

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS**

**ANÁLISE GEOMATEMÁTICA DE DADOS HIDROGRÁFICOS,  
SEDIMENTOLÓGICOS E DAS ASSOCIAÇÕES DE FORAMINÍFEROS  
DO CANAL DE SÃO SEBASTIÃO, SP**

**Priscilla Pinto da Fonseca**

**Orientador: Profa. Dra. Wânia Duleba**

**Co-orientador: Prof. Dr. Marcelo Monteiro da Rocha**

**MONOGRAFIA DE TRABALHO DE FORMATURA  
(TF - 2007/ 34)**

**SÃO PAULO  
2007**

TF  
F676  
PP.a

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS**

DEDALUS - Acervo - IGC



30900024348

**ANÁLISE GEOMATEMÁTICA DE DADOS HIDROGRÁFICOS,  
SEDIMENTOLÓGICOS E DAS ASSOCIAÇÕES DE FORAMINÍFEROS  
DO CANAL DE SÃO SEBASTIÃO, SP**

**Priscilla Pinto da Fonseca**



**Orientador: Profa. Dra. Wânia Duleba  
Co-orientador: Prof. Dr. Marcelo Monteiro da Rocha**

**MONOGRAFIA DE TRABALHO DE FORMATURA  
(TF - 2007/ 34)**

**SÃO PAULO  
2007**

**"Affirmatio unius non est negatio alterius"**

Aristóteles (384 - 322 a.C.)

*("A afirmação de uma coisa não é a negação de outra")*

## **Agradecimentos**

Aos orientadores Wânia Duleba e Marcelo Monteiro da Rocha pelo conhecimento compartilhado, pela atenção e paciência e principalmente pela oportunidade de estudar e aprender novos métodos de análise de dados. Ao professor Thomas Rich Fairchild e ao Jason Donald Kirk pela revisão do abstract.

A todos aqueles que me ajudaram durante esses cinco anos: amigos e colegas do laboratório de Micropaleontologia (particularmente, Andreia, Juliana, Silas, Rafaela, Luciana, Maria Fernanda, Waldemar), amigos e colegas de turma (em especial, Grace e Thaís), funcionários e professores do instituto, meus pais (Fátima e Maurício), meu irmão (Maurício), minha avó (Therezinha) e minha cachorra.



## Resumo

Dados hidrográficos e sedimentológicos de 217 amostras foram estudados a partir de análise geoestatística e de krigagem ordinária com o intuito de determinar padrões de distribuição batimétricos e granulométricos ao longo do Canal de São Sebastião, SP. Análise canônica por correspondência e geoestatística com cokrigagem ordinária co-localizada foram utilizadas para analisar dados bióticos e abióticos de 38 amostras de sedimentos superficiais (metade coletada no inverno de 1997 e outra metade no verão de 1998) visando, respectivamente, definir as variáveis ambientais que determinam a distribuição dos foraminíferos e obter mapas de abundância das espécies ao longo do canal.

Em todo canal, a profundidade tende a diminuir do lado insular em direção ao continente. A porção mais estreita e profunda, localizada no centro do canal, é dominada por sedimentos compostos por porcentagens intermediárias de areia, silte+argila e argila, indicativos de dinâmica de correntes variável. Sedimentos arenosos predominam no sul, próximo ao continente, e no centro da porção norte, enquanto sedimentos pelíticos predominam no lado continental da porção central do canal, sugerindo energia de fundo alta e baixa, respectivamente.

As variáveis ambientais que determinam a distribuição de foraminíferos no canal são porcentagem de areia, enxofre e nitrogênio, bem como coeficiente de assimetria. Variações sazonais na distribuição das espécies são mínimas e as maiores abundâncias ocorrem na porção sul de ambos os lados, insular e continental, diminuindo em direção ao centro e norte do canal.

Maiores abundâncias das espécies indicadoras de ambiente oxigenado, água marinha com aporte de água doce, matéria orgânica e de plataforma externa podem ser relacionadas, respectivamente, à hidrodinâmica local (retrabalhamento de sedimentos de fundo e movimento de correntes), proximidade de fontes fluviais, poluição local e à ingressão periódica, no canal, de massas d'água a partir de áreas externas.

## Abstract

Hydrographical and sedimentological data of 217 samples were studied by geostatistics as well as ordinary kriging methods to determine the bathymetric and grain size distribution along the São Sebastião Channel (SP). Canonical correspondence analysis and geostatistics with ordinary collocated cokriging were also used to analyse biotic and abiotic data from 38 samples of surficial bottom sediment (half collected in the winter of 1997 and half in the summer of 1998) in order, respectively, to define the environmental variables determining the recent distribution of foraminifera and to obtain species abundances maps in the channel.

Throughout the channel, the depth tends to diminish from the island of São Sebastião to the continent. The narrower, deeper central portion of the channel is dominated by sediments composed of intermediate percentages of sand, silt+clay and clay, indicative of variable current dynamics. Arenitic sediments dominate in the south, near the continent, and in the central northern portion, whereas pelitic sediments dominate the continental side of the central portion of the channel, suggesting higher and lower hydrodynamic conditions, respectively.

The environmental variables that determine the distribution of foraminifera in the channel are sand, sulfur and nitrogen percentages as well as skewness. Seasonal variations in species distribution are minimal, and the highest abundances occur in the south portion of both the continental and insular sides, diminishing towards the middle and north of the channel.

The greatest abundances of species indicative of oxygenated, freshwater, organic-rich and outer shelf environments may be related, respectively, to local hydrodynamics (reworking of the bottom sediments and current movement), proximity of fluvial sources, local pollution and periodic incursion of the channel by water masses from outer areas.

# ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO.....	1
2. OBJETIVOS .....	1
3. TRABALHOS PRÉVIOS NA REGIÃO EM ESTUDO.....	1
4. REVISÃO DA LITERATURA .....	3
4.1. ASSOCIAÇÕES DE FORAMINÍFEROS.....	3
4.2. ANÁLISE POR CORRESPONDÊNCIA CANÔNICA.....	4
4.2.1. O DIAGRAMA ORDENADO .....	7
4.3. ESTATÍSTICA DESCRITIVA.....	7
4.4. GEOESTATÍSTICA .....	9
4.4.1. VARIÁVEIS REGIONALIZADAS .....	9
4.4.2. HIPÓTESE INTRÍNSECA E DE QUASE-ESTACIONARIEDADE.....	10
4.4.3. VARIOGRAMA .....	10
4.4.4. MODELOS TEÓRICOS DE VARIOGRAMA .....	12
4.4.5. VALIDAÇÃO CRUZADA.....	13
4.4.6. KRIGAGEM.....	13
4.4.7. CORREGIONALIZAÇÃO E COKRIGAGEM .....	15
5. MATERIAIS E MÉTODOS.....	17
5.1. GEOESTATÍSTICA E KRIGAGEM ORDINÁRIA .....	18
5.2. ANÁLISE POR CORRESPONDÊNCIA CANÔNICA.....	19
5.3. GEOESTATÍSTICA E COKRIGAGEM CO-LOCALIZADA ORDINÁRIA.....	20
6. DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO .....	21
7. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	21
7.1. GEOESTATÍSTICA E KRIGAGEM ORDINÁRIA .....	21
7.1.1. ANÁLISE ESTATÍSTICA .....	21
7.1.2. ANÁLISE GEOESTATÍSTICA .....	22
7.1.3. VALIDAÇÃO CRUZADA.....	24
7.1.4. KRIGAGEM ORDINÁRIA .....	25
7.2. ANÁLISE POR CORRESPONDÊNCIA CANÔNICA.....	27
7.3. GEOESTATÍSTICA E COKRIGAGEM CO-LOCALIZADA ORDINÁRIA.....	30
7.3.1. ANÁLISE ESTATÍSTICA .....	30
7.3.2. ANÁLISE GEOESTATÍSTICA .....	32
7.3.3. COKRIGAGEM CO-LOCALIZADA ORDINÁRIA.....	34
8. CONCLUSÕES.....	39
9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	40

## **1. INTRODUÇÃO**

Desde a década de 50 do século passado, diversos trabalhos têm sido realizados para definir os efeitos de parâmetros ambientais sobre associações de foraminíferos (q.v., Boltovskoy, 1991). A maioria destes trabalhos relaciona a distribuição das espécies apenas a algumas variáveis ambientais isoladamente (e.g., temperatura, salinidade, tipo de sedimento). Contudo, deve ser ressaltado que vários parâmetros ambientais atuam conjuntamente sobre as diferentes espécies de foraminíferos. Por este motivo, a partir da década de 80, métodos estatísticos multivariados passaram a ser aplicados uma vez que estes têm se mostrado eficazes na determinação do conjunto de variáveis responsáveis pela estrutura das associações de foraminíferos (Parker & Arnold, 1999; Duleba & Debenay, 2003).

O estudo da distribuição de espécies de foraminíferos e dos sedimentos depositados em regiões costeiras permite fazer inferências quanto aos tipos de ambiente, à presença de massas d'água, ao aporte de nutrientes e à circulação atual naquelas regiões. No caso dos estudos de associações de foraminíferos, a amostragem geralmente é pouco densa já que o processo de triagem e identificação das espécies constitui um trabalho exaustivo e que pode ser demorado caso o número de amostras seja demasiadamente grande. Como consequência, a amostragem se mostra insuficiente para interpolação consistente dos dados. Uma possibilidade para contornar esse problema é a aplicação da geoestatística com cokrigagem. Dessa maneira, torna-se possível estimar a distribuição das espécies com maior segurança.

Nesse contexto insere-se o presente trabalho com a proposta de aplicação dos métodos de análise por correspondência canônica, geoestatística, krigagem ordinária e cokrigagem ordinária co-localizada na análise de dados sedimentológicos e de foraminíferos do Canal de São Sebastião (CSS).

## **2. OBJETIVOS**

Os principais objetivos do trabalho são prever a distribuição batimétrica e granulométrica ao longo do canal de São Sebastião, definir as variáveis ambientais que determinam a distribuição de foraminíferos recentes e obter mapas de abundância das espécies.

## **3. TRABALHOS PRÉVIOS NA REGIÃO EM ESTUDO**

O canal de São Sebastião localiza-se no litoral norte do Estado de São Paulo, entre as coordenadas de 23° 40' e 23° 53.5' de latitude sul e 45° 19' e 45° 30' de longitude oeste, separando o continente da ilha de mesmo nome (Figura 1).

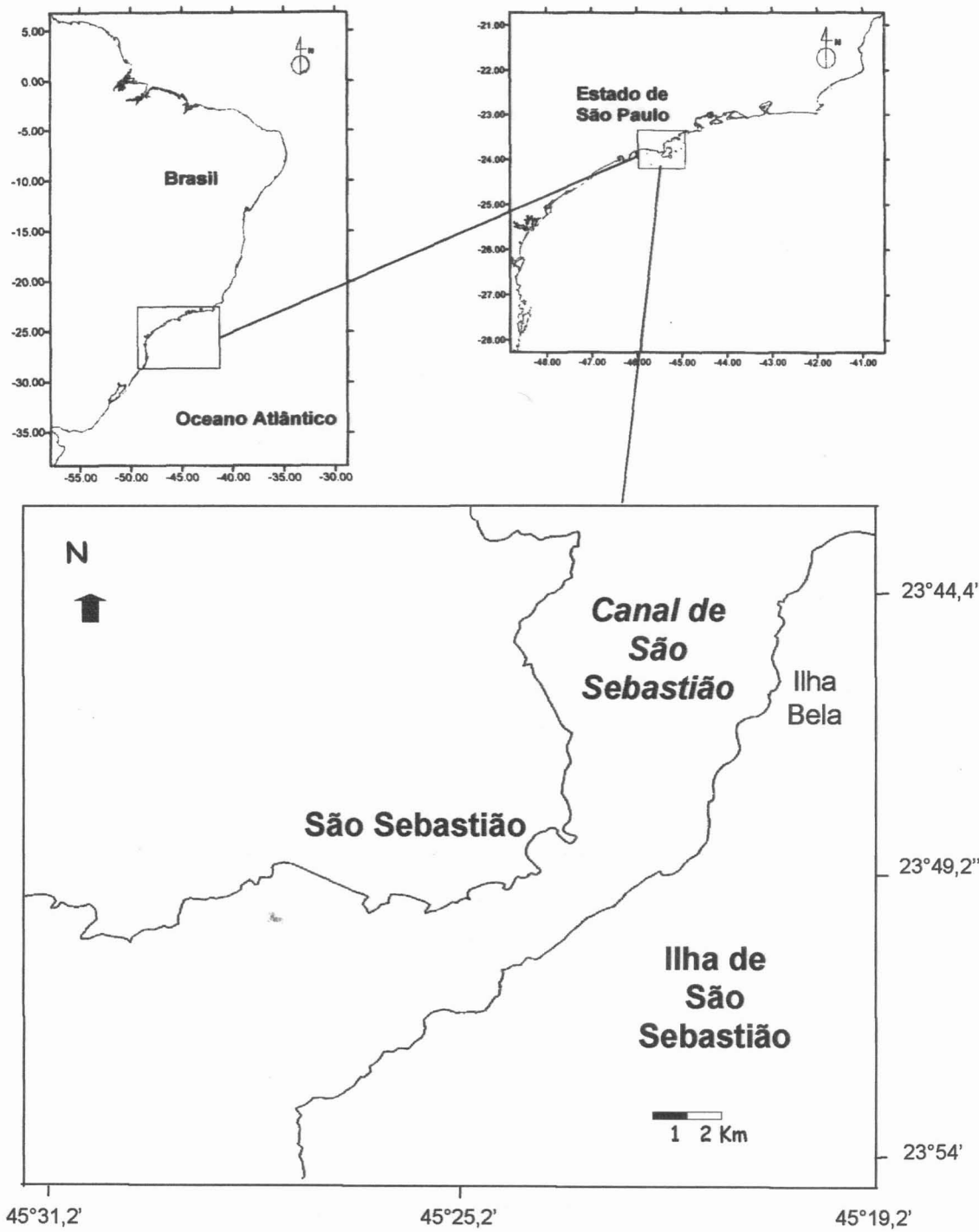


Figura 1. Mapa da área de estudo. Modificado de Barcellos & Furtado (1999) e de FUNDESPA (1999).

De acordo com Almeida & Cameiro (1998), a geologia e geomorfologia da área são caracterizadas pela ocorrência dos granitos e migmatitos da Serra do Mar e pelas rochas alcalinas e graníticas da ilha de São Sebastião. Ao longo de praticamente todo o canal, a topografia é íngreme, com costões proeminentes, pequenas praias e planícies aluvionares (Barcellos & Furtado, 2001). Devido às altas declividades, a carga sedimentar dos rios de pequeno porte é lançada diretamente no mar (Kutner, 1969 *apud* Furtado, 1978).

A gênese da ilha de São Sebastião está relacionada à atividade vulcânica alcalina e à reativação de falhas pré-existentes, ocorridas no sudeste brasileiro no final do Cretáceo e representadas pelo soerguimento da Serra do Mar e subsidência da Bacia de Santos, respectivamente. Nesse contexto, a ilha de São Sebastião seria remanescente do retrocesso erosivo da Serra do Mar (Almeida, 1976). Ainda segundo esse mesmo autor, o canal de São Sebastião teria sido escavado subaereamente durante os últimos estágios glaciais do Pleistoceno. Para Mahiques et al. (1989), parte da escavação do canal estaria associada à ação de marés durante eventos transgressivos que ocorreram na área.

O canal apresenta 25 km de comprimento e larguras variáveis de 2 km, em sua porção central, e 7 km, em suas entradas sul e norte. As maiores profundidades (30 a 50m) ocorrem ao longo de seu eixo, deslocado para o lado insular, e as menores (6m), no lado continental do canal. As entradas sul e norte apresentam profundidades de 25 e 20m, respectivamente (Furtado, 1978).

A distribuição de sedimentos ao longo do canal está relacionada à sua geometria, topografia de fundo e à circulação local. Sua geometria assemelha-se a de canal fluvial, condicionando deposição no lado continental e erosão no lado insular. A topografia do CSS é extremamente irregular, com grandes variações em pequeno espaço, produzindo distribuição dos sedimentos em manchas, com tamanhos variados (Furtado, 1995; Barcellos & Furtado, 1999, 2001).

A circulação no canal caracteriza-se por movimentos para norte e sul, com periodicidade de dias, pouco influenciados pelas correntes de maré (Castro-Filho, 1990; Fontes, 1995; Miranda & Castro-Filho, 1995). A geometria e a topografia do fundo do canal condicionam correntes mais intensas no sentido longitudinal do lado insular, com velocidades de até  $1,0 \text{ ms}^{-1}$  para o norte e  $0,7 \text{ ms}^{-1}$  para sul (FUNDESPA, 1999). As características termohalinas do canal são determinadas pelo transporte de massas de água da plataforma continental, cujos movimentos são predominantemente gerados pelo vento e por forças de gradiente de pressão (Miranda & Castro-Filho, 1995).

Os sedimentos do canal provêm do retrabalhamento de depósitos preexistentes, da contribuição costeira adjacente, embora pequena e localizada, e do material em suspensão oriundo de áreas externas ao canal (Furtado, 1995). O aporte terrígeno aumenta durante as estações chuvosas.

## **4. REVISÃO DA LITERATURA**

### **4.1. ASSOCIAÇÕES DE FORAMINÍFEROS**

A estrutura e a dinâmica das associações de foraminíferos são fortemente dependentes das condições ambientais, traduzidas pela interação de diversos fatores abióticos (e.g., temperatura, profundidade, teor de carbonato de cálcio, salinidade, tipo de



sedimento, circulação de fundo, teor de oxigênio, nutrientes, matéria orgânica disponível) e bióticos interespecíficos (competição) e intraespecíficos (predação, parasitismo e simbiose).

As associações de foraminíferos, principalmente planctônicas, diferenciam-se em associações de águas frias, temperadas, subtropicais e tropicais uma vez que as grandes variações na temperatura são geralmente latitudinais. Já a profundidade é um fator importante na distribuição dos foraminíferos bentônicos em plataformas siliciclásticas e a diversidade das espécies tende a aumentar da região entre-marés à quebra do talude (Murray, 1991).

A distribuição de foraminíferos calcários de plataforma marinha pode também estar vinculada à solubilidade do carbonato de cálcio. Assim, em regiões de mar profundo, mais especificamente a partir da zona de compensação do carbonato de cálcio, todo  $\text{CaCO}_3$  passa a ser dissolvido já que o meio torna-se insaturado em  $\text{CO}_2$  e íons cálcio (Berger, 1979). Por isso, foraminíferos calcários estão ausentes abaixo desta zona, sendo encontrados apenas aqueles que aglutinam e cimentam partículas sedimentares em suas carapaças (Boersma, 1980).

A salinidade é um dos principais fatores controladores das associações de foraminíferos de regiões estuarinas (Duleba & Debenay, 2003). Os foraminíferos de regiões de entre-marés de ambientes parálidos, por sua vez, são controlados pela elevação e tempo de duração da maré (Horton et al., 1999).

Ambientes com sedimentos finos, nutrientes disponíveis e baixa circulação de fundo são mais ricos em espécies de foraminíferos que ambientes com areia grossa, desprovidos de matéria orgânica (Bonfante et al., 2005). Por outro lado, ambientes com alta concentração de matéria orgânica e baixa concentração de oxigênio determinam associações com baixa diversidade e elevadas densidades (Bernhard, 1986). As correntes de circulação apresentam ação mecânica sobre as carapaças e são responsáveis pelo transporte *post-mortem* das mesmas (Martin, 1999).

A luminosidade é importante para foraminíferos bentônicos de plataformas carbonáticas e planctônicas que vivem em simbiose com algas fotossintetizantes (Boersma, 1980).

## 4.2. ANÁLISE POR CORRESPONDÊNCIA CANÔNICA

A aplicação de métodos matemáticos em estudos ecológicos deve considerar a maneira como as espécies respondem às mudanças nas condições ambientais. Nesse sentido, cada espécie ocorre em uma porção limitada do habitat, denominada nicho, dentro da qual tende a ser mais abundante em condições ambientais específicas ou ótimas (Green, 1971; ter Braak & Verdonschot, 1995).

Dessa forma, métodos padrões, baseados em modelo de resposta linear, tornam-se inapropriados em estudos ecológicos, o que levou os ecologistas a desenvolver técnicas

alternativas baseadas em modelo de resposta unimodal (ter Braak & Prentice, 1988). Assim sendo, Hill (1973 *apud* ter Braak & Prentice, 1988) introduziu a técnica da média recíproca também conhecida como análise por correspondência (AC).

A análise por correspondência canônica (ACC) deriva da técnica da média recíproca. Trata-se de método multivariado a partir do qual dados de abundância das espécies são relacionados diretamente às variáveis ambientais medidas nos mesmos locais de coleta das espécies (ter Braak, 1986).

Segundo esse último autor, a ACC resulta da combinação das técnicas de média recíproca e de regressão múltipla. Com relação aos objetivos da ACC, a primeira permite visualizar o padrão de variação nos dados bióticos e a segunda, as principais características das distribuições das espécies ao longo das variáveis ou gradientes ambientais (ter Braak, 1987).

Com base na técnica da média recíproca, o ponto central ou valor ótimo  $u_k$  do nicho da espécie  $k$  é definido pelos valores  $x_i$  de um dado gradiente nos locais onde a espécie ocorre, ponderados por  $y_{ik}/y_{+k}$

$$u_k = \sum_{i=1}^n \frac{y_{ik}}{y_{+k}} \cdot x_i,$$

onde  $y_{ik}$  é a abundância da espécie  $k$  no local  $i$  e  $y_{+k}$ , a soma das abundâncias da espécie  $k$  de todos locais  $i$  ( $i = 1, \dots, n$ ) (ter Braak, 1986). Os valores de  $u_k$  fornecem uma primeira indicação da localização das espécies ao longo dos gradientes.

De modo análogo, os valores  $x_i^*$  do gradiente são obtidos a partir dos valores ótimos  $u_k$  ponderados por  $y_{ik}/y_{i+}$ , onde  $y_{i+}$  é a soma das abundâncias de todas as espécies  $k$  ( $k = 1, \dots, m$ ) que ocorrem no local  $i$  (ter Braak, 1986)

$$x_i^* = \sum_{k=1}^m \frac{y_{ik}}{y_{i+}} \cdot u_k.$$

Tal como em uma regressão linear, os valores do gradiente  $x_i$  também são obtidos a partir da combinação linear das variáveis ambientais

$$x_i = \sum_{j=1}^p c_j z_{ij},$$



onde  $z_{ij}$  é o valor da variável ambiental  $j$  ( $j = 1, \dots, p$ ) no local  $i$  e  $c_j$ , seu coeficiente ou peso (ter Braak & Verdonschot, 1995). Os valores  $x_i^*$  e  $x_i$  obtidos são correlacionados, resultando na correlação espécies – ambiente que mede a importância das variáveis ambientais na explicação da variação composicional dos dados bióticos (ter Braak, 1986).

A ACC determina os ponderadores  $c_j$  que maximizam a separação dos nichos das espécies (ter Braak, 1987) já que, conforme Whittaker et al. (1973), as espécies tendem a separar seus nichos de modo a minimizar a competição entre si. Os ponderadores otimizados são denominados coeficientes canônicos (ter Braak & Verdonschot, 1995).

Os gradientes ambientais subsequentes também devem maximizar a separação dos nichos e são obtidos de forma semelhante, porém sob a restrição de serem não correlacionados com os gradientes extraídos anteriormente (ter Braak & Verdonschot, 1995). Informações detalhadas sobre o algoritmo do método da ACC podem ser obtidas em ter Braak (1986).

A aplicação da ACC exige a adoção de algumas hipóteses. Tal como proposto por Hill & Gauch (1980), considera-se que cada espécie tenha curva de resposta gaussiana (Figura 2) em relação a um dado gradiente ambiental e que essas curvas apresentem mesmo máximo, mesma tolerância e modas igualmente espaçadas.

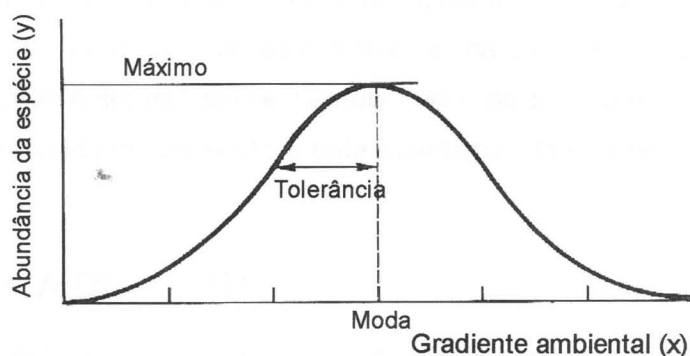


Figura 2. Curva de resposta gaussiana assumida para cada espécie. Modificado de ter Braak & Prentice (1988).

A ACC é uma análise por correspondência com restrições. Entretanto, tais restrições tornam-se menos rígidas quando o número de variáveis ambientais na análise é igual ou maior do que o número total de amostras. Nesses casos, a ACC passa a produzir os mesmos resultados que a AC, surgindo então a necessidade de reduzir a quantidade de variáveis ambientais (ter Braak, 1987; ter Braak & Verdonschot, 1995).

Nesses casos, as variáveis ambientais são avaliadas e ordenadas quanto à sua importância na determinação das variações na composição dos dados bióticos. A significância estatística do efeito de cada variável é obtida a partir do teste de permutação de Monte Carlo e, com base em um nível de significância adequado à análise, são escolhidas as variáveis suficientes para explicar os dados (ter Braak & Verdonschot, 1995).

Informações adicionais sobre o teste de permutação de Monte Carlo podem ser obtidas em Manly (1991) e ter Braak (1992).

Em relação a outros métodos de análise direta de gradientes (e.g., regressão múltipla), a ACC é um método simples e eficaz para analisar e obter uma visualização gráfica resumida das relações entre muitas espécies e variáveis ambientais, principalmente quando o número das últimas for maior do que dois ou três (ter Braak, 1987).

#### 4.2.1. O DIAGRAMA ORDENADO

O resultado da ACC é o diagrama ordenado, um sistema cartesiano cujos eixos (autovetores) representam os dois primeiros gradientes ambientais sintéticos extraídos pela ACC. O autovalor de cada eixo ordenado corresponde à máxima separação entre os nichos. Neste diagrama, amostras e espécies são representadas por pontos e as variáveis ambientais, por setas (ter Braak, 1986).

As coordenadas das amostras são os valores das projeções das mesmas nos dois primeiros gradientes sintéticos. A distribuição dos pontos das espécies ao longo dos eixos indica a localização de seus nichos e mostra a substituição sucessiva dos mesmos em função das variações ambientais (ter Braak & Verdonschot, 1995).

As setas apontam na direção da máxima mudança da variável ambiental e seu comprimento é proporcional à taxa de variação. Quanto maior o comprimento das setas, maior a importância de uma dada variável ambiental na explicação da variação nos dados bióticos. As correlações entre as variáveis ambientais e os eixos ordenados são dadas pelas coordenadas da extremidade das setas e pela orientação destas em relação aos eixos (ter Braak, 1987).

#### 4.3. ESTATÍSTICA DESCRITIVA

A estatística descritiva é o ramo da estatística que descreve e analisa um conjunto de amostras de uma população (Spiegel, 1967). Uma distribuição de frequências pode ser caracterizada numericamente por suas estatísticas descritivas, a saber: média, mediana, moda, variância, desvio padrão, coeficiente de variação, assimetria e curtose.

Média, mediana e moda são medidas de tendência central (Davis, 1986). Assumindo-se que as probabilidades associadas a cada uma das  $n$  ocorrências da variável  $X_i$  são todas iguais a  $1/n$ , a média  $\bar{X}$  ou esperança matemática  $E[X]$  é calculada conforme (Yamamoto, 2001):

$$E[X] = \bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i .$$

A mediana é o valor que divide a distribuição de freqüências em duas partes de áreas iguais. A moda, por sua vez, é o valor mais freqüente que corresponde ao ponto mais alto de uma curva de freqüências (Davis, 1986).

A variância e o desvio padrão caracterizam a dispersão dos valores em torno da média. Considerando que todas as  $n$  ocorrências da variável  $X_i$  tenham probabilidades iguais a  $1/n$ , a variância é a média das diferenças quadráticas em relação à média (Yamamoto, 2001)

$$Var [X] = S^2 = 1/n \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2.$$

O desvio padrão é igual a raiz quadrada da variância. A utilização do mesmo, ao invés da variância, é mais vantajosa uma vez que apresenta mesma unidade de medida que os dados (Davis, 1986).

O coeficiente de variação também é uma medida de dispersão e resulta da divisão do desvio padrão pela média. Dado o fato de ser uma medida adimensional, o coeficiente de variação pode ser utilizado para comparar distribuições diferentes quanto à dispersão relativa dos valores em torno da média (Yamamoto, 2001). Conforme destacado por Spiegel (1967), a utilização desta medida é desvantajosa quando a média é muito próxima de zero.

O coeficiente de assimetria mede o grau de simetria de uma distribuição de freqüências em torno da média, sendo calculado a partir do terceiro momento centrado na média (Yamamoto, 2001)

$$CA = \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^3 / S^3.$$

Quando a curva apresenta assimetria positiva, a cauda da distribuição alonga-se à direita da média e à esquerda da mesma, se a assimetria for negativa. O grau de assimetria também pode ser indicado pela relação entre média e mediana, as quais coincidem em distribuições simétricas, enquanto que em distribuições assimétricas positivas e negativas, a média é maior e menor que a mediana, respectivamente (Spiegel, 1967; Davis, 1986).

O coeficiente de curtose mede o grau de achatamento da curva de freqüências em relação à distribuição normal, indicando a razão de espalhamento médio das caudas da distribuição em relação ao desvio padrão (Davis, 1986). É obtido a partir do quarto momento em torno da média (Yamamoto, 2001)

$$CC = \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^4 / S^4.$$

Nesse caso, as distribuições podem ser platicúrticas, mesocúrticas ou leptocúrticas. No primeiro caso, os picos são achatados e, no terceiro, pronunciados. A distribuição normal, que não é muito pontiaguda nem muito achatada, é classificada como mesocúrtica (Spiegel, 1967).

## 4.4. GEOESTATÍSTICA

### 4.4.1. VARIÁVEIS REGIONALIZADAS

O termo 'variáveis regionalizadas' foi inicialmente mencionado por Matheron (1965) e se refere a funções que descrevem fenômenos com distribuição espacial. De acordo com Bubenicek & Haas (1969 *apud* Yamamoto, 2001), uma variável regionalizada apresenta localização no espaço, suporte (ponto, área ou volume centrado em  $x$ ), continuidade ponto a ponto e anisotropia. O valor assumido pela variável regionalizada depende de sua localização e do tamanho, forma e orientação de seu suporte. A anisotropia surge quando a variação espacial muda conforme a direção considerada.

As variáveis regionalizadas usualmente apresentam aspectos contraditórios, pois exibem variações altamente irregulares e imprevisíveis, tal como uma variável aleatória, e certa continuidade que reflete as características estruturais inerentes ao fenômeno regionalizado (Huijbregts, 1975).

Diante dessas características ambíguas exibidas pela variável regionalizada e da necessidade de se conhecer o comportamento do fenômeno de interesse em locais não amostrados, torna-se necessária uma formulação que represente de forma simples e adequada a variabilidade espacial (Journel & Huijbregts, 1978).

A Teoria das Variáveis Regionalizadas baseia-se no conceito de função aleatória (Huijbregts, 1975). Segundo esse conceito, uma variável regionalizada é considerada uma realização particular de uma variável aleatória a qual recebe um dado número de valores de acordo com certa distribuição de probabilidades. Em outras palavras, o valor  $z(x)$  assumido por uma variável regionalizada no ponto  $x$  constitui uma realização particular da variável aleatória  $Z(x)$ . Por extensão, o conjunto de valores  $z(x)$  tomados em todos os pontos  $x$  pode ser interpretado como uma realização particular de um conjunto de variáveis aleatórias, denominado função aleatória (Huijbregts, 1975; Journel & Huijbregts, 1978).

As variáveis de interesse geológico comumente resultam da interação de muitos processos e, como tais, não são passíveis de serem descritas por qualquer função determinística. Por isso, adota-se o modelo probabilístico acima referido, assumindo-se que as mesmas resultam de um processo aleatório (Isaaks & Srivastava, 1989).



#### 4.4.2. HIPÓTESE INTRÍNSECA E DE QUASE-ESTACIONARIEDADE

Em geoestatística, a diferença de valores entre quaisquer dois pontos separados por uma distância  $h$  e tendo uma dada orientação relativa resulta em uma variável com distribuição semelhante a dos dois pontos considerados (Clark, 1979).

Para possibilitar as inferências estatísticas, a geoestatística assume que essas distribuições são iguais e que as diferenças de valores dependem apenas da distância e orientação relativa entre pares de amostras. Esta assunção é referida como hipótese intrínseca (Clark, 1979).

De acordo com Journel & Huijbregts (1978), uma função aleatória  $Z(x)$  é intrínseca quando o valor médio esperado  $E[Z(x)]$  existe e é constante

$$E[Z(x)] = m, \forall x$$

e o incremento  $[Z(x+h) - Z(x)]$  tem uma variância finita, dependendo apenas da distância  $h$

$$Var\{Z(x+h) - Z(x)\} = E\{[Z(x+h) - Z(x)]^2\} \forall x.$$

A hipótese de quase-estacionariedade é uma limitação da hipótese intrínseca, pois assume que o fenômeno apresenta homogeneidade local, podendo haver variações progressivas em escalas maiores (Huijbregts, 1975). Na prática, considera-se que o valor médio esperado e a covariância sejam estacionários no interior de uma dada vizinhança e que os dados sejam suficientes para se fazer inferências estatísticas. A adoção da hipótese de quase-estacionariedade deve considerar o grau de homogeneidade do fenômeno e a quantidade de dados disponíveis (Journel & Huijbregts, 1978).

#### 4.4.3. VARIOGRAMA

Segundo Huijbregts (1975), o variograma é a ferramenta básica que possibilita descrever quantitativamente a variação espacial de um fenômeno regionalizado. A estrutura desse fenômeno é determinada mediante comparação dos valores assumidos pela variável regionalizada simultaneamente em dois pontos ao longo de uma direção específica.

O variograma experimental é a representação gráfica da função variograma  $2\gamma(h)$

$$2\gamma(h) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [Z(x+h) - Z(x)]^2,$$

a qual mede a variância entre os valores  $Z(x)$  e  $Z(x+h)$  assumidos pela variável regionalizada nos pontos  $x$  e  $x+h$ , respectivamente. Nessa expressão,  $n$  é o número de pares de pontos igualmente espaçados considerados em uma dada direção (Yamamoto, 2001). De acordo com Clark (1979), a função semivariograma  $\gamma(h)$  é designada por muitos autores como função variograma.

O variograma experimental apresenta parâmetros que se relacionam às características estruturais da variável regionalizada (Huijbregts, 1975). Esses parâmetros são efeito pepita, amplitude, patamar e variância espacial (Yamamoto, 2001) (Figura 3).

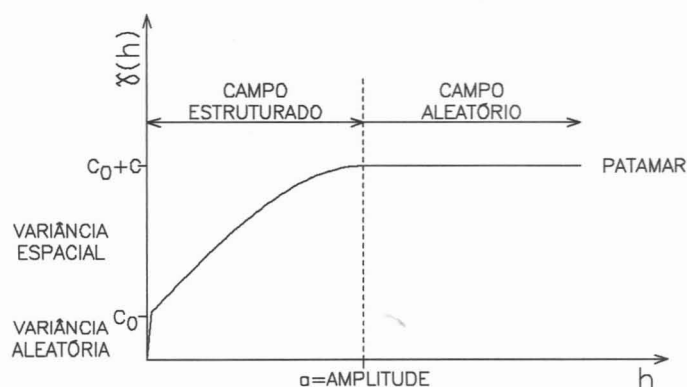


Figura 3. Variograma e seus parâmetros. Extraído de Yamamoto (2001).

O efeito pepita ou variância aleatória consiste numa descontinuidade próxima a origem do variograma e pode resultar tanto de erros de amostragem quanto de microvariabilidades do fenômeno estudado (Kitanidis, 1997). Para Isaaks & Srivastava (1989), embora o valor da variância para distâncias nulas deva ser zero, o mesmo pode ser significativamente maior para distâncias muito pequenas, menores que o intervalo de amostragem.

De modo geral, a variância é função crescente do módulo da distância  $h$ . Desta maneira, seus valores são menores para pontos mais próximos, que tendem a ser mais correlacionados, e progressivamente maiores para pontos mais distantes (Clark, 1979).

A amplitude é a distância a partir da qual a variância adquire um valor máximo e se mantém constante, configurando o patamar no variograma (Davis, 1986). A amplitude mede a zona de influência de amostras uma vez que separa o campo estruturado do aleatório, onde as amostras são correlacionadas e independentes, respectivamente (Yamamoto, 2001) (Figura 3). O patamar, por sua vez, dá uma noção sobre a homogeneidade do fenômeno<sup>1</sup>.

Finalmente, a variância espacial, que constitui a porção ascendente do variograma, resulta da diferença entre o valor da variância no patamar e o efeito pepita e reflete o grau de dependência espacial entre as amostras (Davis, 1986; Yamamoto, 2001).

O variograma experimental expressa a variação espacial de uma variável regionalizada ao longo de uma determinada direção. Por isso, o cálculo do mesmo deve ser feito para diferentes direções para se detectar possível anisotropia, com destaque para as direções de maior e menor continuidade ou homogeneidade do fenômeno.

<sup>1</sup> Notas de aula da disciplina GSA 400 – Prospecção, pesquisa e avaliação de jazidas.

A anisotropia será geométrica quando o variograma apresentar um patamar e amplitudes distintas para diferentes direções; zonal, se diferentes direções possuírem mesma amplitude e patamares distintos; mista, no caso em que cada direção apresentar patamar e amplitude diferentes das demais direções (Isaaks & Srivastava, 1989). Na Figura 4, estão ilustrados os tipos de anisotropia mencionados.

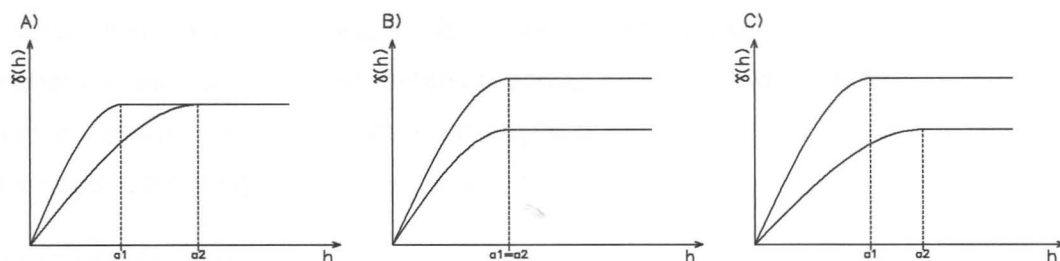


Figura 4. Anisotropias geométrica (A), zonal (B) e mista (C). Extraído de Yamamoto (2001).

#### 4.4.4. MODELOS TEÓRICOS DE VARIOGRAMA

O variograma experimental é definido por uma função discreta, o que impossibilita o cálculo da variância espacial para quaisquer distâncias no domínio. Por isso, uma função matemática contínua e autorizada no espaço multidimensional deve ser ajustada ao mesmo para que estimativas possam ser feitas em locais não amostrados. O ajuste de modelos teóricos é empírico e iterativo e se baseia nos parâmetros do variograma experimental (Yamamoto, 2001).

Os modelos teóricos de variograma são isotrópicos e os mais utilizados são o esférico, o exponencial e o gaussiano (Figura 5). Os dois primeiros apresentam comportamento linear próximo à origem. A diferença entre ambos está no fato do modelo esférico atingir o patamar, enquanto que o exponencial é assintótico ao mesmo. Outra diferença é a inclinação mais suave do modelo exponencial (Clark, 1979).

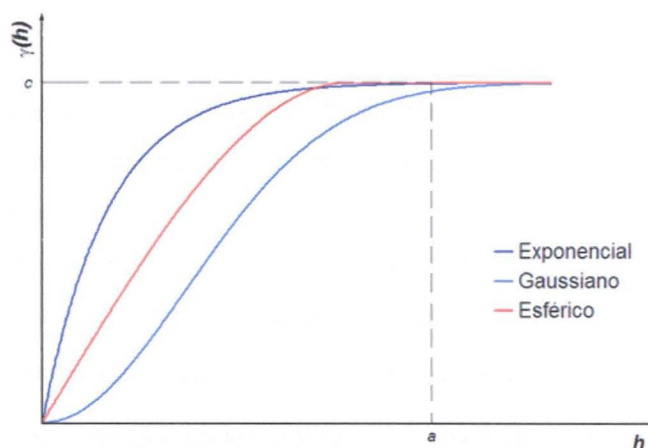


Figura 5. Principais modelos teóricos de variograma. Modificado de Goovaerts (1997).

O modelo gaussiano é usado para modelar fenômenos extremamente contínuos e, tal como o modelo exponencial, apenas tangencia o patamar. Seu comportamento para pequenas distâncias é parabólico (Clark, 1979; Isaaks & Srivastava, 1989).

O modelo pepita puro apresenta patamar igual ao efeito pepita e amplitude infinitesimalmente menor que as distâncias de observação. Representa fenômenos cujo comportamento é puramente aleatório (Journel & Huijbregts, 1978; Clark, 1979). Portanto, métodos geoestatísticos de interpolação não podem ser utilizados.

O modelo linear não apresenta patamar, sendo representado por uma reta que passa pela origem do gráfico e é definida pela inclinação  $p$ . O modelo De Wijsian é uma relação linear entre variância e o logaritmo da distância (Clark, 1979).

#### 4.4.5. VALIDAÇÃO CRUZADA

A validação cruzada é uma técnica que possibilita comparar valores estimados e reais a partir dos dados dos locais amostrados. De acordo com essa técnica, o valor de um ponto amostrado é descartado temporariamente do conjunto de dados e estimado com base nos valores das demais amostras, considerando os parâmetros de vizinhança e o modelo de variograma escolhidos. Este procedimento é repetido para todos os pontos amostrais (Isaaks & Srivastava, 1989; Goovaerts, 1997).

O resultado pode ser um diagrama dos valores estimados em função dos valores reais, fornecendo uma idéia do erro de estimativa. Nesse caso, segundo Yamamoto (2002), a solução ideal seria que a reta de regressão estivesse mais próxima possível da primeira bissetriz, com mínima dispersão dos pontos em torno da mesma.

A validação cruzada permite aferir o modelo de variograma no caso da estimativa ser feita por krigagem ordinária pontual (Yamamoto, 2002). Por meio desta técnica, também é possível avaliar e comparar distintas estratégias de busca, além de testar diferentes métodos de estimativa (Isaaks & Srivastava, 1989).

#### 4.4.6. KRIGAGEM

Em geoestatística, as estimativas são feitas mediante krigagem que compreende um conjunto de estimadores baseados em regressão linear, pioneiramente estudados por Daniel Krige (Goovaerts, 1997).

Segundo Huijbregts (1975), a krigagem ordinária é um melhor estimador linear não enviesado de uma variável regionalizada intrínseca. Assim sendo, o valor estimado  $Z^*(X_0)$  resulta da combinação linear de  $n$  dados da variável de interesse  $Z(X_i)$  cada qual multiplicado pelo ponderador da krigagem  $\lambda_i$  associado ao ponto  $i$  (Yamamoto, 2001)

$$Z^*(X_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i \cdot Z(X_i).$$



Para cada ponto estimado, a diferença entre os valores estimado e real constitui o erro de estimativa. Esse erro deve ser igual a zero para que o estimador seja não enviesado. Para isso, é necessário que a soma dos ponderadores de krigagem relacionados a cada estimativa seja igual a 1. Essa condição também garante que a variância do erro da krigagem seja mínima (Isaaks & Srivastava, 1989). Isto significa que, dentre as muitas estimativas, o erro médio tende a ser zero já que superestimativas tendem a cancelar subestimativas (Davis, 1986).

Infinitas combinações de pesos poderiam ser escolhidas, cada uma resultando em uma estimativa e um erro de estimativa. Nesse sentido, o estimador de krigagem é ótimo, pois busca o melhor conjunto de ponderadores para que as condições acima sejam satisfeitas (Brooker, 1980).

Os pesos atribuídos a cada amostra estão relacionados com a distância de cada uma em relação ao ponto estimado bem como com a dependência espacial entre as amostras dada pelo variograma. Esses pesos provêm de um sistema linear com  $n$  equações e  $n$  incógnitas que pode ser representado sob a forma matricial <sup>2</sup>

$$[A] \cdot [X] = [B].$$

A matriz  $[A]$  contém as variâncias entre as amostras consideradas na estimativa. A matriz  $[X]$  apresenta os ponderadores que constituem a solução do sistema linear e a matriz  $[B]$  possui a variância entre o ponto estimado e as amostras. Uma equação contendo uma variável denominada multiplicador de Lagrange  $\mu$  é adicionada ao sistema para garantir que a solução seja não-enviesada, restringindo os pesos a somar 1. Os termos da matriz  $[A]$  e do vetor  $[B]$  são tomados diretamente do variograma ou da função matemática que descreve sua forma (Davis, 1986).

O sistema de equações deve ser resolvido para cada ponto estimado a menos que o arranjo espacial das amostras seja regular e a distância entre os pontos permaneça a mesma (Davis, 1986).

De acordo com Goovaerts (1997), na krigagem ordinária a média  $m(x_i)$  é desconhecida, sendo constante apenas no interior da vizinhança local  $W(x_i)$ , esta definida como domínio de estacionariedade

$$m(x_i) = m, \forall x_i \in W(x_i).$$

<sup>2</sup> Notas de aula da disciplina GSA 400 – Prospecção, pesquisa e avaliação de jazidas.

#### 4.4.7. CORREGIONALIZAÇÃO E COKRIGAGEM

A corregionalização ocorre quando variáveis regionalizadas correlacionadas são definidas sobre o mesmo domínio. É muito comum, nesses casos, que a variável primária de interesse apresente dados esparsos ou moderadamente correlacionados no espaço, o que dificulta suas estimativas. Para Goovaerts (1997), a cokrigagem é particularmente útil nesses casos, pois permite que dados de variáveis secundárias, mais densamente amostradas, sejam integrados na estimativa da variável primária, considerando a correlação entre as mesmas.

De acordo com Xu et al. (1992), no caso da utilização de apenas uma variável secundária, o valor primário  $Z_1^*(X)$ , estimado por cokrigagem, resulta da combinação linear dos valores das variáveis primária  $Z_1(X_i)$  e secundária  $Z_2(X_j)$  multiplicados pelos ponderadores  $\lambda_i^1$  e  $\lambda_j^2$ , respectivamente

$$Z_1^*(X) = \sum_{i=1}^n \lambda_i^1 \cdot Z_1(X_i) + \sum_{j=1}^m \lambda_j^2 \cdot Z_2(X_j).$$

No entanto, a implementação da cokrigagem pode conduzir a um problema de instabilidade de matriz, no caso da variável secundária ser muito mais densamente amostrada do que a primária, já que a correlação entre dados secundários próximos seria muito maior do que a correlação entre dados primários distantes (Xu et al., 1992).

Além disso, dados secundários próximos ou até mesmo co-localizados com o valor primário a ser estimado tendem a impedir que dados secundários mais distantes influenciem as estimativas. Por isso, torna-se necessário restringir a vizinhança de estimativa, eliminando a informação secundária redundante (Goovaerts, 1997).

A cokrigagem co-localizada constitui a solução para ambos os problemas. Trata-se de uma simplificação da cokrigagem e consiste em reduzir a vizinhança de estimativa a apenas um ponto, ou seja, o dado secundário localizado no ponto a ser estimado (Wackernagel, 1995). Segundo Goovaerts (1997), o estimador linear para cokrigagem ordinária co-localizada pode ser escrito como

$$Z_1^*(X) = \sum_{i=1}^n \lambda_i^1 \cdot Z_1(X_i) + \lambda^2 [Z_2(X) - m_2 + m_1],$$

onde  $m_1$  e  $m_2$  são as médias locais estacionárias das variáveis primária e secundária, respectivamente. A única restrição é que a soma dos pesos das variáveis primária e secundária seja igual a 1

$$\sum_{i=1}^n \lambda_i^1 + \lambda^2 = 1.$$

Os modelos de variograma, diretos e cruzados, a serem utilizados na resolução do sistema de cokrigagem ordinária co-localizada podem ser obtidos a partir do Modelo Linear de Corregionalização (MLC) (Remacre & Botelho, 2005). Nesse caso, cada modelo resulta da combinação linear de um ou mais modelos básicos de variograma direto (Isaaks & Srivastava, 1989). Entretanto, o MLC apresenta algumas limitações uma vez que esses modelos não podem ser construídos independentemente um do outro (Goovaerts, 1997). Para Journel (1999), a principal limitação reside no fato do ajuste de todos os variogramas cruzados ser feito com base no mesmo conjunto de modelos básicos. Esse autor também aponta a necessidade de se modelar  $K^2$  funções se houver  $K$  variáveis corregionalizadas.

Diante de tais limitações, a utilização dos modelos de Markov para covariâncias cruzadas facilita o emprego da cokrigagem, principalmente se cada dado da variável secundária estiver em um dos nós da malha onde a variável primária será estimada (Journel, 1999).

O Modelo de Markov 1 (MM1) permite a obtenção do modelo da variância cruzada  $\gamma_{12}(h)$  diretamente a partir da variância primária  $\gamma_{11}(h)$  e da razão entre as covariâncias cruzada  $C_{12}(0)$  e primária  $C_{11}(0)$  (Goovaerts, 1997)

$$\gamma_{12}(h) = \frac{C_{12}(0)}{C_{11}(0)} \gamma_{11}(h).$$

O MM1 apóia-se na hipótese de que o dado primário  $z_1(x)$  impede que dados primários  $z_1(x+h)$  mais distantes exerçam influência sobre a variável secundária. Para isso, esse modelo requer que a variável primária seja definida sobre um suporte maior que o da variável secundária, caso contrário deve ser utilizado o Modelo Markoviano 2 (MM2) (Journel, 1999).

De acordo com Shmaryan & Journel (1999), no MM2 a variância cruzada  $\gamma_{21}(h)$  é proporcional à variância secundária  $\gamma_{22}(h)$  e  $C_{22}(0)$  é a covariância secundária

$$\gamma_{21}(h) = \frac{C_{12}(0)}{C_{22}(0)} \gamma_{22}(h).$$

O MM2 assume que a variável primária é condicionada pelo dado co-localizado  $z_2(x)$  da variável secundária, o qual impede que dados secundários  $z_2(x+h)$  mais distantes influenciem a estimativa da mesma (Shmaryan & Journel, 1999).

## 5. MATERIAIS E MÉTODOS

Para realização do projeto, três conjuntos de dados foram digitalizados em planilhas eletrônicas. O primeiro conjunto, compilado de Furtado (1978), contém dados de profundidade e granulometria (areia, argila e silte / argila) para 217 amostras de sedimento de superfície de fundo (Figura 6).

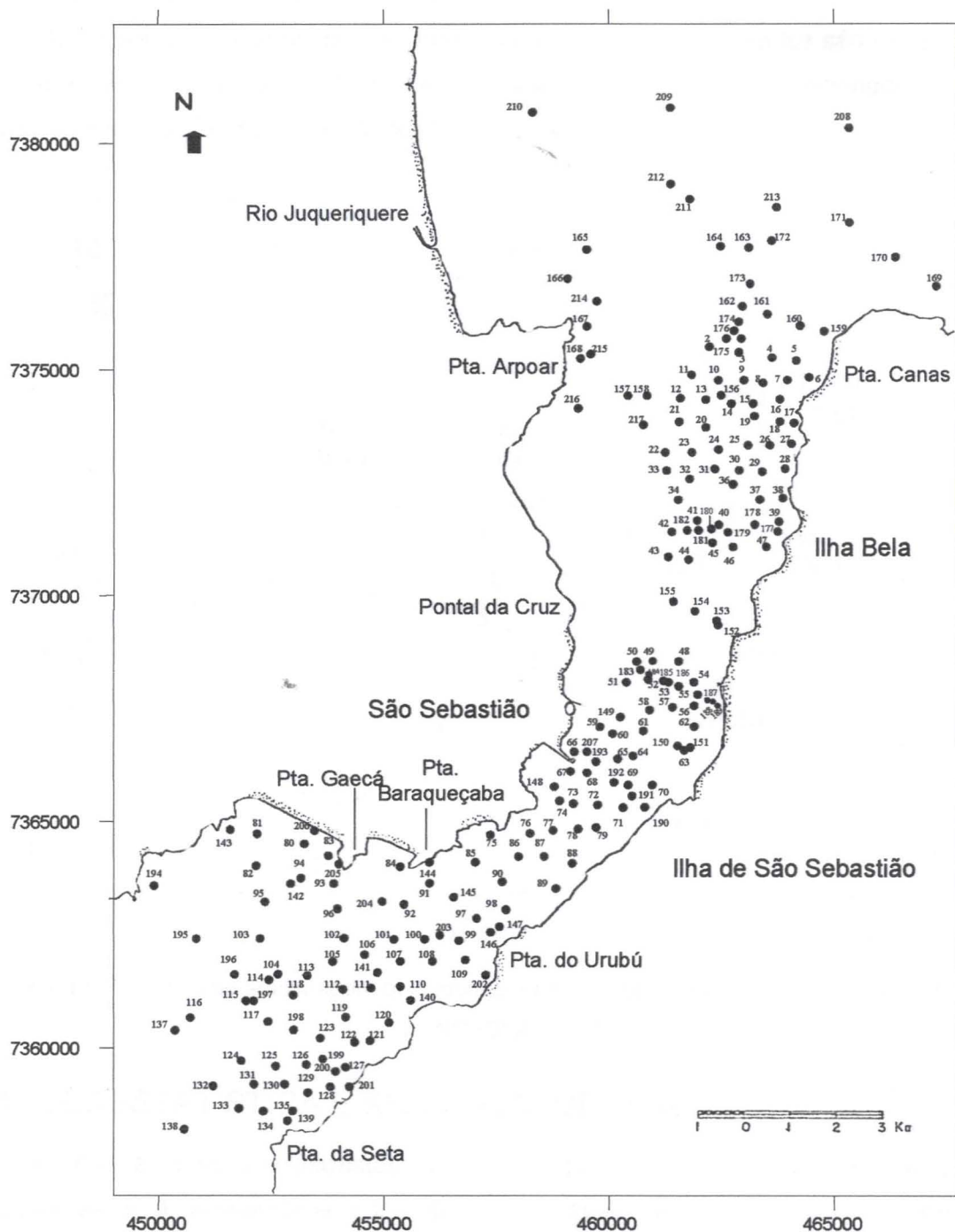


Figura 6. Pontos de amostragem do primeiro conjunto de dados. Extraído de Furtado (1978).

O segundo conjunto apresenta dados de abundância das espécies de foraminíferos bentônicos que ocorrem em 38 amostras, 19 coletadas no verão de 1998 e 19, no inverno

de 1997 (Figura 7). O terceiro possui dados de parâmetros estatísticos de Folk & Ward (1957) (diâmetro médio, assimetria, curtose e grau de seleção), sedimentológicos (porcentagens em peso de areia e lama), oceanográficos (profundidade, salinidade) e geoquímicos (porcentagem em peso de carbonato e de carbono orgânico, nitrogênio total, enxofre total e razões S/C e C/N) analisados para as 38 amostras. Os dados destes dois conjuntos foram compilados de projetos já realizados no Laboratório de Micropaleontologia do IGc da USP, em parceria com a FUNDESPA.

Os 19 pontos amostrais do segundo e terceiro conjuntos de dados são representativos de diferentes regimes hidrodinâmicos encontrados no CSS e foram selecionados a partir do mapa de Furtado (1978), correspondente ao primeiro conjunto de dados.

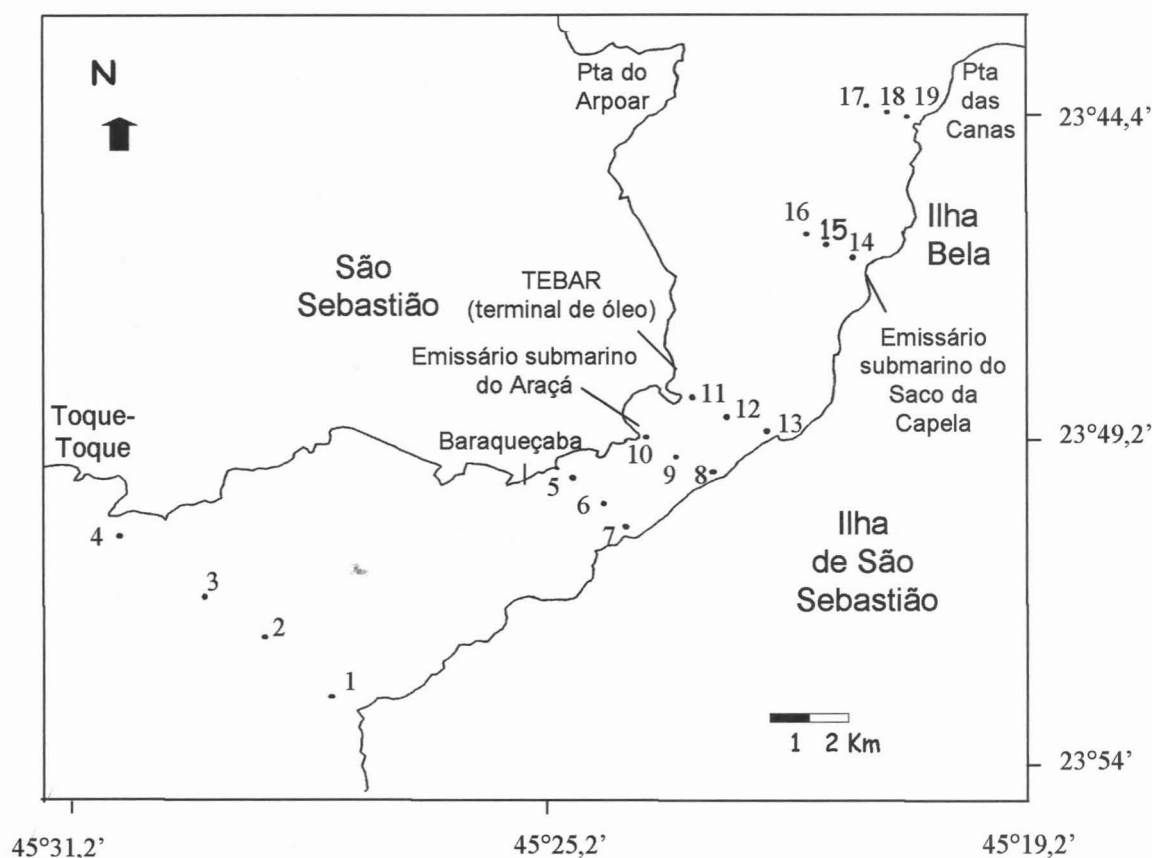


Figura 7. Pontos de amostragem do segundo e terceiro conjuntos de dados. Modificado de FUNDESPA (1999).

## 5.1. GEOESTATÍSTICA E KRIGAGEM ORDINÁRIA

Análise estatística e geoestatística foram aplicadas para estudar a distribuição de freqüências e a variabilidade espacial das variáveis do primeiro conjunto de dados, respectivamente. A aplicação da análise geoestatística é justificável pelo fato das variáveis em questão serem regionalizadas apresentando localização, continuidade espacial e anisotropia. Nesta etapa foram utilizados os programas do Sistema GeoVisual (Yamamoto, 2007).



A análise estatística compreendeu a obtenção dos histogramas e estatísticas descritivas das variáveis. A análise geoestatística consistiu em calcular variogramas experimentais para as mesmas variáveis e em ajustar modelos teóricos aos mesmos.

Os variogramas foram inicialmente calculados para 4 direções (0°, 45°, 90° e 135°) e, posteriormente, para 2 direções, neste caso, considerando os pares (0° e 90° ou 45° e 135°) com maior discrepância da dependência espacial entre si e também os variogramas mais bem estruturados.

Para o ajuste dos modelos teóricos, foram quantificados o efeito pepita, as amplitudes máxima e mínima e a variância espacial, a partir dos variogramas experimentais calculados para duas direções.

Na validação cruzada, foram obtidos diagramas de dispersão do valor real versus o valor estimado para cada variável estudada. O raio de busca foi escolhido com base no coeficiente de correlação das retas e no número de pontos estimados de modo a conciliar qualidade de estimativa e quantidade estimada.

As estimativas dos valores das variáveis, em locais não amostrados, foram feitas por krigagem ordinária, considerando-se os parâmetros de vizinhança definidos na validação cruzada e o modelo de variograma ajustado aos variogramas experimentais. O tamanho definido para os blocos foi de 600 m.

Os mapas de estimativa, assim obtidos, permitiram prever a distribuição batimétrica e granulométrica ao longo do canal de São Sebastião.

## 5.2. ANÁLISE POR CORRESPONDÊNCIA CANÔNICA

Análise por correspondência canônica (ACC) foi realizada com intuito de verificar quais variáveis (terceiro conjunto de dados) são responsáveis pela composição da associação de foraminíferos do segundo conjunto de dados. Esse método é apropriado para tal finalidade, pois integra as técnicas de regressão e ordenação (Ter Braak, 1986; Ter Braak, 1994).

Foi utilizado o programa CANOCO, versão 4.5 (Ter Braak & Smilauer, 2002), pois o mesmo permite análise simultânea de todas as espécies e disponibiliza o teste de permutação de Monte Carlo. Com base nesse teste, foram selecionadas as variáveis ambientais com nível de significância estatística menor ou igual a 0,05. Também foram observados e analisados os coeficientes de correlação entre as variáveis ambientais e o autovalor dos dois primeiros eixos ordenados canônicos para eliminar variáveis complementares.

Com relação às espécies, foram consideradas apenas aquelas com mais de 40 indivíduos, conforme sugerido por Horton et al. (1999) uma vez que, em técnicas de ordenação, espécies raras interferem muito pouco nos resultados (Duleba & Debenay, 2003), além de dificultar a interpretação da análise (Gauch, 1982). Os dados das espécies foram normalizados por meio do cálculo do logaritmo dos mesmos, conforme:  $y = \log(x+1)$ .

### 5.3. GEOESTATÍSTICA E COKRIGAGEM CO-LOCALIZADA ORDINÁRIA

O procedimento inicial foi realizar análise estatística para obtenção dos histogramas e estatísticas descritivas das variáveis primárias (dados de abundância das espécies do segundo conjunto de dados). Em seguida, procedeu-se a análise geoestatística com o cálculo de variogramas para 4 direções e, posteriormente, para 1 direção para obter a variabilidade espacial das mesmas variáveis. Os dados dos períodos de verão e de inverno foram analisados conjuntamente, dado o fato do número de amostras coletadas em cada período ser pequeno. Esses procedimentos foram realizados com auxílio dos programas do Sistema GeoVisual (Yamamoto, 2007).

Nesta etapa, foram consideradas as espécies (*Ammonia tepida*, *Ammotium* sp., *Lenticulina* sp., *Gaudryina exilis* e *Sigmoilopsis schlumbergeni*) cujos dados apresentaram maiores coeficientes de correlação com a variável granulométrica selecionada pelo teste de Monte Carlo (i.e., areia). Também foram analisadas as distribuições dos grupos de espécies bioindicadoras, obtidos a partir da classificação de algumas espécies consideradas na ACC. Esses grupos são: matéria orgânica (*Fursenkoina pontoni*, *Fissurina semimarginata*, *Pseudononion grateloupi*, *Pseudononion atlanticum*, *Bulimina marginata*, *Bolivina compacta*, *Buliminella elegantissima*), água marinha costeira, com aporte de água doce (*Ammonia tepida*, *Ammotium* sp., *Gaudryina exilis*, *Haynesina depressula*), plataforma externa (*Uvigerina peregrina*, *Lenticulina* sp., *Sigmoilopsis schlumbergeni*) e ambiente oxigenado (*Discorbis williamsoni*, *Hanzawaia boueana*, *Rosalina floridensis*, *Rolshauseni rolshauseni*, *Poroepionides lateralis*).

As estimativas foram feitas por cokrigagem ordinária co-localizada. A aplicação da cokrigagem faz-se necessária, pois o número de amostras com dados de abundância é insuficiente para plena aplicação da krigagem. Por outro lado, o maior número de dados granulométricos obtidos de Furtado (1978) pode auxiliar as estimativas dada a existência de correlação entre distribuição granulométrica e de foraminíferos. Dessa maneira, as estimativas das variáveis acima mencionadas (primárias) também foram realizadas a partir dos dados previamente estimados da variável areia (secundária) do primeiro conjunto de dados.

A opção pela cokrigagem ordinária co-localizada levou em consideração as características dos conjuntos de dados (variáveis primária e secundária com amostragens escassa e densa, respectivamente) e os objetivos a serem alcançados (estimativa da variável primária em todos os nós da malha da variável secundária).

Foram obtidos mapas de estimativa para cada período, embora os variogramas de cada variável primária refiram-se aos períodos de verão e inverno conjuntamente. Não foi necessário ajustar os variogramas cruzados haja vista o emprego do Modelo de Markov 1

para covariâncias cruzadas. As estimativas foram feitas no programa Isatis (Geovariances, 2006).

## 6. DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO

As atividades foram realizadas tal como proposto no cronograma abaixo e os objetivos foram alcançados. Houve apenas uma mudança do método utilizado na estimativa da abundância das espécies, conforme explicado no item 5.3, visando a obtenção de melhores resultados.

	FEV	MAR	ABR	MA	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
Levantamento bibliográfico	X	X			X	X	X	X	X		
Elaboração do projeto inicial	X	X									
Informatização do banco de dados		X					X				
Geoestatística e krigagem ordinária		X	X	X							
Análise por correspondência canônica				X	X	X					
Elaboração do relatório de progresso				X	X	X	X				
Geoestatística; cokrigagem colocalizada							X	X	X		
Elaboração da monografia								X	X	X	
Elaboração da apresentação										X	X
Apresentação e arguição											X

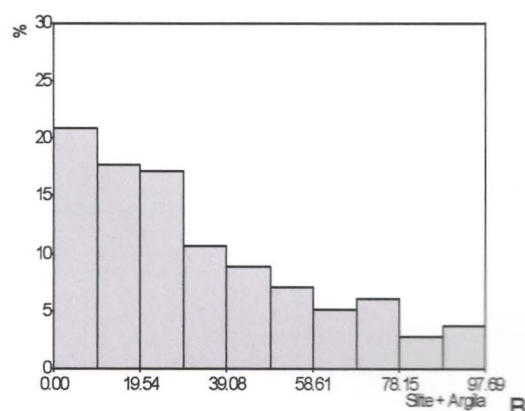
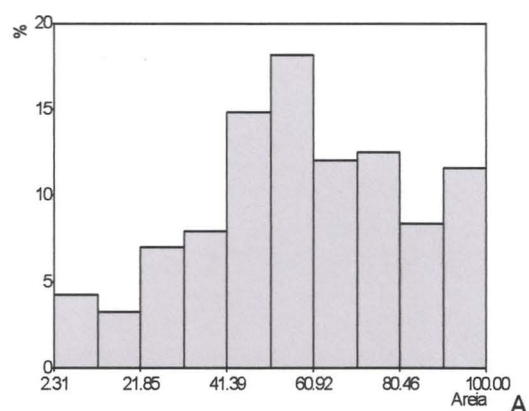
## 7. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 7.1. GEOESTATÍSTICA E KRIGAGEM ORDINÁRIA

#### 7.1.1. ANÁLISE ESTATÍSTICA

O histograma das porcentagens em peso de areia (Figura 8 A) aproxima-se de uma distribuição normal, com moda entre 51,16 e 60,92. As variáveis silte+argila (Figura 8 B) e argila (Figura 8 C), por sua vez, apresentam distribuição assimétrica positiva.

Na Figura 8 D, o histograma da variável profundidade indica provável mistura de populações já que podem ser reconhecidas duas distribuições assimétricas positivas, de 2 a 14,6 m e de 14,6 a 44 m.





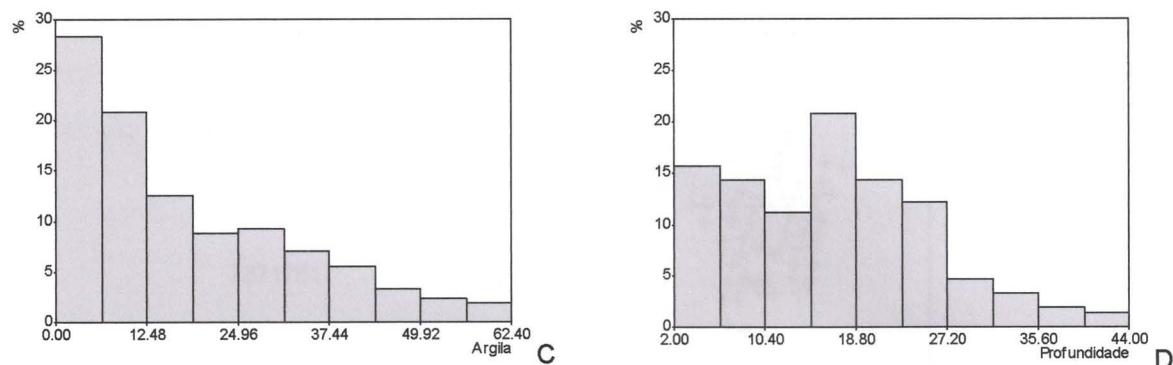


Figura 8. Histogramas das variáveis em estudo.

Na Tabela 1, encontram-se quantificadas as estatísticas descritivas de cada uma das variáveis. Em todos os casos, a média é maior que a mediana, confirmando a assimetria positiva das distribuições. Convém ressaltar, entretanto, que no caso da variável areia, média e mediana são relativamente próximas e, dessa forma, a distribuição pode ser considerada aproximadamente normal. Já no caso da variável profundidade, a pequena diferença entre média e mediana possivelmente resulta da mistura de populações.

O coeficiente de variação (Tabela 1) indica que a dispersão em torno da média é maior para argila e menor para areia, sendo intermediária para silte+argila e profundidade.

Tabela 1. Estatísticas descritivas das variáveis em estudo.

	AREIA	SILTE+ARGILA	ARGILA	PROFUNDIDADE
Nº de dados	215	215	215	215
Média	58.267	32.347	17.098	16.452
Mediana	57.725	25.175	12.530	15.925
Desvio Padrão	24.152	25.630	15.653	9.142
Coeficiente de Variação	0.415	0.792	0.916	0.556

### 7.1.2. ANÁLISE GEOESTATÍSTICA

O mapa base das amostras, a partir do qual foi determinado o campo geométrico utilizado na análise geoestatística, encontra-se na Figura 9.

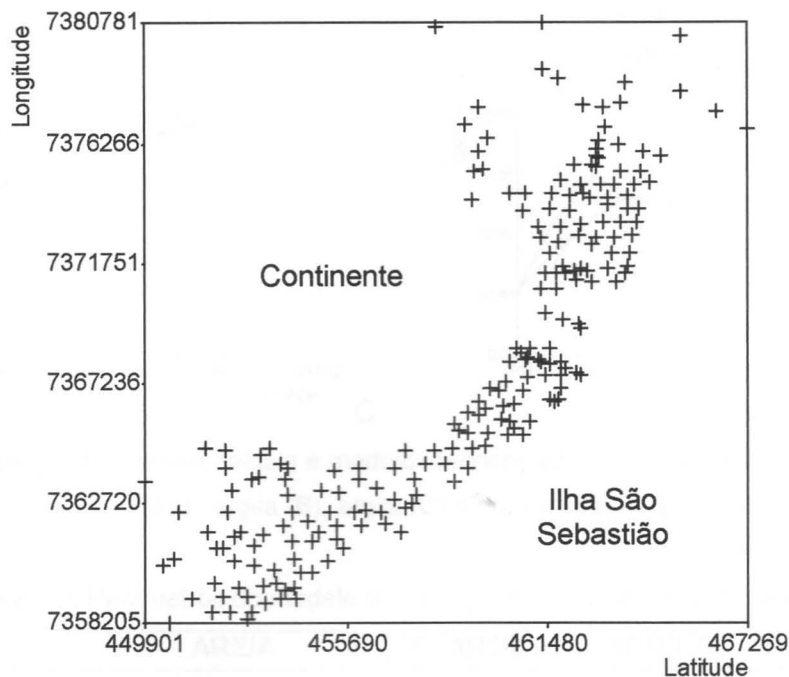
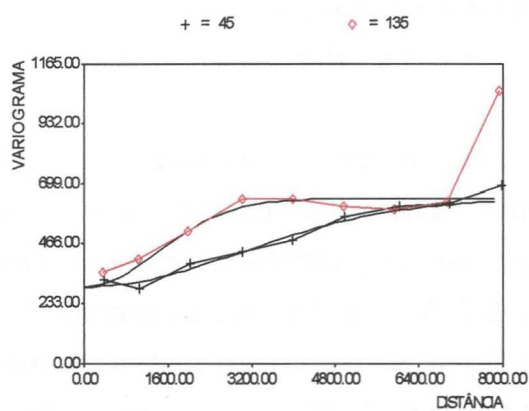
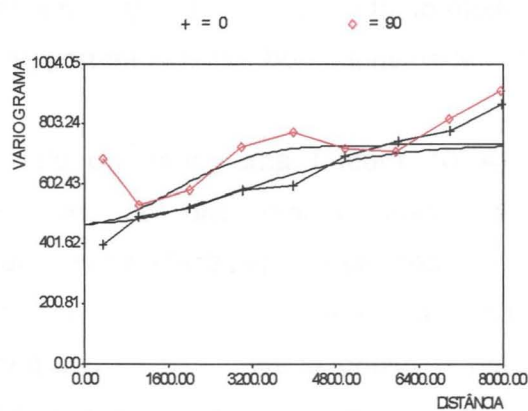


Figura 9. Mapa base das amostras no Canal de São Sebastião.

A Figura 10 apresenta os variogramas experimentais obtidos para as quatro variáveis analisadas bem como os modelos teóricos de variograma ajustados. O modelo gaussiano apresentou melhor ajuste aos variogramas das variáveis areia, silte+argila e argila (Figura 10 A, B e C, respectivamente) e o esférico, ao variograma da variável profundidade (Figura 10 D). Os parâmetros definidos para cada modelo de variograma estão resumidos na Tabela 2.



A



B

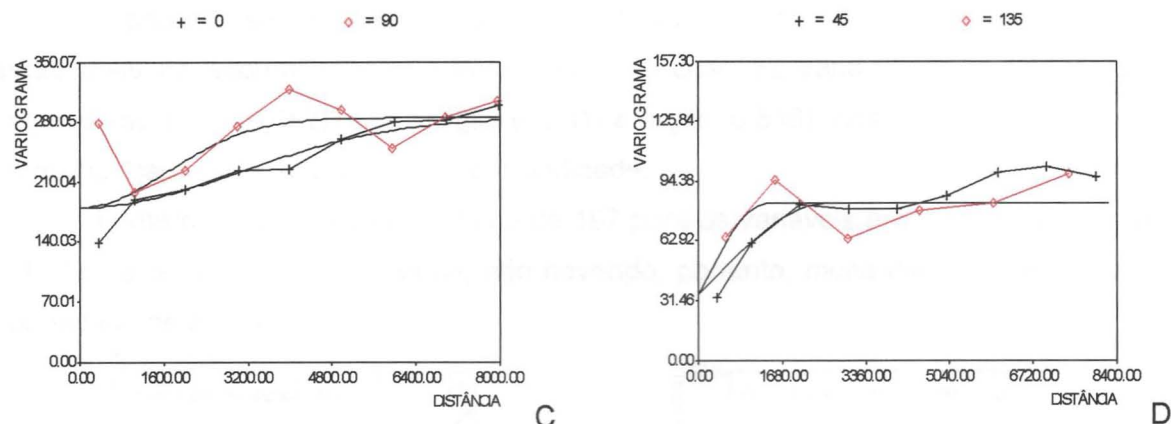


Figura 10. Variogramas experimentais e modelos teóricos de variograma das variáveis areia (A), silte+argila (B), argila (C) e profundidade (D).

Tabela 2. Parâmetros do modelo de variograma de cada variável analisada.

	AREIA	SILTE+ARGILA	ARGILA	PROFUNDIDADE
Efeito Pepita	297,85	469,81	180,25	34,28
Amplitude Máxima	7333,31	6957,88	7378,00	2575,31
Amplitude Mínima	3416,90	3988,40	4017,02	1345,50
Patamar	641,85	733,16	284,94	82,55

As direções de maior continuidade espacial são 45° para as variáveis areia (Figura 10 A) e profundidade (Figura 10 D) e 0° para as variáveis silte / argila (Figura 10 B) e argila (Figura 10 C).

Os modelos de variograma obtidos para as variáveis silte / argila e argila (Figuras 10 B e C, respectivamente) também são semelhantes quanto aos valores de amplitudes máxima e mínima (Tabela 2). A diferença entre ambos está no patamar mais elevado do modelo de variograma da variável silte / argila que apresenta, portanto, menor homogeneidade (Tabela 2).

A variável areia também apresenta modelo de variograma (Figura 10 A) com amplitudes, máxima e mínima, muito próximas às das outras duas variáveis granulométricas, diferindo destas pela menor relação entre efeito pepita e patamar.

De acordo com a Figura 10 D e a Tabela 2, verifica-se que a variável profundidade apresenta menores valores de amplitude (máxima e mínima), efeito pepita e patamar, sendo, portanto, menos contínua e mais homogênea relativamente às outras variáveis.

### 7.1.3. VALIDAÇÃO CRUZADA

A Figura 11 A, B, C e D apresenta o diagrama de dispersão do valor real versus estimado para as variáveis areia, silte / argila, argila e profundidade, respectivamente. Os pontos foram estimados, considerando-se 8 pontos por setor e raios de busca por amostras de 2000 m para as variáveis areia, silte / argila e argila e de 1700 m para a variável profundidade.

Comparando-se os coeficientes de correlação, conclui-se que os valores estimados estão mais de acordo com os valores reais no caso da variável profundidade (0,801), seguindo-se areia (0,652), silte / argila (0,531) e argila (0,518). Assim, o fenômeno espacial foi melhor capturado para a variável profundidade.

O número de pontos estimados foi de 197 para as variáveis areia, silte / argila e argila e 190 para a variável profundidade, não havendo, portanto, muita diferença em termos de quantidade de pontos estimados.

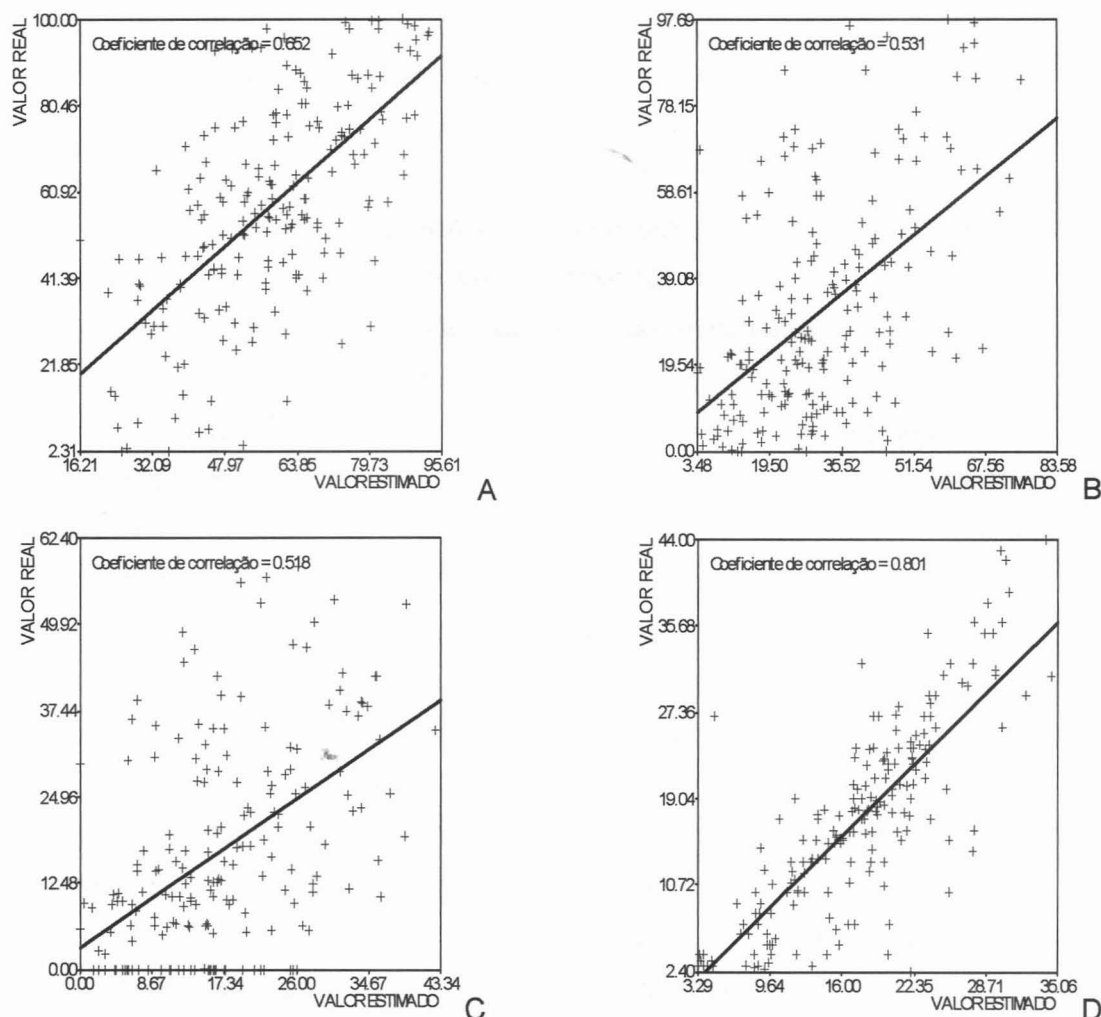


Figura 11. Diagramas de dispersão resultantes da validação cruzada para as variáveis areia (A), silte+argila (B), argila (C) e profundidade (D).

#### 7.1.4. KRIGAGEM ORDINÁRIA

Ao longo de todo canal, longitudinalmente ao mesmo, predominam porcentagens intermediárias de areia (Figura 12 A), silte+argila (Figura 12 B) e argila (Figura 12 C). Nesses casos, as porções mais profundas corresponderiam ao eixo do canal onde ocorre mistura de classes granulométricas, devido a mudanças no sentido e intensidade do fluxo, acarretando momentos de alta e baixa energia e deposição de sedimentos grossos e finos, respectivamente (Furtado, 1978).

As distribuições de argila e silte+argila são muito semelhantes entre si e complementares à distribuição de areia, isto é, onde ocorrem maiores porcentagens de sedimentos mais argilosos e siltosos, ocorrem menores porcentagens de areia.

Nesse sentido, mais ao sul do canal, há um predomínio de sedimentos arenosos (Figura 12 A) em detrimento dos mais finos (Figuras 12 B e 12 C), sobretudo próximo à costa continental, mas também nas proximidades da costa insular. Segundo Furtado (1978), nas proximidades da costa continental, ondas promovem constante retrabalhamento dos sedimentos de fundo, enquanto pequenos vórtices remobilizam os sedimentos pelíticos para o eixo do canal. Junto à ilha de São Sebastião, por sua vez, a ação de correntes seria mais intensa propiciando deposição de sedimentos mais grossos com pequenos vórtices locais removendo os finos.

Na entrada norte do canal, também predominam sedimentos arenosos (Figura 12 A). Nesse caso, tal predominância pode estar relacionada ao aumento de velocidade resultante do estreitamento do canal na região central e, possivelmente, da geração de correntes hidráulicas por represamento (Furtado, 1978).

Por outro lado, as maiores porcentagens de sedimentos argilosos e siltosos e as menores porcentagens de areia ocorrem na porção mais afunilada do canal, no lado da costa continental, configurando uma estreita faixa (Figuras 12 A, B e C). Na porção norte, há manchas com predominância de sedimentos mais finos, menos expressivas em área, tanto no lado da costa continental quanto da costa insular (Figuras 12 B e C).

A deposição dos sedimentos pelíticos próximo à costa continental provavelmente deve-se ao giro anti-horário da corrente principal na entrada norte do canal, gerando fluxo de baixa energia desde a Ponta do Arpoar até a Ponta de Baraqueçaba. No caso da deposição de sedimentos mais finos junto à ilha, a atenuação da energia resulta do desvio das correntes mais intensas para o eixo do canal (Furtado, 1978).

O padrão de distribuição da profundidade (Figura 12 D) revela predomínio de valores intermediários ao longo de toda extensão longitudinal do canal com tendência generalizada de diminuição gradual dos mesmos da costa da ilha de São Sebastião até a costa continental. As porções mais rasas corresponderiam às feições morfológicas submersas de origem sedimentar de Furtado (1978). Os locais mais profundos, por sua vez, ocorrem no centro da porção mais estreita do canal e, provavelmente, constituem o canal de fluxo principal das águas (Furtado, 1978).



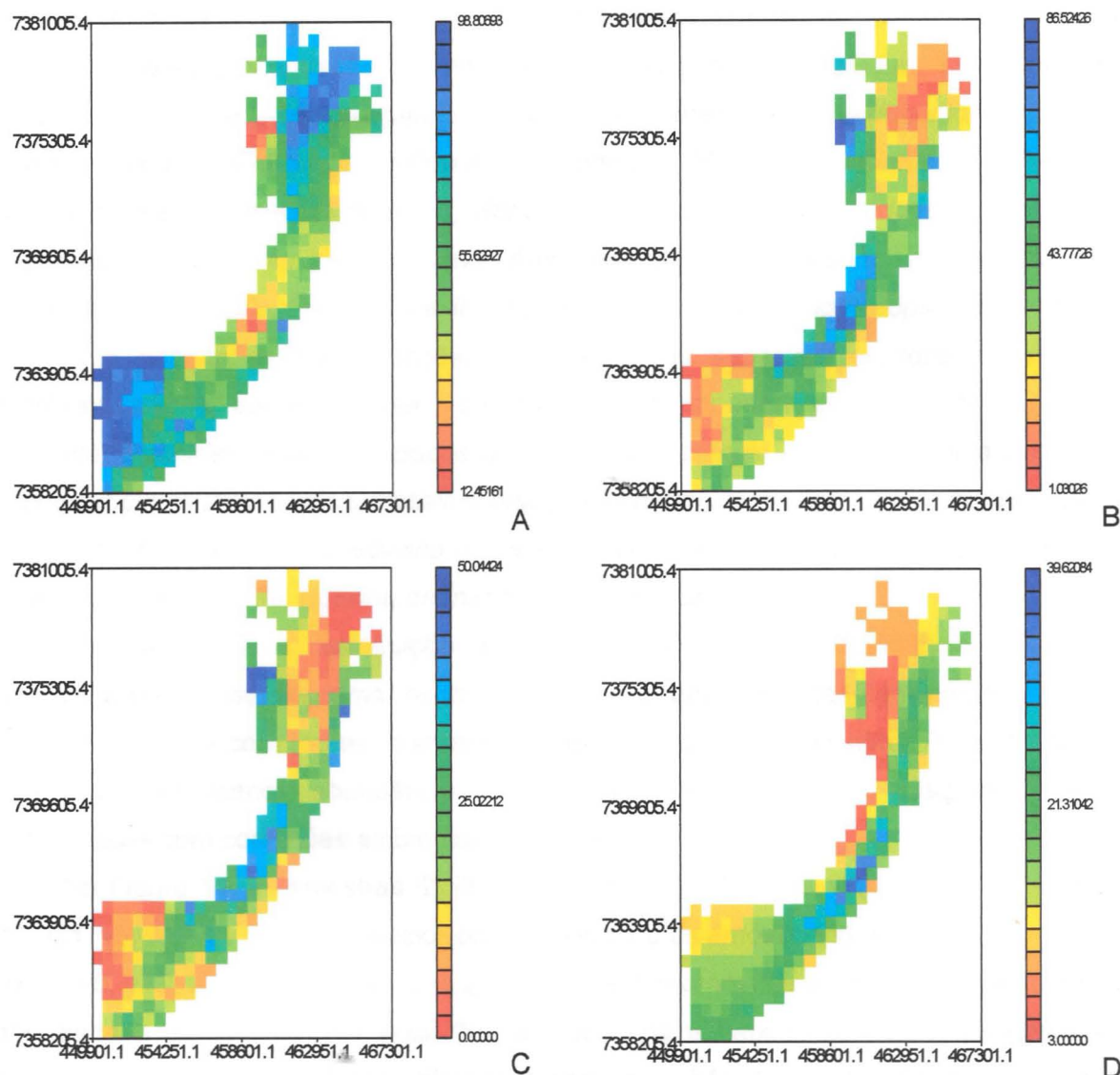


Figura 12. Mapas de estimativa das porcentagens de areia (A), silte+argila (B), argila (C) e dos valores de profundidade (D) ao longo do Canal de São Sebastião.

## 7.2. ANÁLISE POR CORRESPONDÊNCIA CANÔNICA

As Figuras 13 e 14 ilustram os diagramas de ordenação (“biplots”) das espécies e das estações, respectivamente. Esses diagramas apresentam quatro variáveis ambientais (porcentagem de areia, grau de assimetria e teores de nitrogênio e enxofre) as quais foram significativamente correlacionadas com a distribuição das espécies, sendo utilizadas para a ordenação das estações e das espécies ao longo do primeiro e segundo eixos da ACC.

Ao analisar as Figuras 13 e 14, verifica-se que porcentagem de areia, grau de assimetria e teor de nitrogênio estão relacionados ao eixo 1 e teor de enxofre, ao eixo 2. Dessa forma, o eixo 1 da ACC representa gradiente ambiental que varia de locais com maiores porcentagens de areia e maiores valores de coeficiente de assimetria para locais com maiores porcentagens de sedimentos finos e valores mais elevados de nitrogênio. O eixo 2, por sua vez, reflete gradiente que varia de locais com maiores teores de enxofre para locais com menores concentrações do mesmo.

As espécies relacionadas ao eixo 1 distribuem-se das maiores concentrações de areia para as maiores concentrações de nitrogênio, na seguinte ordem (Figura 13): *Fursenkoina pontoni*, *Fissurina semimarginata*, *Uvigerina peregrina*, *Pseudononion grateloupi*, *Pseudononion atlanticum*, *Bulimina marginata*, *Discorbis williamsoni*, *Pararotalia cananeaensis*, *Hanzawaia boueana*, *Bolivina compacta*, *Rosalina floridensis*, *Rolshauseni rolshauseni*, *Buliminella elegantissima*, *Ammonia tepida*, *Ammotium* sp., *Lenticulina* sp., *Poroeponides lateralis*, *Gaudryina exilis*, *Haynesina depressula*, *Sigmoilopsis schlumbergeri*.

Com relação às concentrações de enxofre, as espécies relacionadas ao eixo 2 distribuem-se na seguinte ordem decrescente de importância (Figura 14): *Triloculina trigonula*, *Eponides repandus*, *Buccella peruviana* f. *campsi*, *Quinqueloculina patagonica*, *Quinqueloculina lamarckiana*, *Rosalina bradyi*, *Criboelphidium discoidale*, *Brizalina striatula*, *Criboelphidium poeyanum*, *Bolivina doniezi*, *Cassidulina crassa* f. *media*, *Bolivina pulchella*, *Ammonia* spp. *Juvenile*, *Bolivina ordinaria*, *Pseudononion opima*, *Cassidulina* sp..

Verifica-se que a distribuição das espécies com maior abundância concentra-se próximo à origem do diagrama, ocorrendo, portanto, em ambientes com predominância de areia muito fina e com teores intermediários de nitrogênio e de enxofre. Por outro lado, as espécies com menor abundância localizam-se na periferia do diagrama, estando relacionadas com condições ambientais extremas.

Na Figura 14, as amostras i2, i3, v3, v2, v13, i15, i18, v18, v7, i13, i7, v16, v10, v17, i17, i11, v5, v11 e v14 estão relacionadas ao eixo 1 e as amostras i6, v4, i5, i10, i14, i9, v12, v9, i2, v6, v19, i19, v1 e i16, ao eixo 2. A maioria das amostras de ambos os períodos está associada a ambientes com areia fina a muito fina e baixos teores de nitrogênio e de enxofre, não havendo, portanto, diferenças entre o padrão de distribuição das amostras do verão e do inverno.

A distribuição das amostras ao longo dos eixos permite detectar focos de poluição no canal. De acordo com a Figura 14, as amostras i10 e v10 encontram-se em locais com altos teores de enxofre e de nitrogênio, respectivamente. Assim sendo, o aporte de esgoto do emissário submarino do Araçá pode ser inferido a partir dessas amostras as quais se localizam nas proximidades do mesmo (Figura 6). De modo semelhante, a partir das amostras i14 e v14, identifica-se o aporte de esgoto do emissário submarino do Saco da Capela como fonte poluidora na região. As amostras i11 e v11 localizam-se em ambientes com altas concentrações de nitrogênio (Figura 14). Como essas amostras encontram-se próximo ao Terminal Petrolífero Almirante Barroso (TEBAR) (Figura 6), então as altas concentrações de nitrogênio possivelmente resultam de efluentes industriais provenientes do mesmo. Nesses locais, encontram-se as espécies capazes de sobreviver em ambiente poluído e, no caso dos locais com altos teores de enxofre, ambiente redutor com matéria orgânica em decomposição.

A Tabela 3 resume os resultados da ACC. Os autovalores dos quatro primeiros eixos indicam que a importância dos mesmos na explicação da variância dos dados diminui do primeiro para o quarto eixo. A correlação entre espécies e ambiente é alta e os dois primeiros eixos explicam 78 % da variância dos dados.

Tabela 3. Sumário dos resultados da ACC.

EIXOS	1	2	3	4	INÉRCIA TOTAL
AUTOVALORES	0,04	0,03	0,01	0,01	0,425
CORRELAÇÕES ESPÉCIES-AMBIENTE	0,84	0,79	0,66	0,63	
VARIÂNCIA EM PORCENTAGEM ACUMULADA					
dos dados das espécies	10	17	20,4	21,8	
das relações entre espécies e ambiente	45,7	78	93,4	100	

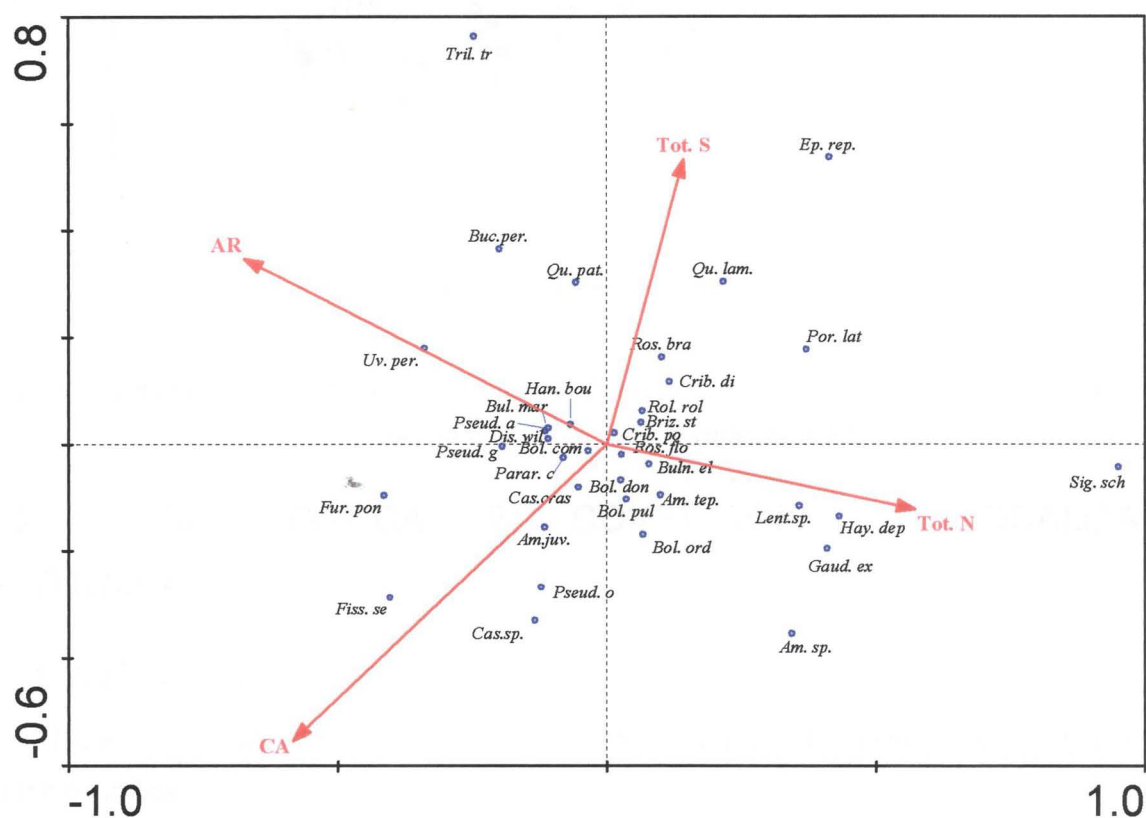


Figura 13. Diagrama ordenado para as espécies.



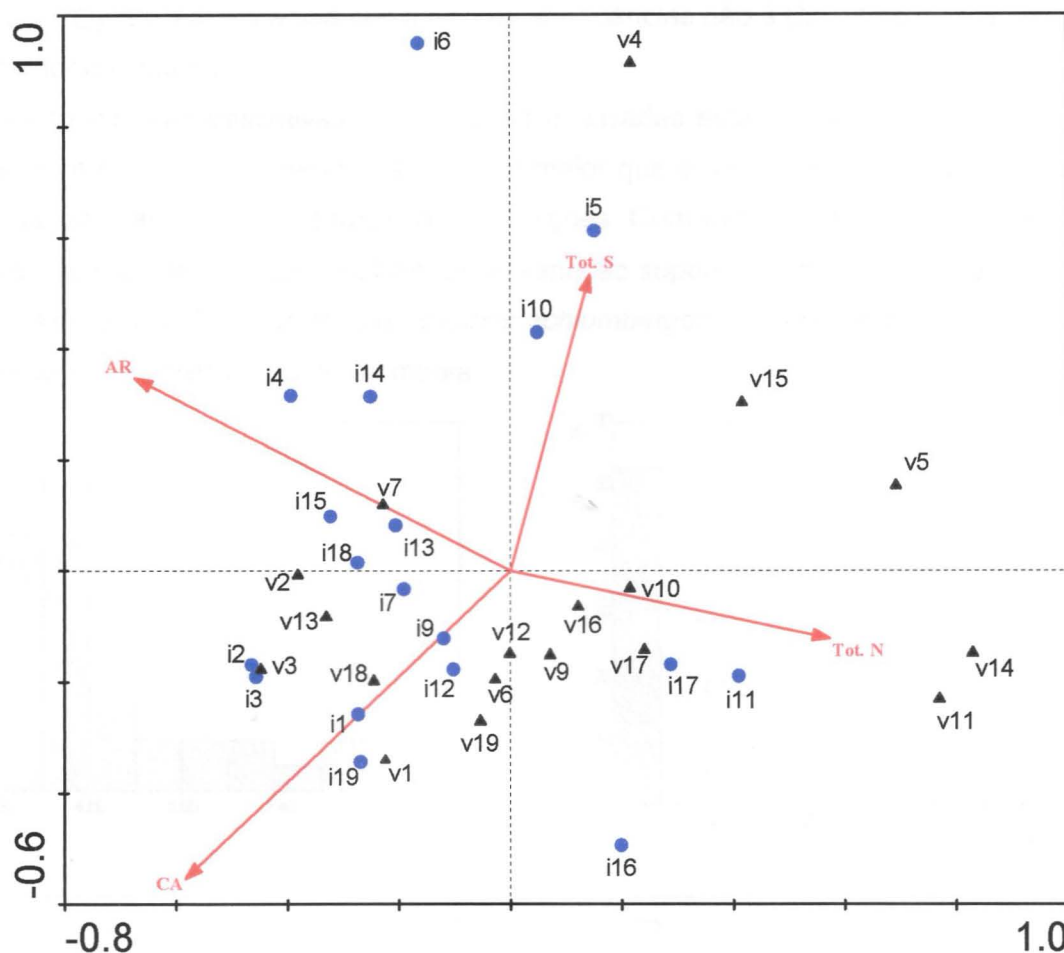


Figura 14. Diagrama ordenado para as amostras. Círculos e triângulos referem-se, respectivamente, às coletas do inverno de 1997 e verão de 1998.

### 7.3. GEOESTATÍSTICA E COKRIGAGEM CO-LOCALIZADA ORDINÁRIA

#### 7.3.1. ANÁLISE ESTATÍSTICA

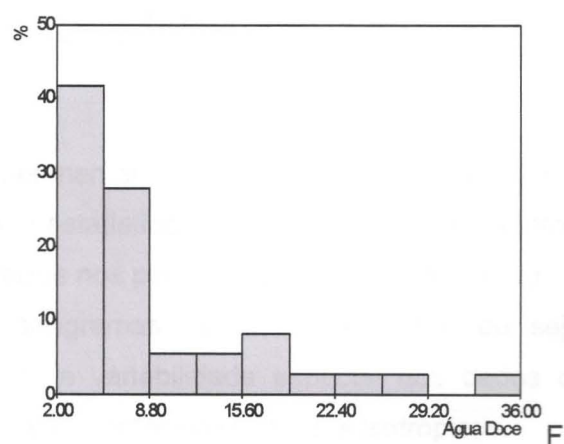
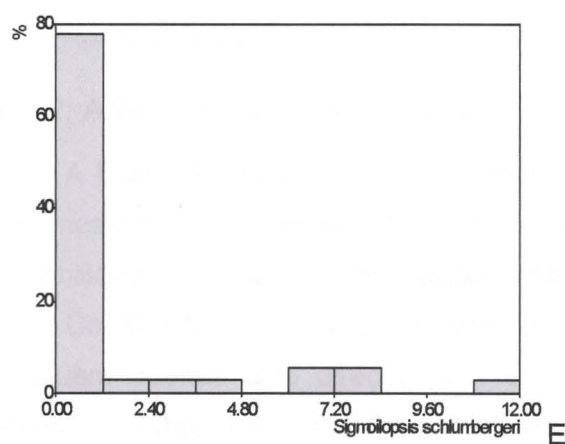
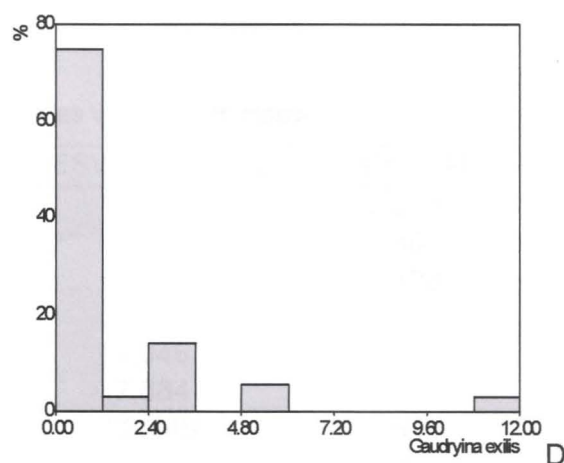
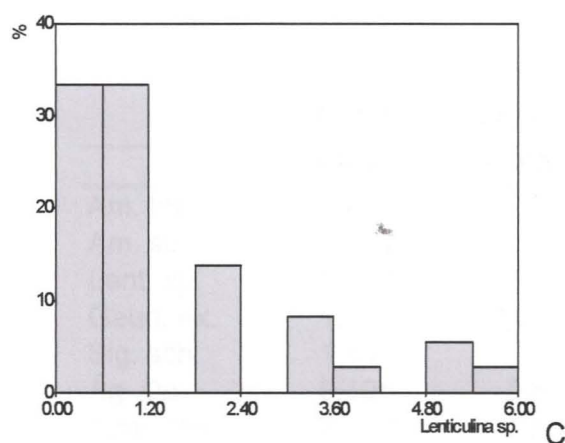
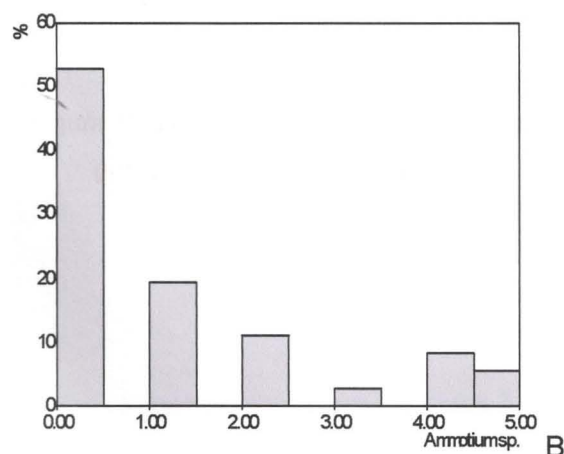
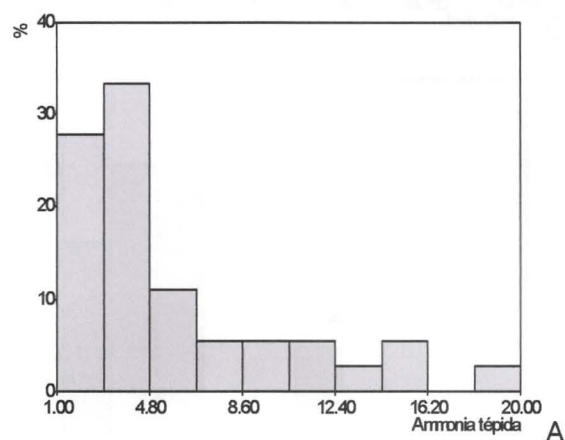
Na Figura 15 encontram-se os histogramas das espécies individuais e dos grupos de espécies indicadoras.

Em todos os casos, as distribuições das abundâncias são assimétricas positivas, com alguma mistura de populações, esta sendo mais evidente para os grupos de espécies indicadoras exceto para o grupo 'matéria orgânica' (Figura 15 H) que não exibe tal característica.

A partir desses histogramas verifica-se que predominam as menores abundâncias tanto das espécies quanto dos grupos analisados, a exceção do grupo 'ambiente oxigenado'. Esse padrão provavelmente é consequência da amostragem do segundo conjunto de dados cujos pontos amostrais concentraram-se na porção central do canal e pode ser observado nos mapas do item 7.3.3. No caso do grupo 'ambiente oxigenado'

(Figura 15 G), a predominância das menores abundâncias não é tão nítida e as abundâncias são melhor distribuídas.

As estatísticas descritivas das variáveis analisadas estão resumidas na Tabela 4. De acordo com os dados da mesma, a média é maior que a mediana para todas as variáveis, confirmando a assimetria positiva das distribuições. Com exceção de '*Ammonia tepida*', as demais espécies apresentam coeficiente de variação superior ao dos grupos de espécies, o maior valor sendo da variável '*Sigmoilopsis schlumbergeri*' que, portanto, apresenta maior dispersão dos valores em torno da média.



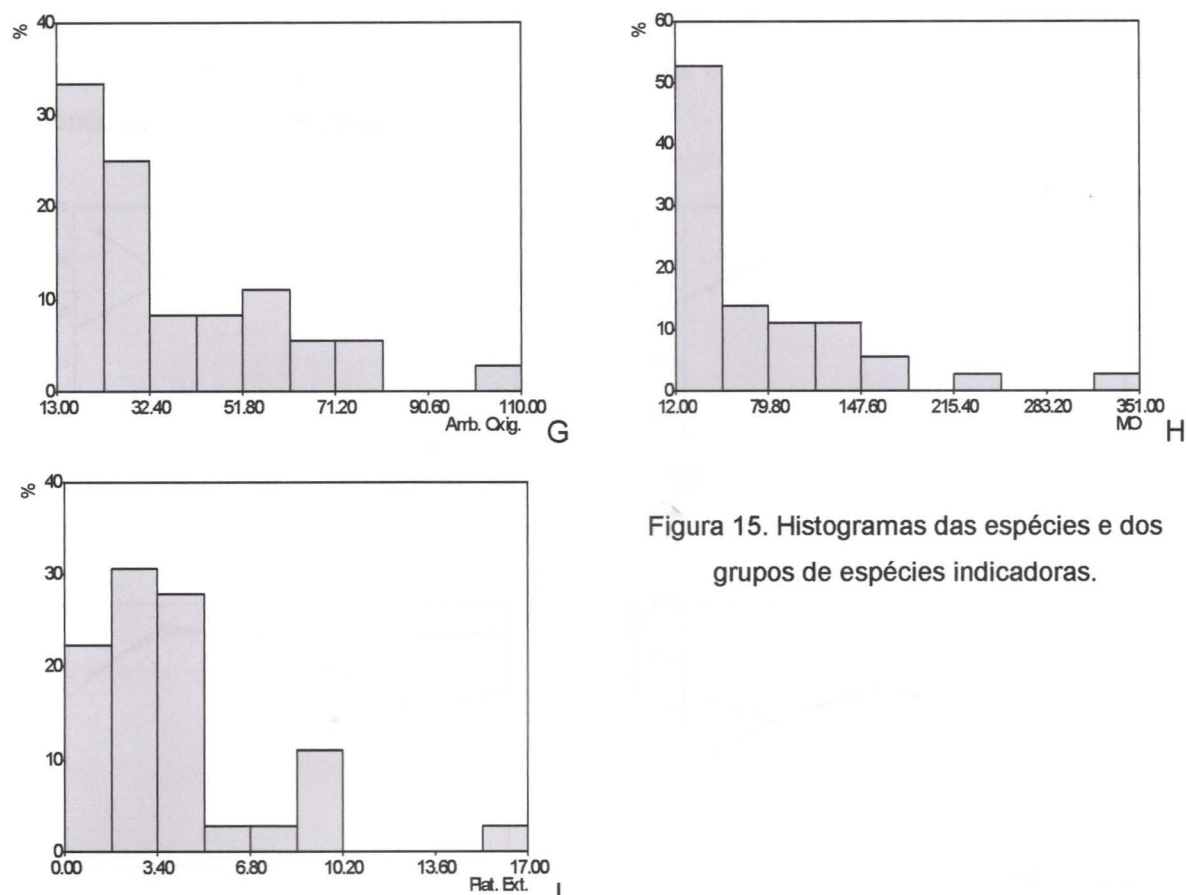


Figura 15. Histogramas das espécies e dos grupos de espécies indicadoras.

Tabela 15. Estatísticas descritivas das variáveis analisadas.

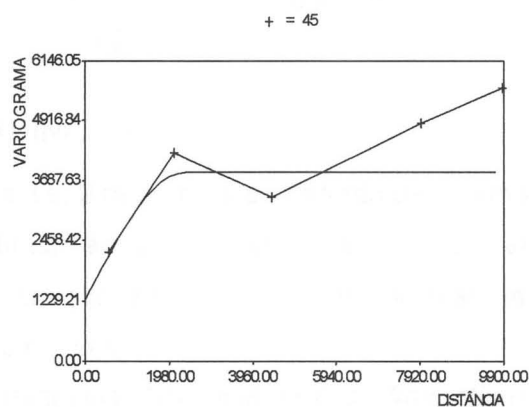
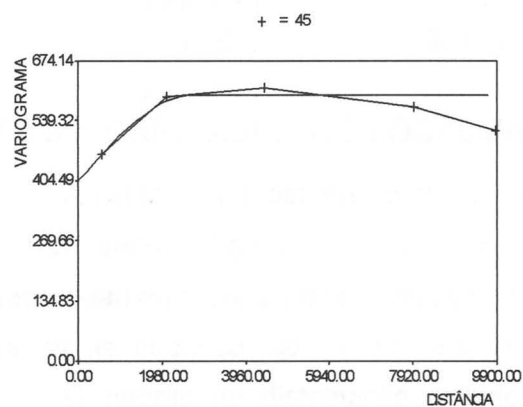
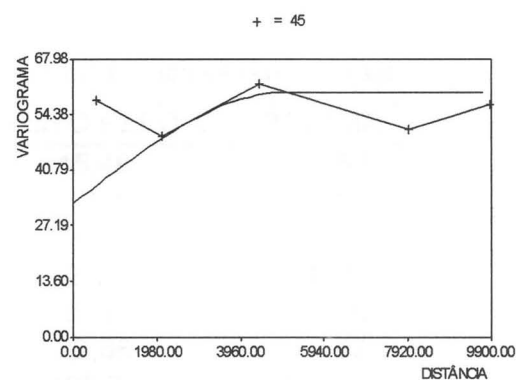
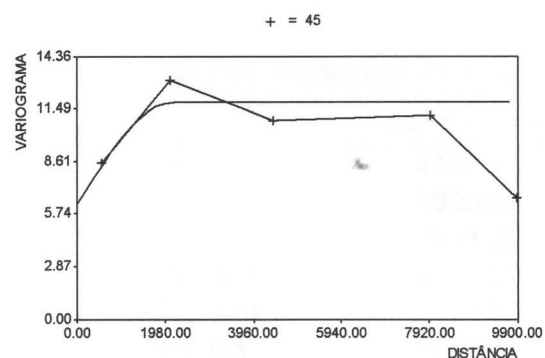
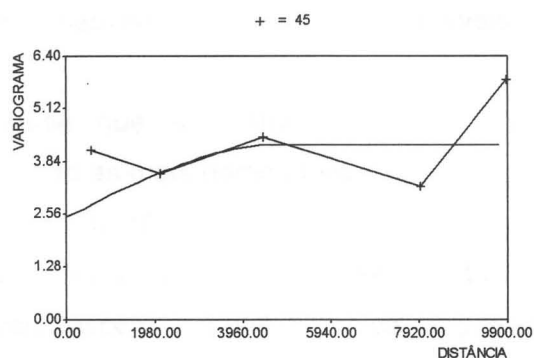
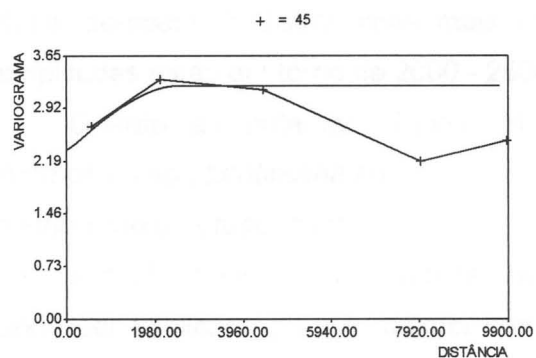
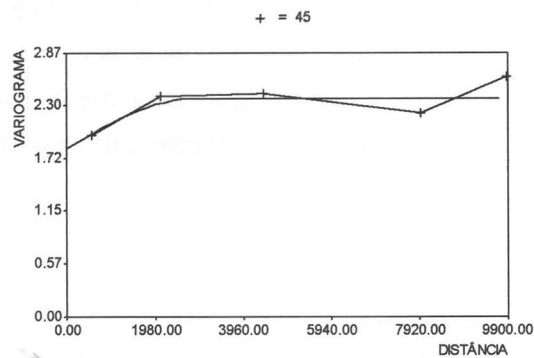
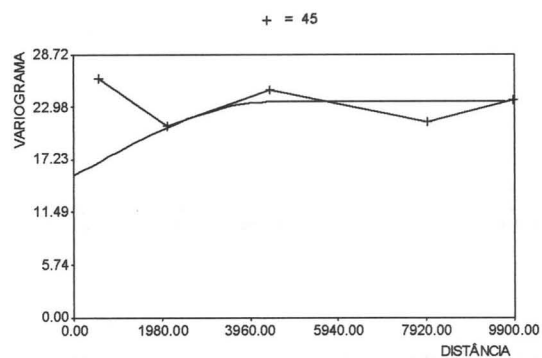
	MÉDIA	MEDIANA	DESVIO PADRÃO	COEF. VAR.
Am. tep.	5,417	3,2	4,734	0,874
Am. sp.	1,111	-	1,542	1,387
Lent. sp.	1,417	0,5	1,57	1,108
Gaud. ex.	1,472	0,357	2,23	1,514
Sig. sch.	1,444	-	2,948	2,041
Ág. Do.	9,194	5,6	7,684	0,836
Amb. Oxiq.	36,028	27	22,148	0,615
Mat. Org.	75	40	70,044	0,934
Plat. Ext.	3,972	2,5	3,492	0,879

### 7.3.2. ANÁLISE GEOESTATÍSTICA

A Figura 16 apresenta os variogramas experimentais e os modelos teóricos ajustados aos mesmos. Tal como os histogramas na análise estatística, cada variograma representa a variabilidade espacial das abundâncias das espécies nos períodos de verão e de inverno.

Conforme pode ser observado, esses variogramas são omnidirecionais, ou seja, possuem apenas uma direção para caracterizar a variabilidade espacial dos dados de abundância das espécies e dos grupos, pois os dados foram considerados isotrópicos.

Em todos os casos, o modelo esférico apresentou melhor ajuste aos variogramas. Assim sendo, os dados de abundância das espécies e dos grupos representam fenômenos de continuidade intermediária.





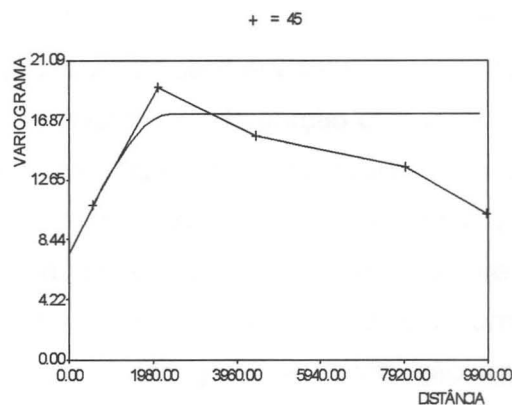


Figura 16. Variogramas experimentais e modelos teóricos de variograma das variáveis *Ammonia tepida* (A), *Ammotium* sp. (B), *Lenticulina* sp. (C), *Gaudryina exilis* (D), *Sigmoilopsis schlumbergeri* (E), Água Doce (F), Ambiente Oxigenado (G), Matéria Orgânica (H) e Plataforma Externa (I).

Com relação à amplitude (Tabela 5), *Ammonia tepida*, *Gaudryina exilis* e o grupo 'água doce' apresentam distribuições mais contínuas relativamente às demais variáveis cujas amplitudes estão em torno de 2000 - 2500 m.

Quanto ao patamar (Tabela 5), verifica-se que as distribuições das espécies *Ammotium* sp., *Lenticulina* sp. e *Gaudryina exilis* são as mais homogêneas, enquanto que a distribuição do grupo 'matéria orgânica' é a menos homogênea.

A razão efeito pepita / patamar indica que mais de 50% da variância nos dados não pode ser explicada para a maioria das variáveis, exceto 'matéria orgânica' e 'plataforma externa'.

Tabela 5. Parâmetros do modelo de variograma de cada variável analisada.

	AMPLITUDE	EFEITO PEPITA	PATAMAR
Am. tep.	4430,00	15,48	23,52
Am. sp.	2809,98	1,84	2,37
Lent. sp.	2551,20	2,34	3,23
Gaud. ex.	4836,70	2,50	4,26
Sig. sch.	2126,00	6,28	11,85
Ág. Do.	5045,64	32,68	59,82
Amb. Oxi.	2684,16	403,76	596,95
Mat. Org.	2338,60	1275,30	3863,26
Plat. Ext.	2381,12	7,43	17,34

### 7.3.3. COKRIGAGEM CO-LOCALIZADA ORDINÁRIA

Ao todo, foram obtidos 18 mapas de estimativa, 9 referentes ao período de inverno e 9, ao de verão (Figura 17). Optou-se por estimar as abundâncias para cada período separadamente para tentar visualizar alguma variação sazonal. Contudo, na maioria dos casos, as mudanças do inverno para o verão são mínimas.

O padrão de distribuição exibido pelas espécies *Ammonia tepida*, *Ammotium* sp., *Gaudryina exilis* (Figuras 17 A - F) é muito semelhante entre si e também ao padrão do grupo 'água doce' (Figuras 17 G, H), já que as três espécies foram classificadas como indicadoras do aporte de água doce (vide seção 5.3). As maiores concentrações ocorrem na



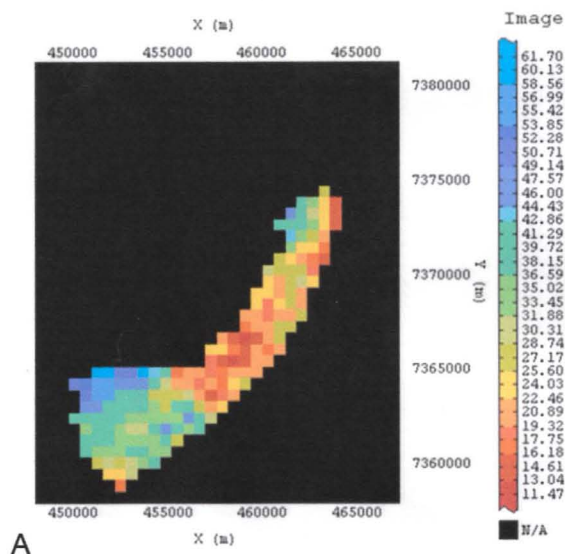
desembocadura sul e norte, no lado da margem continental do canal, provavelmente devido à proximidade de drenagens, ou seja, do Ribeirão Grande e do Córrego do São Francisco, respectivamente. Na porção central da área e na margem insular norte, sobretudo ao longo do eixo principal do canal, estas espécies são menos abundantes, sugerindo aporte de água doce menos intenso nessas áreas. Ao sul do canal, no lado da costa da ilha, as abundâncias são intermediárias já que esta é a porção do canal mais influenciada por massas d'água provenientes da plataforma externa.

De modo geral, a distribuição das espécies indicadoras da ocorrência de matéria orgânica (Figuras 17 I, J) apresenta predominância de menores abundâncias, sobretudo no verão, sugerindo que o aporte de matéria orgânica na maior parte do canal é incipiente ou que não há retenção devido a movimentação de fundo. Entretanto, de acordo com a hidrodinâmica local (Furtado, 1978), maiores abundâncias dessas espécies deveriam ocorrer nos locais com menores profundidades e baixa dinâmica de correntes, tal como na costa continental (da Ponta do Arpoar até a de Baraqueçaba) e insular (próximo à Ponta das Canas). As maiores abundâncias ocorrem apenas na desembocadura sul, próximo à costa da ilha, principalmente no inverno e, embora possam estar associadas à contribuição costeira, é mais provável que seja consequência de contaminação por hidrocarbonetos, decorrente, segundo Zanardi et al. (1999b *apud* Muniz & Pires, 2000), da lavagem clandestina de tanques de navios próximo à área.

As espécies indicadoras de ambiente oxigenado apresentam padrões de distribuição com predominância de abundâncias intermediárias a elevadas, ao longo de todo canal, sobretudo no verão (Figuras 17 L, M). As abundâncias mais elevadas ao longo do eixo do canal relacionam-se provavelmente à propagação de massas d'água da plataforma. Ao sul do canal, próximo à costa continental, as abundâncias mais elevadas estão associadas a sedimentos arenosos (Figura 12 A) constantemente retrabalhados junto ao fundo dada a incidência direta de ondas na área. Nas adjacências da costa insular sul e na porção central do canal, as abundâncias elevadas podem ser relacionadas à aceleração de correntes. As menores abundâncias encontram-se na desembocadura norte, no lado da ilha de São Sebastião dada a atenuação da energia resultante do desvio das correntes mais intensas para o eixo do canal (Furtado, 1978).

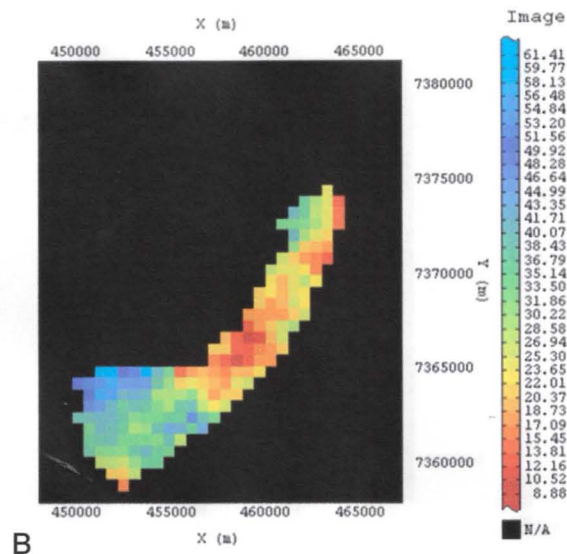
Finalmente, as maiores abundâncias das espécies indicadoras de plataforma externa (Figuras 17 N, O), dentre elas *Lenticulina* sp. (Figuras 17 P, Q) e *Sigmoilopsis schlumbergeri* (Figuras 17 R, S), ocorrem na porção sul, diminuindo em direção ao centro do canal onde ocorrem os menores valores. Na porção norte, há uma redução das abundâncias em direção ao lado insular. A presença destas espécies estaria associada a um transporte diferencial a partir de áreas externas, mecanismo que pode ocorrer no canal através da ingressão da Água Central do Atlântico Sul (ACAS) durante os meses de primavera / verão.

Ammonia Tepida Inverno



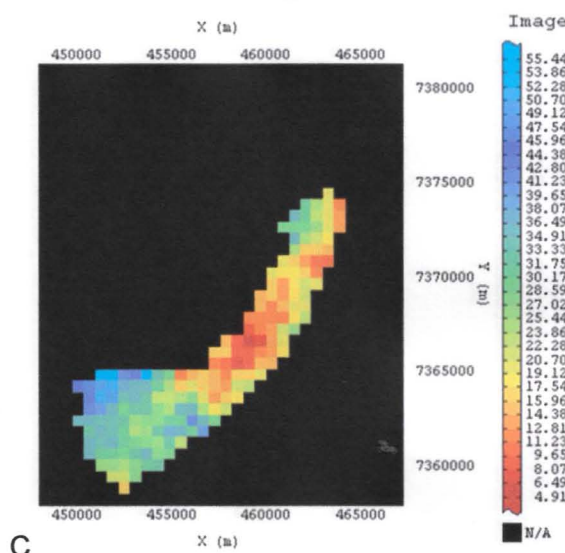
A

Ammonia Tepida verao



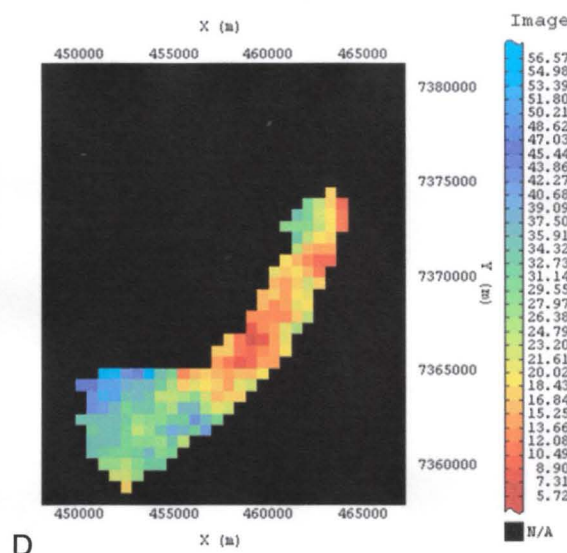
B

ammonium sp inverno



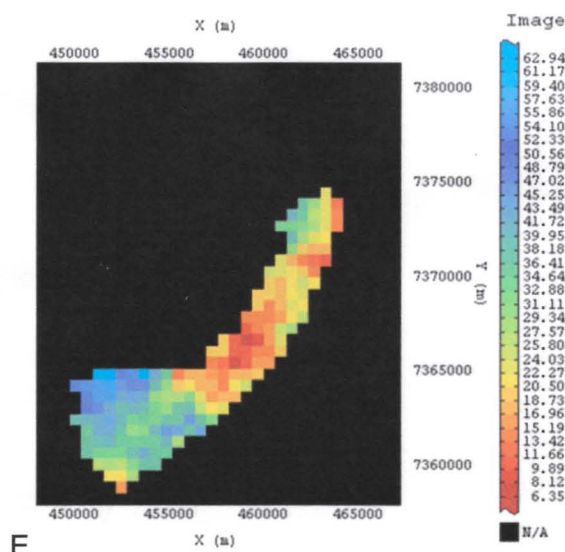
C

ammonium sp verao



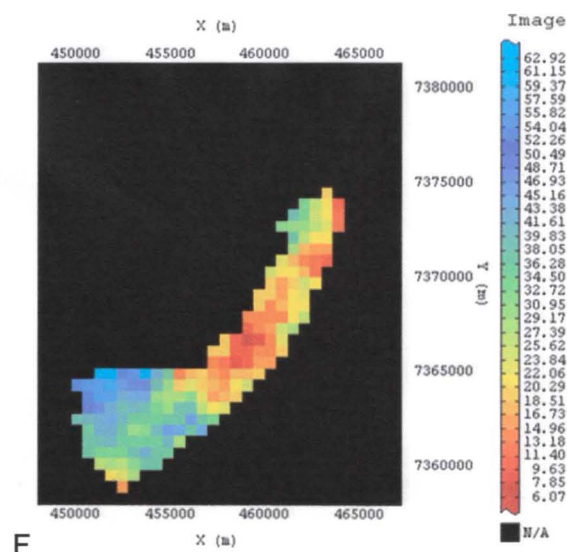
D

Gaudryina Inverno



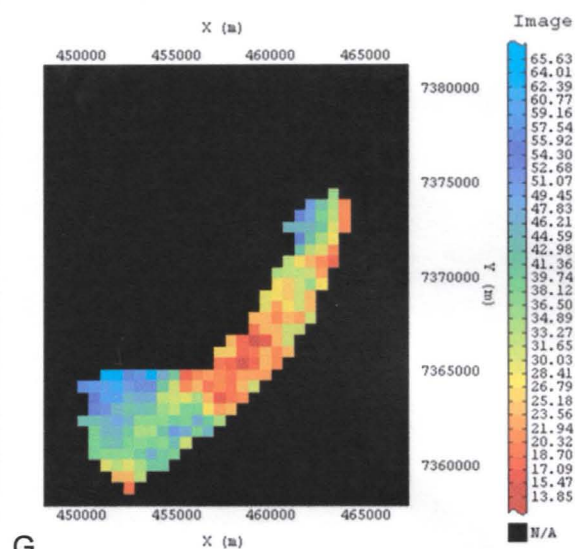
E

Gaudryina verao

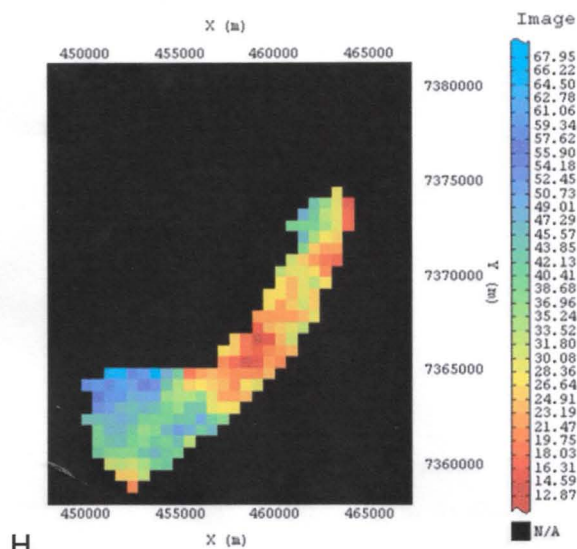


F

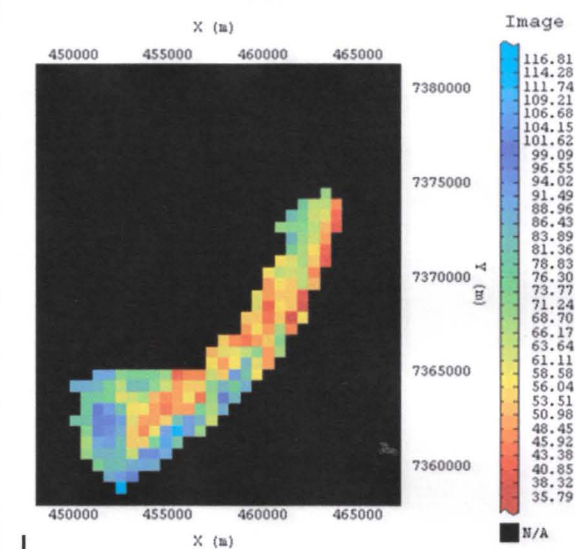
# Agua Doce Inverno



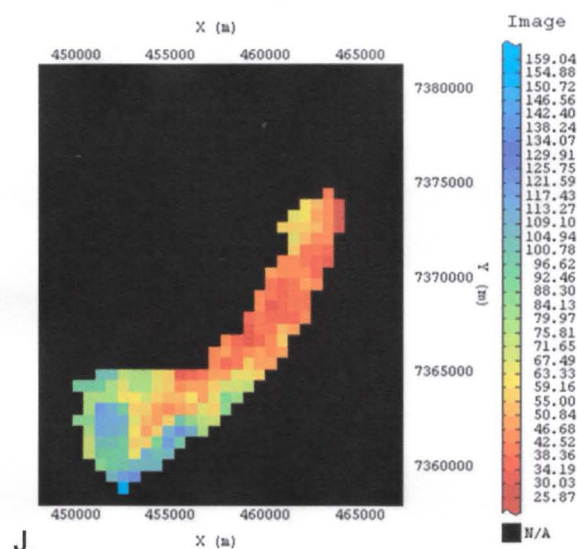
# Agua Doce Vero



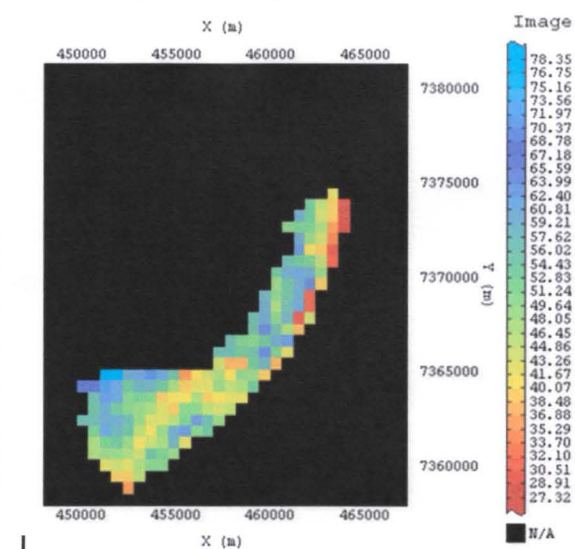
# Materia Organica Inverno



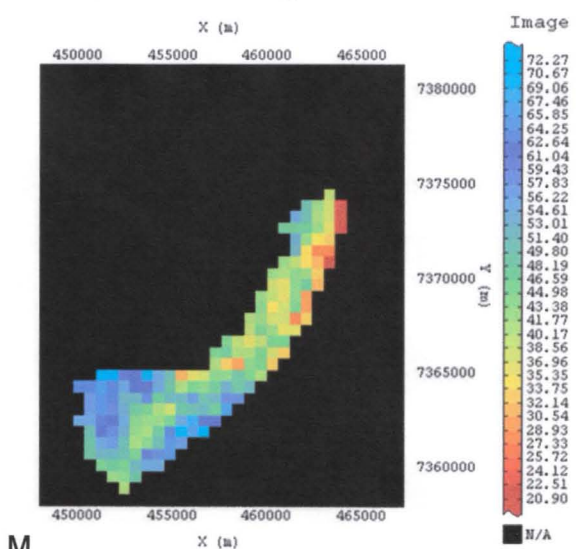
# Materia Organica Vero



# Ambiente Oxigenado Inverno



# Ambiente Oxigenado Vero





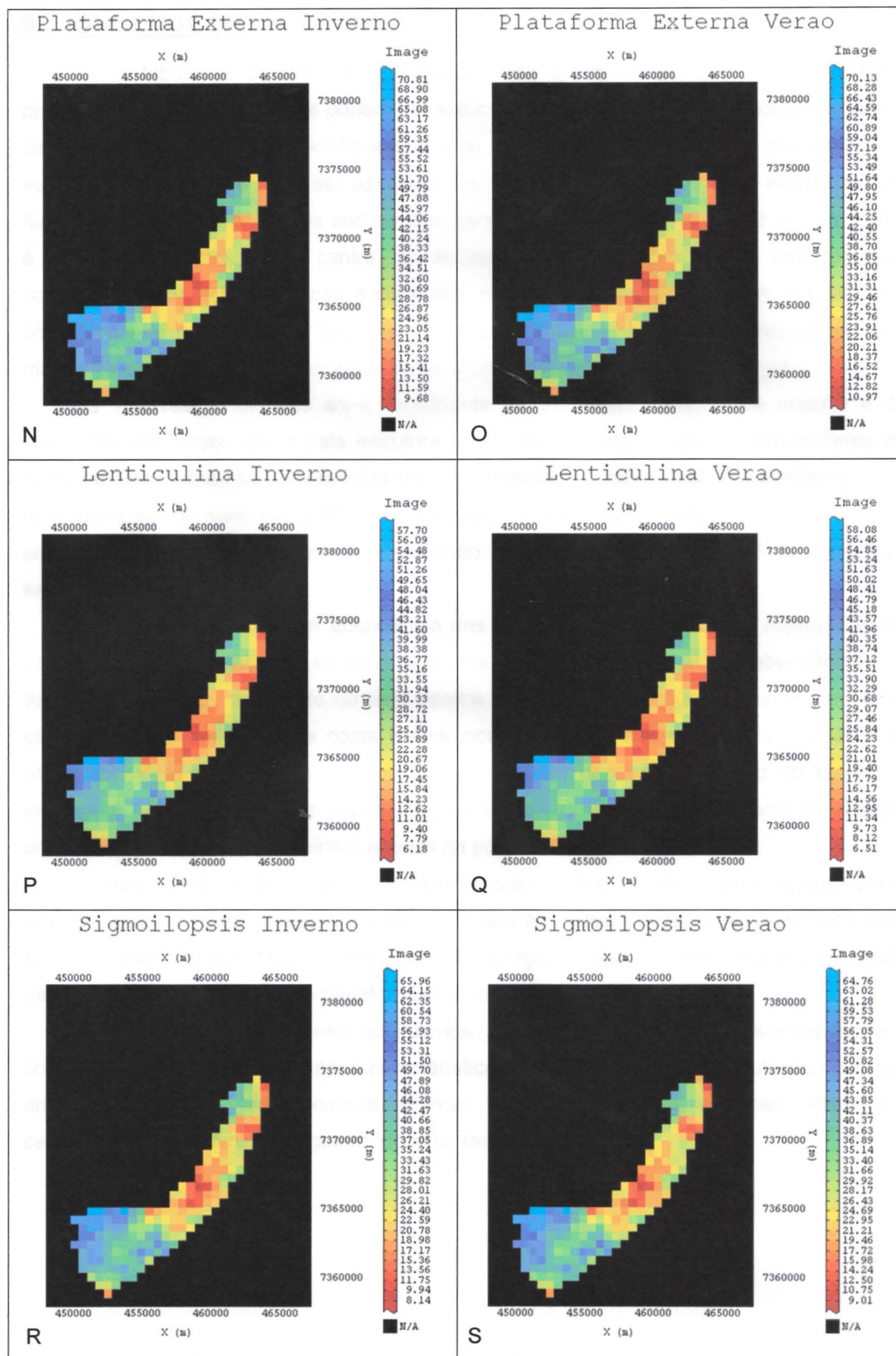


Figura 17. Mapas de estimativa de abundância das espécies e grupos de espécies ao longo do CSS.

## **8. CONCLUSÕES**

As distribuições batimétrica e granulométrica estão de acordo com os padrões propostos por Furtado (1978) e podem ser explicadas pelo comportamento hidrodinâmico do canal. Ao longo de toda extensão longitudinal da área de estudo, há um predomínio de sedimentos mistos que pode ser associado às oscilações no sentido e na intensidade do fluxo principal de correntes. Os sedimentos arenosos predominam na porção sul, em frente à praia do Guaecá, e no centro da entrada norte do canal, sendo uma possível consequência da ação de ondas e correntes, respectivamente. Os sedimentos mais finos concentram-se no centro do canal, próximo à costa continental, e nas adjacências da margem insular norte devido provavelmente à hidrodinâmica com menor energia.

As variáveis ambientais areia, coeficiente de assimetria e teores de enxofre e de nitrogênio são responsáveis pela estrutura e dinâmica da associação de foraminíferos do canal de São Sebastião. As espécies mais abundantes concentram-se em ambientes com predominância de areia muito fina e com teores intermediários de nitrogênio e de enxofre, enquanto que as menos abundantes estão relacionadas com condições ambientais extremas.

A maioria dos mapas de abundância das espécies e dos grupos de espécies exhibe padrões muito semelhantes, caracterizados de modo geral por maiores abundâncias na desembocadura sul, sobretudo no lado continental, e menores abundâncias no centro do canal e nas proximidades da costa insular norte. No caso das espécies indicadoras de ambiente oxigenado, abundâncias mais altas também ocorrem no centro do canal, no inverno, e próximo à margem insular sul, no verão. As espécies indicadoras de matéria orgânica, por sua vez, predominam apenas na porção insular ao sul do canal.

As maiores abundâncias das espécies indicadoras de ambiente oxigenado, água doce, matéria orgânica e de plataforma externa podem ser relacionadas à hidrodinâmica local (ação de ondas e correntes), proximidade de drenagens, atividade antrópica e à ingressão de massas d'água oriundas da plataforma, respectivamente.

Esses mapas mostraram-se satisfatórios para prever a ocorrência das espécies bem como para confirmar determinadas características hidrodinâmicas e de circulação do canal, embora não tenha sido possível estimar a abundância das espécies *Pararotalia cananeiaensis* e *Bulimina marginata*, dominantes na região.



## **9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

- Almeida F. F. M. de. 1976. The system of continental rifts bordering the Santos Basin, Brazil. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, **48**: 15 - 26.
- Almeida F. F. M. de & Carneiro C. dal R. 1998. Origem e evolução da Serra do Mar. *Revista Brasileira de Geociências*, **28** (2): 135 - 150.
- Barcellos R. L. & Furtado V. V. 1999. Processo sedimentar atual e a distribuição de carbono e nitrogênio orgânicos no Canal de São Sebastião (SP) e Plataforma Continental adjacente. *Revista Brasileira de Oceanografia*, **47**: 207 - 221.
- Barcellos R. L. & Furtado V. V. 2001. Caracterização dos componentes da fração arenosa (0,500 mm / 0,250 mm) no Canal de São Sebastião. *Pesquisas em Geociências*, **28**: 35 - 51.
- Berger W. 1979. Preservation of Foraminifera. *American Association of Petroleum Geologist, SEMP Short Course*, **6**: 105 - 155.
- Bernhard J. M. 1986. Characteristic assemblages and morphologies of benthic foraminifera from anoxic, organic-rich deposits: Jurassic through Holocene. *Journal of Foraminiferal Research*, **16**: 207 - 215.
- Boersma A. 1980. Foraminifera. In: Haq, B. U. & Boersma, A. eds. *Introduction to Marine Micropaleontology*. Nova Yorque: Elsevier. p. 19 - 77.
- Boltovskoy E., Scott D. B., Mediolli F. S. 1991. Morphological variations of benthic foraminiferal tests in response to changes in ecological parameters: a review. *Journal of Paleontology*, **65** (2):175 - 185.
- Bonfante R. L., Duleba W., Mahiques M. M. 2005. Dinâmica de fundo da Enseada do Flamengo, Ubatuba, Brasil, inferida a partir da distribuição espacial, morfometria e tafonomia de foraminíferos. *Revista Brasileira de Paleontologia*, **8**: 181 - 192.
- Brooker P. I. 1980. Kriging. In: Mousset-Jones P. F. ed. *Geostatistics*. Nova Yorque: McGraw-Hill. p. 41 - 60.
- Castro-Filho B. M. 1990. Wind driven currents in the channel of São Sebastião: winter, 1979. *Boletim do Instituto Oceanográfico de São Paulo*, **38**: 111 - 132.
- Clark I. 1979. The semivariogram – Part 1. *Engeneering and Mining Journal*, **7**: 90 - 94.
- Davis J. C. 1986. *Statistics and data analysis in geology*. John Wiley & Sons. 646 p.

- Duleba W. & Debenay J. P. 2003. Hydrodynamic circulation in the estuaries of Estação Ecológica Juréia-Itatins, Brazil, inferred from foraminifera and thecamoebian assemblages. *Journal of Foraminiferal Research*, **32** (3): 62 – 93.
- Folk R. L. & Ward W. C. 1957. Brazos river bar: a study in the significance of grain size parameters. *Journal of Sedimentary Petrology*, **27**: 3 - 27.
- Fontes R. F. C. 1995. *As correntes no canal de São Sebastião*. Dissertação de Mestrado, Instituto Oceanográfico, Universidade de São Paulo, 159 p.
- FUNDAÇÃO DE ESTUDOS E PESQUISAS AQUÁTICAS. 1999. *Levantamento oceanográfico da área diretamente afetada por efluentes dos emissários submarinos de esgotos da Sabesp, entre os municípios de São Sebastião e Mongaguá, Estado de São Paulo*. São Paulo: FUNDESPA. 2 v. (Relatório final).
- Furtado V. V. 1978. *Contribuição ao estudo da sedimentação atual no Canal de São Sebastião Estado de São Paulo*. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 2 v.
- Furtado V. V. 1995. Sedimentação quaternária no Canal de São Sebastião. *Publicação Especial Instituto Oceanográfico da USP*, **11**: 27 – 35.
- Gauch H. G. 1982. *Multivariate analysis in community ecology*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Geovariances. 2006. Isatis Geostatistical Package r6.0. France: Avon Cedex.
- Goovaerts P. 1997. *Geostatistics for Natural Resources Evaluation*. New York: Oxford University Press. 483 p.
- Green R. H. 1971. A multivariate statistical approach to the Hutchinsonian niche: bivalve mollusks of central Canada. *Ecology*, **52**: 543 – 556.
- Hill M. O. & Gauch A. G. 1980. Detrended correspondence analysis, an improved ordination technique. *Vegetatio*, **42**: 47 - 58.
- Horton B. P., Edwards R. J., Lloyd J. M. 1999. UK intertidal foraminiferal distributions: implications for sea-level studies. *Marine Micropaleontology*, **36**: 205 - 223.
- Huijbregts C. J. 1975. Regionalized Variables and Quantitative Analysis of Spatial Data. In: Davis J. C. & McCullagh M. J. orgs. *Display and Analysis of Spatial Data*. New York: John Wiley. p. 38 - 53.

- Isaacs E. H. & Srivastava R. M. 1989. Applied Geostatistics. New York: Oxford University Press. 561 p.
- Journel A. G. & Huijbregts C. J. 1978. Mining Geostatistics. London: Academic Press. 600 p.
- Journel A. G. 1999. Markov Models for Cross-Covariances. *Mathematical Geology*, **31** (8): 955 - 964.
- Kitanidis P. K. 1997. Introduction to geostatistics: applications to hydrogeology. Cambridge: Cambridge University Press. 249 p.
- Mahiques M. M. de, Furtado V. V., Tessler M. G. Origin and evolution of isolated depressions on the coastal region of São Paulo and Rio de Janeiro states. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON GLOBAL CHANGES IN SOUTH AMERICA DURING THE QUATERNARY: PAST-PRESENT-FUTURE, 1. Spec. Publ. Associação Brasileira de Estudos do Quaternário. São Paulo, 1989. p. 285 - 288.
- Manly B. F. 1991. *Randomization and Monte Carlo methods in biology*. London: Chapman and Hall.
- Martin R. 1999. Taphonomy a process approach. Cambridge: Cambridge University Press. 508 p.
- Matheron G. 1965. Les Principes de la Geostatistique. Fontainebleau: ESMP. 26 p. (Rapport 65).
- Miranda L. B. & Castro - Filho B. M. 1995. Variabilidade da circulação e do transporte de volume no Canal de São Sebastião (SP): outono de 1980. *Publicação Especial do Instituto Oceanográfico*, **11**:1 - 9.
- Muniz P. & Pires A. M. S. 2000. Polychaete Associations in a Subtropical Environment (São Sebastião Channel, Brazil): a Structural Analysis. *Marine Ecology*, **21** (2): 145 - 160.
- Murray J. W. 1991. Ecology and paleoecology of benthic foraminifera. London: Longman Scientific & Technical. 397 p.
- Parker W. C. & Arnold A. J. 1999. Quantitative methods of data analysis in foraminiferal ecology. In: Gupta B. K. S. ed. *Modern Foraminifera*. Grã Bretanha: Kluwer Academic Publishers. p. 71 - 89.
- Remacre A. Z. & Botelho M. C. 2005. O uso da Cokrigagem Co-locada na integração de dados químicos e mineralógicos no minério de ferro. *Revista da Escola de Minas*, **58** (1): 61 - 69.

- Shmaryan L. E. & Journel A. G. 1999. Two Markov Models and Their Application. *Mathematical Geology*, **31** (8): 965 - 988.
- Spiegel M. R. 1967. Estatística. São Paulo: McGraw Hill. 580 p.
- Ter Braak C. J. F. 1986. Canonical correspondence analysis: a new eigenvector technique for multivariate direct gradient analysis. *Ecology*, **67** (5): 1167 - 1179.
- Ter Braak C. J. F. 1987. The analysis of vegetation-environment relationships by canonical correspondence analysis. *Vegetatio*, **69**: 69 - 77.
- Ter Braak C. J. F. & Prentice I. C. 1988. A theory of gradient analysis. *Advances in Ecological Research*, **18**: 271 - 317.
- Ter Braak C. J. F. 1992. Permutation versus bootstrap significance tests in multiple regression and ANOVA. In: Jöckel K. H., Rothe G., Sendler W. eds. *Bootstrapping and related techniques*. Berlin: Springer Verlag. p. 79 - 85.
- Ter Braak C. J. F. 1994. Canonical community ordination. Part I: Basic theory and linear methods. *Ecoscience*, **1**: 127 - 140.
- Ter Braak C. J. F. & Verdonschot P. F. M. 1995. Canonical correspondence analysis and related multivariate methods in aquatic ecology. *Aquatic Sciences*, **57** (3): 255 - 289.
- Ter Braak C. J. F. & Smilauer P. 2002. CANOCO Reference Manual and User's Guide to Canoco for Windows: Software for Canonical Community Ordination. Versão 4.5. Ithaca: Microcomputer Power. 500 p.
- Xu W., Tran T. T., Stanford U., Srivastava R. M., Journel A. G. Integrating Seismic Data in Reservoir Modeling: The Collocated Cokriging Alternative. In: ANNUAL TECHNICAL CONFERENCE OF THE SOCIETY OF PETROLEUM ENGINEERS, 67. Anais... SPE # 24742, Washington, 1992. p. 833 - 842.
- Wackernagel H. 1995. Multivariate Geostatistics: an introduction with applications. Heidelberg: Springer-Verlag. 275 p.
- Whittaker R. H., Levin S. A., Root R. B. 1973. Niche, habitat and ecotope. *American Naturalist*, **107**: 321 - 338.
- Yamamoto J. K. 2001. Análise Estatística. In: Yamamoto J. K. ed. *Avaliação e classificação de reservas minerais*. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo. p. 49 - 68.

Yamamoto J. K. 2001. Análise Geoestatística. In: Yamamoto J. K. ed. *Avaliação e classificação de reservas minerais*. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo. p. 69 - 91.

Yamamoto J. K. 2001. Métodos Computacionais. In: Yamamoto J. K. ed. *Avaliação e classificação de reservas minerais*. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo. p. 123 - 161.

Yamamoto J. K. 2002. II Curso de Geoestatística Aplicada. São Paulo: USP/LIG/ABGE. 76 p.

Yamamoto J. K. 2007. Sistema GeoVisual. Versão 3.0.

De acordo,



SP- 05/11/07

De acordo



Orientadora Wânia Duleba

SP5/11/07

De acordo,





Yamamoto J. K. 2001. Análise Geostatística. In: Yamamoto J. K. ed. Avaliação e classificação de reservas minerais. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo. p. 69 - 91.

Yamamoto J. K. 2001. Métodos Computacionais. In: Yamamoto J. K. ed. Avaliação e classificação de reservas minerais. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo. p. 123 - 161.

Yamamoto J. K. 2002. Curso de Geostatística Aplicada. São Paulo: USP/USP/USP. 76 p.

Yamamoto J. K. 2007. Sistema GeoVisual, Versão 3.0.

DOAÇÃO  
TBC-USP  
Data: 02/05/08