

O Sistema de Informações Geográficas do Reservatório da UHE Barra Bonita

Evlyn de Moraes Novo

Fernanda Leite

INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
Caixa Postal 515, 12201 São José dos Campos, SP, Brasil
evlyn@ltd.inpe.br
fernanda@ltd.inpe.br

Abstract. This paper describes the way a Geographical Information System was organized for the storage and spatial modelling of the limnological data collected for the Barra Bonita Reservoir as part of the Remote Sensing of Aquatic System project carried out through the cooperation between the National Institute for Space Research and the Centre for Water Resources and Applied Ecology (CHREA) from the University of São Paulo. Examples of limnological data manipulation for modelling the reservoir trophic state are also presented.

Keywords: GIS, limnology, water trophic state.

1 Introdução

Os ecossistemas aquáticos continentais podem ser classificados em sistemas lênticos (lagos e reservatórios) e lóticos (rios). Estes sistemas podem ser caracterizados por sua morfometria (volume, área, profundidade, perímetro) e pelas propriedades físicas, químicas e biológicas da água. Estas, propriedades variam amplamente no tempo e no espaço, quer num dado sistema aquático, quer entre sistemas diferentes.

Em função do intenso dinamismo das propriedades da água num dado sistema aquático, as atividades para seu monitoramento se baseiam na aquisição e análise de grandes volumes de dados. Programas rotineiros de monitoramento de qualidade da água envolvem a medição de 10 a 15 variáveis da água, tais como: - a concentração de diversos nutrientes, espécies fitoplanctônicas, penetração de radiação solar, etc. A análise simultânea de tal volume de dados torna-se altamente complexa quando se amplia o número de locais de amostragem e a frequência de amostras ao longo da coluna d'água. Este quadro é um claro indicador de que o conhecimento sobre o funcionamento dos ecossistemas aquáticos pode se beneficiar amplamente se os dados dispersos em diferentes formatos e fontes forem organizados em Sistemas de Informações Geográficas.

Um Sistema de Informações Geográficas, ou simplesmente, SIG, é um sistema computacional que permite o gerenciamento de dados espaciais. A palavra "geográfica" significa que os dados armazenados no sistema encontram-se referenciados a um sistema de coordenadas geográficas (latitude e longitude). A palavra sistema implica em que um dado SIG comporta um conjunto de componentes que permite não apenas armazenar dados, mas sobretudo, manipular

especialmente tais dados de modo a produzir informações relevantes (Bonham-Carter, 1994).

O objetivo deste artigo é relatar a experiência de organização de um banco de dados limnológicos para o reservatório da UHE Barra Bonita no âmbito do projeto Sensoriamento Remoto de Sistemas Aquáticos e exemplificar o uso dos aplicativos disponíveis para gerar informações sobre as condições tróficas do reservatório de Barra Bonita. Maiores informações sobre o projeto podem ser obtidas em Novo e Braga (1991) e Novo et al. (1994).

2 Área Teste

O reservatório de Barra Bonita foi selecionado como área de estudo do projeto Sensoriamento Remoto de Sistema Aquáticos e programaram-se missões para a aquisição simultânea de dados radiométricos (ao nível orbital e de campo) e dados limnológicos.

O reservatório de Barra Bonita (Figura 1) encontra-se localizado na bacia hidrográfica do Rio Tietê e, as sub-bacias de drenagem que o alimentam pertencem às Unidades de Gerenciamento de Recursos Hídricos (UGRH) Tietê/Sorocaba, Tietê/Jacaré e Piracicaba, conforme proposta do Plano Estadual de Recursos Hídricos do Estado de São Paulo (São Paulo, 1990). As UGRHs Tietê/Sorocaba e Piracicaba se caracterizam pelo elevado grau de industrialização. A UGRH do Tietê/Jacaré encontra-se em vias de industrialização e nela está demarcada uma extensa Área de Proteção Ambiental (APA) a qual inclui grande parte dos afluentes da margem direita do reservatório. Ainda, de acordo com o Plano Estadual de Recursos Hídricos do Estado de São Paulo (São Paulo, 1990), o reservatório em estudo é alimentado por rios com níveis de qualidade de água bastante variáveis. Existem desde

"águas nobres", correspondentes aos rios que drenam a APA até "águas poluídas". Estas características tornam esta região altamente favorável ao teste das metodologias de integração e análise de dados limnológicos em sistemas de informações geográficas.

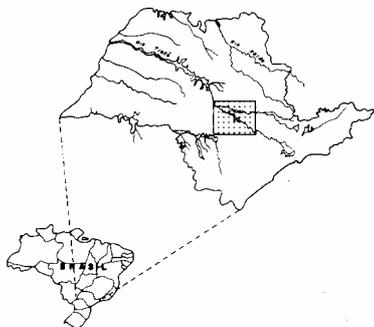


Figura 1 - Localização da Área de Estudo

Estudos realizados por Calijuri (1988) classificam o reservatório como um sistema polimítico, controlado pela precipitação, vento, vazão e tempo de residência. De acordo com estes estudos, a coluna d'água do reservatório tende a ser permanentemente desestratificada devido à ação do vento, apresentando elevadas taxas de oxigênio dissolvido em toda sua profundidade. De modo geral, o nitrogênio não é o fator limitante no reservatório sendo que a adição de fósforo é a principal causa de sua eutrofização.

Calijuri (1988) observou que, no Verão, o reservatório apresenta maior produção primária por área devido à elevada precipitação e consequente entrada de nutrientes por escoamento difuso. No Inverno os aumentos na produção primária se devem à mistura na coluna d'água pela ação do vento.

O tempo de residência hidráulica também foi identificado como um fator controlador da qualidade da água do reservatório. Nos períodos de pequeno tempo de residência hidráulica (Verão), dominam Flagelados e Diatomáceas, enquanto que nos períodos de elevado tempo de residência hidráulica dominam as Diatomáceas e Cianofíceas. As Cianofíceas (*Anabaena sp.* e *Microcysts aeruginosa*) ocorrem em geral na camada superior da coluna d'água do reservatório, enquanto que as Diatomáceas (*Melosira itálica* e *Melosira granulata*) dominam a camada inferior da coluna d'água. Devido ao processo de mistura, as algas apresentam concentração uniforme na coluna d'água (Calijuri, 1988).

3 Breve Descrição da Organização do SIG de Barra Bonita.

3.1 Compilação e armazenamento da base de dados espaciais de limnologia.

Os dados que integraram o SIG de Barra Bonita foram compilados a partir de três fontes básicas: cartas topográficas na escala 1:50 000, que foram utilizadas para gerar o limite topográfico do reservatório, perfis batimétricos que permitiram gerar informações sobre a profundidade do reservatório, e medidas de propriedades limnológicas obtidas no campo em diversas estações amostrais, organizadas em tabelas, tais que, cada estação amostral encontra-se associada a uma dada latitude e longitude. A entrada do limite topográfico do reservatório foi realizada a partir da digitalização das cartas topográficas. Os dados batimétricos e os referentes às variáveis limnológicas foram introduzidos no sistema como modelos numéricos do terreno (MNT).

Os dados limnológicos disponíveis para o estudo consistem-se de amostras obtidas em 30 locais do reservatório de Barra Bonita, equidistantes no terreno em aproximadamente 2 km, e para as quais foram feitas determinações em laboratório de uma ampla variedade de propriedades: nitrato, nitrito, nitrogênio amoniacal, nitrogênio total, fósforo total, ortofosfato, total de sólidos em suspensão, total de matéria inorgânica em suspensão; total de matéria orgânica em suspensão, clorofila total, razão nitrogênio total/ fósforo total. Estes dados foram obtidos durante 18 missões de campo ao reservatório de Barra Bonita, que se realizaram entre 01 de Maio de 1989 e 10 de Outubro de 1991. O Sistema de Informações Geográficas foi organizado de modo a permitir que novos dados limnológicos fossem adicionados a esta base de informações, bem como dados referentes às características da região adjacente ao reservatório. O processo de geocodificação e análise das variáveis limnológicas foi realizado com o auxílio do sistema SGI (INPE). O SGI é um banco de dados geográficos que permite armazenar, combinar, analisar e recuperar informações espacialmente codificadas. Para uma descrição do sistema SGI, consultar o Manual do Usuário (ENGESPAÇO, 1988).

O processo de entrada dos dados limnológicos no sistema de informações se encontra descrito em Novo e Braga (1991). As datas de aquisição dos dados e as variáveis foram codificadas com números. O tipo de plano armazenado foi codificado com letras. Assim sendo, para cada data existe um "mega-arquivo" que contém os arquivos referentes aos planos de informações (PIs) originais e aos PIs deles derivados. A tabela 1 exemplifica o processo de geocodificação para um determinado plano de informação (PI).

O plano R301, por exemplo, representa os dados brutos ("raw data") com os valores das variáveis limnológicas para cada estação. O primeiro algarismo representa a posição dos dados na série temporal (no caso específico, 3ª coleta de dados limnológicos), os dois últimos algarismos indicam a variável limnológica codificada (no exemplo, variável 01).

Tabela 1 - Exemplo de Codificação de Planos de Informações Limnológicas

PROJETO	PLANO DE INFORMAÇÃO	ARQUIVOS
	R301	BBE.PRJ BBE.DIR BBE_R301.DI BBE_R301.GRD BBE_R301.PT BBE_R301.PTA BBE_R301.PTO BBE_R301.TB BBE_R301.I
	F301	BBE.PRJ BBE.DIR BBE_F301.DI BBE_F301.TB BBE_F301.I
BBE	B301	BBE.PRJ BBE.DIR BBE_B301.DI BBE_B301.LI1 BBE_B301.LI2 BBE_B301.PO1 BBE_B301.PO2 BBE_B301.TB BBE_B301.CEN BBE_B301.I
	C301	BBE.PRJ BBE.DIR BBE_C301.CAT BBE_C301.LEG BBE_C301.S

As características do Plano R301 encontram-se descritas nos arquivos que definem sua relação com o Projeto Ativo (BBE.PRJ, BBE.DIR). Esses arquivos descrevem as características do projeto tais como, suas coordenadas (UTM), a unidade de medida (metro), o tipo de projeção cartográfica dos dados, o datum de referência e os parâmetros descritivos dos planos de informação que integram o projeto (nome do plano, categoria, escala).

Os valores assumidos pela variável limnológica 01 na data 3 (R301) em cada estação de coleta, e suas

respectivas coordenadas UTM, encontram-se codificados nos arquivos BBE_R301.PT. A partir deste arquivo original, os valores pontuais de cada estação amostral podem ser extrapolados para todo o reservatório através de métodos de interpolação. O interpolador selecionado, bem como as razões técnicas para sua escolha, encontram-se descritos em Novo e Braga, (1991). No processo de interpolação são criados os arquivos PTA (que abrigam uma árvore com a hierarquia dos pontos a serem interpolados), PTO (que contém os pontos organizados) e GRD (que contém a grade de pontos interpolados).

A partir do arquivo GRD pode-se transformar o PI em uma imagem com a distribuição espacial dos valores assumidos pela variável limnológica numa dada área. O processo de geração de imagem se faz a partir do refinamento da grade de pontos interpolados. Este processo dá origem aos arquivos BBE_R301.I, .TB e .DI, onde I representa o arquivo que contém a imagem, TB contém os valores assumidos pelos "pixels" da imagem (no caso 256 níveis digitais) e DI contém o descritor da imagem.

Os planos *.I podem então ser tratados como imagens convencionais e submetidos a classificação através de um processo de fatiamento, tal que cada nível digital corresponda à grandeza da variável mapeada.

Para que o resultado da classificação se transforme numa carta, os planos B.* devem ser convertidos para o formato vetorial (ENGESPAÇO, 1988) dando origem aos arquivos LI1, LI2 (arquivo de linhas), PO1, PO2 (arquivo de polígonos), e CEN (arquivo de centróides). Com esta transformação pode-se gerar então os planos C.* que são as cartas temáticas prontas para serem plotadas. Associados ao planos C.* encontram-se os arquivos CAT (carta), LEG (legenda) e S (símbolos).

3.2 Processamento dos dados limnológicos

O segundo passo para a organização do banco de dados espaciais é processar os dados básicos para deles extrair evidências de interesse limnológico. No caso específico do reservatório de Barra Bonita, uma das grandes questões enfrentadas para o seu manejo é a questão da Eutrofização. O processo de eutrofização resulta do aumento da concentração de nutrientes na água, sendo que suas consequências são diversas. Em função do nível trófico da água, os diferentes sistemas aquáticos podem ser classificados em oligotróficos, mesotróficos e eutróficos.

A OECD ("Organization for Economic Cooperation and Development") (OECD, 1982) propôs alguns valores limites de propriedades da água que permitem a classificação do sistema aquático em uma das três categorias tróficas. Estes valores foram

utilizados para classificar as águas do reservatório de Barra Bonita em Oligotróficas, Mesotróficas e Eutrólicas em função da concentração de Fósforo Total (Ptot), Nitrogênio Total (Ntot) e Clorofila Total (Clot). Tendo em vista as observações de Esteves (1988), segundo as quais, um única variável limnológica não é suficiente para definir o estado trófico do sistema, foram também utilizadas regras de manipulação dos planos resultantes da classificação trófica para gerar novas classificações de estado trófico resultantes do cruzamento de duas e três das variáveis limnológicas. Estes limites podem ser observados na tabela 2.

Tabela 2 - Classificação do nível trófico de sistemas aquáticos a partir de diferentes parâmetros de qualidade de água. Fonte: Adaptado da OECD, 1982.

Variável	Parâmetro	Oligotrófic	Mesotrófic	Eutrófic
Ptot	Média	8.0	26.7	84.0
Ntot	Média	661.0	753.0	1674.0
Clot	Média	1.7	4.7	14.3

4 Resultados

Para exemplificar a aplicação do SIG de Barra Bonita na modelagem do estado trófico do reservatório foram selecionados dados limnológicos referentes ao mês de Agosto de 1990 que representam condições típicas de inverno. A tabela 3 apresenta os valores médios e o desvio padrão das variáveis limnológicas comumente utilizadas para a determinação do estado trófico de um sistema aquático, determinadas a partir de 30 amostras distribuídas pelo reservatório de Barra Bonita. Pela análise da tabela, observa-se que, em termos médios, o reservatório poderia ser classificado como Mesotrófico em termos da concentração de Fósforo Total, Eutrófico em termos da concentração média de Nitrogênio Total e Mesotrófico em termos da Concentração de Clorofila Total. Um exame mais detalhado da tabela, entretanto, indica uma ampla dispersão dos dados em torno da média. A questão importante, sob o ponto de vista de manejo, é a de identificar no reservatório: a) que regiões enquadram-se nas diferentes categorias tróficas?; b) que variáveis limnológicas apresentam-se como indicadoras do nível trófico?; e c) que regiões do reservatório encontram-se simultaneamente classificadas como tróficas quando mais de uma variável é utilizada no processo de classificação?

Tabela 3 - Média e Desvio Padrão das variáveis limnológicas utilizadas para determinar o nível trófico do reservatório de Barra Bonita.

DATA	PTOT	ug/l	NTOT	ug/l	CLTOT	ug/l
	AVG	STD	AVG	STD	AVG	STD
08/08/90	43.79	24.71	2885.58	2018.68	9.40	14.99

A figura 2 representa a distribuição espacial das classes tróficas existentes no reservatório de Barra Bonita em Agosto de 1990. Pode-se observar que praticamente todo o reservatório encontra-se classificado como Mesotrófico, mas que há uma região próxima ao encontro das águas do rio Tietê e Piracicaba que se classifica como Eutrófica. O isolamento desta ilha eutrófica dentro do reservatório pode ser importante para identificar as funções de força que estejam atuando neste ponto do reservatório de modo a serem tomadas medidas preventivas.

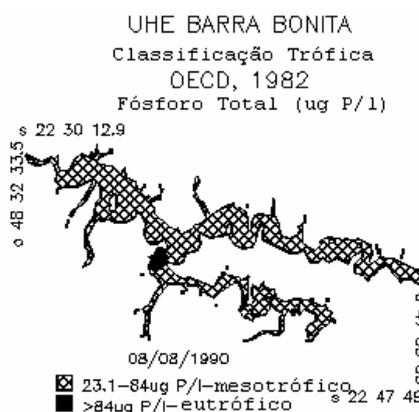


Figura 2 - Classificação do nível trófico do reservatório de Barra Bonita em função da concentração de Fósforo Total na água.

A figura 3 apresenta a classificação trófica resultante da utilização da concentração de Nitrogênio Total como indicador de nível trófico. Pode-se observar neste caso, que em termos da disponibilidade de Nitrogênio Total, o reservatório apresenta-se espacialmente heterogêneo: todo o braço do Rio Tietê e corpo central do reservatório se apresenta Eutrófico, o braço do Piracicaba se apresenta Mesotrófico, e um dos pequenos braços drenando uma região de proteção ambiental apresenta-se Oligotrófico. Pela análise dos resultados desta classificação, fica claro que as medidas de controle da eutrofização do reservatório devem ser centradas no rio Tietê.

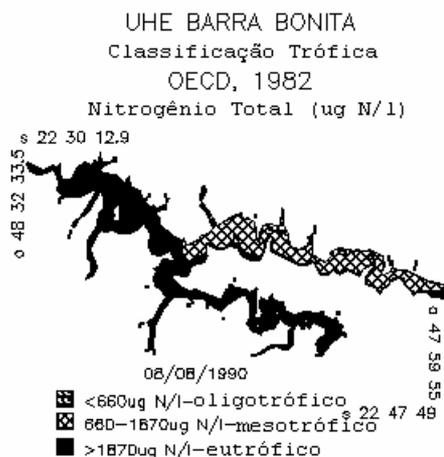


Figura 3 - Classificação do nível trófico do reservatório de Barra Bonita em função da concentração de Nitrogênio Total na água.

A figura 4 representa o resultado da classificação do reservatório em termos da concentração de Clorofila Total na água. A distribuição espacial das classes trófica é bastante distinta daquelas propiciadas pelas variáveis anteriormente analisadas, mas ainda assim indica o braço do Tietê e o corpo do reservatório junto à barragem como áreas críticas.

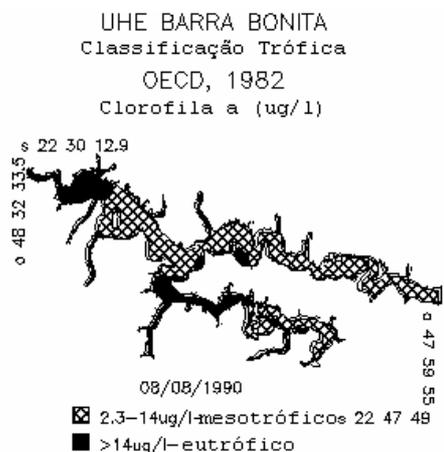


Figura 4 - Classificação do nível trófico do reservatório de Barra Bonita em função da concentração de Clorofila Total na água.

Tendo em vista os diferentes resultados de classificação do nível trófico obtidos a partir das três diferentes variáveis, pode-se desejar identificar no reservatório as regiões classificadas dentro das mesmas categorias quando os três indicadores são considerados simultaneamente. A figura 5 apresenta o resultado da classificação trófica do reservatório quando as três variáveis são utilizadas simultaneamente. Pela análise da figura, observa-se que a região próxima ao encontro

dos rios Piracicaba e Tietê é crítica em termos das três variáveis: Fósforo, Nitrogênio e Clorofila. Esta região recebe um afluente que drena a cidade de Botucatu, o que pode sugerir que esta região é prioritária para o controle de poluição. O comportamento do rio Piracicaba também parece bastante previsível, podendo ser considerado mesotrófico, independentemente da variável analisada.

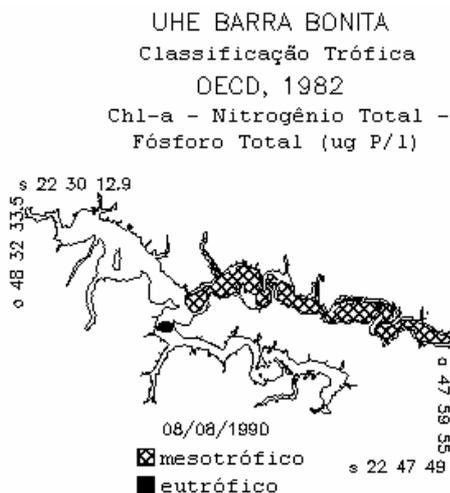


Figura 5 - Classificação do nível trófico do reservatório de Barra Bonita em função da concentração de Fósforo Total, Nitrogênio Total e Clorofila Total na água.

Pode-se verificar que o uso de Clorofila Total como indicador de estado trófico permite identificar as regiões mais críticas, visto que esta variável responde de modo global à disponibilidade de fósforo e nitrogênio. Isto demonstra o potencial de sensoriamento remoto para o monitoramento de reservatórios visto que a clorofila é um componente óticamente ativo, passível de ser detectado.

5 Conclusões

Os resultados aqui apresentados indicam o grande potencial que os SIGs tem como ferramentas para o manejo de sistemas aquáticos. O banco de dados limnológicos de Barra Bonita conta atualmente com um acervo de 325 planos de informações originais que podem ser manipulados das mais diferentes maneiras, de modo a se extrair informações úteis no manejo do reservatório. Este acervo de dados encontra-se à disposição da comunidade que tenha interesse em ampliá-lo e usá-lo para diversas finalidades.

6 Referências

Bonhanm-Carter, G.F. **Geographic Information Systems for Geoscientists**. Modeling with GIS. Ottawa, Pergamon, 1994.

Calijuri, M.C. **Respostas fisioecológicas da comunidade fitoplantônica e fatores ecológicos em ecossistemas com diferentes estágios de eutrofização.** (Tese de Doutorado em Hidráulica e Saneamento) - Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, dezembro de 1988.

Engespaço. **Sistema de Informações Geográficas: Manual do Usuário.** São José dos Campos, 1988.

Esteves, F.A. **Fundamentos de limnologia.** Rio de Janeiro, Interciência/FINEP, 1988.

Organization for Economic Cooperation and Development **Eutrophication of Waters. Monitoring, Assessment and Control.** Final Report. OECD Cooperative Programme on Monitoring of Inland Waters (Eutrophication Control). Environment Directorate, OECD, Paris, 1982.

São Paulo. Conselho Estadual de Recursos Hídricos. **Plano Estadual de Recursos Hídricos: primeiro plano do Estado de São Paulo - Síntese.** São Paulo, DAEE, 1990, 120 p.

Novo, E.M.L.M.; Braga, C.Z.F. **Relatório do Projeto "Sensoriamento Remoto de Sistemas Aquáticos".** São José dos Campos, INPE, 1991 (INPE-5271-PRP/159).

Novo, E.M.L.M.; Lobo, F.A.L.R.; Calijuri, M.A.; Tundisi, J.G. Predictive modelling of trophic reservoir using geographical information systems. IGARSS'94 Digest, **Proceedings** of the IGARSS'94, Pasadena, CA, USA, 8-12, August, 1994.