

## MODELAGEM DA PROFUNDIDADE SECCHI E DA CONCENTRAÇÃO DE CLOROFILA A NO ESTUÁRIO DO RIO ANIL, SÃO LUÍS-MA

**Enner Herenio Alcântara**

Depto. Oceanografia e Limnologia – UFMA  
Email: [ennerha@yahoo.com.br](mailto:ennerha@yahoo.com.br)

**Flavia Rebelo Mochel**

Depto. Oceanografia e Limnologia - UFMA

**Alexsandro de Jesus Ericeira Amorim**

LASERGEIO - UFMA  
Email: [aamorim@yahoo.com.br](mailto:aamorim@yahoo.com.br)

**Adeline Thevand**

Université Paul Sabatier - Toulouse 3 - França.

### RESUMO

*A geoestatística é um tópico especial da estatística aplicada que trata de problemas referentes às variáveis regionalizadas, aquelas que tem comportamento espacial mostrando características intermediárias entre as variáveis verdadeiramente aleatórias e as totalmente determinísticas. O presente trabalho teve com objetivo modelar através da geoestatística, dados de profundidade secchi e concentração de clorofila a, utilizando a krigagem de bayes (modelo esférico) e o pacote SPRING 4.0.*

**Palavras-chave:** geoestatística, modelagem, secchi, clorofila a.

## MODELING OF SECCHI DEPTH AND CHLOROPHYLL A CONCENTRATION IN ANIL RIVER ESTUARY, SÃO LUÍS - MA

### ABSTRACT

*The geostatistical is a special topic of the applied statistics that deals with referring problems to the regionalizing variable, those that space behavior has showing characteristic intermediate between the truly random variable and the total deterministically. The present work had with shape objective through geostatistical, data of depth secchi and concentration of chlorophyll a, using the bayes kriging (spherical model) and package SPRING 4.0.*

**Key-word:** geostatistical, modeling, secchi, chlorophyll a.

---

Recebido em 29 de julho de 2004  
Aceito para publicação em 07/09/2004

## INTRODUÇÃO

A geoestatística é um tópico especial da estatística aplicada que trata de problemas referentes às variáveis regionalizadas, aquelas que tem comportamento espacial mostrando características intermediárias entre as variáveis verdadeiramente aleatórias e as totalmente determinísticas (Landim, 1998).

Com a Teoria das Variáveis Regionalizadas proposto por Matheron, em 1971 e o conseqüente emprego da interpolação em geoestatística (Krigagem) além da evolução da ciência da computação e dos sistemas de informação geográfica, não há mais necessidade de agrupamento dos dados primários em classes, sendo os mapas-base elaborados automaticamente como mapas de isolinhas (McBratney & De Gruijter, 1992, Burrough et al., 1997 e McBratney & Odeh, 1997 e Zimback, 2001). Openshaw (1988) ressalta a importância de análises mais acuradas na confecção de mapas, assegurando maior confiabilidade nas informações-base usadas em Sistemas de Informação Geográfica, bem como da avaliação da margem de erro contida em cada entrada de dados no sistema.

Estas variáveis têm em comum uma dupla característica: são aleatórias já que os valores numéricos observados podem variar consideravelmente de um ponto a outro no espaço; são espaciais e apesar de muito variáveis dentro do espaço, os valores numéricos observados não são inteiramente independentes (Guerra, 1988).

A teoria fundamental da geoestatística é a esperança de que, na média, as amostras próximas no tempo e espaço sejam mais similares entre si do que as que estiverem distantes (Isaaks & Srivastava, 1989).

Alguns métodos estimadores geoestatísticos da autocorrelação espacial são usados como ferramentas de continuidade espacial, como: o variograma ou semivariograma, o covariograma e o correlograma. Essas ferramentas são usadas para investigar a magnitude da correlação entre as amostras e sua similaridade ou não, com a distância.

A função semivariograma deve o seu nome a Matheron (entre 1957 e 1962), bem como o seu tratamento e interpretação teórica e prática, embora seja uma função conhecida anteriormente,

já tendo sido citada por Langsaetter em 1926 (Valente, 1989).

Segundo Guerra (1988), ocorrem três tipos de semivariogramas: observado ou experimental (obtido a partir das amostras colhidas no campo), verdadeiro (real, mas desconhecido) e teórico (de referência, utilizado para o ajuste do modelo).

Os semivariogramas expressam o comportamento espacial da variável regionalizada ou de seus resíduos e mostram o tamanho da zona de influência em torno de uma amostra, a variação nas diferentes direções do terreno e mostrando também continuidade da característica estudada no terreno (Landim, 1998).

Segundo Rossi et al. (1994), o variograma e outros parâmetros geoestatísticos de um modelo de função aleatória estacionária são constantes em um determinado espaço amostral e estimados das medidas verdadeiras. Sabendo-se que, o padrão espacial ocorre em uma pequena ou grande escala e tendo alguma idéia do tamanho desses padrões, garantir-se-á o sucesso dos instrumentos geoestatísticos que serão utilizados para fornecerem estimativas de locais não amostrados (interpolação).

Como auxiliar na descrição e representação de variáveis contínuas de atributos dos solos e paisagens, primeiramente a geoestatística foi utilizada para estudar uma única variável, posteriormente métodos geoestatísticos foram desenvolvidos para múltiplas variáveis e para quantificar variáveis correlacionadas, não conhecidas ou de difícil determinação (Stein et al., 1988 e McBratney et al., 1991). No Brasil, o emprego de amostragem regionalizada e de métodos geoestatísticos para solos ainda é incipiente e muito pouco disseminado em comparação aos métodos convencionais de análises estatísticas.

Segundo Carter (1995), a habilidade dos variogramas em separar a variância de amostras entre componentes espaciais e casuais permite avaliações aperfeiçoadas de espaçamento e quantidade de amostragem de solo, além do melhor visão da continuidade destas características.

A sensibilidade dos semivariogramas, para detectar a variabilidade espacial das amostras, está diretamente ligada ao melhor ajuste dos dados experimentais ao modelo teórico do variograma. Cressie & Hawkins (1980), Armstrong & Jabin

(1981), Armstrong (1982), Dunn (1983), Horowitz & Hillel (1983), Mc Bratney & Webster (1983 e 1986), Baker (1984), Cressie (1985), Issaks & Srivastava (1988), Barnes (1991), Shapiro & Botha (1991), Goyway & Hartford (1996), Tsegaye & Hill (1998) e Ahn et al. (1999) descrevem as inferências sobre a escolha do modelo teórico e ajuste desse modelo ao semivariograma experimental.

Alguns autores utilizaram a geoestatística para o estudo da variabilidade, dependência e continuidade espacial de atributos da natureza, como: Tragmar et al. (1985), Kirda et al. (1988), Vieira et al. (1992), Reichardt et al. (1993), Van Es & Van Es (1993) e Shouse et al. (1995).

Outros autores estudaram o mapeamento de características específicas, bem com a variabilidade e dependência espacial destas nos solos, como: medidas de umidade e temperatura superficiais do solo (Davidoff & Selim, 1988), densidade e condutividade hidráulica dos solos (Bresler et al., 1984; Ciollaro & Romano, 1995; Rogowski & Wolf, 1994 e Gupta et al., 1995), retenção de água (Burden & Selim, 1989; Voltz & Goulard, 1994; Folegati, 1996 e Mallants et al., 1996),

propriedades físicas dos solos (Borgelt et al., 1994; Horn et al., 1994 e Ribeiro Jr., 1995), porosidade do solo (Puentes et al., 1992), resistência à penetração (Moolman & Van Huysstem, 1989 e Ley & Laryea, 1994), nível do lençol freático (Aboufirassi & Marino, 1983), drenagem em solos salinos (Agrawal et al., 1995), salinidade do lençol freático (Hooda et al., 1986 e Samra et al., 1989), contaminação do lençol (Reynolds et al., 1994), acidez do solo (Boyer et al., 1996), resistência e plasticidade (Alli et al., 1990) e processos erosivos (Cremers et al., 1996), etc.

Especificamente, para as propriedades químicas dos solos, outros autores, como Marx (1988), Cahn et al. (1994), Gonzales & Zak (1994), Davis et al. (1995), Cora (1997) e Kravchenko & Bullock (1999), Oliveira et al. (1999) e Cassel et al (2000) verificaram a variabilidade espacial dos principais atributos e propriedade dos solos.

## **MATERIAIS E MÉTODOS**

### **Caracterização da área de estudo**

A Bacia Hidrográfica do Rio Anil, localizada no quadrante NW da ilha de São Luis – MA, com o Rio Anil

possuindo cerca de 13,8 Km de extensão. Tem suas nascentes localizadas no Bairro Aurora, descendo ao nível do mar aproximadamente 9,5 Km em linha reta, com o eixo direcional orientado de SE para NW a partir da nascente, a sua calha caracteriza-se por apresentar um perfil meândrico, cortando a porção NE do centro urbano da cidade de São Luís, no trajeto em direção à desembocadura (LABOHIDRO, 1980; Siqueira, 1987), como pode ser visto na figura 1.

A bacia do rio Anil está atualmente com uma densidade demográfica em torno de 8.575,35 hab/Km<sup>2</sup>, caracterizando-se então como uma bacia extremamente urbana, densamente povoada, com problemas sócio-ambientais, tais como: assoreamento do rio principal e seus afluentes; poluição por efluentes industriais, domésticos e hospitalares; falta de saneamento básico; construção de moradias irregulares (palafitas) e problemas de drenagem. A bacia do Rio Anil vem sofrendo com o grande adensamento populacional, com a conseqüente ocupação das áreas mais baixas, onde estão localizados os manguezais e a várzea, (Alcântara & Silva, 2003).

### **Coleta de dados**

Para a aquisição de dados utilizou-se a embarcação do LABOHIDRO, onde foram coletados dados e amostras de água na superfície, para análises posteriores, ao longo do estuário do rio Anil no sentido jusante-montante (Figura 1).

Foram estabelecidos 9 pontos de coleta, sendo coletadas amostras de salinidade (ups), pH, temperatura (T°C), concentração de clorofila *a* (µg/l), total de sedimentos em suspensão (g/l) e profundidade Secchi (cm). Sendo que todas as amostras foram coletadas apenas na superfície e na maré enchente. Assim como que para cada ponto também se coletou a sua localização geográfica utilizando GPS, sendo inseridos posteriormente na imagem de satélite utilizando o Software SPRING 4.0. Trabalhos de Campo e Laboratório

### **Clorofila *a***

Assim como a concentração de sólidos em suspensão, os pigmentos fotossintéticos possuem comportamento óptico ativo e, portanto, são também responsáveis pelos padrões observados nos dados multiespectrais. A

concentração de clorofila-a foi determinada por espectrofotometria (Strickaland & Parsons, 1972), após a extração do pigmento nos filtros com

acetona. Este método, segundo os mesmos autores, fornece uma precisão de 3%.

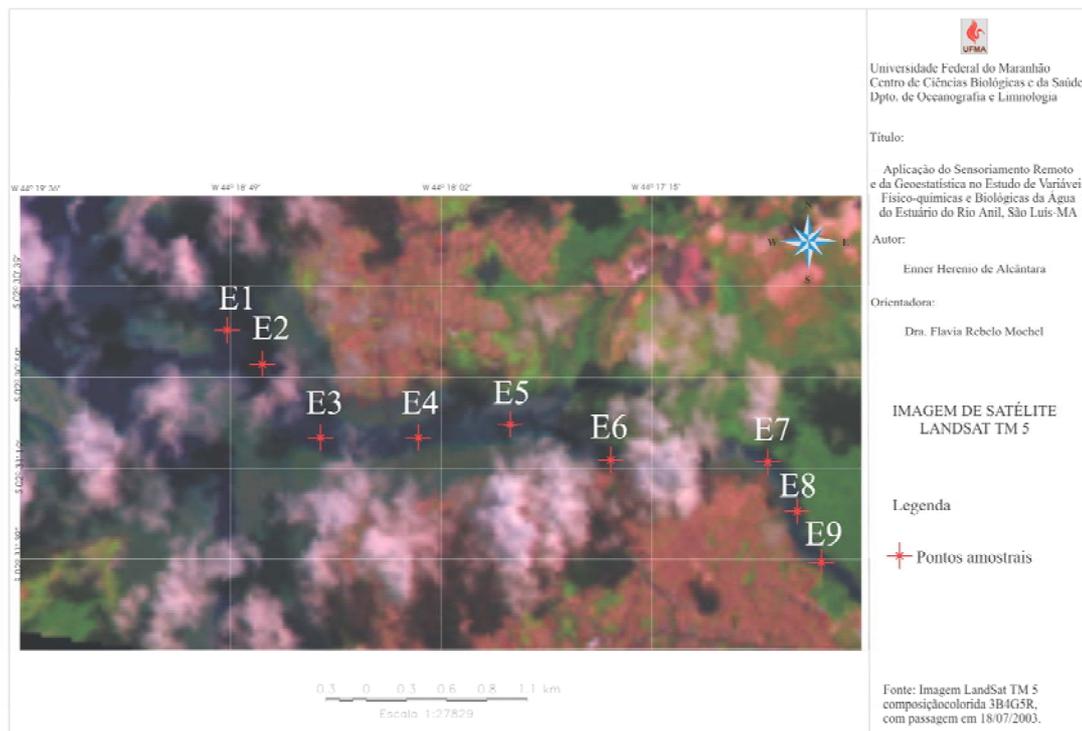


Figura 1 - Imagem satélite LANDSAT TM 5, bandas 3, 4, 5 composição RGB, mostrando os pontos amostrais, de jusante para montante.

### Profundidade Secchi

Um método para se medir a transparência da água no mar e estimar o coeficiente de extinção é o método que utiliza o disco de Secchi. Este disco é dividido em seções brancas e pretas, com um anel no centro ao qual está atado uma linha com marcas a cada metro. A profundidade na qual o disco desaparece de vista é utilizada para

estimar o coeficiente de extinção. Com um pouco de prática é possível obter-se leituras consistentes dentro de mais ou menos 10% (Littlepage, 1998). Esta medida oferece uma avaliação indireta da turbidez de corpos d'água, sendo inversamente correlacionada com a concentração de partículas dissolvidas e em suspensão na água. Corresponde à

máxima profundidade de visibilidade de um disco circular branco com 25 cm de diâmetro, e deve ser realizada sempre pela mesma pessoa durante as coletas de dados, evitando-se a influência das características individuais de visão. A corda de sustentação do disco foi graduada em intervalos de 10 cm, permitindo uma precisão no mesmo nível desta mesma medida.

### O Modelo utilizado

O modelo aqui apresentado é o *Esferico* considerado um modelo básico, denominado de modelo isotrópico por Isaaks e Srivastava (1989). O modelo utilizado neste é referenciado na geoestatística como modelo transitivo. Alguns dos modelos transitivos atingem o

patamar (*C*) assintoticamente. Para tais modelos, o alcance (*a*) é arbitrariamente definido como a distância correspondente a 95% do patamar. Modelos do segundo tipo não atingem o patamar, e continuam aumentando enquanto a distância aumenta. Tais modelos são utilizados para modelar fenômenos que possuem capacidade infinita de dispersão.

Os modelos transitivos mais utilizados são: modelo esférico (Sph), modelo exponencial (Exp) e modelo gaussiano (Gau).

O modelo esférico é um dos modelos mais utilizados e está representado em vermelho na Figura acima.

O semivariograma do modelo esférico pode ser calculado pela equação:

$$\gamma(h) = \begin{cases} 0 & , |h|=0 \\ C_o + C_l \left[ \frac{3}{2} \left( \frac{|h|}{a} \right) - \frac{1}{2} \left( \frac{|h|}{a} \right)^3 \right] = C_o + C_l [\text{Sph}(|h|)] & , 0 < |h| \leq a \\ C_o + C_l & , |h| > a \end{cases} \quad [1]$$

A equação normalizada deste modelo é:

$$\text{Sph}(|h|) = \begin{cases} 0 & , |h|=0 \\ 1,5 \left( \frac{|h|}{a} \right) - 0,5 \left( \frac{|h|}{a} \right)^3 & , 0 < |h| \leq a \\ 1 & , |h| > a \end{cases} \quad [2]$$

O modelo utilizando neste estudo foi rodado no modulo geoestatística do Software SPRING 4.0.

### **Krigagem de bayes**

Os valores obtidos através da krigagem não são viciados e têm variância mínima (Vieira et al., 1983) e ideais para a construção de mapas de isolinhas ou tridimensionais para verificação e interpretação da variabilidade espacial (Carvalho *et al.*, 2002).

Como os métodos tradicionais de interpolação de pontos (como a ponderação da distância inversa, a triangulação e a média das amostras locais), a Krigagem pode fornecer a estimativa para um local específico. Frequentemente, os métodos tradicionais podem ser tão acurados mas consomem muito mais tempo do que a Krigagem (Isaaks & Srivastava, 1989).

Landim (1998) descreve a Krigagem como uma série de técnicas de análise de regressão que procura minimizar a variância estimada, a partir de um modelo prévio, que leva em conta a dependência estocástica entre os dados distribuídos no espaço.

Segundo Rossi et al. (1994), três

características da Krigagem a distinguem dos outros métodos de interpolação. Primeiro, a Krigagem pode fornecer uma estimativa que é maior ou menor do que os valores da amostra, sendo que as técnicas tradicionais estão restritas a faixa de variação das amostras. Segundo, enquanto os métodos tradicionais usam distâncias Euclidianas para avaliar as amostras, a Krigagem tem vantagem de usar a distância e a geometria (relação de anisotropia) entre as amostras. Terceiro, diferentemente dos métodos tradicionais, a Krigagem leva em conta a minimização da variância do erro esperado, por meio de um modelo empírico da continuidade espacial existente ou do grau de dependência espacial com a distância ou direção, isto é, através do variograma, covariograma ou correlograma.

## **RESULTADOS E DISCUSSÃO**

### **Análise dos dados coletados em campo**

Pode-se observar através da tabela 1 os resultados obtidos em campo. Profundidade Secchi. De acordo com o resultado obtido em campo referente à medida na coluna d'água da profundidade secchi ao longo do estuário do rio Anil, tem-se que o

valor máximo obtido foi 32 (cm), o mínimo de 16 (cm) e a média 25,88 (cm), como se pode observar na figura 2.

Observando a figura 2, é possível notar dois picos na profundidade secchi referente as estações 4 e 6. E as menores profundidades secchi foram observadas a montante do estuário. Provavelmente isso acontece porque há uma maior influencia dos manguezais que exportam grandes quantidades de sedimentos para o estuário. Mais nota-se que não há nenhum padrão, e que esta variável depende muito da quantidade de material em suspensão. No trabalho desenvolvido por

LABOHIDRO (1994), a transparência variou de 0,37 a 2,40 (m) ao longo do estuário do Anil. No período chuvoso, meses de fevereiro e abril, quando o aporte terrígeno é maior, a transparência diminui e ocorrendo o contrário no período seco outubro a dezembro, aumentando a transparência.

#### Clorofila a

O fitoplâncton é o maior responsável pela fotossíntese e conseqüentemente pela fixação do carbono, componente principal da matéria, chegando a contribuir com 95% da produção primária através desses processos, (Tundisi, 1970).

**Tabela 1**

Estações de coleta e dados de campo e laboratório dos parâmetros físico-químicos rio Anil

Estação	Latitude	Longitude	Horário	Secchi (cm)	Cl-a (µg/L)
1	2°31'14"	44°18'35"	12:33	24,5	5,48
2	2°31'13"	44°18'03"	12:41	25	9,30
3	2°31'24"	44°17'76"	14:09	26	13,95
4	2°31'30"	44°17'41"	14:21	32	15,59
5	2°31'33"	44°17'08"	14:45	26	14,24
6	2°31'37"	44°16'76"	15:00	32	11,77
7	2°31'59"	44°16'66"	15:11	26	25,84
8	2°31'76"	44°16'49"	15:25	25,5	26,67
9	2°31'88"	44°16'28"	15:40	16	27,25

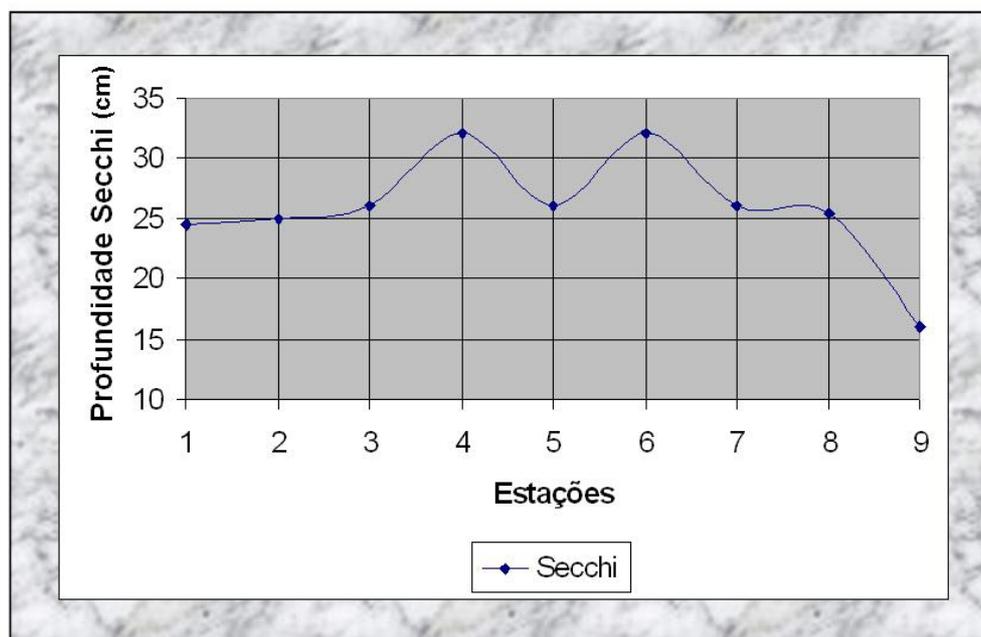


Figura 2 - Variação da profundidade secchi (cm) nas estações de amostragem no estuário do rio Anil, sentido jusante montante, maré enchente.

A determinação da biomassa fitoplânctônica através da clorofila *a* é um dos métodos mais precisos que possibilita a avaliação da comunidade dos produtores primários aquáticos (Santos-Fernandes *et al.*, 1998). A sobrevivência dos organismos clorofilados que chegam é limitada principalmente pelas condições de luz, temperatura, salinidade e toxinas (Lackey, 1967).

De acordo com o resultado obtido após análise em laboratório referente as amostras de concentração de clorofila *a* ao longo do estuário do rio Anil, tem-se

que o valor máximo obtido foi 27,25 ( $\mu\text{g/L}$ ), o mínimo de 5,48 ( $\mu\text{g/L}$ ) e a média 16,68 ( $\mu\text{g/L}$ ), como se pode observar na figura 3.

De acordo com Ewerton (2001) a concentração de clorofila *a* na preamar na estação de amostragem que se localiza atrás do hospital Sarah Kubishek obteve o maior valor em torno de 59,7  $\text{mg/m}^3$ , durante os meses de menor precipitação em agosto de 2000. Também segundo esse mesmo autor, as maiores médias de concentração da clorofila *a* foram obtidas em maré baixa.

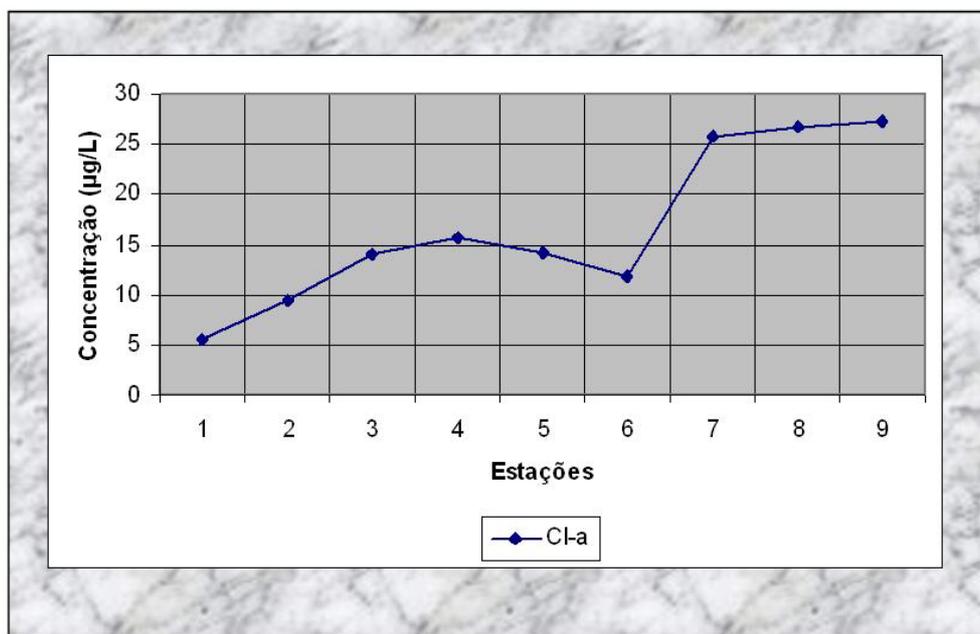


Figura 3 - Variação da clorofila *a* ( $\mu\text{g/L}$ ) nas estações de amostragem no estuário do rio anil, sentido jusante montante, maré enchente.

De acordo com Moreira (2003), a densidade fitoplantônica é mais expressiva no período de estiagem e o menos expressivo no período chuvoso, sendo que o fitoplâncton do estuário do rio Anil sofre influência do lançamento de esgoto “in natura” e a grande deposição de lixo nas margens do estuário, o que também influencia na sua distribuição ao longo do estuário.

### **Modelagem da Profundidade Secchi e da Concentração de Clorofila *a* com auxílio da geoestatística**

#### Profundidade Secchi (m)

De acordo com a aplicação da

geoestatística (Krigagem Bayesiana), é possível notar na figura 4 que a profundidade secchi teve uma variação de 20,2 a 29,2. É possível perceber que não há um padrão quanto a essa variável, e sim que é condicionada através do material em suspensão presente na região de amostragem. Mas também é possível notar que quanto mais próximo da montante do estuário menor a profundidade secchi.

#### Clorofila *a* ( $\mu\text{g/L}$ )

De acordo com a aplicação da geoestatística (Krigagem Bayesiana), é possível notar na figura 5 que a clorofila

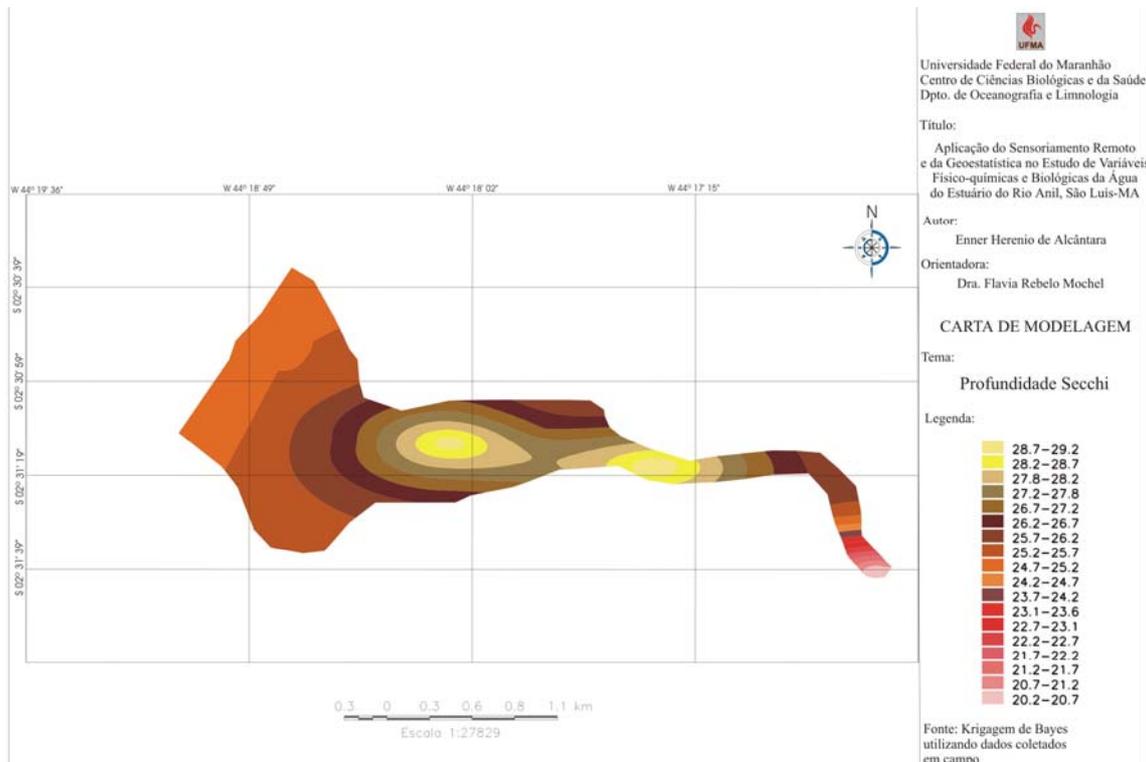


Figura 4 - Carta de Modelagem de Profundidade Secchi (cm) para a maré cheia no estuário do Rio Anil

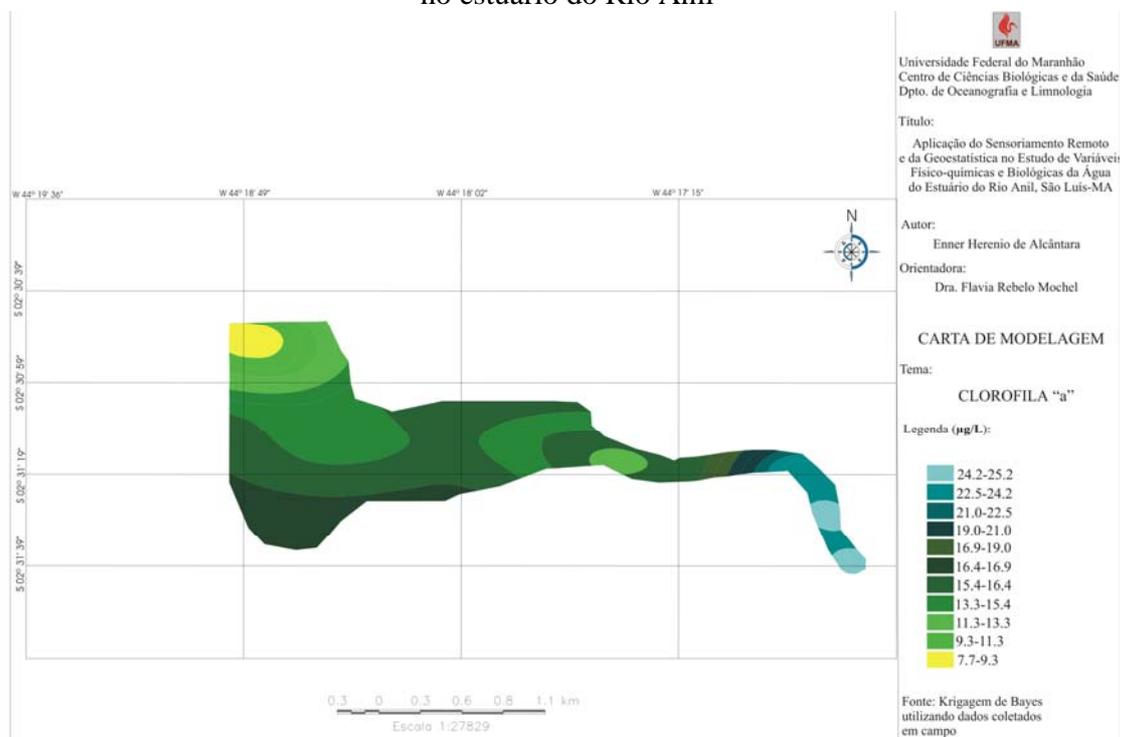


Figura 5 - Carta de Modelagem de Clorofila a (µg/L) para a maré cheia no estuário do Rio Anil

*a* ( $\mu\text{g/L}$ ) uma variação de 77,3 a 252,9 ( $\mu\text{g/L}$ ), com a desembocadura apresentando os menores valores, e aumentando em direção à montante.

Este resultado está de acordo com o trabalho de Ewerton (2001) que obteve como resultado sobre a concentração de clorofila *a* na preamar os maiores valores à jusante do estuário do rio Anil.

### CONCLUSÃO

É possível a aplicação da geoestatística no monitoramento da qualidade da água, com o auxílio do sensoriamento remoto e do geoprocessamento. Estas se mostraram muito eficientes na modelagem espacial das variáveis estudadas, facilitando o monitoramento dos recursos naturais, sendo assim uma importante ferramenta para auxiliar nas tomadas de decisões.

### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABOUFIRASSI, M., MARINO, M. A. Kriging of water levels in the Souss Aquifer, Morocco. *Mathematical Geology*, v. 15, p. 537-550, 1983.

AGRAWAL, O. P., RAO, K. V. G. K., CHAUHAN, H.S., KHANDELWAL, M.K. Geostatistical analysis of soil salinity improvement with subsurface drainage system. *Transactions of the*

*ASAE*, v. 38, p. 1427-1433, 1995.

ALCÂNTARA, E. H. & SILVA, G. C. Conseqüências Ambientais da Intensa Urbanização da Bacia Hidrográfica do Rio Anil, São Luís – MA. *In: VI Congresso de Ecologia do Brasil*. Fortaleza – CE. 2003.

AHN, C. W., BAUMGARDNER, M. F., BIEHL, L. L. Delineation of soil variability using geostatistics and fuzzy clustering analyses of hyperspectral data. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, v. 63, p. 142-150, 1999.

ALMEIDA, A. S.; Bettini, C. *Curso de Geoestatística Aplicada*. Rio de Janeiro, UFRJ, Apostila. 1994.

ARMSTRONG, M., JABIN, R. Variogram models must be positive-definite. *Mathematical Geology*, v. 13, p. 455-459, 1981.

ARMSTRONG, M. Common problems seen in variograms. *Mathematical Geology*, v. 16, p. 305-313, 1982.

BAKER, R. Modeling soil variability as a random field. *Mathematical Geology*, v. 16, p. 435-448, 1984.

BARNES, R.J. The variogram sill and the sample variance. *Mathematical geology*,

v. 23, p. 673-697, 1991.

BIDIGARE, R. R. & ONDRUSEK, M. *In vivo* absorption properties of algal pigments.

SPIE V. 1302, *Ocean Optics X*, p. 290-302, 1990.

BERNARDI, J. V. E.; FOWLER, H. G.; LANDIM, P. M. B. Um estudo de impacto ambiental utilizando análises estatísticas espacial e multivariada. *HOLOS Environment*, V.1 n.2, 2001 – p.162-172. 2001.

BOYER, D. G., WRIGHT, R.J., FELDHAK, C.M., BLIGH, D. P. Soil spatial variability relationships in a steeply sloping acid soil environment. *Soil Sci.*, v. 161, p. 278-287, 1996.

BORGELT, S.C., SEARCY, S.W., STOUT, B.A., MULLA, D.J. Spatially variable liming rates: a method for determination. *Transactions of the ASAE*, v. 37, p. 1499-1507, 1994.

BRESLER, E., DAGAN, G., WAGENET, R.J., LAUFER, A. Statistical analysis of salinity and texture effects on spatial variability of soil hydraulic conductivity. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, v.48, p. 16-25, 1984.

BOWERS, D. G., HARKER, G. E. L. & STEPHAN, B. Absorption of inorganic particles in the Irish Sea and their relevance to remote sensing of chlorophyll. *International Journal of Remote Sensing*, v. 17, n. 12, p. 2449-2460, 1996.

BURROUGH, P. A., VAN GAANS, P. F. M., HOOTSMANS, R. Continuous classification in soil survey: spatial correlation, confusion and boundaries. *Geoderma*, v. 77, p. 115-135, 1997.

CAHN, M. D., HUMMEL, J. W., BROUER, B. H. Spatial analysis of soil fertility for site-specific crop management. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, v. 58, p. 1240-1248, 1994.

CÂMARA, G., FREITAS, U. M., SOUZA, R. C. M. & GARRIDO, J. SPRING: Integrating Remote Sensing and GIS by Object – Oriented Data Modelling. *Computers and Graphics*, v. 20, n.3, p. 395-403, 1996.

CARTER, M. R. Spatial variability of porosity under reduced tillage in a homo-ferric podzol. *Can. J. Soil Sci.*, v. 75, p. 149-152, 1995.

CARVALHO, J. R. P.; SILVEIRA, P. M. & VIEIRA, S. R. Geoestatística na

determinação da variabilidade espacial de características químicas do solo sob diferentes preparos. *Pesq. agropec. bras.* vol.37 no.8 Brasília. 2002.

CASSEL, D. K., WENDROTH, O., NIELSEN, D. R. Assessing spatial variability in an agricultural experiment station field: opportunities arising from spatial dependence. *Agron. J.*, n. 92, p. 706-714, 2000.

CIOLLARO, G., ROMANO, N. Spatial variability of the hydraulic properties of a volcanic soil. *Geoderma*, v. 65, p. 263-282, 1995.

CORA, J. E. The potential for site-specific management of soil and corn yield variability induced by tillage. Dissertation, Michigan State University, 1997. 104p.

CREMERS, N.H.D.T., VAN DIJK, P.M., ROO, A.P.J., VERZANDVOORT, M.A. Spatial and temporal variability of soil surface roughness and the application in hydrological and soil erosion modelling. *Hydrol. Processes*, v.10, p.1035-1047, 1996.

CRESSIE, N., HAWKINS, D. M. Robust estimation of the variogram: I. *Mathematical geology*, v. 12, p. 115-125,

1980.

CRESSIE, N. Fitting variogram models by weighted least squares. *Mathematical geology*, v. 17, p. 563-586, 1985.

DAVIS, J. C. *Statistics and data analysis in geology*. 2.ed. New York: John Wiley & Sons. 1986.

DAVIS, J. G., HOSSNER, L. R., WILDING, L. P., MANU, A. Variability of soil chemical properties in two sandy dunal soils of niger. *Soil Sci.*, v. 159, p. 321-330, 1995.

DEUTSCH, C. V., JOURNEL, A. G. *GSLIB. geostatistical software library*. Oxford Univ. Press, New York, 1998.

DILLON, W. R. & GOLDSTEIN, M. *Multivariate Analysis – Methods and applications*. New York: John Wiley & Sons, 1984. 587 p.

DYER & TAYLOR, P. A. A Simple, Segmented Prism Model of Tidal Mixing in Well-mixed Estuaries. *Estuar. Coast. Mar. Sci.*, 1:411-418. 1973.

DUNN, M. R. A simple sufficient condition for a variogram model to yield positive variances under restrictions. *Mathematical geology*, v. 15, p. 553-564, 1983.

- DURUM, W. H. Chemical, physical and biological characteristics of water. In: CIACCIO, L.L., Ed., Water and Water pollution handbook. New York, NY, 1971. V1, part. 1, p. 1-50. 1971.
- EWERTON, C. A. Biomassa fitoplanctônica do rio Anil, na Ilha de São Luís, Maranhão, Brasil. São Luís. 42p. 2001.
- ENGLUND, E. J., SPARKS, A. Geoeas. Users's guide. USEMS, Las Vegas, 1988. sp.
- FOLEGATI, M. V. Estabilidade temporal e variabilidade espacial da umidade e do armazenamento de água em solo siltoso. Livre-Docência, ESALQ/USP, 1996. 84p.
- GALLIE, E. A. & MURTHA, P. A. Specific absorption and backscattering spectra for suspended minerals and chlorophyll-*a* in Chilko Lake, British Columbia. *Remote Sensing of Environment*, v. 39, p. 103-118, 1992.
- GITELSON, A. The peak near 700nm on radiance spectra of algae and water: relationships of its magnitude and position with chlorophyll concentration. *International Journal of Remote Sensing*, v. 13, n. 17, p. 3367-3373, 1992.
- GONZALES, O.J., ZAK, D.R. Geostatistical analysis of soil properties in a secondary tropical dry forest, St. Lucia, West Indies. *Plant and Soil*, v. 45-54, 1994.
- GOTWAY, C. A., HARTFORD, A. H. Geostatistical methods for incorporating auxiliary information in the prediction of spatial variables. *J. Agri., Biol. Environ. Statistics*, v. 1, p. 17-39, 1996.
- GUERRA, P. A. G. Geoestatística operacional. Brasília, MME/DNPM, 1988. 145p.
- GUPTA, R.P., AGGARWAL, P., CHAUHAN, A.S. Spatial variability analysis of bulk density as a guide for tillage. *J. Indian Soc. Soil Sci.*, v. 43, p. 549-557, 1995.
- HAARDT, H. & MASKE, H. Specific in vivo absorption coefficient of chlorophyll-*a* at 675 nm. *Limnology and Oceanography*, v. 32, p. 608-619, 1987.
- HERZ, R. Circulação das águas da superfície da Lagoa dos Patos. Contribuição metodológica ao estudo de processos lagunares e costeiros do Rio Grande do Sul através da aplicação de técnicas de sensoriamento remoto. Tese de Doutorado em Geografia. São Paulo,

USP, 1977.

HOODA, P.S., DAHIYA, I.S., MALIK, R.S. Spatial variability of ground water salinity in a watershed. *J. Indian Soc. Soil Sci.*, v. 34, p. 372-378, 1986.

HORN, R., TAUBNER, H., WUTTKE, M., BAUMGARTL, T. Soil physical properties related to soil structure. *Soil Till. Reser.*, v. 30, p. 187-216, 1994.

HOROWITZ, J., HILLEL, D. A critical of some recent attempts to characterize spatial variability. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, Madison, v. 47, p. 614-615, 1983.

HUIJBREGTS, C. J. Regionalized variables and quantitative analysis of spatial data. In: Davis, J. C.; McCullagh, M. J. ed. *Display and analysis of spatial data*. New York, John Wiley, p. 38-53. 1975.

ISAAKS, E.H., SRIVASTAVA, M. An introduction to applied geostatistics. Oxford Univ. Press., New York, 1989. 600p.

KIRDA, C., HARDARSON, G., ZAPATA, F., REICHARDT, K. Spatial variability of root zone soil water status and of fertilizer N uptake by forage crops. *Soil Tech.*, v. 1, p. 223-234, 1988.

KLEMAS, V. 7 POLIS, D. Remote sensing of estuaries fronts and their effects on pollutants. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. 43(5): 599-612. 1977.

KRAVCHENKO, A. N., BULLOCK, D. G. A comparative study of interpretation methods for mapping properties. *Agron. J.*, v. 91, p. 393-400, 1999.

LABOHIDRO. *Estudos Bioecológicos nos Estuários dos Rios Anil e Bacanga – Ilha de São Luís-MA*. (Relatório parcial). 1980.

LABOHIDRO. Estudo da poluição química e biológica na Ilha de São Luís – MA: Rios Anil e Bacanga. Relatório final. 1983.

LABOHIDRO. Estudo do plâncton e de fatores físico e químicos na região estuarina dos Rios Anil e Bacanga, São Luís/MA. 1994.

LACKEY, J. B. The microbiota of estuaries and their roles. In: LAUFF, G.H. *Estuaries*. Washington, Dc, AAAS, Cap. 6, p.329-335, (publication n° 83). 1967.

LANDIM, P. M. B. Análise estatística de dados geológicos. São Paulo: Editora da UNESP. 1998.

- LANDIM, P. M. B. Introdução aos métodos de estimação espacial para confecção de mapas. DGA, IGCE, UNESP/Rio Claro, Lab. Geomatemática, Texto Didático 02, 20 pp. 2000.
- LEY, G. J., LARYEA, K. B. Spatial variability in penetration resistance of a hardsetting tropical Alfisol. *Soil & Tillage Res.*, v. 29, p. 367-381, 1994.
- LITTLEPAGE, J. Oceanografia: manual de técnicas oceanográficas para trabalhos em laboratório e a bordo. Fortaleza-CE. Ed. da UFC. 99 p. 1998.
- MARX, D. B., GILMOUR, J. T., SCOTT, H. D., FERGUSON, J. A. Effects of long-term water management in a humid region on spatial variability of soil chemical status. *Soil Sci.*, v. 145, p. 188-193, 1988.
- McBRATNEY, A.B., HART, G.A., McGARRY, D. The use of region partitioning to improve the representation of geostatistically mapped soil attributes. *J. Soil Sci.*, v. 42, p. 513-532, 1991.
- McBRATNEY, A.B., WEBSTER, R. How many observations are needed for regional estimation of soil properties. *Soil Sci.*, v. 135, p. 177-183, 1983.
- McBRATNEY, A.B., WEBSTER, R. Choosing functions for semi-variograms of soil properties and fitting them to sampling estimates. *J. Soil Sci.*, v. 37, p. 617-639, 1986.
- McBRATNEY, A. B., DE GRUIJTER, J. J. A continuum approach to soil classification by modified fuzzy k-means with extragades. *J. Soil Sci.*, v. 43, p. 159-176, 1992.
- McBRATNEY, A. B., ODEH, I. O. A. Application of fuzzy sets in soil science: fuzzy logic, fuzzy measurements and fuzzy decisions. *Geoderma*, v.77, p. 85-113, 1997.
- MALLANTS, D., MOHANTY, B.P., JACQUES, D., FEYEN, J. Spatial variability of hydraulic properties in a multi-layered soil profile. *Soil Sci.*, v. 161, p. 167-181, 1996.
- MANN, K. Ecology of coastal waters: a system approach. University of California Press. Verkeley, C.A., 322 p. 1982.
- MATHERON, G. Principles of geostatistics. *Economic Geology*, 58 (8): 1246-1266. 1963.
- MATHERON, G. The theory of regionalized variables and its applications. Paris, Les Cahiers du Centre de Morphologie Mathematique de

Fontainebleu, 211p. 1971.

MITSCH, W.J. & GOSSELINK, J.G. Wetlands. Van Nostrand Reinhold Company, New York, 539 p. 1986.

MOOLMAN, J.H., HUYSSTEEN, L.V. A geostatistical analysis of the penetrometer soil strength of a deep ploughed soil. *Soil Til. Res.*, v. 15, p. 11-24, 1989.

MOREIRA, E. G. Comunidade fitoplanctônica do estuário do rio Anil, Ilha de São Luís-MA. Monografia (graduação em ciências biológicas - UFMA). 2003.

NASSER, V. L., FILHO, O. C. R., AMARAL, V., JUNIOR, S. L. C., SILVA, E. V. A. 2003. Sensoriamento e geoestatística aplicados à qualidade de água da Baía de Guanabara. *Anais XI SBSR*, Belo Horizonte, Brasil, INPE.

NETGIS – Geoprocessamento e Informática Ltda. *SPRING – Sistema de processamento de informações georreferenciadas*. Versão 2.0.4, 1997. 4 v.

OLEA, R. A. 1977. Measuring spatial dependence with semivariograms, Kansas, Kansas Geological Survey, 29p. (Series on Spatial Analysis 3).

OLIVEIRA, J. J., CHAVES, L. H. G., QUEIROZ, J. E. LUNA, J. G. Variabilidade espacial de propriedades químicas em um solo salino-sódico. *Ver. Bras. Cien. Solo*, v. 23, p. 783-789, 1999.

OPENSHAWS, S. Developments in geographical information systems. *Econ. Social Res. Council*, v. 63, p. 11-14, 1988.

PAREY, P. Aussagekraft Von Gewasserguteparametern in Fließgewässern. *Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau (EVWK)*. 1993.

PARANHOS, R. 1996. Alguns métodos para análise da água. Rio de Janeiro: UFRJ, 200 p. (Cadernos didáticos UFRJ; 19).

PETERS, D. G.; HAYES, J. M & HIEFTZE, M. Chemical separations and measurements. W. B. Saunders Co. Londres, 813 p.

POLCYN, F. C. & LYZENGA, D. R. *Remote bathymetric and shoal detection with ERTS*. Ann Arbor, 1975. 55 p.(NASA - CR - ERIM - 193300-51-F).

PRIEUR, L. & SATHYENDRANATH, S. An optical classification of coastal and oceanic water based on the specific spectral absorption curves of

phytoplankton pigments, dissolved organic matter, and other particulate materials. *Limnology and Oceanography*, v. 26, n. 4, p. 671-689, 1981.

PUNTES, R., WILDING, L. P., DREES, L. R. Microspatial variability and sampling concepts in soil porosity studies of Vertisols. *Geoderma*, v. 53, p. 373-385, 1992.

QUIBELL, G. The effect of suspended sediment on reflectance spectra from freshwater

algae. *International Journal of Remote Sensing*, v. 12, n. 1, p. 177-182, 1991.

REICHARDT, K., BACCHI, O.S., VILLAGRA, M.M., TURATTI, A.L., PEDROSA, Z.O. Hydarulic variability in space and time in a dark red latosol of the tropics. *Geoderma*, v. 60, p. 159-168, 1993.

REYNOLDS, W.D., JONG, R., VIEIRA, S.R., CLEMENTE, R.S. Methodology for predicting agrochemical contamination of ground water resources. Soil Quality evaluation program technical Report 4, Canada, 1994. 51p.

ROSSI, R. E., DUNGAN, J. L., BECK, L. R. Kriging in the shadows: geostatistical interpolation for remote

sensing. *Remote Sens. Environ.*, v.49, p. 32-40, 1994.

ROGOWSKI, A. S. & WOLF, J. K. Incorporating variability into soil map unit delineations. *Soil Sci. Soc Am. J.*, Madison, v. 58, p. 163-174, 1994..

SAMRA, J.S., GILL, H.S., ANLAUF, R., RICHTER, J. Geostatistical evaluation of soil sodicity and growth of *Melia azedarach* Linn. as simultaneous stochastic processes. *Soil Sci.*, v. 148, p. 361-369, 1989.

SANTOS-FERNANDES, T. L.; PASSAVANTE, J. Z. O.; KOENING, M. L. & MACÊDO, S. J. 1998. Fitoplâncton do estuário do rio Jaguaribe, (Itamaracá, Pernambuco, Brasil): Biomassa, Universidade Federal de Pernambuco, In: Trab. Oceanográficos. Recife, 26(2): 1-18.

SHAPIRO, A., BOTHA, J. D. Variogram fitting with a general classes of conditionally nonnegative definite functions. *Comp. Statistical & Data Analysis*, v. 11, p. 87-96, 1991.

SHOUSE, P.J., RUSSELL, W.B., BURDEN, D.S., SELIM, H.M., SISSON, J.B., VAN GENUCHTEN, M.T. Spatial variability of soil water retention

functions in a silt loam soil. *Soil Sci.*, v. 159, p. 1-12, 1995.

SIEGEL, S. Estatística não – paramétrica para as ciências do comportamento. São Paulo, Mc Graw-Hill, 350 p., 1981.

SIQUEIRA, A.M.F., 1987. *Efeitos da Poluição por efluentes domésticos e industriais sobre o rio Anil*. (Monografia). Universidade Federal do Maranhão, São Luís.

STEIN, A., HOOGERWERF, M., BOUMA, J. Use of soil map delineations to improve (co)kriging of point data on moisture deficits. *Geoderma*, v. 43, p. 163-177, 1988.

TEIXEIRA, C., ARANHA, F. J., BARBIERI, R., MELO, O. T. Redução primária e clorofila *a* do fitoplâncton e parâmetros físico e químicos do Estreito dos Coqueiros, MA-Brasil. *Revista Brasileira de Biologia*. 48; 1:29-39. 1988.

TRAGMAR, B. B., YOST, R. S., UEHARA, G. Application of geostatistics to spatial studies of soil properties. *Advances in Agronomy*, v. 38, p. 45-94, 1985.

TSEGAYE, T., HILL, R. L. Intensive tillage effects on spatial variability of soil test, plant growth and nutrient uptake

measurements. *Soil Sci.*, v. 163, p. 155-165, 1998.

TUNDISI, J. G. 1970. O plâncton estuarino. Contribuições avulsas do Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo. Série Oceanografia Biológica, São Paulo, 19: 1-12.

VALENTE, J. M. G. P. Geomatemática – Lições de geoestatística. Ouro Preto, Ed. da Fundação Gorceix, 1989. 8v.

VAN ES, H.M., VAN ES, C.L. Spatial nature of randomization and its effect on the outcome of field experiments. *Agronomy Journal*, v. 85, p. 421-428, 1993.

VIEIRA, S. R.; HATFIELD, J. L.; NIELSEN, D. R. & BIGGAR, J. W. Geostatistical theory and application to variability of some agronomical properties. *Hilgardia*, Berkeley, v. 51, n. 3, p. 1-75. 1983.

VIEIRA, S.R., CASTRO, O.M., TOPP, G.C. Spatial variability of soil physical properties in three soils of São Paulo, Brazil. *Pesq. agrop. bras.*, v. 27, p. 333-341, 1992.

VOLTZ, M., GOULARD, M. Spatial interpolation of soil moisture retention curves. *Geoderma*, v. 62, p. 109-123, 1994.

ZIMBACK, C.R.L. Análise espacial de atributos químicos de solos para fins de mapeamento da fertilidade. Tese de Livre-Docência (Livre-Docência em Levantamento do solo e ftopedologia), FCA/UNESP, 2001. 114p.