

# BATIMETRIA E ESTUDO DE PARÂMETROS MORFOMÉTRICOS DO RESERVATÓRIO DA FLORESTA ESTADUAL “EDMUNDO NAVARRO DE ANDRADE” (FEENA) RIO CLARO/SP

Cristiano CIGAGNA<sup>1</sup>, Daniel Marcos BONOTTO<sup>1</sup>, José Ricardo STURARO<sup>2</sup>

(1) Departamento de Petrologia e Metalogenia, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, UNESP/Rio Claro. Avenida 24-A, 1515 – Bela Vista. CEP 13506 – 900. Rio Claro – São Paulo. Endereços eletrônicos: cigagna@rc.unesp.br; dbonotto@rc.unesp.br.

(2) Departamento de Geologia Aplicada, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, UNESP/Rio Claro. Avenida 24-A, 1515 – Bela Vista. CEP 13506 – 900. Rio Claro – São Paulo. Endereço eletrônico: sturaro@rc.unesp.br.

- Introdução
- Caracterização da área de estudo
- Materiais e métodos
  - Aquisição dos dados
  - Variabilidade dos dados
  - Krigagem ordinária
  - Confecção da carta batimétrica
- Resultados e discussão
  - Carta batimétrica
  - Parâmetros morfométricos
    - Área
    - Volume
    - Profundidade máxima
    - Profundidade média
    - Profundidade relativa
    - Perímetro e desenvolvimento do perímetro
    - Desenvolvimento do volume
    - Comprimento máximo e largura máxima
  - Curvas hipsográficas
  - Vazão e tempo de retenção hidráulica
- Conclusões
- Referências bibliográficas

**RESUMO** – Este trabalho descreve o levantamento batimétrico e caracterização dos principais parâmetros morfométricos do reservatório da Floresta Estadual “Edmundo Navarro de Andrade”. Foram medidos 271 valores de profundidade do reservatório ao longo de 10 transectos. Estes dados foram utilizados na estimativa, por meio da krigagem ordinária, dos mapas batimétricos que serviram como base para o cálculo dos principais parâmetros morfométricos do reservatório. Os resultados apresentam o quadro de assoreamento em que o reservatório se encontra, além da possível influência da morfometria em seu atual elevado grau de trofia. O conhecimento e a adequada interpretação do conjunto de dados apresentados são de grande valia para o planejamento de ações que busquem a recuperação da qualidade ecológica do reservatório. Neste contexto, a Geoestatística foi a principal ferramenta utilizada para um ajuste de superfícies segundo técnicas de estimativas robustas.

**Palavras-chave:** Geoestatística, Krigagem, Morfometria, Limnologia.

**ABSTRACT** - This study describes the bathymetric survey and characterization of the main morphometric parameters of the reservoir located in the State Forest "Edmundo Navarro de Andrade." 271 reservoir depth values were measured along 10 transects. These data were used to estimate, by ordinary kriging, the bathymetric maps that were the basis for the calculation of the main morphometric parameters of the reservoir. The results present the actual condition of siltation in the reservoir, and the possible influence of morphometry in your current high trophic level. The knowledge and the proper interpretation of the overall data submitted are of great value for planning actions that seek recovery of the ecological quality of the reservoir. In this context, geostatistics has been the main tool used for a surface adjustment according to techniques of robust estimate.

**Keywords:** Geostatistics, Kriging, Morphometry, Limnology.

## INTRODUÇÃO

As características físicas de um reservatório constituem elementos importantes para a avaliação do seu comportamento hidrológico. O seu estudo, por meio de parâmetros morfométricos, auxilia no entendimento da estrutura e funcionamento de corpos d'água, o

que permite a associação desses atributos com a qualidade da água, particularmente ao seu grau de trofia.

A origem de um reservatório estabelece algumas condições morfológicas e morfométricas básicas. Estas, evidentemente, alteram-se com o tempo, dependendo de uma série de fatores e, principalmente, da atividade antrópica e dos próprios eventos que ocorrem na bacia hidrográfica que afetam, em último caso, o sistema lacustre.

A morfologia de reservatórios significa o estudo de sua forma enquanto que a morfometria trata da quantificação dessas formas e elementos (Tundisi & Matsumura-Tundisi, 2008). As características morfológicas e morfométricas têm efeitos relevantes sobre quase todas as variáveis físicas, químicas e biológicas de lagos e reservatórios (Wetzel, 2001). Dentre as principais variáveis que possuem relação direta com a morfometria podem ser destacadas: o balanço de nutrientes, a produtividade biológica, a estabilidade térmica da coluna d'água e os processos de circulação e dispersão de organismos na massa d'água (Panosso et al., 1995).

A caracterização de parâmetros morfométricos de lagos e reservatórios, é de suma importância para estudos que tenham como objetivos preservar e recuperar a qualidade ecológica, registrar a evolução de assoreamento e controlar processos de eutrofização. Além disso, a análise dos dados morfométricos possibilita a avaliação da capacidade de assimilação de impactos decorrentes da entrada de efluentes, das taxas de acumulação e dos padrões de dispersão de poluentes (Fantin-Cruz et al., 2008).

Independente da finalidade, a construção de reservatórios acarreta a interrupção do transporte natural de sedimentos ao longo do curso do rio, fenômeno responsável pelo assoreamento da represa. No caso de reservatórios urbanos, o adensamento industrial e populacional às margens do corpo d'água, ou junto à sua bacia de drenagem, é mais um fator responsável pelo aporte de material sólido no reservatório, via escoamento superficial.

O lago do Horto, como popularmente ficou conhecido, é um reservatório localizado na

parte central da Floresta Estadual "Edmundo Navarro de Andrade" (FEENA), uma Unidade de Conservação, pertencente ao grupo das Unidades de Uso Sustentável prevista na Lei Federal n.º 9.985/2000 sob a administração do Instituto Florestal, órgão da Secretaria do Estado de Meio Ambiente de São Paulo-SP.

O reservatório da FEENA é um corpo d'água de significativo patrimônio histórico-cultural e enriquecimento paisagístico local, que diariamente recebe visitantes da cidade de Rio Claro e região para a prática de esportes e lazer. Contudo, este corpo d'água ainda é um ambiente pouco pesquisado e, a escassez de registros referentes à sua qualidade ecológica, dificulta a avaliação do verdadeiro grau de deterioração em o ecossistema se encontra, embora seja reconhecido que o processo de degradação tenha-se intensificado nas últimas décadas (Galvão & Raduan, 1982); (Zevallos, 1986); (Cunha, 1997); (Stradioto, 2003); (Hardt, 2009).

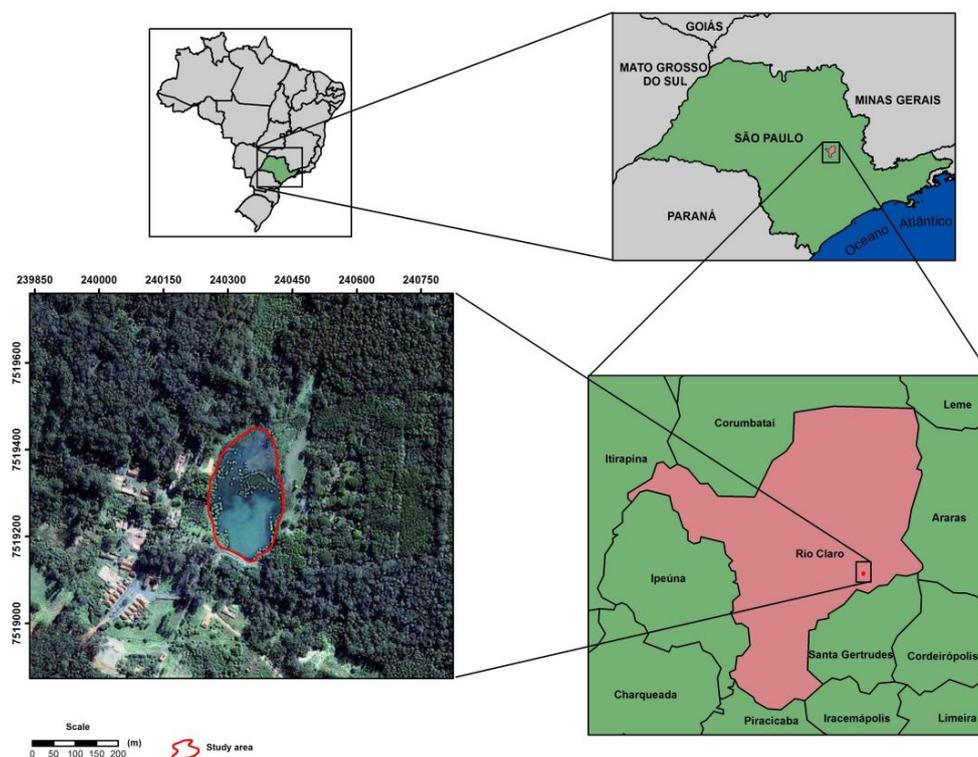
Uma técnica de grande importância para o conhecimento das características morfométricas de corpos d'água é a elaboração de cartas batimétricas, as quais possibilitam um maior entendimento da estrutura e do funcionamento dos ambientes aquáticos. Estes mapas constituem um importante subsídio para a realização de estudos sobre evolução de assoreamento e qualidade da água, entre outros. O conjunto dessas informações torna-se de grande valia em tomadas de decisões em projetos ambientais no sentido de direcionar ações de conservação e manejo de ecossistemas aquáticos.

O presente estudo teve como objetivo caracterizar os principais parâmetros morfométricos primários e secundários e por fim produzir a primeira carta batimétrica do reservatório da FEENA. Neste sentido, aplicou-se a técnica geoestatística da krigagem ordinária, a qual se destaca devido a sua capacidade de minimizar a variância dos valores estimados, além da possibilidade de se obter os melhores ponderadores das amostras situadas em uma determinada vizinhança com relação ao local a ser estimado, o que permite a confecção de mapas geoestatísticos robustos.

## CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

O reservatório central da Floresta Estadual “Edmundo Navarro de Andrade” (FEENA) está localizado em uma importante Unidade de Conservação de Uso Sustentável do Estado de Paulo, situada a sudeste do Brasil, no extremo

leste do município de Rio Claro (Figura 1). O quadrante com as coordenadas UTM (*Universal Transverse Mercator*) que abrangem a área de estudo são: 240258 – 240442 E e 7519137 – 7519380 S, zona 23K, datum SIRGAS/2000.



**Figura 1.** Mapa de localização da área de estudo.

O clima da área pode ser considerado tropical com duas estações definidas - Cwa na classificação de Köppen, ou seja, w: seca no inverno, a: mês mais quente com temperatura superior a 22° C.

Quanto ao regime de chuvas, ocorre um período de estiagem entre abril e setembro, com precipitação média de 34,2 a 72,3 mm, e um período chuvoso, de outubro a março, com a média variando de 119,3 mm a 338,6 mm. A média pluviométrica anual é de 1366 mm.

A área de estudo está inserida na sub-bacia do Ribeirão Claro que, por sua vez, insere-se na bacia hidrográfica do rio Corumbataí. O principal sistema de drenagem da região é representado pelo rio Corumbataí e seus afluentes: Ribeirão Claro, Cabeça e Passa Cinco. Estes rios nascem nas encostas da Cuesta e deslocam-se para sul, desaguando no rio Piracicaba que, correndo no sentido oeste, leva suas águas para o rio Tietê. Os principais

tributários do Ribeirão Claro que atravessam a FEENA são: os córregos Lavapés, Santo Antônio e Ibitinga.

O reservatório é resultado do represamento das águas do córrego Ibitinga na porção final de seu curso, dentro dos limites da Floresta Estadual. O afluente abastece o reservatório por sua extremidade norte, o vertedouro encontra-se ao sul, drenando as águas no córrego Santo Antônio, afluente esquerdo do Ribeirão Claro. Este último é responsável por parte do abastecimento de água do município de Rio Claro-SP.

As principais formas do relevo estão vinculadas ao contexto geológico regional. Na área ocorrem três principais tipos de formações geológicas (Pirani et al., 2005): formação Corumbataí (pertencente ao grupo Passa Dois), formação Serra Geral (grupo São Bento) e a formação Rio Claro (depósitos cenozóicos). Segundo Zaine (1994), na área predominam as

litologias vinculadas às intrusivas básicas, representadas por “sills de diabásio” que encontram-se no setor E, NE e N. Entre as cotas de 630 e 656 metros, ocorrem litologias vinculadas à formação Rio Claro e entre 568 e

650 metros ocorrem os argilitos da formação Corumbataí. Ao longo do canal do Ribeirão Claro destaca-se a presença contínua de depósitos aluvionares quaternários constituídos por areias e argilas.

## MATERIAIS E MÉTODOS

### Aquisição dos dados

A autorização para o desenvolvimento desta pesquisa foi concedida pelo Instituto Florestal, órgão da Secretaria do Meio Ambiente do Estado de São Paulo (Processo SMA n° 260108-006.744/2012).

O método de se avaliar a profundidade adotado neste trabalho justifica-se devido a grande quantidade de macrófitas flutuantes e submersas presentes no ambiente. O uso de um ecobatímetro foi descartado em virtude das dificuldades operacionais inerentes ao local, que poderiam ocasionar possíveis erros de leitura dos dados no equipamento. Para Sperling (1999), um dos aspectos mais complexos no levantamento batimétrico é a possibilidade de interferência da vegetação de fundo e dos sedimentos. Desta forma, pode ocorrer que o resultado fornecido pelo ecobatímetro não se refira à profundidade real.

O levantamento batimétrico foi realizado no dia 03/09/2012. Utilizou-se uma trena métrica

de fibra de vidro da marca *Western* para a determinação da profundidade do reservatório em cada ponto.

Para a aquisição das coordenadas, utilizou-se um equipamento de GPS *Garmin*, modelo GPS12. Neste caso, o sistema de projeção UTM (*Universal Transverse Mercator*) e o datum SIRGAS/2000, foram utilizados.

Foram estabelecidos dez transectos no sentido leste-oeste do reservatório (Figura 2). Os transectos receberam marcações equidistantes em cinco metros para a orientação durante a coleta dos dados. Em cada ponto marcado foi determinada a profundidade do reservatório e obtidas às coordenadas UTM. Desta forma, 271 pontos foram georreferenciados, delineando o contorno do reservatório e representando os pontos onde a profundidade foi determinada.

Para o deslocamento e transporte dos equipamentos durante a coleta dos dados, utilizou-se uma pequena embarcação a remo.

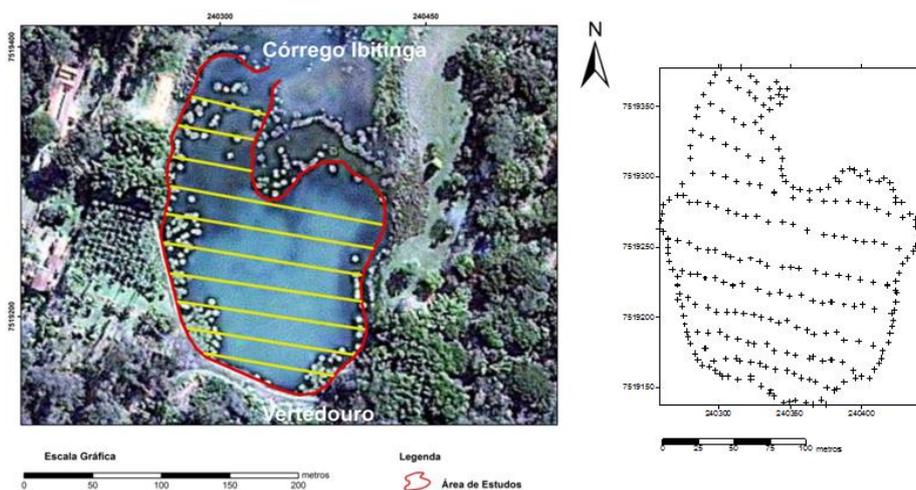


Figura 2. Posicionamento dos transectos e localização dos pontos.

### Variabilidade dos dados

Foram gerados histogramas com o intuito de verificar valores que pudessem causar uma distorção na krigagem dos dados nas etapas seguintes, como por exemplo, valores anômalos (*outliers*).

A análise da distribuição de frequência dos dados (Figura 3) demonstra uma configuração bimodal. A primeira moda reflete a região litorânea do reservatório, enquanto a segunda moda, mais profunda, refere-se à parte mais interna, circundante ao ponto de profundidade

máxima do reservatório. Os níveis de profundidade variam de zero até 2,16 metros. O coeficiente de variação é de 1,12, ou seja, indica uma alta dispersão dos valores. Segundo Andriotti (2003), valores elevados, na prática, superiores a 1, representam amostras com

grande heterogeneidade e valores abaixo de 0,4 refletem uma significativa homogeneidade da amostra. A média e mediana encontram-se próximas e representam a tendência central da distribuição.

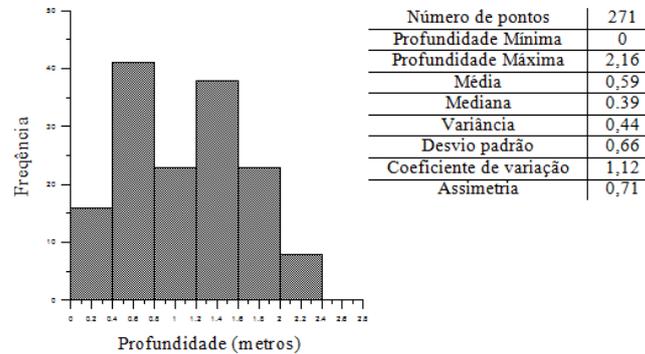


Figura 3. Histograma dos dados de profundidade.

Os dados de profundidade foram inseridos em uma planilha para serem processados no software *VARIOWIN*<sup>®</sup> 2.21 de autoria de (Panatier, 1996). O *VARIOWIN*<sup>®</sup> é composto por três módulos, *Prevar2D*, *Vario2D* e *Model* (Landim, 2004). Com o programa *Prevar2D* foi criado um arquivo com extensão PCF, (*Pair Comparison File*) contendo todas as possíveis distâncias entre os pontos de observação dos dados. Em seguida, o *Vario2D* foi utilizado para o cálculo do semivariograma experimental dos dados de profundidade (Figura 4). As direções principais foram de 90° e 0° por apresentarem, respectivamente, maior e menor continuidade dos dados, utilizando-se uma tolerância angular de 45°.

A partir do tributário em direção ao vertedouro, ou seja, na direção do fluxo d'água, a continuidade do dado de profundidade tende a ser maior do que na direção perpendicular do

referido fluxo. Se os variogramas para diferentes direções tiverem o mesmo comportamento, diz-se haver isotropia da variável; caso contrário, diz-se haver anisotropia. Uma anisotropia corresponde à existência de direções privilegiadas que condicionam a gênese do fenômeno sob estudo (Andriotti, 2003). Tendo em vista estas características, foi modelada a variabilidade dos dados nas duas direções principais de um suposto canal seccionando o reservatório no sentido norte-sul e perpendicular ao mesmo. Como era de se esperar, a variável batimétrica foi mais contínua ao longo do canal e menos contínua na direção perpendicular.

A modelagem do semivariograma foi feita acessando-se o programa *Model* do software *VARIOWIN*<sup>®</sup>. O modelo esférico foi ajustado com os seguintes parâmetros: *Nugget* (0,03), *Range* (73,3), *Sill* (0,42) e *Anisotropia* (0,87).

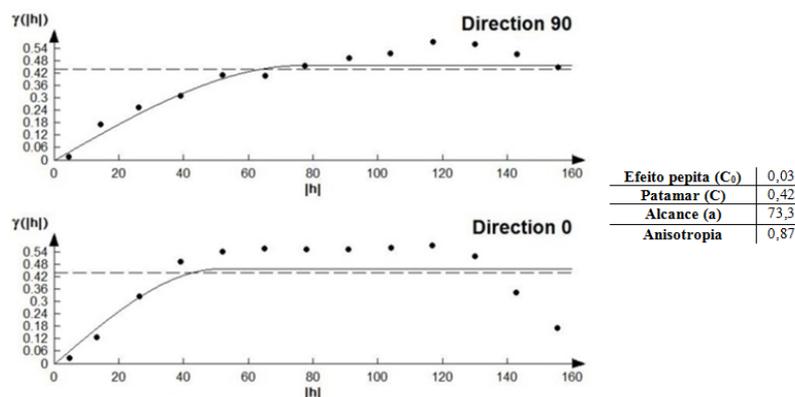


Figura 4. Semivariograma modelado das profundidades nas direções de maior (90°) e menor (0°) continuidade dos dados.

### **Krigagem ordinária**

Após análise da variabilidade espacial, que ajustou um modelo esférico, empregou-se o método geoestatístico da krigagem ordinária para estimar uma malha densa e regular de valores (*grid*).

Para a realização da krigagem, foram utilizados os parâmetros variográficos da componente aleatória *nugget* (efeito pepita), componente estruturada (*sill*), da amplitude variográfica (*range*) e anisotropia, obtidos na etapa de modelagem dos semivariogramas. O objetivo desta prática é de efetuar estimativas condicionadas à minimização da variância das estimativas. A krigagem ordinária pode ser definida como uma técnica geoestatística, fundamentada nas funções aleatórias, cujo objetivo maior é minimizar a variância dos valores estimados (Sturaro & Landim, 1988).

### **Confeção da carta batimétrica e cálculo dos parâmetros morfométricos**

A carta batimétrica foi confeccionada por meio do *software Surfer 10*<sup>®</sup> (*Golden Software Inc.*), adotando-se a técnica da krigagem ordinária como método de interpolação.

A linha de margem foi traçada no campo utilizando-se um equipamento de GPS para a aquisição das coordenadas dos pontos que delimitam o reservatório.

Os parâmetros morfométricos primários de Área (A) e Volume (V) foram obtidos por meio de sub-rotinas do *software Surfer 10*<sup>®</sup>, enquanto que os parâmetros de profundidade máxima ( $Z_{max}$ ), perímetro (m), comprimento máximo ( $L_{max}$ ) e largura máxima ( $La_{max}$ ), foram medidos em campo. Também em ambiente *Surfer* foram calculados os volumes e áreas entre as camadas de profundidade, espaçadas 0,30 metros entre si, possibilitando a confecção das curvas hipsográficas de profundidade-área e profundidade-volume.

Seguindo os métodos descritos por Sperling (1999) foram calculados os parâmetros morfométricos secundários de desenvolvimento do perímetro ( $D_p$ ) e desenvolvimento do volume ( $D_v$ ). A profundidade média ( $Z_{med}$ ) foi dada pela relação entre o volume d'água acumulado e a superfície do espelho d'água (Tundisi & Matsumura-Tundisi, 2008). A profundidade relativa ( $Z_r$ ) foi calculada seguindo o método proposto por (Wetzel, 1993).

A vazão do reservatório foi calculada no período de estiagem e chuvoso, ou seja, setembro de 2012 e janeiro de 2013, respectivamente, adotando-se o método descrito em (EPA, 1997). Por fim, calculou-se o tempo de retenção hidráulica do reservatório segundo (Tundisi & Matsumura-Tundisi, 2008).

## **RESULTADOS E DISCUSSÃO**

### **Carta batimétrica**

Foram confeccionadas três cartas batimétricas. A Figura 5 representando as isóbatas ou curvas de isovalores, a Figura 6 que apresenta diferentes perfis do reservatório em perspectiva tridimensional e a Figura 7, que é uma sobreposição dos mapas de isolinhas e tridimensional.

No lado norte do mapa de isóbatas (Figura 5), é possível notar uma zona onde possivelmente o aporte de sedimentos, advindos do córrego Ibitinga, mantém um constante processo de assoreamento naquele compartimento onde as profundidades oscilam entre 30 e 80 cm. Cunha (1997) observou elevados índices de perda de solo, acima da dinâmica natural, resultante da presença de solos expostos, técnicas de manejo do solo e retirada da mata ciliar das margens e cabeceira

do córrego Ibitinga. Ainda segundo a autora, em decorrência deste fato, observa-se no reservatório, um permanente processo de assoreamento. As áreas mais propensas à erosão localizam-se marginalmente no baixo e alto curso do córrego Ibitinga, bem como nas cabeceiras dos demais cursos d'água e também acompanhando toda a linha de ruptura topográfica que margeia o lado esquerdo do curso principal, principalmente nas vertentes côncavas. A montante do reservatório, o vale apresenta-se em "V", evidenciando a competência do tributário em carrear sedimentos e impedir acumulação de depósitos fluviais (Pinheiro & Cunha, 2010).

O intenso aporte de material mineral é o fenômeno causador do assoreamento dos corpos d'água. No caso de lagos e reservatórios, que apresentam um maior tempo

de residência da água, em comparação com os rios, segundo Sperling (1999), a deposição deste material ocorre na região de entrada dos tributários, podendo estender-se gradativamente por todo o fundo do lago.

De um modo geral, a região litorânea do reservatório é bastante rasa e densamente povoada por macrófitas. Na parte leste do reservatório, onde o terreno adjacente apresenta forte declividade e pouca cobertura vegetal

rasteira, nota-se um intenso processo de assoreamento.

Pesquisando a geocronologia dos sedimentos nos corpos d'água da FEENA, Almeida (2003) detectou uma taxa de sedimentação de 16,2 mm/ano no reservatório e 8,7 mm/ano para o Córrego Ibitinga, afluente do reservatório. A menor taxa de sedimentação foi registrada no Ribeirão Claro (2,4 mm/ano), localizado a jusante do reservatório.

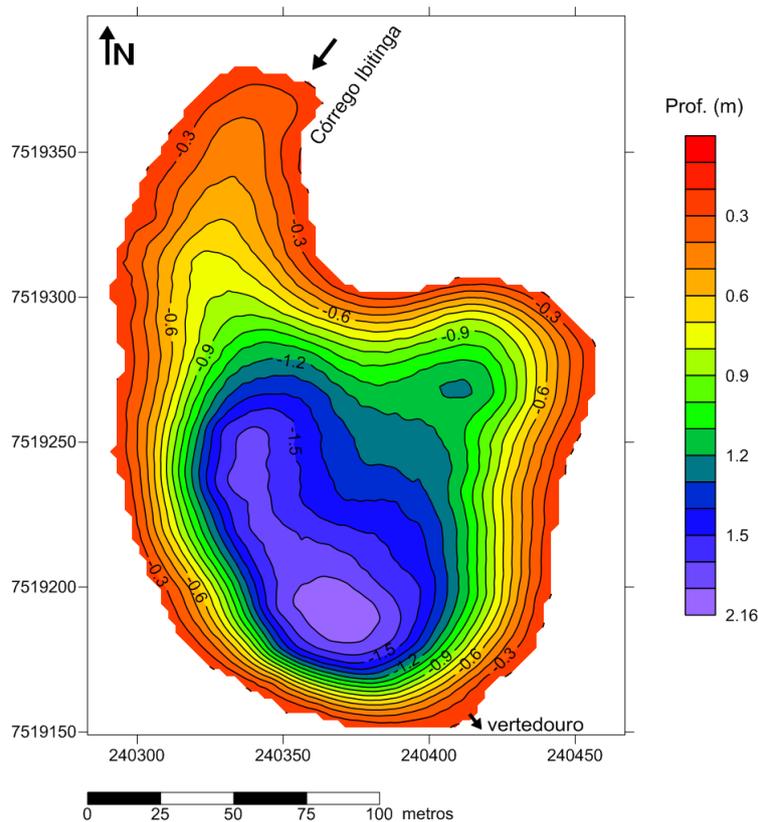


Figura 5. Mapa de isóbatas do reservatório da FEENA.

A morfologia de um corpo d'água exerce influências marcantes no comportamento limnológico do ambiente (Sperling, 1999). O reservatório da FEENA possui uma forma semicircular, caracterizada pelo baixo valor de desenvolvimento do perímetro (Tabela 1).

Quanto à forma do relevo do fundo, o reservatório apresenta uma inclinação regular no sentido norte-sul até o ponto de maior profundidade, próximo ao vertedouro. É possível notar que, aparentemente, a intrusão de água proveniente do córrego Ibitinga mantém um processo de transporte de sedimentos no fundo do reservatório, estabelecendo um canal que converge até o vertedouro. Quando um rio ou córrego encontra as águas mais estáticas de um lago ou reservatório, de um modo geral,

encontra massas d'água com temperaturas, salinidade ou turbidez diferentes. A água de intrusão pode ser, portanto, mais ou menos densa que a água de superfície do ecossistema lêntico gerando camadas turbulentas. Essa intrusão significa um transporte de material, nutrientes ou organismos em várias profundidades (Tundisi & Matsumura-Tundisi, 2008). Os mesmos autores destacam ainda que, os reservatórios em rios barrados apresentam zonas longitudinais originadas por um fluxo de água em sentido único.

Dentro da classificação proposta por Sperling (1999), a bacia possui um formato côncavo. A margem apresenta-se inicialmente escarpada, suavizando-se à medida que se aprofunda.

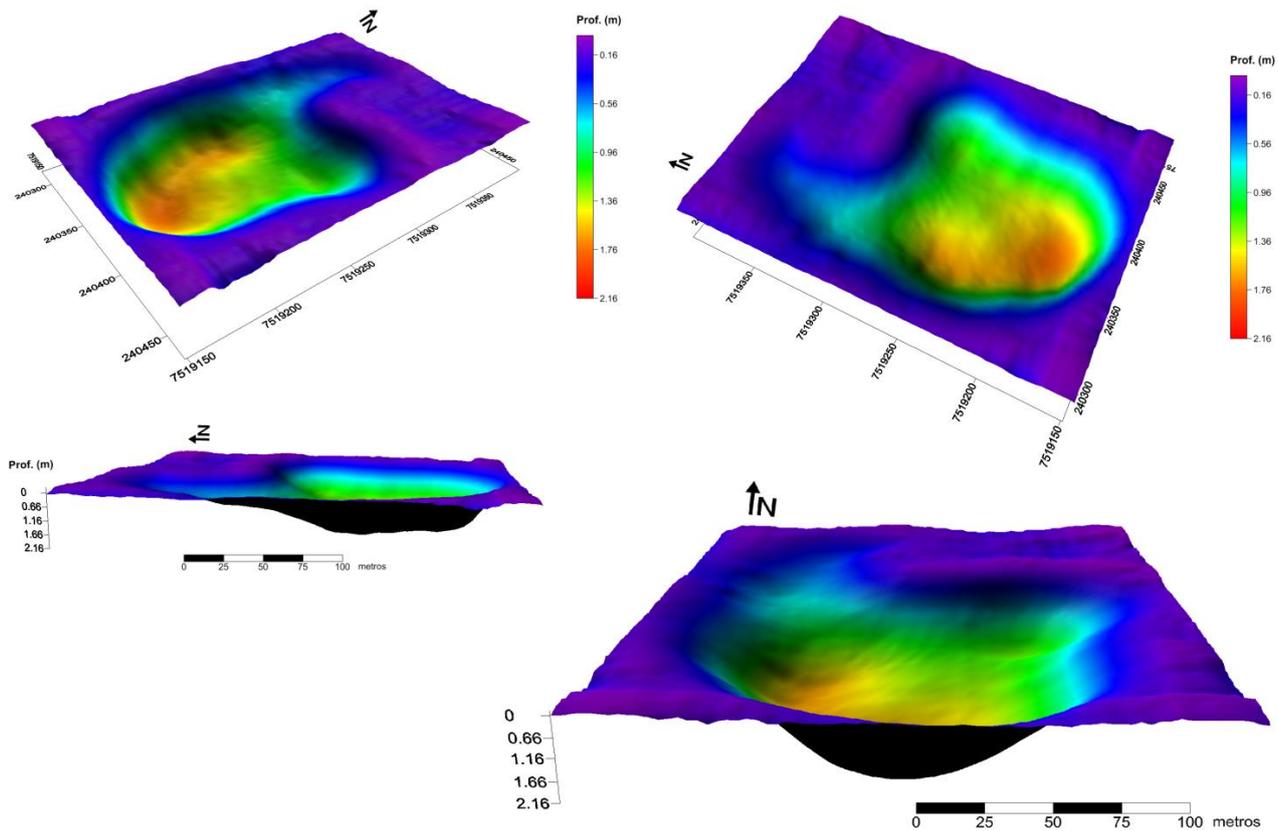


Figura 6. Perfis batimétricos do reservatório da FEENA em perspectiva tridimensional.

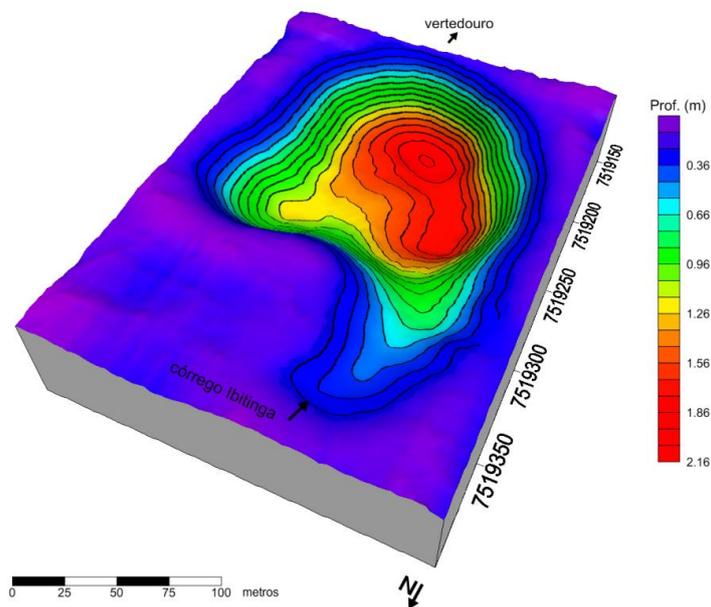


Figura 7. Sobreposição dos mapas de isóbatas e perspectiva tridimensional.

### Parâmetros morfométricos

Os parâmetros morfométricos primários e secundários calculados para o reservatório são apresentados na Tabela 1.

#### Área (A)

O cálculo da área superficial total do reservatório foi de 25.866 m<sup>2</sup>, trata-se de um

parâmetro morfométrico limnológico bastante relevante, isto porque se considera a exposição do espelho d'água à radiação solar e aos ventos (Cole, 1975). A exposição da superfície aos raios solares regula o desenvolvimento da atividade de produção primária e a dinâmica de circulação e estratificação do corpo d'água. O conhecimento da área tem um forte significado

como elemento comparativo entre distintos lagos. O cálculo das cargas que chegam a um lago, como por exemplo, a carga de nutrientes e de metais pesados, permite a sua comparação quantitativa com outros ambientes se os seus valores forem divididos pela área, obtendo-se assim as chamadas cargas superficiais (Sperling, 1999).

Quanto ao tamanho, o reservatório pode ser classificado como muito pequeno dentro das categorias de reservatórios com base nas dimensões, estando compreendido em uma área menor que 1 km<sup>2</sup> (Tundisi & Matsumura-Tundisi, 2008).

#### *Volume (V)*

O volume de um lago ou reservatório está associado à dimensão dos compartimentos aquáticos e à capacidade de diluição do corpo d'água. Lagos de grande volume possuem maior quantidade de oxigênio dissolvido, e apresentam, portanto, melhores condições de assimilação de cargas poluidoras de origem orgânica (Sperling, 1999). A relação entre o volume do epilímnio (camada superior) e do hipolímnio (camada inferior) foi proposta por Thienemann (1927), segundo Hutchinson (1975), para representar o grau de resistência do ambiente aquático aos impactos provenientes de fontes poluidoras, principalmente o lançamento de efluentes domésticos.

O volume do reservatório da FEENA é de 22.251 m<sup>3</sup>, um volume reduzido, evidentemente por se tratar de um ecossistema aquático raso e de pequenas dimensões. Desta forma, o ambiente apresenta pouca capacidade de assimilação de poluentes, tornando-se bastante vulnerável às atividades antropogênicas. Os lagos e represas volumosos apresentam uma capacidade de assimilar poluentes bastante superior àquela encontrada em corpos d'água pequenos, rasos e de reduzido volume (Sperling, 1999).

#### *Profundidade máxima (Z<sub>max</sub>)*

A profundidade de um lago ou reservatório é um dos parâmetros morfométricos de maior relevância limnológica. São marcantes as diferenças de comportamento encontradas em ambientes aquáticos rasos e profundos, especialmente no que se refere ao padrão de circulação e estratificação e à distribuição de

organismos e compostos químicos na coluna d'água (Sperling, 1999).

O reservatório da FEENA caracteriza-se como um ambiente hidrologicamente raso, com uma profundidade máxima de 2,16 m. Lagos e reservatórios rasos tendem a ser polimíticos, nos quais ocorrem circulações frequentes da massa d'água, muitas vezes diárias. Isso se deve ao resfriamento da camada superficial durante a noite e à reduzida profundidade, que facilita a sua homeotermia (Esteves, 2011). A importância limnológica da profundidade máxima é tão grande que o ponto onde ela se situa constitui-se obrigatoriamente em uma estação de amostragem em campanhas de monitoramento, sendo usualmente designado por "ponto limnológico" (Sperling, 1999). Segundo o autor, a maioria dos reservatórios rasos tende a ser mais produtiva do que ecossistemas aquáticos profundos. Isto ocorre quando o ambiente apresenta baixa condição de turbidez, permitindo que a luz chegue até o sedimento criando um ambiente favorável ao crescimento de vegetação do tipo macrófitas.

#### *Profundidade média (Z<sub>med</sub>)*

A profundidade média do reservatório é de 0,86 m. Este parâmetro é frequentemente utilizado em modelos de avaliação do grau de trofia em ambientes aquáticos. Thienemann (1927), segundo Cole (1975) propôs uma classificação onde lagos com profundidade média acima de 18 m, apresentam características oligotróficas. Já ambientes mais rasos, com profundidade média inferior aos 18 m apresentam maior produtividade, sendo classificados como eutróficos. A profundidade média de cada ambiente exerce forte influência na variação anual da produtividade do fitoplâncton em reservatórios e lagos tropicais. Isto porque em função da profundidade média, pode ocorrer ou não estratificação da coluna d'água, com profundas implicações na disponibilidade de nutrientes e na extensão da zona eufótica. Em muitos reservatórios, a principal consequência da eutrofização artificial é o aumento exagerado das comunidades de macrófitas aquáticas. Em decorrência do crescimento destas comunidades, observa-se rápida redução da profundidade média e diminuição da qualidade ecológica do ecossistema aquático (Esteves, 1998).

### *Profundidade relativa ( $Z_r$ )*

A maior parte dos lagos tem uma profundidade relativa menor que 2%, enquanto que somente os lagos profundos e com áreas superficiais pequenas apresentam, em geral, profundidade relativa maior que 4% (Wetzel, 2001). A profundidade relativa constitui-se em um parâmetro bastante útil para descrever o padrão de circulação de um corpo d'água (Sperling, 1999).

A profundidade relativa do reservatório da FEENA é de 1,19%, indicando que não existem limitações morfológicas para a completa mistura da massa d'água por encontrar-se exposto à ação dos ventos. Quando a profundidade relativa não é muito elevada ( $\leq 5\%$ ) o lago pode circular completamente, desde que haja um suficiente aporte de energia externa, representada normalmente por ventos de grande intensidade, o que acarreta frequentes trocas de materiais entre superfície e fundo (Sperling, 1999). O efeito do vento tende a ser mais pronunciado em reservatórios de grande dimensão, especialmente quando o eixo maior é paralelo à direção predominante dos ventos (Panosso et al., 1995).

### *Perímetro (m) e Desenvolvimento do perímetro ( $D_p$ )*

O perímetro do reservatório é de 645 m, trata-se de um parâmetro morfométrico primário bastante relevante, pois será empregado no cálculo do desenvolvimento do perímetro, um parâmetro morfométrico secundário que informa sobre o grau de irregularidade do corpo d'água.

O cálculo do  $D_p$  foi de 1,12, indicando que o reservatório possui um formato semicircular. Um ambiente absolutamente circular possuiria um desenvolvimento do perímetro igual à unidade, que é conseqüentemente o menor valor que pode ser obtido para  $D_p$ . Qualquer variação no contorno da margem fará com que o valor de  $D_p$  supere a unidade, sendo maior quanto mais irregular for o contorno superficial (Sperling, 1999).

Uma morfometria mais alongada faz aumentar o valor de  $D_p$  de modo pronunciado, como por exemplo, acontece em relação aos contornos dendríticos de reservatórios que ocupam vales alagados (Wetzel, 2001). Segundo Tundisi & Matsumura-Tundisi (2008),

os reservatórios que se afastam do formato circular têm valores de  $D_p$  entre 1,5 e 2,5, e os dendríticos muito irregulares, apresentam valores entre 3 e 5 como é o caso do lago Dom Helvécio, localizado no Parque Estadual do Rio Doce, na região leste do estado de Minas Gerais, Brasil. Lagos e reservatórios com contorno irregular das margens são mais resistentes aos impactos provenientes do recebimento de efluentes e de outros pulsos poluidores, devido ao fato de que a vegetação existente às margens, apresenta uma elevada capacidade assimiladora de poluentes. Além disso, a faixa vegetal litorânea protege as margens contra a erosão e reduz a amplitude térmica do ambiente. O potencial de ocupação destas zonas litorâneas por plantas enraizadas, além do  $D_p$  depende de outros fatores morfométricos (Neiff e Poi de Neiff, 2003) que condicionam o tamanho da faixa de ocupação pelas macrófitas marginais. Por outro lado, devido ao seu formato dendrítico, pode ocorrer o acúmulo de material nas reentrâncias onde existe pouca movimentação da água, o que favorece o estabelecimento da eutrofização, cuja magnitude depende do grau de irregularidade das margens do lago ou reservatório (Sperling, 1999). O baixo valor de  $D_p$  do reservatório da FEENA, entre outros atributos morfométricos, demonstra certa vulnerabilidade deste ambiente aquático a impactos poluidores, ou seja, uma baixa capacidade assimiladora.

### *Desenvolvimento do volume ( $D_v$ )*

O  $D_v$  é um parâmetro morfométrico que indica as características do formato vertical do corpo d'água. Calculou-se um  $D_v$  de 1,19 para o reservatório, constatando-se que a bacia possui um formato côncavo. Lagos com  $D_v$  inferior à unidade apresentam uma forma convexa (Sperling, 1999). Segundo Cole (1975), a maioria dos lagos, para os quais existem bons dados morfométricos, ocupam depressões em forma de U na seção transversal, portanto com  $D_v > 1$ . Já os parâmetros muito elevados de  $D_v$  são encontrados em lagos rasos e com grande área. Os valores muito reduzidos de  $D_v$  verificam-se somente em lagos contidos em depressões profundas, tais como lagos de dissolução (Wetzel, 2001). A forma côncava do reservatório da FEENA favorece a

circulação das águas, pois ambientes em forma de U, encontram-se mais expostos ao vento. Este fator influi na hidrodinâmica do ambiente aquático, provocando como consequência mais imediata um maior revolvimento do material de fundo, principalmente em ambientes rasos (Sperling, 1999).

#### Comprimento máximo ( $L_{max}$ ) e Largura máxima ( $La_{max}$ )

A exposição de um lago ou reservatório ao vento exerce um efeito direto no movimento das águas (Cole, 1975). Os parâmetros de  $L_{max}$  e  $La_{max}$  calculados para o reservatório foram de 268 e 159 m, respectivamente. São parâmetros morfométricos que cumprem geralmente um papel de cunho descritivo. Contudo, o

comprimento máximo é um importante parâmetro em estudos hidrodinâmicos. Segundo Sperling (1999), seu valor indica a influência do transporte advectivo. A maior distância entre as margens de um lago ou reservatório, que apresenta certa continuidade retilínea do espelho d'água, sem cortar qualquer obstáculo físico, é denominada *fetch*. Portanto quanto maior o *fetch*, mais intensos serão os efeitos do vento sobre a superfície aquática. Lagos com *fetch* reduzidos apresentam consequentemente condições mais favoráveis à sedimentação, o que implica em um maior acúmulo de nutrientes no corpo d'água. Hutchinson (1975) propõe uma fórmula para o cálculo da altura máxima das ondas em ambientes lacustres utilizando-se o *fetch*.

**Tabela 1.** Parâmetros morfométricos do reservatório da FEENA.

<b>Parâmetros morfométricos primários</b>	
Área (A)	25.866 m <sup>2</sup>
Volume (V)	22.251 m <sup>3</sup>
Profundidade máxima ( $Z_{max}$ )	2,16 m
Perímetro (m)	645 m
Largura máxima ( $La_{max}$ )	159 m
Comprimento máximo ( $L_{max}$ )	268 m
<b>Parâmetros morfométricos secundários</b>	
Profundidade média ( $Z_{med}$ )	0,86 m
Profundidade relativa ( $Z_r$ )	1,19%
Desenvolvimento do perímetro ( $D_p$ )	1,12
Desenvolvimento do volume ( $D_v$ )	1,19

#### Curvas hipsográficas

A interpretação das curvas (área x profundidade e volume x profundidade) fornece uma clara indicação sobre como a área de cada estrato vai diminuindo e o volume de água acumulado vai aumentando à medida em que se avança em direção ao fundo do reservatório. Conforme a maior ou menor convexidade das paredes internas, as curvas adquirem configurações específicas, que retratam com fidelidade a morfologia do ambiente aquático (Sperling, 1999).

As curvas hipsográficas (profundidade x área e profundidade x volume) estão representadas na Figura 8 e os estratos de profundidade na Tabela 2. Observa-se que 50% do volume e da área total do reservatório encontram-se numa profundidade próxima, ou seja, aos 0,85 m, e 0,75 m, respectivamente. Bezerra-Neto & Pinto-Coelho (2002)

elaboraram curvas hipsográficas para a Lagoa do Nado, um reservatório mesotrófico situado em Belo Horizonte-MG, e identificaram que o reservatório possui uma bacia de acumulação em formato cônico. Embora também seja um reservatório raso, o formato cônico e o fato do ambiente sofrer pouca ação dos ventos, devido à vegetação arbórea circundante, lhe conferem um padrão de circulação da massa d'água bastante peculiar para um corpo d'água raso, com somente um período de circulação durante o ano. A importância dessas curvas de área e volume para a investigação em limnologia vem da relação existente entre a morfologia do lago e a sua produtividade primária (Wetzel, 2001). Segundo o autor, as depressões pouco profundas e com uma percentagem maior de contato da água com os sedimentos, caracterizam-se em regra por apresentarem maiores valores de produtividade primária.

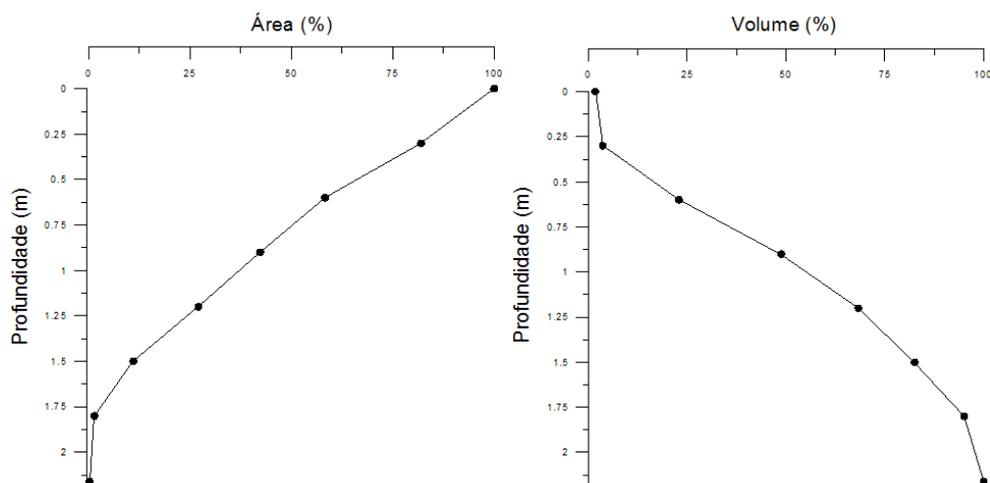


Figura 8. Curvas hipsográficas do reservatório da FEENA.

Tabela 2. Representação do volume e área do reservatório, por estratos de profundidade.

Profundidade (m)	Área (m <sup>2</sup> )	Área (%)	Estrato	Volume (m <sup>3</sup> )	Volume (%)
0	25.865,7	100,0	0 - 0.3	1.142,9042	5,13
0.3	21.221,6	82,04	0.3 - 0.6	2.847,8926	12,79
0.6	15.074,9	58,28	0.6 - 0.9	3.209,9367	14,42
0.9	10.936,0	42,27	0.9 - 1.2	4.384,5831	19,70
1.2	7.014,9	27,12	1.2 - 1.5	5.823,8699	26,17
1.5	2.841,3	10,98	1.5 - 1.8	4.341,7564	19,51
1.8	366,2	1,41	1.8 - 2.16	500,1167	2,24
2.16	66,2	0,25	Total	22.251,06	100,0

### Vazão e tempo de retenção hidráulica

A razão entre o volume do reservatório e a vazão afluente, determina o tempo teórico de retenção hidráulica do reservatório (Tundisi & Matsumura-Tundisi, 2008). A vazão do reservatório durante o período de estiagem foi de 0,04603 m<sup>3</sup>/s ou 46,03 L/s. Neste período, a precipitação pluviométrica média é de 47,05 mm. Na estação das chuvas, quando ocorre uma precipitação média de 200,75 mm, a vazão do reservatório é 355,75% superior àquela registrada durante a estiagem, representando uma descarga de 0,20978 m<sup>3</sup>/s ou 209,78 L/s. O aumento do fluxo d'água diminui o tempo de retenção hidráulica, o que ocasiona uma

redução da biomassa de algas no ambiente aquático (Esteves, 2011).

Calculou-se o tempo de retenção hidráulica de 5,6 dias no período de estiagem, e 1,2 dias, na estação chuvosa. A vazão reduzida durante a estiagem ocasionou um maior tempo de retenção, ocorrendo exatamente o oposto durante a estação das chuvas, quando a vazão foi maior. De certa forma, ambos os tempos de retenção calculados foram curtos (<10 dias). Segundo Tundisi & Matsumura-Tundisi (2008), o tempo de retenção hidráulica ou tempo de residência, está associado à qualidade das águas nos reservatórios. Este parâmetro é fundamental para o controle, monitoramento da poluição e cálculos sobre o balanço de nutrientes.

## CONCLUSÕES

A partir dos estudos realizados neste trabalho, foi possível concluir que o reservatório encontra-se bastante raso ( $Z_{med}$  0,86 m), principalmente no setor norte, onde possivelmente o aporte de sedimentos proveniente de seu tributário (córrego Ibitinga), mantém um constante processo de assoreamento naquele compartimento.

A morfometria pode estar relacionada ao elevado grau de trofia do reservatório.

O emprego da krigagem ordinária neste mapeamento batimétrico foi de grande valia, tendo em vista que o estudo da variabilidade considera a componente aleatória, a componente estruturada, o raio de influência da amostra e o aspecto anisotrópico do sistema. A

anisotropia constitui-se em um dos aspectos morfológicos de alta importância em sistemas aquáticos, visto que, o fluxo d'água possui um notável sentido. Desta forma, ao longo do fluxo, é de se esperar maior continuidade dos

valores de profundidade. Esta anisotropia aparece exposta na configuração total do corpo d'água e sua modelagem possibilitou expressar a configuração elíptica do reservatório por meio dos mapas geoestatísticos.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ALMEIDA, K. Y. M. de, **Uso do Po-210 na avaliação da taxa de sedimentação na floresta estadual "Navarro de Andrade", município de Rio Claro, São Paulo, SP.** (TCC) apresentado ao Instituto de Biociências da Universidade Estadual Paulista "Julio de Mesquita Filho". Rio Claro-SP. 2003. 53p.
2. ANDRIOTTI, J. L. S. **Fundamentos de Estatística e Geoestatística.** Editora da Universidade do Vale do Rio dos Sinos. São Leopoldo-RS. 2003. 165 p.
3. BEZERRA-NETO, J. F. & PINTO-COELHO R. M. A estrutura térmica, o trabalho do vento e a estabilidade de um reservatório tropical raso: Lagoa do Nado, BH – MG. *Revista Bios*, 2002, V.10, N.10, p. 19-33.
4. COLE, G. A. *Textbook of Limnology.* Sant Louis, The C. V. Mosby Company: 1975. 283 p.
5. CUNHA, C. M. L. **Quantificação e mapeamento das perdas de solo por erosão com base na malha fundiária.** 1997. (Dissertação de Mestrado) – Pós-Graduação em Geografia da Unesp. Rio Claro-SP. 1997. 152 p.
6. EPA, (Environmental Protection Agency), **Stream flow.** In: Environmental Protection Agency. Volunteer stream monitoring: a methods manual. Washington: EPA. Cap. 5.1, 1997.
7. ESTEVES, F.A. **Fundamentos de Limnologia.** 2. ed. Rio de Janeiro: Editora Interciência, 1998. 602 p.
8. ESTEVES, F.A. **Fundamentos de Limnologia.** 3. ed. Rio de Janeiro: Editora Interciência, 2011. 826 p.
9. FANTIN-CRUZ, I.; LOVERDE-OLIVEIRA, S.; GIRARD, P. Caracterização morfométrica e suas implicações na limnologia de lagoas do Pantanal Norte. *Acta Sci. Biol. Sci. Maringá*, v. 30, n. 2, p. 133-140, 2008.
10. GALVÃO, M. Y. H. & RADUAN, R. N. **Fatores bióticos e abióticos e seus efeitos sobre alguns parâmetros de qualidade da água no lago "Navarro de Andrade" (Horto Florestal) – Rio Claro/SP.** 1982, 59 p. (TCC) apresentado ao Departamento de Biologia, Instituto de Biociências da Universidade Estadual Paulista. 1982. 59p.
11. HARDT, R. A. **Identificação e diagnóstico dos impactos ambientais ocorridos nos cursos d'água localizados na faixa oeste da Floresta Estadual Edmundo Navarro de Andrade.** 2009. 84 p. (TCC) apresentado ao Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro-SP. 2009. 84 p.
12. HUTCHINSON, G. E. **A Treatise on Limnology,** vol. I, Geography and Physics of Lakes. 1975. 540 p.
13. LANDIM, P.M.B. **INTRODUÇÃO À ANÁLISE VARIAGRÁFICA COM O VARIOWIN:** Lab. Geomatemática, DGA,IGCE,UNESP/Rio Claro, Texto Didático 14, 25 pp. 2004. Disponível em: <<http://www.rc.unesp.br/igce/aplicada/textodi.html>>. Acesso em:13/12/2014.
14. NEIFF, J.J.; POI DE NEIFF, A. Connectivity processes as a basis for management of aquatic plants. In: THOMAZ, S.M.; BINI, L.M. (Ed.). **Ecologia e manejo de macrófitas aquáticas.** Maringá: Eduem, 2003. p. 39-58.
15. PANNATIER, Y. **Variowin:** Software for Spatial Data Analysis in 2D. Springer-Verlag, 1996. 91 p.
16. PANOSSO, R.F. et al. **Morphological characteristics of an Amazon floodplain lake (Lake Batata, Pará State, Brazil).** *Amazoniana*, Manaus, v. 8, n. 3-4, p. 245-258, 1995.
17. PINHEIRO, L. S. & CUNHA, C. M. L. **Geração do Fator Topográfico (LS) da EUPS Para Modelagem Erosiva de Bacia Hidrográfica.** II Seminário Ibero-Americano de Geografia Física. Universidade de Coimbra, 2010.
18. PIRANI, A. C; SARTORI FILHO, A.; FREITAS, C. A.; REIS, C. M.; ZANCHETTA, D.; SILVA, D. A.; HONDA, F. A.; PINHEIRO, G. S.; FACHIN, H. C.; MENDES, I. A.; AHMAD, I. T.; MONTEIRO, J. B.; PAGANI, M. I.; MONTEIRO, R.; FELISBINO, R. **Plano de Manejo da Floresta Edmundo Navarro de Andrade (FEENA),** coordenação: Claudia Macedo Reis, Denise Zanchetta, Honório Carlos Fachin; organizadores: Claudia Macedo Reis, Denise Zanchetta, Suely Ferreira Lino Pontalti; editoração: Fábio Vicentin Diniz, Leandro de Souza Pinheiro, Suely Ferreira Lino Pontalti; CD-ROM, Rio Claro, 2005.
19. SPERLING, E. **Morfologia de lagos e represas /** Eduardo von Sperling - Belo Horizonte: DESA/UFMG, 1999. 138 p.
20. STRADIOTO, E. de F. **Levantamento das aves aquáticas e de brejo do lago da floresta estadual Edmundo Navarro de Andrade.** 2003. (TCC) apresentado ao Instituto de Biociências da Universidade Estadual Paulista, Rio Claro-SP. 2003. 36f.
21. STURARO, J. R. & LANDIM, P. M. B. 1988, Estudo do Nível Piezométrico pela Análise Geoestatística. *Revista Geociências.* São Paulo: , v.2, p. 201-210.
22. SURFER. **Version 10 User's Guide** – Golden Software, Inc. 2002.
23. TUNDISI, J. G. & TAKAKO MATSUMURA-TUNDISI . **Limnologia,** São Paulo: Oficina de Textos, 2008. 631 p.
24. WETZEL, R.G. **Limnologia.** Lisboa; Fundação Calouste Gulbenkian, 1993. 919 p.
25. WETZEL, R.G. **Limnology.** Lake and River Ecosystems, third edition, Academic Press. 2001. 1006 p.
26. ZAINE, J. E. **Geologia da Formação Rio Claro (SP).** 90 p. (Dissertação de Mestrado). Geologia Regional. IGCE,Unesp, Rio Claro. 1994. 90 p.
27. ZEVALLOS, A. M. **Produção primária de fitoplâncton no lago central do "Horto Florestal Navarro de Andrade" Rio Claro-SP.** 1986. 28 p. (TCC) apresentado ao Instituto de Biociências da Universidade Estadual Paulista, Rio Claro-SP. 1986. 28 p.

*Manuscrito recebido em: 08 de Outubro de 2014  
Revisado e Aceito em: 07 de Janeiro de 2015*