jaboatão dos Guararapes durante o verão austral**. 2007. 109 p.

CAPÍTULO III

CONCLUSÕES GERAIS

As estimativas das concentrações dos nutrientes N, P e Si da costa marinha no Estado de Pernambuco geram informações que dão suporte a atividades futuras de pesca artesanal.

O apoio científico serve de suporte para o aumento da demanda pesqueira que é de interesse econômico para a região, considerando ser uma zona costeira.

A exploração das zonas costeiras para a aqüicultura, pescado e turismo, torna seus recursos vulneráveis à exploração por diferentes partes interessadas, podendo levar a exaustão, os ecossistemas costeiros.

Toda legislação ambiental marinha precisa sempre de revisão. Porém, os órgãos ambientais aos níveis dos três poderes constituídos são inoperantes, negligentes e omissos em aplicar a lei, além disso, há vulnerabilidade nesses órgãos, sujeitos a pessoal reduzido e desqualificado para a função, além da amplitude dos ambientes costeiros e principalmente, a falta de investimentos em todos os níveis por parte do Governo.

Portanto, é essencial que o conhecimento sobre ecossistema costeiro é primordial para a proteção dessas áreas através de um sensível e responsável gerenciamento.