

# Caracterização da dispersão espacial de plantas aquáticas usando sensoriamento remoto e geoestatística

Daniel Luís de Lima <sup>1</sup>  
Maria de Lourdes Bueno Trindade Galo <sup>2</sup>  
Vilma Mayumi Tachibana <sup>2</sup>  
Nilton Nobuhiro Imai <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Gisplan Tecnologia da Geoinformação - GISPLAN  
Av. Armando Lombardi 800 s311 – 22640-020 – Rio de Janeiro - RJ, Brasil  
daniel@gisplan.com.br

<sup>2</sup> Universidade Estadual Paulista - UNESP / FCT - Departamento de Cartografia  
Rua Roberto Simonsen, 305 - 19060-900 - Presidente Prudente - SP, Brasil  
{mlourdes, vilma, nnimai}@fct.unesp.br

**Abstract.** Multispectral and multitemporal images availability represents a particularly important phenomenon register in the use of water for energy generation context. This paper proposes the establishment of a method to use multispectral data acquired at different moments of the time to characterize aquatic plants infestation in hydroelectric reservoirs, what is an increasing importance problem in Brazil. Multispectral images analysis and geostatistics techniques are used aiming the construction of a model that characterizes the phenomenon dispersion structure.

**Palavras-chave:** multispectral image analysis, geostatistics, aquatic plants, análise de imagens multiespectrais, geoestatística, plantas aquáticas.

## 1. Introdução

A ocorrência de plantas aquáticas em reservatórios de hidrelétricas é um problema de importância crescente no Brasil. Alguns reservatórios já têm sua eficiência comprometida, na utilização da água para navegação e geração de energia, pela elevada infestação de plantas aquáticas tanto marginais e flutuantes como submersas. Em geral, o grande tamanho dos reservatórios brasileiros torna seu monitoramento extremamente caro e demorado. Nesse sentido, devido ao seu caráter sinóptico e repetitivo, as imagens de satélite podem se constituir, em um recurso auxiliar no processo de mapear e monitorar a distribuição espacial de alguns componentes presentes no corpo d'água, como por exemplo, a ocorrência de plantas aquáticas em reservatórios de hidrelétricas.

A proposta deste trabalho é buscar um método que permita usar dados multiespectrais adquiridos em diferentes momentos do tempo para monitorar a evolução de áreas infestadas por plantas aquáticas em reservatórios. A modelagem da distribuição espaço-temporal de fenômenos dinâmicos é reconhecidamente importante em vários campos científicos e das engenharias, porém, sua implementação não é trivial, principalmente quando a variável em questão deve ser analisada em diferentes domínios: multiespectral, espacial e temporal.

Para viabilizar esse propósito, é utilizada uma combinação de técnicas de transformação de imagens multiespectrais e de geoestatística, contribuindo, deste modo, com estudos que envolvam a identificação, caracterização e monitoramento de plantas aquáticas em grandes reservatórios.

## 2. Sensoriamento remoto

Tentativas de correlacionar a resposta espectral com a ocorrência de componentes que indiquem a qualidade da água em grandes reservatórios têm sido relatadas desde que as imagens orbitais do sensor MSS (*MultiSpectral Scanner*) do satélite Landsat tornaram-se disponíveis. Com a disponibilidade das imagens do sensor TM (*Thematic Mapper*), foram realizados experimentos para verificar se o aumento na resolução espacial dessas imagens permitiria estimativas da concentração dos componentes individuais da água. No entanto, conforme salienta Novo et al. (1994), a maior limitação desses dados é sua resolução espectral inadequada para estudos da água, a qual não permite discriminar componentes opticamente ativos, principalmente quando ocorrem simultaneamente altas concentrações de clorofila e material inorgânico. Por outro lado, Galo et al. (2002) destacam que muito embora o sensor TM não tenha sido projetado para estudos da água, os dados obtidos permitem detectar apropriadamente áreas infestadas por plantas aquáticas em grandes reservatórios, principalmente macrófitas marginais e flutuantes. Além disso, a possibilidade de aquisição sistemática de imagens de uma mesma área geográfica, constitui um aspecto de grande importância no monitoramento dos grandes reservatórios, além de ser uma fonte imprescindível de dados históricos.

Dois tipos de processamentos de imagens multiespectrais são imprescindíveis em qualquer estudo que envolva o aspecto temporal: o registro e a normalização radiométrica, a fim de garantir a consistência geométrica e radiométrica, respectivamente. Na tentativa de viabilizar a análise de séries temporais, Schott et al. (1988) apud Galo e Novo (2000), desenvolveram uma técnica de normalização radiométrica cena a cena que resulta em uma alteração das imagens para que estas pareçam ter sido imageadas nas mesmas condições atmosféricas e de iluminação de uma imagem de referência da mesma área, aproximando os valores de média ( $\bar{I}$ ) e desvio-padrão ( $S$ ) da imagem tomada como referência ( $I_R$ ) com os das imagens a serem normalizadas ( $I_{AN}$ ). Esta normalização radiométrica é feita, pixel a pixel, através da seguinte expressão (GALO E NOVO, 2000):

$$I_{(i,j)_N} = \frac{S_R}{S_{AN}} (I_{(i,j)_{AN}} - \bar{I}_{AN}) + \bar{I}_R \quad (1)$$

onde  $I_{(i,j)_N}$  representa o valor de brilho do pixel ( $i,j$ ) da imagem resultante da normalização.

## 3. Geoestatística

Em geral, a metodologia da geoestatística pode ser usada quando se dispõe de uma amostra aleatória de uma variável resposta contínua, na qual para cada elemento amostral se tem associada uma localização geográfica (através de coordenadas). A análise da variação desta variável resposta em relação à localização dos elementos possibilita a construção de um modelo estatístico usado para prever o valor da variável em locais não previamente amostrados. O conhecimento do comportamento dessa variação é obtido através de uma função chamada semivariograma e que é utilizada no procedimento de predição espacial chamado de krigagem.

De acordo com Camargo (1997), o variograma é definido como sendo a esperança matemática do quadrado da diferença entre pontos separados no espaço por um vetor  $h$  (definido por sua orientação e tamanho). Desse modo, o semivariograma é dado pela metade do variograma, ou seja:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2} E \{ [Z(s) - Z(s+h)]^2 \} \quad (2)$$

Se as condições de estacionariedade intrínseca são contempladas, então o semivariograma

pode ser estimado através de um conjunto de elementos amostrais  $z(s_i)$ ,  $i=1,2,\dots,n$ , por:

$$\hat{\gamma}(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [z(s_i) - z(s_i + h)]^2 \quad (3)$$

sendo  $\hat{\gamma}(h)$  o *semivariograma experimental* estimado a partir dos elementos amostrais; e  $N(h)$  o número de pares de pontos  $z(s)$  e  $z(s+h)$  separados por um vetor  $h$ .

O semivariograma mostra apenas uma série de pontos discretos de  $\gamma(h)$  para cada  $h$ , aos quais deverá ser ajustada uma função contínua (denominada de modelo teórico). Após o ajuste do modelo teórico ao semivariograma são definidos alguns parâmetros, como efeito pepita, alcance e contribuição, os quais podem ser utilizados em método de interpolação a fim de gerar superfície contínua que represente o fenômeno de interesse. Este método é denominado krigagem, que é um processo de estimação de valores de variáveis distribuídas no espaço, a partir de valores adjacentes, enquanto considerados como interdependentes pelo semivariograma.

Em todas as situações, o método fornece, além dos valores estimados, o erro associado a tal estimação, o que o distingue dos demais algoritmos à disposição. A krigagem usa informações a partir do semivariograma para encontrar os pesos ótimos a serem associados aos elementos amostrais que irão estimar um ponto, ou uma área, ou um volume. Como o semivariograma é uma função da distância entre elementos amostrais, mantendo o mesmo número de elementos, os pesos serão diferentes de acordo com o seu arranjo geográfico.

Alguns autores têm buscado avaliar a aplicação de métodos geoestatísticos não só no domínio espacial, como é o caso da geoestatística “clássica”, mas também em análise de séries temporais (MINGOTI E NEVES, 1999) e em abordagens espaço-temporais (DE IACO, MYERS e POSA, 2002; GNEITING et al., 2005; MONTEIRO, 2003).

#### 4. Experimento: descrição, método e resultados

##### 4.1. Área de estudo e imagens utilizadas

Foi identificada uma área de estudo na qual a presença de plantas aquáticas, no caso exclusivamente marginais e flutuantes, está adequadamente caracterizada. Trata-se do reservatório da Usina Hidrelétrica de Salto Grande, em Americana/SP, para o qual se dispõe de 18 cenas, de diferentes sensores e satélites, tomadas no período de junho de 2000 a outubro de 2005, como pode ser observado na **Tabela 1**.

Tabela 1 – Imagens disponíveis.

<b>Imagem</b>	<b>Data</b>	<b>Sensor/Satélite</b>	<b>Resolução espacial (m)</b>
a	24 / Jun / 2000	ETM+/Landsat-7	30
b	23 / Mar / 2001	ETM+/Landsat-7	30
c	02 / Nov / 2001	ETM+/Landsat-7	30
d	11 / Abr / 2002	ETM+/Landsat-7	30
e	21 / Nov / 2002	ETM+/Landsat-7	30
f	08 / Jan / 2003	ETM+/Landsat-7	30
g	16 / Mai / 2003	ETM+/Landsat-7	30
h	16 / Out / 2003	Ikonos II	04
i	29 / Dez / 2003	CCD/CBERS-2	20
j	16 / Mar / 2004	CCD/CBERS-2	20
k	11 / Abr / 2004	CCD/CBERS-2	20
l	08 / Jun / 2004	Ikonos II	04

m	07 / Jul / 2004	CCD/CBERS-2	20
n	17 / Fev / 2005	CCD/CBERS-2	20
o	10 / Abr / 2005	CCD/CBERS-2	20
p	06 / Mai / 2005	CCD/CBERS-2	20
q	18 / Ago / 2005	CCD/CBERS-2	20
r	09 / Out / 2005	CCD/CBERS-2	20

O reservatório de Salto Grande localiza-se no município de Americana/SP e está inserido na sub-bacia do rio Atibaia, o qual pertence à bacia hidrográfica do rio Piracicaba. A área do reservatório é de aproximadamente 1135 ha. Por estar localizado em uma região com elevada densidade demográfica, altamente industrializada e com intensa atividade agrícola, o reservatório possui uma alta concentração de nutrientes, o que provoca o crescimento excessivo de plantas aquáticas. Devido a esse tipo de desequilíbrio, diversos usos foram minimizados, incluindo a produção de energia e a recreação de contato primário, implicando na desvalorização econômica da infra-estrutura construída na década de 70 (LEITE e ESPÍNDOLA, 2002 apud LEITE, 2002).

#### 4.2. Método proposto

Deve-se destacar que o principal objetivo deste trabalho é buscar um método adequado que permita estimar um modelo que represente o comportamento da dispersão de plantas aquáticas. Neste sentido, o método originalmente idealizado, apresentado a seguir, sofreu algumas reformulações no decorrer do experimento, conforme houve a necessidade de adequar o propósito da pesquisa com as ferramentas de análise disponíveis.

A **Figura 1** apresenta um fluxograma que procura sintetizar o método proposto inicialmente.

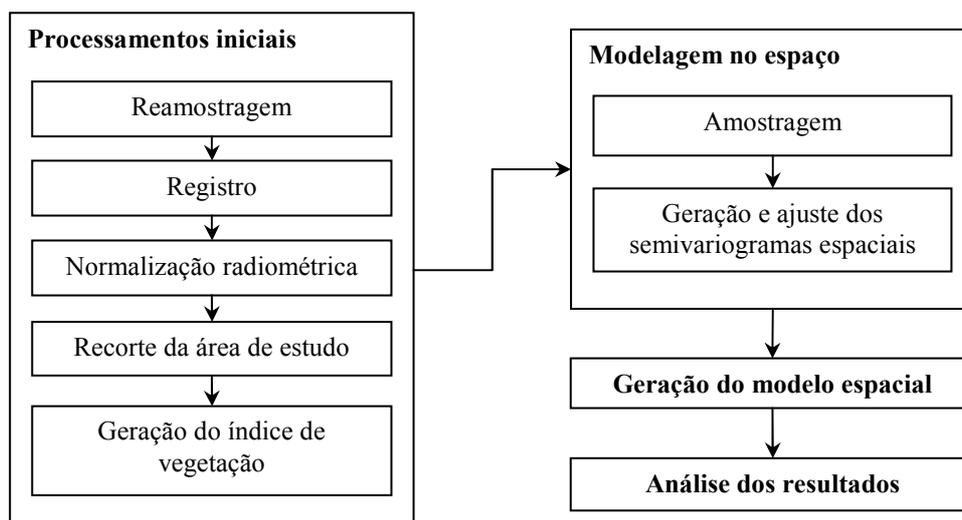


Figura 1 – Fluxograma representando o método proposto.

#### 4.3. Experimento realizado

##### 4.3.1. Processamentos iniciais

Inicialmente, a fim de compatibilizar as imagens utilizadas radiométrica e geometricamente,

passo imprescindível em uma análise que envolva o aspecto temporal, foram realizados alguns processamentos iniciais.

- Reamostragem: o conjunto de imagens utilizadas no experimento, composto por imagens de diferentes sensores e satélites, cada qual com uma determinada resolução espacial, foi reamostrado para que ficasse com a mesma resolução espacial de 10 m. Este valor foi adotado para que não se perdesse muita informação das imagens de alta resolução e também levando-se em conta que o fenômeno de interesse não fica descaracterizado com um menor elemento de resolução, conforme mostra Cruz (2005);
- Registro: para garantir a consistência geométrica do experimento todas as 36 imagens foram registradas, tomando-se como referência a imagem Ikonos de Junho de 2004. O erro médio quadrático (EMQ) do registro de cada uma das imagens ficou em torno de quatro metros.

#### 4.3.2 Normalização radiométrica

Uma vez que imagens de diferentes sensores e satélites foram utilizadas no experimento, a normalização foi realizada com o objetivo de compatibilizar radiometricamente as imagens. Embora as imagens Ikonos possuíssem um maior contraste, estas não representavam bem as bandas utilizadas, uma vez já foram submetidas a uma operação de aumento de contraste quando convertidas de 11 para 8 bits. Desse modo, foi utilizada como referência radiométrica a imagem ETM+/Landsat de Novembro de 2001, imagem (c), por possuir um maior contraste originalmente.

#### 4.3.3 Geração dos NDVI's e recorte da área de estudo

A implementação de modelos de distribuição espaço-temporal de fenômenos dinâmicos não é trivial, principalmente quando a variável em questão deve ser analisada em diferentes domínios: multiespectral (7D para as imagens Landsat e 4D para as imagens Ikonos e CBERS), espacial (2D) e temporal (1D). Neste sentido, a fim de diminuir a dimensionalidade dos dados multiespectrais, foram elaboradas imagens índices de vegetação. Deste modo, a variável planta aquática passa a ser representada pelo respectivo índice de vegetação estimado para cada cena multitemporal e o espaço do domínio multiespectral passa a ser unidimensional.

As imagens índices de vegetação foram geradas, sendo que o índice de vegetação adotado no experimento foi o NDVI – Normalized Difference Vegetation Index – pelo fato de que todas as imagens estariam representadas no mesmo intervalo, de -1 a 1. Por fim, foram recortadas as 18 imagens NDVI's, removendo-se o entorno da Represa de Salto Grande, resultando em imagens nas quais se destacam somente a área de estudo.

#### 4.3.4 Modelagem no espaço

A amostragem foi elaborada em dois passos: inicialmente foi feita amostragem automática, no Idrisi, do tipo sistemático não-alinhado com 800 elementos amostrais, dos quais foram removidos os que estavam fora da área de interesse; em seguida, foi elaborada uma imagem de máximos na qual estão representados os maiores valores de todas as imagens multitemporais em cada posição. Esta imagem foi gerada com o objetivo de sintetizar toda a informação temporal em um único A partir desta imagem de máximos, foi feito, manualmente, um adensamento de elementos amostrais nas regiões em que, em algum momento do tempo, houve infestação por plantas aquáticas. Obteve-se, então, uma amostra com 543 elementos amostrais irregularmente distribuídos no espaço. A **Figura 2** apresenta a imagem de máximos, na qual foi sobreposta a amostra adquirida no espaço.

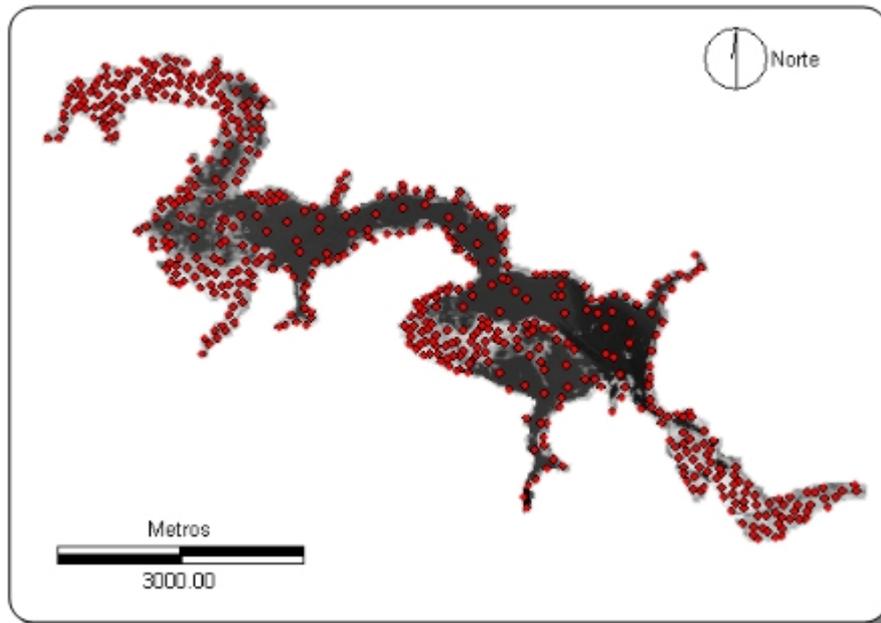


Figura 2 – Imagens de máximos e distribuição dos elementos amostrais.

Utilizando-se o *software* SPRING 4.1 realizou-se a etapa da modelagem no espaço, com a geração dos semivariogramas e ajuste dos modelos para cada data e para os valores da imagem de máximos.

A **Figura 3** apresenta os semivariogramas experimentais gerados para cada data e para os elementos da imagem de máximos.

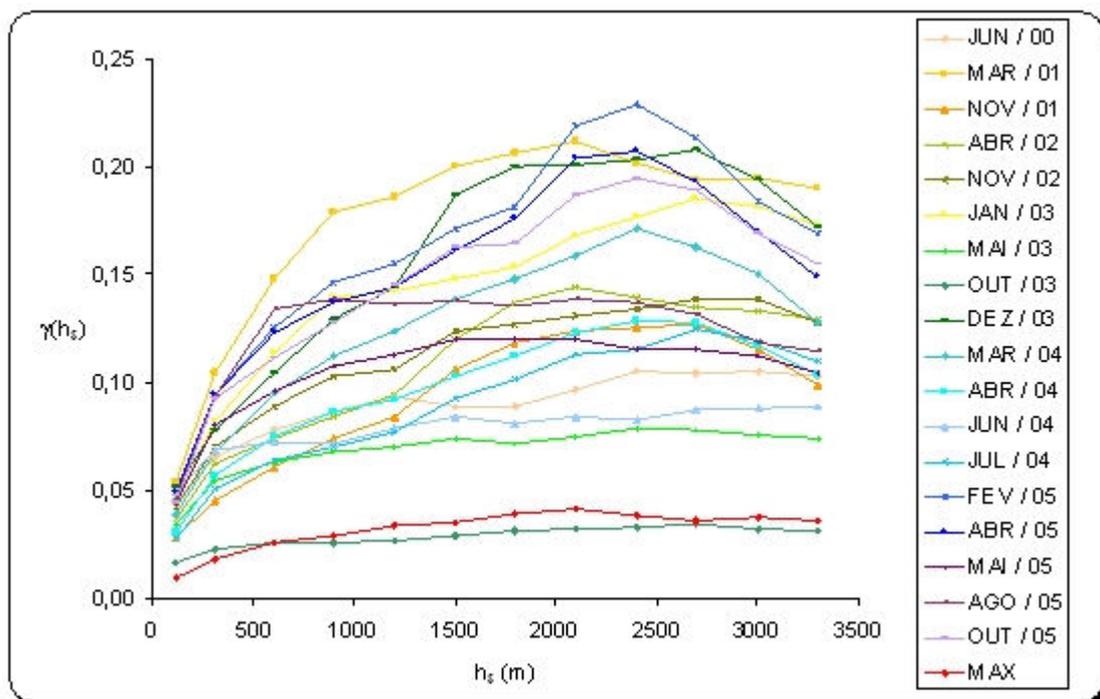


Figura 3 – Semivariogramas experimentais.

A **Tabela 2** apresenta os valores obtidos para os parâmetros (efeito pepita, contribuição e alcance, respectivamente) dos modelos ajustados. Para todas as datas, o modelo foi ajustado a partir de um semivariograma experimental omnidirecional, com 10 lags de 300 m e tolerância de 150 m, sendo que o modelo adotado foi o esférico, com exceção do modelo gerado para os valores da imagem de máximos (MAX), sendo adotado o modelo exponencial.

Tabela 2 – Parâmetros dos modelos ajustados.

<b>Imagem</b>	<b>Data</b>	<b>Efeito pepita (<math>C_0</math>)</b>	<b>Contribuição (<math>C_1</math>)</b>	<b>Alcance (a) (em metros)</b>
a	JUN / 00	0,04	0,058	1365,282
b	MAR / 01	0,033	0,165	1188,840
c	NOV / 01	0,022	0,095	2237,164
d	ABR / 02	0,032	0,104	2347,555
e	NOV / 02	0,039	0,093	1888,764
f	JAN / 03	0,037	0,133	1720,419
g	MAI / 03	0,03	0,045	1079,864
h	OUT / 03	0,018	0,015	2299,315
i	DEZ / 03	0,04	0,156	2142,440
j	MAR / 04	0,032	0,119	1872,870
k	ABR / 04	0,028	0,09	2045,990
l	JUN / 04	0,052	0,033	1721,588
m	JUL / 04	0,026	0,091	2721,927
n	FEV / 05	0,038	0,156	1860,946
o	ABR / 05	0,043	0,135	1807,936
p	MAI / 05	0,032	0,082	955,913
q	AGO / 05	0,014	0,118	632,828
r	OUT / 05	0,038	0,136	1808,363
MAX	---	0,003	0,035	1768,086

Uma informação relevante que é obtida pelos modelos ajustados é um valor médio do alcance do fenômeno, isto é, a partir de um alcance de aproximadamente 1761 m (média de todos os alcances encontrados) o fenômeno perde sua dependência espacial. Esta informação seria importante, por exemplo, na determinação de unidades de manejo das plantas (para a aplicação de produtos químicos para o controle da proliferação das plantas, por exemplo).

## 5. Considerações finais

Considerando a hipótese inicial e os resultados apresentados, verifica-se que o objetivo de elaborar um modelo espacial da ocorrência de plantas aquáticas na área de estudo foi atingido. Por se tratar de um fenômeno ambiental, registrado em imagens multiespectrais e multitemporais, cada uma das etapas necessárias para se chegar ao modelo final foi cuidadosamente avaliada, garantindo-se consistência e domínio do processo.

Deve-se também levar em conta que este fenômeno sujeito a uma série de perturbações naturais e/ou antrópicas, dentre elas:

- Diversos tipos de manejo, como por exemplo a remoção mecânica de plantas do reservatório são realizadas de tempos em tempos, em períodos não regulares, para controlar o grau de infestação por plantas aquáticas invasoras. Além disto, a implantação de uma barreira flutuante, próximo a usina hidrelétrica, modifica totalmente o regime distribuição das plantas na região adotada no experimento;
- Ocorrência de fatores que influenciam direta ou indiretamente no comportamento do

fenômeno analisado e que não foram considerados no modelo, como por exemplo, os componentes químicos da água. Um fator externo que, aparentemente, modificou o comportamento esperado para o fenômeno foi a direção dos ventos: apenas nos últimos meses do ano e às vezes também nos primeiros meses (no verão) percebeu-se que a dispersão das plantas na região considerada no experimento seguiu um padrão, agrupando-se na direção noroeste.

Como recomendação para trabalhos futuros que tratem do assunto em questão, pode-se sugerir:

- Procurar utilizar co-variáveis, ou seja, incorporar ao modelo variáveis correlacionadas com a presença de plantas aquáticas invasoras, como por exemplo, dados meteorológicos, dados de qualidade da água do reservatório, entre inúmeros outros;
- Utilizar o método proposto neste trabalho para investigar outros fenômenos, que não estejam sujeitos a interferências antrópicas muito drásticas;
- Por fim, utilizar abordagens espaço-temporais, como por exemplo, a geoestatística aliada à abordagem bayesiana.

## Referências

CAMARGO, E. C. G. **Desenvolvimento, implementação e teste de procedimentos geoestatísticos (krigagem) no Sistema de Processamento de Informações Georreferenciadas (SPRING)**. São José dos Campos, 1997. Disponível em: <http://www.dpi.inpe.br/teses/eduardo>. Acesso em: 20 set. 2003.

CRUZ, N. C. **Uma análise da infestação por plantas aquáticas utilizando imagens multiescala e redes neurais artificiais**. 2005. 101 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas). Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente.

DE IACO, S.; MYERS, D. E.; POSA, D. Space-time variograms and a functional form for total air pollution measures. **Computational Statistics and Data Analysis**, 41, p.311-328, 2002. Disponível em: <<http://www.donatoposa.it/sandra.htm>>. Acesso em: 25 set. 2003.

GALO, M.L.B.T.; NOVO, E. M.L.M. Normalização radiométrica de imagens: um meio de integrar dados multitemporais de Sensoriamento Remoto para monitoramento ambiental. **Revista do Instituto Florestal**, São Paulo, v.1, n.12, p.67-75, 2000.

GALO, M. L. B. T.; VELINI, E. D.; TRINDADE, M. L. B.; SANTOS, S. C. A. Uso de Sensoriamento Remoto orbital no monitoramento da dispersão de macrófitas nos reservatórios do Complexo Tietê. **Planta Daninha**, Edição Especial de Plantas Aquáticas, v.20, p.7-20, 2002.

GNEITING, T.; GENTON, M. G.; GUTTORP, P. Geostatistical space-time models, stationarity, separability and full symmetry. **Technical report**, n. 475. Seattle: Department of Statistics, University of Washington, 2005. Disponível em: [www.stat.washington.edu/www/research/reports/2005/tr475.pdf](http://www.stat.washington.edu/www/research/reports/2005/tr475.pdf). Acesso em: 10 abr. 2005.

LEITE, M. A. **Análise do aporte, da taxa de sedimentação e da concentração de metais na água, plâncton e sedimento do Reservatório de Salto Grande, Americana-SP**. 2002. Tese (Doutorado em Ciências da Eng. Ambiental). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.

MINGOTI, S. A.; NEVES, O. F. A metodologia de geoestatística como alternativa na análise de séries temporais. **Revista Escola de Minas (REM)**, Ouro Preto, v.52, n.3, 182-187, 1999. Disponível em: [http://www.est.ufmg.br/prevgeo/artigo\\_1.pdf](http://www.est.ufmg.br/prevgeo/artigo_1.pdf). Acesso em: 08 fev. 2005.

NOVO, E. M. L. M.; BRAGA, C.Z.F.; TUNDISI, J. G. Use of TM/Landsat data to retrieve the optically active water constituents from an eutrophic tropical reservoir. **Proceedings of ISPRS Commission VII Symposium: Resource and Environmental Monitoring**, Rio de Janeiro, sept-26-30, 1994, INPE, Vol.30, Part 76, 1994, p.258-62.