

Inferência de macrófitas aquáticas submersas por meio da Geoestatística

Alex Garcez Utsumi
Luiz Henrique da Silva Rotta
Maria de Lourdes Bueno Trindade Galo
Vilma Mayumi Tachibana

Universidade Estadual Paulista - UNESP
Faculdade de Ciências e Tecnologia – FCT
Caixa Postal 305 – 19060-900 – Presidente Prudente - SP, Brasil
{alex_utsumi, luizhrotta}@yahoo.com.br
{mlourdes, vilma}@fct.unesp.br

Abstract. Macrophytes are important in the dynamic of natural water bodies, but the uncontrolled growth of aquatic vegetation may compromise the multiple use of reservoirs. Submerged macrophytes are among the most serious problems encountered in this environment due to the difficulty of monitoring their growth and even to map areas of infestation. Typically, identifying areas of infestation is made with on-site verification, so it is important to seek methods that can estimate values in places not sampled. The aim of this research is to use geostatistics to estimate and map submerged aquatic macrophytes in freshwater. To achieve this goal it was used values of height of aquatic macrophytes and water depth obtained by an echosounder Biosonics DT-X. For this purpose it was used Ordinary Kriging to interpolate this variables in the whole area. It was selected a study site located on Uberaba River, MG, where it was detected presence of submersed macrophytes. Interpolation of the height of macrophytes was made taking into account the isotropy and anisotropy of the phenomenon. The interpolated surfaces were used to generate thematic maps representing ranges of plant height and depth. These maps were compared and the results showed that submerged macrophytes which height greater than 60 cm are concentrated in a depth less than 4 meters.

Palavras-chave: Submerged aquatic macrophytes, geostatistic, Ordinary Kriging, Macrófitas aquáticas submersas, geoestatística, Krigagem ordinária.

1.INTRODUÇÃO

O crescimento descontrolado de plantas aquáticas em reservatórios de hidrelétricas pode causar prejuízos ao uso múltiplo desses ecossistemas. As macrófitas aquáticas submersas estão entre os mais sérios problemas encontrados nesse tipo de ambiente, pois não podem ser controladas com o uso de herbicidas e dificilmente são eliminadas via extração mecânica. Um dos problemas decorrentes da proliferação indiscriminada de macrófitas aquáticas é a perda de eficiência na produção de energia elétrica ocasionando, muitas vezes, uma interrupção no seu fornecimento devido ao entupimento das grades de proteção de turbinas nas usinas geradoras de energia.

De acordo com Tundisi e Tundisi (2008), fatores abióticos como disponibilidade de radiação e alcalinidade, variáveis hidráulicas e biológicas podem interferir na sucessão e distribuição espacial de várias espécies de plantas que surgem nos ambientes aquáticos. Desse modo, o manejo apropriado dos reservatórios ou mesmo a utilização de métodos de controle e remoção das plantas, pressupõe a necessidade de detectar e monitorar áreas infestadas por macrófitas aquáticas.

Por outro lado, a utilização de medidas de controle no caso de plantas aquáticas submersas torna-se complexa pelo fato destas não emergirem na superfície do espelho d'água, dificultando, assim, tanto o manejo dessas plantas invasoras quanto a detecção das áreas infestadas a partir, por exemplo, de imagens de Sensoriamento Remoto. Além disso, a verificação "in loco" das áreas infestadas são adequadas para ecossistemas aquáticos de tamanho reduzido, porém a sua aplicação em grandes ambientes ainda permanece um desafio.

Isto se deve ao alto custo associado à realização de uma amostragem densa em toda a área do reservatório, quando se utiliza métodos tradicionais.

A maneira convencional de se representar amostras pontuais em uma superfície é por meio da interpolação. Camargo, Fucks e Câmara (2002) sugerem que, para gerar superfícies que sejam mais realistas, é necessário modelar sua variabilidade espacial. Nesse sentido, diversos métodos podem ser empregados para realizar a inferência de valores em locais não observados com base em valores amostrados. Dentre eles, a geoestatística destaca-se pela possibilidade de realizar estimativas baseadas na correlação entre os valores de um fenômeno em diferentes posições e procura representar o grau de dependência espacial entre os valores distribuídos no espaço para realizar a reconstrução de uma superfície.

Webster e Oliver (2007) afirmam que a maioria das variáveis ambientais é contínua, entretanto a amostragem em grande escala torna-se inviável em muitos estudos. Assim, a melhor solução é estimar, ou prever esses valores distribuídos espacialmente. Nesse sentido, a geoestatística nos permite realizar este tipo de inferência sem tendência e com erro mínimo.

A geoestatística é um ramo da estatística que trata de problemas referentes às variáveis regionalizadas, as quais possuem características tanto de variáveis verdadeiramente casuais quanto totalmente determinísticas. Desse modo, a variável possui uma tendência de apresentar valores muito similares em dois pontos vizinhos e à medida que os pontos começam a se distanciar, os valores estimados tornam-se cada vez mais distintos (LANDIM, 1998).

As ferramentas fundamentais da geoestatística no estudo do comportamento das variáveis regionalizadas são o semivariograma e a interpolação por krigagem (LANDIM, 1998). O semivariograma mostra a medida do grau de dependência espacial entre os elementos da amostra de uma variável. Para o estudo dessas variáveis regionalizadas é importante conhecer os principais parâmetros do semivariograma: patamar, efeito pepita, contribuição e alcance.

Camargo (2000) afirma que quando se aplica modelos inferenciais para realizar a interpolação são obtidos melhores resultados. Um desses modelos é a Krigagem, o qual se baseia na teoria das variáveis regionalizadas. Essa teoria considera que as diferenças entre os valores assumidos pelas variáveis dependem de uma componente estrutural, associada a uma tendência, uma componente aleatória, espacialmente correlacionada e um ruído residual.

A Krigagem é um nome genérico adotado pelos geoestatísticos para uma família de algoritmos generalizados de regressão dos mínimos quadrados, em reconhecimento ao trabalho pioneiro de Daniel Krige, em 1951 (GOOVAERTS, 1997). Todos os estimadores de Krigagem são variações da regressão linear básica, tendo como objetivo em comum minimizar a estimativa do erro.

Considerando então, que a geoestatística é adequada para inferir variáveis espacialmente amostradas, que se caracterizam por apresentar variação de um local para outro com algum grau de continuidade em uma área geográfica específica e, diante da dificuldade de se mapear a ocorrência de plantas aquáticas submersas a partir da sua detecção em imagens ópticas de Sensoriamento Remoto, pretende-se utilizar essa ferramenta de inferência para estimar a distribuição espacial da vegetação submersa a partir dos dados pontuais adquiridos por um instrumento sonar. Especificamente, o objetivo deste trabalho é utilizar a geoestatística para inferir a localização de macrófitas submersas e correlacionar esta informação com dados de profundidade e altura de plantas medidos por meio de um equipamento ecobatimétrico.

2. MATERIAL

Os dados ecobatimétricos utilizados neste estudo foram obtidos em um trecho do rio Uberaba, afluente do rio Grande, em área de influência do Reservatório de Porto Colômbia, localizado entre os municípios de Planura (MG) e Guaíra (SP) (Figura 1). Essa região foi

escolhida por ser uma área com presença de macrófitas submersas *Egeria spp.*, e se caracteriza por ser de fácil navegação e sem ocorrência de galhadas.

Para a aquisição dos dados de profundidade e altura das plantas aquáticas foi utilizado o ecobatímetro científico digital BioSonics DT-X, integrado com sistema de posicionamento GPS. O ecobatímetro DTX é um sensor ativo que emite sinais em duas frequências do espectro sonoro. Enquanto o sinal de maior frequência interage com alvos de menor tamanho, como peixes e plantas submersas, o de menor frequência é refletido somente pelo fundo do corpo d'água (BIOSONICS INC., 2010). Assim, é possível obter dados tanto do relevo submerso como das plantas presentes.

O levantamento dos dados "in situ" ocorreu no dia 27 de setembro de 2009 e a amostragem foi realizada em forma de transectos de uma margem à outra do rio.

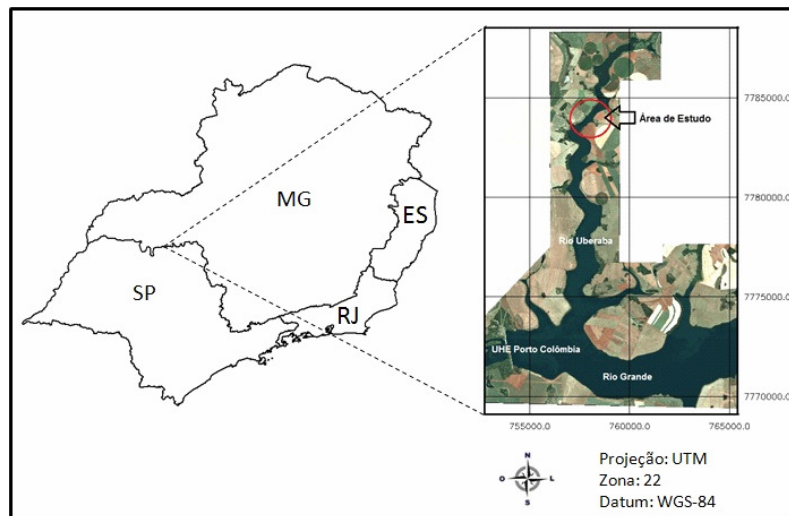


Figura 1-Área de estudo
Fonte: Rotta et al. (2010)

Os dados levantados foram adquiridos e processados em softwares específicos do próprio sistema sonar (*Visual Acquisition*, *Visual Analyser* e *EcoSAV*). Os arquivos processados nesses aplicativos geraram tabelas contendo coordenadas, tempo, profundidade e, altura de macrófitas submersas.

Além disso, foram utilizados os seguintes softwares: o *Variowin*, para modelar os semivariogramas; o *Spring 5.1.5* para realizar a inferência por geoestatística e o *Idrisi Andes* para análise da correlação das superfícies geradas.

3. MÉTODO

Para realizar as inferências e análises previstas a partir dos dados ecobatimétricos levantados "in situ", foram desenvolvidas as seguintes etapas: tratamento prévio dos dados amostrais, registrados nos arquivos processados nos softwares do instrumento sonar; análise do semivariograma; interpolação dos dados por Krigagem e interpretação dos resultados. Alguns desses procedimentos resultaram de processamentos intermediários, necessários para a definição de parâmetros e modelos adequados ao problema proposto.

No que se refere aos dados ecobatimétricos, processados em softwares específicos do sistema, os arquivos gerados foram configurados na forma de tabelas contendo as coordenadas, hora da medição, profundidade do corpo d'água e altura de macrófitas submersas. O grande número de elementos amostrais obtido a partir dos transectos foi

reduzido de modo a se excluir da amostra os dados com coordenadas iguais ou muito próximas, eliminando sistematicamente pontos ao longo dos transectos, a fim de otimizar o processo da Krigagem. Utilizando-se o software *Variowin* foram modelados os semivariogramas da variável altura das plantas submersas para, posteriormente, realizar o processo de krigagem no *Spring*. A variável profundidade do rio foi modelada diretamente no *Spring*.

Inicialmente, modelou-se os dados de altura de macrófitas considerando o comportamento do fenômeno como isotrópico, gerando-se o semivariograma omnidirecional. A isotropia em fenômenos naturais não é muito freqüente, porém a análise do semivariograma é feita primeiramente nessa situação para tentar detectar uma estrutura de correlação espacial (CAMARGO, 2000). Assim, pôde-se usar os dados desse modelo para posteriormente realizar a interpolação por Krigagem ordinária.

Em seguida, foi realizada a interpolação levando em consideração a anisotropia do fenômeno e, conseqüentemente, sua variabilidade espacial. Nesse caso, observou-se a superfície variográfica, bem como os semivariogramas direcionais com abertura angular de 45° , de modo a analisar a variação do fenômeno em todas as direções.

Os resultados obtidos nas duas abordagens (isotrópica e anisotrópica) foram fatiados em intervalos regulares e, a partir de uma comparação pixel a pixel, foi selecionada aquela mais eficiente para a interpolação de altura de macrófitas aquáticas.

Finalmente, a superfície interpolada por Krigagem para a variável profundidade do corpo d'água foi fatiada, também em intervalos regulares, gerando o mapa temático dessa variável, o qual foi relacionado com as classes representativas da altura de macrófitas submersas por meio de tabulação cruzada (ferramenta disponível no *Idrisi*), de modo a analisar a presença de macrófitas submersas em relação à profundidade do corpo d'água.

4.RESULTADOS

O resultado da modelagem do semivariograma omnidirecional para a variável altura de macrófitas, considerando uma abertura de 90° , é mostrado na Figura 3. O modelo que melhor se ajustou a essa variável foi o esférico, com valor do efeito pepita de 0,031 e alcance de 172 m.

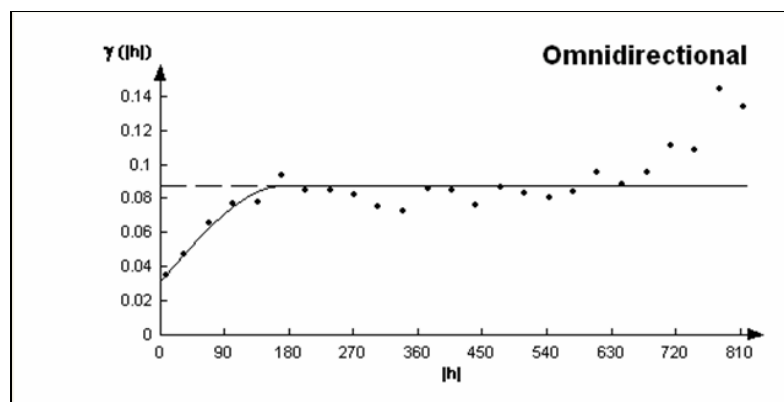


Figura 2- Modelo de semivariograma omnidirecional para altura de plantas

Para verificar a ocorrência de anisotropia analisou-se o comportamento da superfície variográfica e dos semivariogramas em quatro direções, com abertura angular de 45° , observando-se que os semivariogramas de menor e maior variabilidade foram em 135° e 0° respectivamente. Assim, para modelar a anisotropia do fenômeno, combinaram-se os modelos gerados nessas duas direções, cuja representação é mostrada na Figura 3. Para a direção de

135° utilizou-se o modelo esférico com alcance de 112 m, enquanto que para a direção de 0° utilizou-se o modelo exponencial com alcance de 240 m. O valor do efeito pepita para as duas direções foi de 0,026.

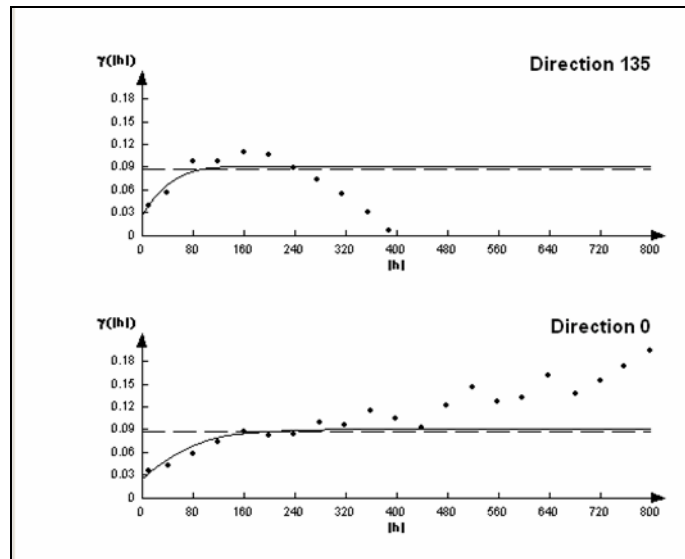


Figura 3-Modelagem da anisotropia para a variável altura de plantas

Os mapas temáticos de altura de macrófitas foram gerados a partir do fatiamento das superfícies interpoladas em 7 classes com intervalos regulares de 15 cm e comparados por meio de uma tabulação cruzada, que produziu um índice de concordância Kappa igual a 0,985. Com isso, os resultados foram considerados similares para as duas abordagens (isotrópica e anisotrópica), com base na alta similaridade entre os dois mapas temáticos. Portanto, adotou-se a abordagem mais simples, que considera o fenômeno natural como constante em todas as direções, e que resultou no mapa temático da distribuição da altura de macrófitas submersas mostrado na Figura 4.

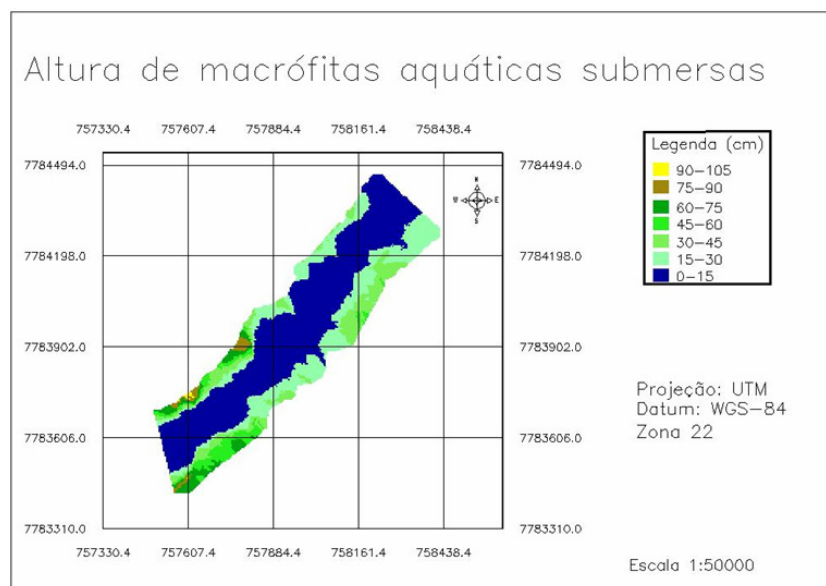


Figura 4- Mapeamento da altura de macrófitas submersas obtido por Krigagem Ordinária isotrópica

O resultado da interpolação por Krigagem dos dados de profundidade produziu um mapa temático com oito classes diferentes, a partir do fatiamento da profundidade em intervalos regulares de dois metros (Figura 5).

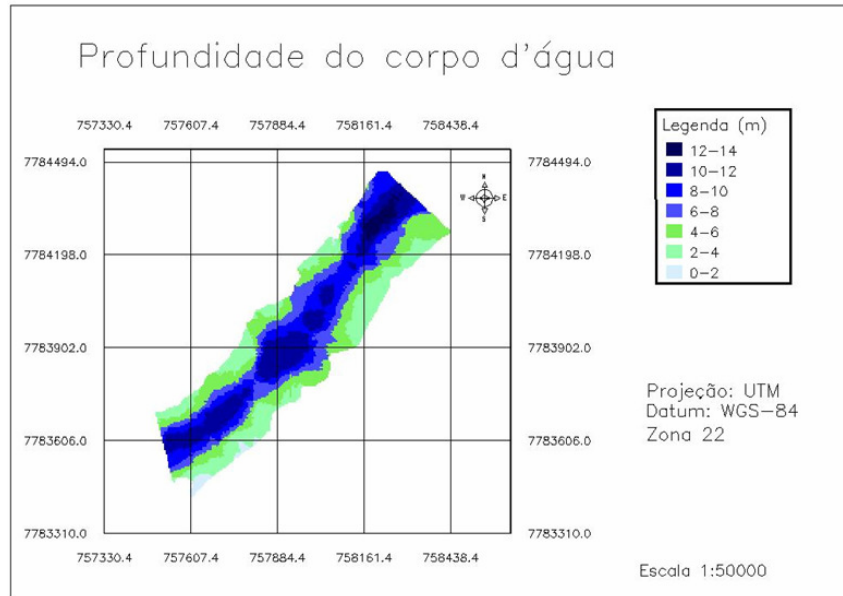


Figura 5-Mapeamento dos intervalos de profundidade do corpo d'água obtido por Krigagem ordinária isotrópica

Para verificar a que profundidade se concentra as macrófitas submersas de maior expressão (altura) e como se distribuem no corpo d'água, fez-se uma tabulação cruzada entre os mapas temáticos mostrados nas figuras 5 e 6. A partir dessa comparação entre os mapas temáticos, expressa na Tabela 1, pôde-se constatar que as macrófitas que apresentam altura superior a 60 cm se concentram em uma profundidade inferior a 4 m, enquanto que plantas submersas com altura inferior a 45 cm se concentram em profundidade superior a 2 metros. Percebe-se que nas profundidades superiores a 6 metros, a altura de plantas está na faixa 0 a 15 cm, apontando para uma pequena ocorrência de plantas aquáticas nas maiores profundidades, notadamente no curso principal do rio.

Tabela 1-Tabulação cruzada entre os mapas temáticos de profundidade e altura de macrófitas submersas

Altura de macrófitas (cm)	Profundidade (m)							Total
	0 a 2	2 a 4	4 a 6	6 a 8	8 a 10	10 a 12	12 a 14	
0-15	0	18	483	1447	1975	2012	236	6171
15-30	4	781	1430	372	94	19	0	2700
30-45	1	775	426	57	4	0	0	1263
45-60	41	412	91	0	0	0	0	544
60-75	111	210	26	0	0	0	0	347
75-90	1	105	25	0	0	0	0	131
90-105	0	17	3	0	0	0	0	20
Somatório	158	2318	2484	1876	2073	2031	236	11176

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O objetivo do estudo foi atingido uma vez que, a partir dos dados obtidos com o equipamento sonar, pôde-se inferir e espacializar a altura de macrófitas aquáticas submersas, bem como dados de profundidade, para toda a área de estudo.

Verificou-se que não houve diferença significativa quando se modelou a altura de macrófitas encarando como um fenômeno isotrópico ou anisotrópico. Os mapas temáticos resultantes das duas abordagens apresentaram alta similaridade, que pode ser comprovada por meio do índice concordância Kappa de 0,985.

A análise da tabulação cruzada entre os mapas temáticos das duas variáveis mostrou que as macrófitas aquáticas mais desenvolvidas se concentram em uma profundidade inferior a 4 m, enquanto que as plantas submersas que apresentam menor altura (0 a 15 cm) se concentram em profundidades superiores a 6 m.

O mapeamento temático das macrófitas correspondeu ao seu comportamento real esperado. Sabe-se que este tipo de espécie não se desenvolve em ambientes com alta profundidade, uma vez que a luz não atinge tais locais, tornando-se impossível a realização da fotossíntese.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento e Pesquisa (CNPq) pela concessão de bolsas de mestrado, aos alunos envolvidos na pesquisa e ao Programa de Pós-graduação em Ciências Cartográficas por viabilizar a realização deste trabalho.

REFERÊNCIAS

- BIOSONICS, Inc. Web Site. Disponível em: <<http://www.duke-energy.com.br/mab/bacia.asp>>. Acesso: 12/06/2010.
- CAMARGO, E. C. G. Geoestatística: fundamentos e aplicações. In: Geoprocessamento: teoria e aplicações. São José dos Campos: INPE, 2000. p. 12.1-12.25. Ed. Camara Neto, Gilberto et al. (INPE-8083-PRE/3898).
- CAMARGO, E. C. G.; FUCKS, S. D.; CÂMARA, G. Análise espacial de superfícies. In: FUKS, Suzana Druck; CARVALHO, Marília Sá; CÂMARA, Gilberto; MONTEIRO, Antonio Miguel Vieira (Ed.). Análise espacial de dados geográficos. São José dos Campos: INPE, 2002. p. 37. Disponível em: <<http://urlib.net/sid.inpe.br/sergio/2004/10.07.14.57>>. Acesso em: 29 set. 2010.
- GOOVAERTS, P. Geostatistics for natural resources evaluation. New York: Oxford University, 1997.
- LANDIM, P. M. B. Análise estatística de dados geológicos. São Paulo: Fundação Editora da UNESP, 1998.
- ROTTA, L. H. S.; FERREIRA, M. S.; IMAI, N. N.; TACHIBANA, V. M. Análise espacial de macrófitas submersas no reservatório de Porto Colômbia. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 2010, Recife. p. 001-006.
- TUNDISI, J. G.; TUNDISI, T. M. Limnologia. São Paulo: Oficina de textos, 2008.
- WEBSTER, R.; OLIVER, M. A. Geostatistics for environmental scientists. England: John Wiley & Sons, 2007.