



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
INSTITUTO DE CIÊNCIAS BIOLÓGICAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ECOLOGIA, CONSERVAÇÃO E MANEJO
DA VIDA SILVESTRE



MORFOMETRIA, COMPARTIMENTAÇÃO E HIDRODINÂMICA DE UM
RESERVATÓRIO PERIURBANO TROPICAL: PROGNÓSTICOS SOBRE O TEMPO
DE VIDA ÚTIL DO RESERVATÓRIO DE VARGEM DAS FLORES, MINAS GERAIS –
BRASIL

SIMONE PAULA DOS SANTOS

Belo Horizonte
Minas Gerais – Brasil
2012

SIMONE PAULA DOS SANTOS

MORFOMETRIA, COMPARTIMENTAÇÃO E HIDRODINÂMICA DE UM
RESERVATÓRIO PERIURBANO TROPICAL: PROGNÓSTICOS SOBRE O TEMPO
DE VIDA ÚTIL DO RESERVATÓRIO DE VARGEM DAS FLORES, MINAS GERAIS –
BRASIL

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ecologia, Conservação e Manejo de Vida Silvestre, do Instituto de Ciências Biológicas, da Universidade Federal de Minas Gerais, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Ecologia, Conservação e Manejo de Vida Silvestre.

Orientador: Prof. Dr. Ricardo Motta Pinto-Coelho

Coorientador: Prof. Dr. José Fernandes Bezerra-Neto

Belo Horizonte
Minas Gerais – Brasil
2012

SIMONE PAULA DOS SANTOS

MORFOMETRIA, COMPARTIMENTAÇÃO E HIDRODINÂMICA DE UM
RESERVATÓRIO PERIURBANO TROPICAL: PROGNÓSTICOS SOBRE O TEMPO
DE VIDA ÚTIL DO RESERVATÓRIO DE VARGEM DAS FLORES, MINAS GERAIS –
BRASIL

Dissertação apresentada ao Instituto de Ciências Biológicas, Universidade Federal
de Minas Gerais como parte dos requisitos para a obtenção do grau de mestre em
Ecologia, Conservação e Manejo da Vida Silvestre

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Marcos Von Sperling
Membro titular – Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG)

Profª. Drª. Eliane Maria Vieira
Membro titular – Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI)

Profª. Drª. Paulina Maria Maia Barbosa
Membro suplente – Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG)

Prof. Dr. Ricardo Motta Pinto Coelho
Orientador – Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG)

Belo Horizonte - MG, 27 de abril de 2012.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Ricardo Motta Pinto-Coelho, por disponibilizar a infraestrutura necessária para a realização deste trabalho. Pela orientação, apoio e por acreditar no meu potencial.

Ao Prof. Dr. José Fernandes Bezerra-Neto pelas importantes sugestões e críticas durante a realização deste trabalho.

Ao Prof. Dr. Paulo César Colonna Rosman, por permitir que participasse de sua disciplina “Modelagem Ambiental Aplicada” na UFRJ e pela constante disponibilidade na correção dos modelos hidrodinâmicos.

À Prof^a. Dr^a. Paulina Maia Barbosa, que me cedeu um horário da Rosinha, fundamental na aprendizagem e identificação do zooplâncton

À Rosinha, por me ensinar tudo do pouco que sei sobre zooplâncton.

À CAPES, pela concessão da bolsa de mestrado.

Ao CNPq – Projeto São Simão, pelo financiamento que possibilitou a realização da disciplina na UFRJ.

Ao USFish & Wild Life, que financiou minhas coletas, possibilitou minha participação em congressos e parte da disciplina na UFRJ.

Ao curso de Pós-Graduação em Ecologia, Conservação e Manejo de Vida Silvestre. E aos secretários deste, Fred e Cris, pela atenção e disposição em resolver nossos problemas.

À COPASA, em especial ao Dr. Tales Heliodoro Viana, Superintendente de Meio Ambiente, pela ajuda na coleta batimétrica e pela boa vontade em ajudar sempre que precisei.

À minha família pelo apoio incondicional e por torcerem pela conquista dos meus ideais. Em especial aos meus pais, que mesmo não concordando, suportaram a diferença no meu fuso horário e deram todo suporte que necessitei para conclusão

deste trabalho. E à minha irmã Cláudia, que sempre me incentivou em todos os sentidos a continuar.

À todos os colegas do Laboratório de Gestão Ambiental de Reservatórios, pelo prazeroso convívio. Em especial gostaria de agradecer: a Laila Ribeiro e Gabriela Fernandes, pelas inúmeras digitalizações de contorno do reservatório, ao Felipe “Desenho” Cerqueira, pela ajuda em campo e pela companhia no aprendizado do zoo. Ao Cid Antônio pela realização das análises químicas.

À Denise Fernandes, colega de laboratório, companheira de curso e amiga de todas as horas, pela ajuda em campo, pelas trocas de ideia e por compartilhar os momentos de desespero. Resumindo, por estar sempre presente nos bons e maus momentos, tornando mais fácil essa caminhada.

A Eliane Elias, também colega de laboratório e grande amiga, pela ajuda nas análises físicas e químicas e na solução dos problemas logísticos e burocráticos que apareceram. Por tentar me tranquilizar nos momentos de ansiedade, mas principalmente pela amizade e apoio.

Aos meus amigos de NL e da Biologia, que indiretamente ajudaram nessa caminhada. Em especial, à Didis pelos momentos de descontração, apoio e amizade.

Aos colegas do programa de pós-graduação ECMVS pela amizade, principalmente à galera do curso de campo pelos momentos inesquecíveis, que renderam vídeos memoráveis e boas risadas. E à Mirla, pela ajuda na estatística.

E a todos que, de alguma forma, auxiliaram no desenvolvimento deste trabalho.

Resumo

O presente trabalho foi realizado em um reservatório periurbano, da região metropolitana de Belo Horizonte (RMBH), MG – Brasil, Reservatório de Vargem das Flores. Este estudo teve como objetivo: (a) A realização de um estudo morfométrico e identificação de focos de assoreamento, a partir de uma nova batimetria realizada no reservatório. (b) O estudo limnológico do reservatório, com enfoque na qualidade da água, caracterização do grau de trofia do reservatório e na proposição de um modelo de compartimentação, com base nos parâmetros físicos e químicos da água. (c) Investigar o papel da hidrodinâmica, através do padrão das correntes, do tempo de residência e da força do vento, na distribuição horizontal dos organismos planctônicos. (d) Gerar dados que possam contribuir para a elaboração de um plano de manejo, controle e mitigação da eutrofização da lagoa bem como da recuperação. A escolha da área de estudo foi em razão deste reservatório ser um importante manancial de abastecimento para as cidades da RMBH, assim como para a capital Belo Horizonte e por ser um reservatório ameaçado pelas atividades antrópicas em sua bacia. A caracterização morfométrica foi obtida através da realização de uma nova batimetria, utilizando um Ecobatímetro SonarLite (Ohmnex Ltda), acoplado a um D-GPS (Differential Global Positioning System) para a obtenção das coordenadas geográficas de cada profundidade medida. A caracterização limnológica do ecossistema foi estudada com ênfase na variação horizontal dos parâmetros de qualidade de água. Para geração do modelo hidrodinâmico, utilizou-se o software SisBAHIA®, que também gerou o tempo de residência das águas. O reservatório Vargem das Flores é um reservatório pequeno (área=5,15x10⁶m² e volume = 29,10⁶m³), com profundidade relativa ($Z_r = 0,83\%$). Na última década, o reservatório experimentou um incremento na taxa de assoreamento, recebendo em apenas nove anos a mesma quantidade de sedimentos que o reservatório que o reservatório recebeu nos seus 28 primeiros anos de operação. A taxa de deposição de sedimentos cresceu cerca de 2,5 vezes, reduzindo nessa mesma taxa sua vida útil. O estudo da variação longitudinal de parâmetros limnológicos mostrou que o reservatório é eutrófico e apresenta-se compartimentado, com presença de fontes pontuais e difusas de entrada de material alóctone. A distribuição de zooplâncton e fitoplâncton apresentaram relação tanto com a hidrodinâmica, quanto com a disponibilidade de nutrientes.

Palavras-chave: reservatórios, batimetria, assoreamento, perda de volume, modelo de compartimentação, variação horizontal, zooplâncton, modelagem hidrodinâmica, tempo de residência.

Abstract

This study was conducted in an urban reservoir, in the metropolitan region of Belo Horizonte (BHMA), MG - Brazil, Vargem das Flores Reservoir. The major objectives of this investigation were: (a) conducting a morphometric study with an identification of sources of siltation in the catchment basin and delivering a new bathymetry inventory of the reservoir; (b) performing a limnological study, with a focus on water quality, characterization of the trophic level of the reservoir and in proposing a model of limnological compartments, based on physical and chemical parameters of the water; (c) investigating the role of hydrodynamics (residence time and wind forcing) on the horizontal distribution of planktonic organisms. The Vargem das Flores reservoir was selected because it is one of the most important sources of water supply for the metropolitan area of Belo Horizonte. Nevertheless, the reservoir has been threatened by different human activities in its basin. It also has a history of cyanobacterial blooms. Morphometric characterization is obtained by performing a new bathymetry, using an echo sounder SonarLite (Ohmnex Ltd.), coupled to a D-GPS (Differential Global Positioning System) to obtain the geographical coordinates of each measured depth. The limnological characterization of the ecosystem was studied with emphasis on the horizontal variation of several variables used for the typology of water quality in reservoirs. For generation of the hydrodynamic model, the SisBAHIA software was used, it was also used in generating the residence time of water. The present investigation estimated areas and volumes considerable different than existing data from the literature. According to our new estimates, Vargem das Flores reservoir is a small reservoir with an area of $5.15 \times 10^6 \text{ m}^2$ and volume of $29 \times 10^6 \text{ m}^3$, with relative depth ($Z_r = 0.83\%$). In the last decade, the reservoir has experienced an extraordinary increase in sedimentation rates. In just nine years, it has received the same amount of sediment as it has received in its first 28 years of operation. The rate of sedimentation increased about 2.5 times, thus, reducing its useful life time equally. The study of longitudinal variation of limnological parameters showed that the reservoir is eutrophic and its water quality varies strongly according the different horizontal compartments. Finally, this study showed that the horizontal distribution of zooplankton and phytoplankton were associated with hydrodynamics and local pulses of nutrient and suspended solids.

Keywords: reservoir, bathymetry, siltation, volume loss, compartmentation model, horizontal variations, zooplankton, hydrodynamic model, residence time.

Sumário

Resumo.....	1
Abstract.....	2
Lista de Figuras.....	4
Lista de Tabelas.....	7
I-Introdução geral.....	9
II-Objetivos.....	11
III-Characterização geal da área de estudo.....	12
Referências Bibliográficas.....	15
Capítulo I. Nova batimetria, morfometria e diagnóstico de áreas de assoreamento em um reservatório tropical periurbano (Vargem das Flores - Minas Gerais, Brasil).....	17
Resumo	18
Abstract.....	19
Introdução.....	20
Material e Métodos.....	22
Resultados e Discussão.....	28
Conclusões.....	43
Recomendações.....	44
Referências Bibliográficas.....	45
Capítulo II. Limnologia espacial e compartimentação longitudinal de um reservatório tropical periurbano (Vargem das Flores - Minas Gerais, Brasil).....	48
Resumo.....	49
Abstract.....	50
Introdução.....	51
Material e Métodos.....	53
Resultados e Discussão.....	59
Conclusões.....	79
Referências Bibliográficas.....	80
Capítulo III. Distribuição horizontal de zooplâncton e a hidrodinâmica de um reservatório tropical periurbano (Vargem das Flores - Minas Gerais, Brasil).....	85
Resumo	86
Abstract.....	87
Introdução.....	88
Material e Métodos.....	92
Resultados e Discussão.....	98
Conclusões.....	112
Referências Bibliográficas.....	113
Conclusão Geral.....	118
Anexo I – Calibração dos Modelos Computacionais.....	121
Referências Bibliográficas.....	130

Lista de Figuras

Capítulo I. Nova batimetria, morfometria e diagnóstico de áreas de assoreamento em um reservatório tropical periurbano (Vargem das Flores - Minas Gerais, Brasil).

Figura 1. Localização do reservatório Vargem das Flores e seus tributários.....	22
Figura 2. Transectos realizados na coleta batimétrica de 08 de outubro de 2009. Em destaque, no retângulo, os pontos coletados pontualmente e pontos inferidos.....	24
Figura 3. Pontos controle coletados e suas respectivas coordenadas em UTM, coletadas no dia 30 de julho de 2010.....	24
Figura 4. Carta batimétrica do reservatório de Vargem das Flores referente à cota de 837,37m de 08 outubro de 2009. As setas indicam as áreas assoreadas do reservatório, sendo a seta indicada pelo número 1 a região com maior perda de volume por assoreamento.....	28
Figura 5. Curva hipsográfica do reservatório de Vargem das Flores (cota 837,7m).....	31
Figura 6. Curva hipsográfica da Lagoa da Pampulha (RESCK, 2007).....	32
Figura 7. Relação Cota-Volume do reservatório de Vargem das Flores para o ano de 1972 (volume original), 2000 e 2009.....	36
Figura 8. Área do reservatório destacando as regiões de ocorrência do intervalo 7,67-8,67 m, referente ao estrato entre as cotas 824-825m, de profundidade e entrada dos tributários. Contorno em vermelho delimitando as maiores áreas de ocorrência deste estrato, que representa a camada onde houve maior perda de volume da represa.....	39

Capítulo II. Limnologia espacial e compartimentação longitudinal de um reservatório tropical periurbano (Vargem das Flores - Minas Gerais, Brasil).

Figura 1. Localização do reservatório Vargem das Flores e seus tributários (coordenadas em sistema UTM).....	54
Figura 2. Localização das estações amostrais no reservatório Vargem das Flores, onde foram coletados os dados limnológicos. Mapa gerado através do programa <i>Surfer 10</i>	55
Figura 3. Perfil vertical de temperatura, oxigênio dissolvido (O.D.) e condutividade da represa Vargem das Flores, no ponto coleta 1, na coleta do dia 06 de outubro de 2010..	59
Figura 4. Carta temática da profundidade de Secchi (à direita) para o reservatório de Vargem das Flores, na campanha de 06 de outubro de 2010. Os números indicam as áreas de entrada dos tributários: 1. Ribeirão Betim, 2. Córrego Vargem do Sapê, 3. Córrego Olaria do Siqueira, 4. Córrego Água Suja, 5. Córrego do Laje, 6. Córrego Batatal e 7. Córrego Bela Vista. Carta batimétrica (à esquerda). As setas indicam as áreas assoreadas, sendo que a seta indicada pelo número 1 representa a área mais assoreada.....	61
Figura 5. Carta temática de turbidez do reservatório de Vargem das Flores referente à coleta limnológica realizada em 06.10.2010.....	62
Figura 6. Cartas temáticas do reservatório de Vargem das Flores para a campanha de 06 de outubro de 2010: Temperatura (acima, à esquerda); Oxigênio dissolvido (O.D.) (acima, à direita); pH (abaixo, à esquerda) e Sólidos em suspensão – fração orgânica (abaixo e à esquerda). Os números indicam as áreas de entrada dos tributários: 1. Ribeirão Betim, 2. Córrego Vargem do Sapê, 3. Córrego Olaria do Siqueira, 4. Córrego	

Água Suja, 5. Córrego do Laje, 6. Córrego Batatal e 7. Córrego Bela Vista.....	63
Figura 7. Cartas temáticas do reservatório de Vargem das Flores para a campanha de 06 de outubro de 2010: Sólidos totais (à esquerda) e Turbidez (à direita). Os números indicam as áreas de entrada dos tributários: 1. Ribeirão Betim, 2. Córrego Vargem do Sapê, 3. Córrego Olaria do Siqueira, 4. Córrego Água Suja, 5. Córrego do Laje, 6. Córrego Batatal e 7. Córrego Bela Vista.....	64
Figura 8. Localização das estações de monitoramento da COPASA em vermelho (Estações A, B, C e D). As marcações em vermelho simbolizam os 27 pontos em que foram realizadas a coleta limnológica de 2010.....	66
Figura 9. Cartas temáticas do reservatório de Vargem das Flores para a campanha de 06 de outubro de 2010: Nitrogênio total (acima, à esquerda); Amônia (acima, à direita); Nitrito (abaixo, à esquerda) e Nitrato (abaixo, à direita). Os números indicam as áreas de entrada dos tributários: 1. Ribeirão Betim, 2. Córrego Vargem do Sapê, 3. Córrego Olaria do Siqueira, 4. Córrego Água Suja, 5. Córrego do Laje, 6. Córrego Batatal e 7. Córrego Bela Vista.....	67
Figura 10. Carta temática de fósforo total do reservatório Vargem das Flores para a coleta de 06 de outubro de 2010.....	69
Figura 11. Distribuição probabilística de nível trófico de lagos tropicais em função da concentração de fósforo total (SALAS & MARTINO, 1991).....	71
Figura 12. Carta temática da distribuição da concentração de clorofila-a, da coleta do dia 06 de outubro de 2010.....	72
Figura 13. Análise de Componente Principal do reservatório Vargem das Flores comparando a correlação entre as variáveis limnológicas e as estações amostrais. As circunferências em vermelho indicam os grupos de estações mais correlacionadas positivamente.....	74
Figura 14. Comportamento das variáveis limnológicas ao longo do reservatório Vargem das Flores (à esquerda). À direita, mapa da represa Vargem das Flores com todas as estações amostrais utilizadas para coleta e em vermelho os transectos com as estações utilizadas para confecção do gráfico.....	75
Figura 15. Mapa da represa Vargem das Flores com todas as estações amostrais e em vermelho os transectos com as estações utilizadas para confecção do gráfico (acima) Comportamento das variáveis limnológicas a partir do tributário Bela Vista até a barragem, no reservatório Vargem das Flores (abaixo). Os números indicam as zonas: 1. Zona de rio, 2. Zona de transição e 3. Zona lacustre.....	76
Figura 16. Mapa da represa Vargem das Flores com todas as estações amostrais e em vermelho os transectos com as estações utilizadas para confecção do gráfico (acima). Comportamento das variáveis limnológicas a partir dos tributários Água Suja e Córrego do Laje até a barragem, no reservatório Vargem das Flores (abaixo). Os números indicam as zonas: 1. Zona de rio, 2. Zona de transição e 3. Zona lacustre.....	77
Figura 17. Proposição da compartimentação longitudinal do reservatório Vargem das Flores, com base na distribuição horizontal de variáveis físicas e químicas.....	78

Capítulo III. Distribuição horizontal de zooplâncton e a hidrodinâmica de um reservatório tropical periurbano (Vargem das Flores - Minas Gerais, Brasil).

Figura 1. Localização do reservatório Vargem das Flores e seus tributários: 1. Ribeirão Betim; 2. Córrego Vargem do Sapê; 3. Córrego Olaria do Siqueira; 4. Córrego Água Suja; 5. Córrego do Laje; 6. Córrego do Batatal; 7. Córrego Bela Vista; 8. Barragem.....	92
Figura 2. Pontos amostrados na coleta de 06 de outubro de 2010, no reservatório Vargem das Flores.....	93
Figura 3. Malha de elementos finitos quadráticos elementos do reservatório Vargem das Flores, confeccionada com 886 elementos, no <i>software</i> Argus ONE da Argus Holding Ltda.....	94
Figura 4. Fluxograma das etapas envolvidas na confecção da carta batimétrica (à esquerda) e na calibração do modelo hidrodinâmico.....	96
Figura 5. Carta batimétrica do reservatório de Vargem das Flores para a cota altimétrica de 837,7m.....	98
Figura 6. Carta de vento para o período de 30 dias de simulação do modelo hidrodinâmico (21 de setembro a 21 de outubro de 2010).....	99
Figura 7. Carta de vento para o período de 10 anos (03 de novembro de 2000 a 03 de novembro de 2010).....	100
Figura 8. Campo de velocidades das correntes de água determinado pelo modelo Hidrodinâmico para o instante de simulação 1.339.200s (a um metro de profundidade), referente às 12 horas do dia da coleta de 06.10.10, com ventos de direção 90° Azimute e velocidade de 2,6m.s ⁻¹ . Área destacada pelo retângulo vermelho em maior aumento, ilustrando o campo de velocidades de corrente na mesma direção do vento.....	102
Figura 9. Campo de velocidades determinado pelo modelo Hidrodinâmico para o instante de simulação 1.339.200s (10m de profundidade), referente às 12 horas do dia da coleta de 06.10.10, com ventos de direção 90° Azimute e velocidade de 2,6m.s ⁻¹ . Área destacada pelo retângulo vermelho em maior aumento, ilustrando o campo de velocidades de corrente.....	103
Figura 10. Tempos de residência do reservatório Vargem das Flores gerada pelo modelo 3D a profundidade de 1m.....	105
Figura 11. Tempos de residência do reservatório Vargem das Flores gerada pelo modelo 3D a profundidade de 1m.....	106
Figura 12. Carta temática da distribuição horizontal de clorofila-a no reservatório Vargem das Flores coletado na profundidade de 1m, no dia 06.10.2010.....	107
Figura 13. Campo de velocidades determinado pelo modelo Hidrodinâmico 3D à profundidade de 0,5m para o instante de simulação 1.339.200s (a 10m de profundidade), referente às 12 horas da data da coleta de 06.10.10, com ventos de direção 90° Azimute e velocidade de 2,6m.s ⁻¹ . Área destacada pelo retângulo vermelho em maior aumento, ilustrando o campo de velocidades de corrente de água na região da torre de captação de água.....	108
Figura 14. Carta temática da distribuição horizontal de zooplâncton por grandes grupos no reservatório Vargem das Flores coletado na profundidade de 1m, no dia 06.10.2010. As letras denominam as áreas de maior densidade de zooplâncton.....	109
Figura 15. Campo de vetores das correntes determinado pelo modelo Hidrodinâmico 3D para o instante de simulação referente às 12:00 horas do dia da coleta de 06.10.10, na área A. As setas em vermelho indicam a formação do vórtice.....	110

Lista de Tabelas

Capítulo I. Nova batimetria, morfometria e diagnóstico de áreas de assoreamento em um reservatório tropical periurbano (Vargem das Flores - Minas Gerais, Brasil).

Tabela 1. Relatório da calibração gerado pelo <i>software</i> Didger® versão 3.0 (Golden Software Inc	25
Tabela 2. Parâmetros morfométricos do Reservatório de Vargem das Flores para a cota 837,70m.....	29
Tabela 3. Parâmetros morfométricos da Lagoa Central e de reservatórios da RMBH de estudos realizados pelo LGAR.....	30
Figura 4. Áreas e volumes do reservatório Vargem das Flores na cota 837m e percentuais em relação ao ano de 1972, nos anos de levantamento batimétrico.....	33
Tabela 5. Valores de área e volume por cota nos anos em que foram realizados inventário batimétrico.....	34
Tabela 6. Volumes por estrato e suas perdas percentuais e anuais por intervalo de tempo.....	37
Tabela 7. Situação média de assoreamento na última década (2000-2009).....	40
Tabela 8. Situação inicial da capacidade de abastecimento de armazenamento (1972)....	41
Tabela 9. Situação média de assoreamento até as cotas características do reservatório (1972-2000).....	42
Tabela 10. Estimativas de tempo necessário para assoreamento de determinadas cotas com base em suas respectivos taxas de deposição de sedimento por ano.....	42

Capítulo II. Limnologia espacial e compartimentação longitudinal de um reservatório tropical periurbano (Vargem das Flores - Minas Gerais, Brasil).

Tabela 1. Coordenadas em UTM das estações de coleta amostradas no dia 06 de outubro de 2010.....	55
Tabela 2. Variáveis limnológicas medidas na sub-superfície das diferentes estações amostrais do reservatório Vargem das Flores, no dia 06.10.2010.....	59
Tabela 3. Série de dados de monitoramento da COPASA de Sólidos Totais em Suspensão entre os anos de 2003 a 2010 em quatro estações amostrais.....	65
Tabela 4. Comparação dos dados de monitoramento da COPASA (ano de 2010 e média dos 7 anos) e dos dados coletados no ano de 2010 pelo LGAR, por estação de coleta...	65
Tabela 5. Uso e ocupação do solo por sub bacia (situação em 1998.....	68
Tabela 6. Série de dados de nitrogênio total de monitoramento da COPASA, entre os anos de 2003 a 2010 em quatro estações amostrais.....	69

Anexo I - Calibração dos Modelos Computacionais

Tabela 1. Valores recomendados para a amplitude da rugosidade equivalente de fundo, ϵ , para uso no módulo 2DH do modelo FIST3D	121
Tabela 2. Opções de nós de terra para alimentação do modelo hidrodinâmico e suas características.....	126
Tabela 3. Vazão nodal e tipo de nó selecionado para cada tributário da represa Vargem	127

das Flores.....	
Tabela 4. Tipos de nós para nós de fronteira aberta.....	127
Tabela 5. Dados de vento de 30 dias do período (21de setembro a 21 de outubro de 2010) adicionados ao modelo hidrodinâmico.....	128

I – Introdução Geral

O consumo excessivo de água, aliado a elevadas densidades das populações humanas, têm gerado um alto crescimento na demanda por água doce em todo o mundo, seja para abastecimento, para agricultura irrigada ou mesmo para geração de energia. Para atender a essa demanda, no Brasil, inúmeras barragens foram construídas. Segundo Sperling (1999), as cinquenta maiores barragens do Brasil ocupam uma área total de aproximadamente 0,36% do território brasileiro. Os reservatórios são de extrema importância para a política de abastecimento do país, assim como para geração de energia elétrica. No entanto, a urbanização e a ocupação desordenada da bacia e do entorno desses ecossistemas artificiais têm gerado diversos problemas ambientais, uma vez que os sistemas aquáticos sofrem grande influência do uso da sua bacia de drenagem (WETZEL, 1983). PAERL et al. (2006) afirmam que é de extrema relevância entender como mudanças ecológicas induzidas pelo homem (por exemplo, declínios da biodiversidade, da qualidade da água e dos recursos pesqueiros) interagem e afetam a estrutura e funcionamento dos ecossistemas.

Sabe-se, que as concentrações de nutrientes em lagos e reservatórios flutuam naturalmente dependendo das características físicas, químicas e biológicas de suas bacias (COLE, 1983). A ideia de uma referência de nível trófico base, que ocorre naturalmente numa região, constitui uma base de muitos esforços para regular o fluxo de nutrientes (DODDS, 2006). A determinação destes parâmetros por medidas pontuais agrava ainda mais a dificuldade de se qualificar estes ambientes, uma vez que, na verdade, eles possuem variações horizontais e verticais, e que essas medidas pontuais nem sempre são representativas do estado trófico de todo o ecossistema aquático (GODLEWSKA & SWIERZOWSKI, 2003). Desta forma, a utilização de índices de classificação de estado trófico de lagos e reservatórios é uma ferramenta útil, quando utilizada de forma a avaliar uma área representativa do ambiente. No entanto, sozinho não é suficientemente efetivo no estabelecimento de estratégias de manejo.

Uma diferença fundamental entre os reservatórios e os lagos naturais diz respeito ao modelo de circulação da água, que pode explicar muito a respeito do padrão de sedimentação dentro destes corpos d'água. Segundo Thornton (1990), os reservatórios ocorrem ao longo de um "continuum" do fluxo do rio para a barragem com gradientes longitudinais resultando no estabelecimento de três zonas distintas

possuindo propriedades físicas, químicas e biológicas únicas. Estas zonas são: (a) A zona de rio, região mais rasa e estreita, onde deságuam os tributários, com fluxo relativamente alto, força advectiva suficiente para expressivo transporte de material e reduzida penetração de luz, conseqüentemente com limitada produtividade primária. (b) A zona de transição, com significativo processo de sedimentação, aumento da penetração de luz e da produtividade primária. (c) E a zona lacustre, mais próxima da barragem, onde a penetração de luz na coluna d'água é suficiente para promover a produtividade primária que pode sofrer potencial limitação por nutrientes. Deste modo, devido ao contínuo fluxo de água em direção à barragem e da variação do tempo de residência, os reservatórios podem ser considerados sistemas de transição entre rios e lagos, com mecanismos de funcionamento específicos, dependentes da bacia e dos usos do sistema, apresentando dinâmica própria, reflexo do seu tempo de residência, morfometria e profundidade (ANGELINI, 1999).

Segundo GEORGE & WINFIELD (2002), a circulação dos corpos d'água é um fator essencial na determinação da distribuição longitudinal de nutrientes e organismos como o fito e o zooplâncton. Assim, a modelagem hidrodinâmica é uma importante ferramenta para determinação da quantidade de movimento da água, resultando na definição dos padrões de correntes (ROSMAN, 1997). Tal movimento permite o transporte de substâncias ou mesmo de organismos como o fito e zooplâncton, sendo este dominado pela advecção (transporte forçado pelo sistema de correntes). Assim, pode-se afirmar que há uma enorme relação de dependência entre a simulação hidrodinâmica e o processo de transporte (CUNHA et al., 2002), tal como o Lagrangeano . Este último descreve o movimento observando a trajetória da partícula que se move. Deste modo, a circulação da água, visualizado através de simulações hidrodinâmicas, geradas por modelos computacionais, permite a compreensão de uma série de fenômenos, dentre os quais, a distribuição dos organismos planctônicos. Esse conhecimento é fundamental para determinação de estratégias de manejo, tanto no que se refere à contribuição para avaliação de impactos ambientais, como na identificação e gerenciamento de programas de monitoramento ambiental.

II – Objetivos

Considerando o exposto, são propostos os seguintes objetivos para o presente estudo:

- 1 – Realizar um estudo batimétrico e morfométrico do reservatório de Vargem das Flores, comparando os dados atuais com estudos anteriores;
- 2 – Identificar os focos de assoreamento e realizar predições a respeito do tempo de vida útil do corpo d'água.
- 3 – Caracterizar o reservatório de Vargem das Flores, quanto a limnologia, com base nas variáveis físicas e químicas e classificação do estado trófico a partir dos dados obtidos.
- 4 – Propor um novo modelo de compartimentação longitudinal do reservatório.
- 5 – Verificar se a hidrodinâmica interfere na distribuição de fitoplâncton e zooplâncton no reservatório de Vargem das Flores.
- 6 – Gerar dados base para futuros planos de manejo e recuperação do reservatório de Vargem das Flores.

III- Estrutura da Dissertação

O presente trabalho está dividido em três capítulos, sendo estes:

Capítulo I- Nova batimetria, morfometria e diagnóstico de áreas de assoreamento em um reservatório tropical periurbano: Vargem das Flores - Minas Gerais, Brasil.

Capítulo II- Limnologia espacial e compartimentação longitudinal de um reservatório tropical periurbano: Vargem das Flores - Minas Gerais, Brasil.

Capítulo III- Distribuição horizontal de zooplâncton e a hidrodinâmica de um reservatório tropical periurbano: Vargem das Flores - Minas Gerais, Brasil.

IV – Caracterização geral da área de estudo

O reservatório de Vargem das Flores (**Figura 1**) é um importante reservatório de abastecimento de água para os municípios de Contagem (município que corresponde a 87% da área de ocupação da represa), Betim (corresponde aos 13% restantes da área de ocupação) e Belo Horizonte. O reservatório é um contribuinte para a sub-bacia do Paraopeba que, por sua vez, pertence à Bacia Federal do Rio São Francisco (LOPES, 2009). O rio Paraopeba é uma das mais importantes bacias de Minas Gerais. Além de fornecer água para a Região Metropolitana de Belo Horizonte (RMBH), oferece, também, alimentos e insumos para a construção civil. Percorre 537 km da sua nascente, no município de Cristiano Ottoni, até a sua foz, em Felixlândia, no lago de Três Marias (SILVA, 2010).

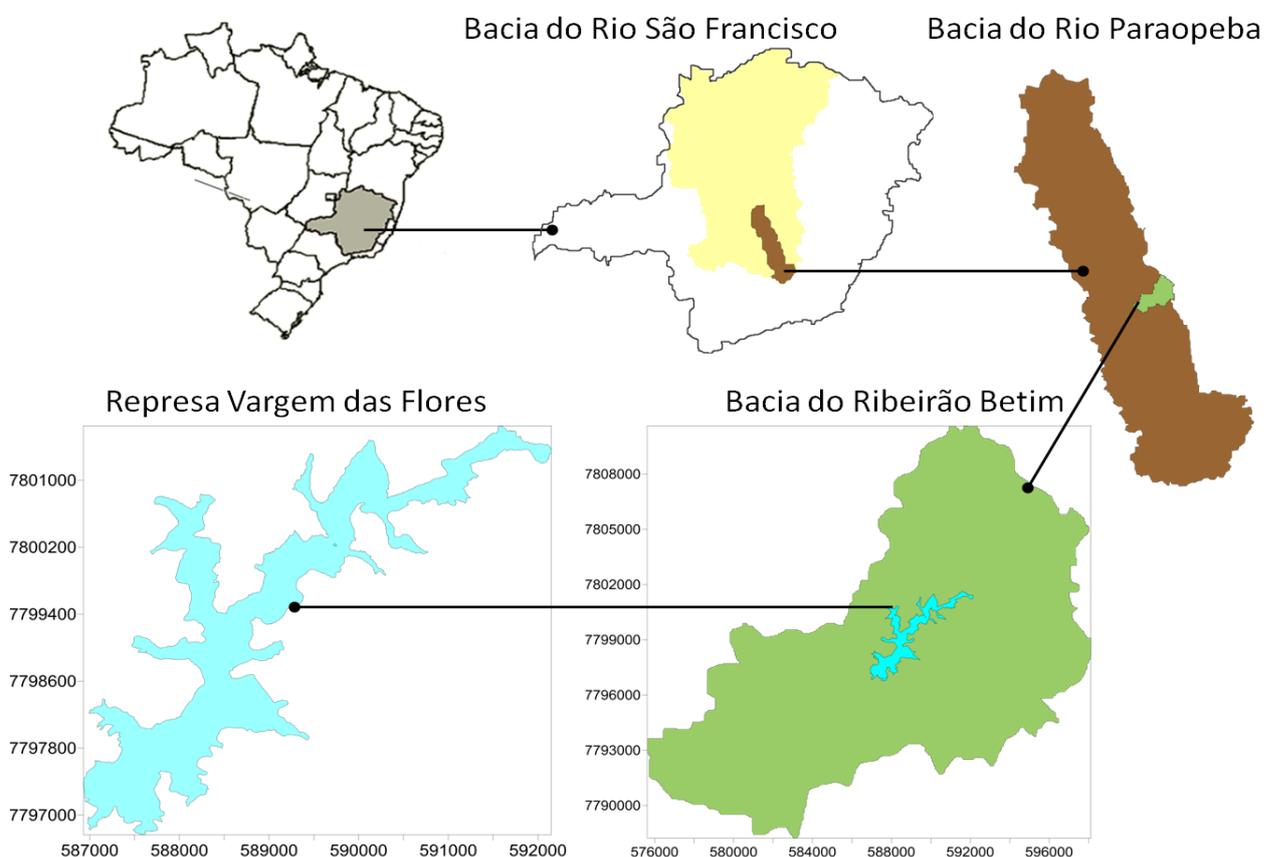


Figura 1. Localização da represa Vargem das Flores, sub-bacia do Ribeirão Betim, Bacia do Paraopeba e área da Bacia do Rio São Francisco contida no estado de Minas Gerais.

Inaugurado no ano de 1972, o reservatório de Vargem das Flores foi construído inicialmente para fins de abastecimento, sobretudo como resposta à grave crise de desabastecimento de água que atingia a região, principalmente por parte da cidade de Belo Horizonte (SOUZA, 2003). Segundo o Plano Diretor de 1993, no decorrer da

década de 80 e 90, a ocupação humana da região a montante da represa cresceu a uma taxa de quase 25% ao ano, devido ao processo de ocupação desordenada, incompatíveis à preservação e recuperação ambiental. Deste modo, a região caracteriza-se historicamente por acelerado processo de urbanização. Como agravante, menciona-se o fato de que o sistema de esgotamento sanitário é deficitário, atendendo apenas parte da população. Além do lançamento de esgotos nos tributários, o desmatamento, as atividades agrícolas e o acúmulo de lixo no leito dos rios e córregos efluentes contribuem para a degradação da bacia de drenagem (SOUZA, 2003).

A água acumulada no reservatório Vargem das Flores tem a sua origem nos principais tributários: córrego Água Suja, ribeirão Betim, córrego Vargem do Sapê, córrego Bela Vista e córrego Batatal, sendo que, com exceção deste último, todos os outros recebem contribuição de esgotos (LOPES, 2009). O principal tributário contribuinte para a represa de Vargem das Flores é o ribeirão Betim. Este apresenta Índice de Qualidade das Águas – IQA Ruim, tendo a poluição origem em diversas fontes, associadas ao tipo de uso e ocupação do solo, dentre as quais se destacam: efluentes domésticos, efluentes industriais, carga difusa urbana e agrosilvopastoril, mineração, natural e acidental (SILVA, 2010).

A beleza cênica, as características favoráveis à prática de esportes náuticos e os atrativos das áreas marginais da lagoa, associados à sua localização, culminaram na consolidação dos usos múltiplos do reservatório verificados atualmente. Desde seu enchimento, além de seu uso como fonte de água para o abastecimento público, são crescentes os usos para recreação, irrigação, controle de cheias e recepção de águas residuárias diversas (GOMES, 2008). Como Vargem das Flores não possui área de proteção específica no seu entorno, está constantemente sob a ação de fatores negativos à conservação da qualidade de suas águas, já que todos os tipos de atividades são executados na sua área de contribuição direta bem como em suas águas (VIANA, 2009).

Segundo Viana (2009), em estudo realizado em seis reservatórios utilizados para abastecimento público no estado de Minas Gerais (Reservatório de Vargem das Flores, Reservatório de Serra Azul, Reservatório do Rio Manso, Reservatório do Juramento, Reservatório do Ribeirão e Reservatório do Soberbo), o reservatório mais ameaçado pelas ações antrópicas é o de Vargem das Flores, cuja bacia contribuinte apresenta uma urbanização descontrolada e de grande porte.

O reservatório de Vargem das Flores apresenta um histórico de ocorrências de florações de cianobactérias tóxicas (GOMES, 2008) e um aumento da área assoreada, com conseqüente perda de volume. Algumas medidas de recuperação da bacia de drenagem vêm sendo tomadas nos últimos anos. Dentre elas destaca-se a construção da estação de tratamento de esgotos de Nova Contagem (montante da represa), com reversão do lançamento do efluente tratado para o córrego do Onça no município de Esmeraldas, aumento da rede coletora de esgotos, retirada do lixo da orla, reflorestamento e programas de educação ambiental para conscientização dos usuários da represa (Prefeitura Municipal de Contagem, 2008). No entanto, a situação do reservatório ainda é crítica, quanto à qualidade de suas águas e ao seu tempo de vida útil.

O clima da região apresenta-se como tropical/mesotérmico semi-úmido, com sazonalidade regularizada e definida e radiação solar forte e intensa (média anual de 2600 h/ano). As duas estações bem definidas compreendem o período chuvoso e quente de outubro a março e seco e frio de abril a setembro, sendo que abril, maio, setembro e outubro podem ser considerados meses de transição. A precipitação média anual é de 1500 mm, com umidade relativa do ar variando de 65% (agosto e setembro) a 80% (dezembro). No verão (período chuvoso) a temperatura máxima média é de 28°C e temperatura mínima média de 17°C. Já no inverno (seco) as menores temperaturas são encontradas em junho e julho, com temperatura máxima média de 24°C e mínima média de 11°C (SOUZA, 2003).

Referências Bibliográficas

ANGELINI, R. 1999. Ecosistemas e modelagem ecológica. *In*: POMPÊO, M.L.M. (Ed.).1999. *Perspectivas da limnologia no Brasil*. São Luís: Gráfica e Editora União. 191p.

COLE, G.A. 1983. *Textbook of limnology*. 3ª Edição. Illinois: Waveland Press. Prospect Heights. 412p.

CUNHA, C.L.N.; MONTEIRO, T.C. & ROSMAN, P.C.C. 2002. *Modelagem bidimensional de transporte de escalares não-conservativos em corpos d'água rasos*. Revista Brasileira de Recursos Hídricos. 7(2): 120-129.

DODDS, W.K. 2002. *Freshwater ecology: concepts and environmental applications*. San Diego: Academic Press. 569p.

GEORGE, D.G. & WINFIELD, I.J. 2002. *Factors influencing the spatial distribution of zooplankton and fish in Loch Ness, UK*. Freshwater Biology. 43: 557-570.

GODLEWSKA, M. & SWIERZOWSKI, A. 2003. *Hydroacoustical parameters of fish in reservoirs with contrasting levels of eutrophication*. Aquatic Living Resources. 16(3): 167-173.

GOMES, L.N.L. 2008. *Estudo da associação entre parâmetros bióticos e abióticos e a ocorrência de florações de cianobactérias no Reservatório de Vargem das Flores – Minas Gerais*. Tese (Doutorado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

LOPES, J.E. & SANTOS, R.C.P. 2002. *Capacidade de reservatórios*. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Disponível em: <http://www.fcth.br/public/cursos/phd5706/phd5706_Reservatorios.pdf>. Acesso em: 03 dez. 2011.

MORAES, D.S.L. & JORDÃO, B.Q. 2002. *Degradação de recursos hídricos e seus efeitos sobre a saúde humana*. Revista Saúde Pública. 36(3): 370-374.

PAERL, H.W.; VALDES, L.M.; PEIERLS, B.L.; ADOLF, J.E. & HARDING JUNIOR, L.W. 2006. *Anthropogenic and climatic influences on the eutrophication of large estuarine ecosystems*. *Limnology and Oceanography*, 51: 448-462.

PLANO DIRETOR. 1993. *A estruturação urbana de Contagem-Evolução do quadro atual*.

PREFEITURA MUNICIPAL DE CONTAGEM/MG. Disponível em <<http://www.contagem.mg.gov.br/>>. Acesso em 06 de fevereiro de 2011.

SILVA, D.A.A.C. 2010. *Estudo da análise temporal da ocupação urbana no rio Betim/MG, utilizando imagens orbitais do Satélite Landsat TM5 – 1997 a 2009*. Monografia (Especialista em Geoprocessamento.) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

SOUZA, A.D. 2003. *Variações espaciais e temporais de parâmetros de qualidade de água em um reservatório tropical (Represa de Vargem das Flores – Contagem – MG) e suas implicações com aspectos limnológicos*. Tese (Doutorado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

SPERLING, E.V. 1999. *Morfologia e lagos e represas*. Belo Horizonte: DESA/UFMG. 137p.

TUNDISI, J.G. & MATSUMURA-TUNDISI, T. 2008. *Limnologia*. São Paulo: Oficina de Textos. 631p.

THORNTON, K.W. 1990. Perspectives on reservoir limnology. *In*: THORNTON, K.W.; KIMMEL, B.L. & PAYNE, F.E (Ed.). *Reservoir limnology: Ecological perspectives*. Somerset: John Wiley & Sons, Inc. 246p.

VIANA, T. 2009. *Estudo do conteúdo de calor e suas influências sobre variáveis limnológicas em reservatórios de abastecimento de água*. Tese (Doutorado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

WETZEL, R.G. 1983. *Limnology*. Philadelphia: Saunders Company. 767p.

Capítulo I

Nova batimetria, morfometria e diagnóstico de áreas de assoreamento em um reservatório tropical periurbano (Vargem das Flores - Minas Gerais, Brasil).

Resumo

O presente estudo tem como objetivos estimar as principais características morfométricas do reservatório Vargem das Flores, discutir suas implicações na limnologia e alterações ao longo dos anos, além de gerar um diagnóstico do grau de assoreamento, através da batimetria da represa. Para tanto foi realizada a determinação das medidas de profundidade da represa, através de um novo inventário batimétrico. A coleta dos dados batimétricos foi realizada por meio de um ecobatímetro SonarLite (Ohmex Ltda.) acoplado a um D-GPS GTR-A[®] (TechGeo Ltda). O pós-processamento foi realizado no laboratório. Os dados foram descarregados no computador, utilizando o programa Util[®] e exportados em seguida para pós-correção. A pós-correção dos dados foi realizada no programa Ezsuv versão 2.2 da VIASAT[®] utilizando como estação base os dados da estação de Belo Horizonte da RBMC (Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS) do IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística) via serviço FTP. A sincronização dos dados do D-GPS (pós-processadas) com os dados da sonda ecobatímetro foi feita utilizando um aplicativo na linguagem PASCAL, desenvolvido pelo Laboratório de Gestão Ambiental de Reservatórios (LGAR) – UFMG. O sistema de projeção e o *datum* utilizados foram, respectivamente, o Universal Transversal de Mercator (UTM) e o World Geodetic System 1984 (WGS-84). No *software* Digger[®] 3.0 (Golden Software Inc.) uma imagem de boa resolução do Google Earth Pro[®] (Google Inc.) foi georreferenciada e o contorno do reservatório digitalizado e exportado para o Surfer[®] 10.0 (Golden Software Inc.), onde foram estimados os volumes total e por estrato, bem como a área. As taxas de perda de volume foram calculadas pela diferença de volume entre os anos, dividido pelo número de anos, segundo a metodologia de Carvalho *et al* (2000). As áreas consideradas assoreadas foram classificadas com base em imagens de satélite e com profundidades inferiores a 0,5m de profundidade. Com base nas diferenças entre as taxas médias de deposição de sedimento, entre os anos de 2000 e 2009, é possível fazer a caracterização de dois períodos do reservatório. No primeiro, de 1972 a 2000, ocorreram profundas modificações na estrutura ocupacional da bacia hidrográfica, gerando um aumento no aporte de sedimentos. No segundo momento, última década, o reservatório experimentou um incremento na taxa de assoreamento, recebendo em apenas nove anos praticamente a mesma quantidade de sedimentos que o reservatório recebeu nos seus 28 primeiros anos de operação, 4.045.318 m³. A taxa de deposição de sedimentos cresceu cerca de 2,5 vezes, reduzindo assim, nessa mesma taxa sua vida útil.

Abstract

This study aims to estimate the main morphometric characteristics of the reservoir Vargem das Flores, discuss their implications in limnology and changes over the years, and generate a diagnosis of the degree of siltation through the bathymetry. A new bathymetric inventory of the dam was done to determine its depth measurements. The bathymetric data collection was performed by an echo sounder SonarLite (Ohmex, which Ltd.) coupled with a D-GPS GTR-A[®] (TechGeo Ltd.). The post-processing was performed in the laboratory, after the data had been downloaded to the computer using the program Util[®] and then was exported for synchronization. The post-processing of data was performed using the 2.2 version of Ezsurv VIASAT[®] and using the data from base stations of Belo Horizonte RBMC (Brazilian Network for Continuous Monitoring Systems GNSS) of IBGE (Brazilian Institute of Geography and Statistics) via FTP service. The synchronization of data from D-GPS (post-processed) with data from the echo sounder probe was made using an application in PASCAL language, developed by LGAR (Laboratory of Environmental Management Reservoir) - UFMG. The coordinate system and datum used were, respectively, Universa Transverse Mercator (UTM) and the World Geodetic System 1984 (WGS-84). In Digger[®] 3.0 software (Golden Software Inc.) one image of good resolution of Google Earth Pro[®] (Google Inc.) was georeferenced and the reservoir boundary digitized and exported to Surfer[®] 10.0 (Golden Software Inc.). The total volume, volume by stratum and the area were estimated in the Surfer 10 software. The volume loss rates were calculated by the difference in volume between the years divided by the number of years according to the method of Carvalho et al (2000). The silted areas considered were classified based on satellite images and with depths less than 0.5 m deep. Based on the differences between the average rates of sediment deposition, between the years 1972 and 2009, it was possible to characterize two periods of the reservoir. In the first period, from 1972 to 2000, there were great changes in the occupational structure of the basin, creating an increase in sediment delivery. In the second stage, the last decade, the reservoir had experienced an increase in sedimentation rate, accumulating in just nine years about the same amount of sediment that the reservoir received in its first 28 years of operation, 4,045,318 m³. The rate of sedimentation increased about 2.5 times, thus reducing its useful life time equally.

Introdução

O estudo da morfologia dos corpos d'água é de fundamental importância para a compreensão do comportamento do ambiente aquático, uma vez que esta exerce uma marcante influência em todas as características limnológicas, ou seja, a forma do lago ou represa condiciona fortemente a interação dos componentes físicos, químicos e biológicos do sistema (SPERLING, 1999). A morfologia é melhor descrita por uma detalhada carta batimétrica, necessária para avaliação de todos os principais parâmetros morfométricos (WETZEL, 1983). A determinação das medidas de profundidade dos ambientes límnicos, expressas cartograficamente em mapas batimétricos, constitui um importante subsídio para a realização de estudos sobre evolução de assoreamento, qualidade da água e distribuição de peixes (RESCK, 2007). Assim, a disponibilidade de um inventário batimétrico é o "passo chave" no estabelecimento de um plano de manejo sustentável para a maioria dos sistemas aquáticos (BEZERRA-NETO & PINTO-COELHO, 2008).

Barramentos de origem antrópica apresentam uma série de características que os distinguem dos lagos naturais, principalmente no que diz respeito às diferenças morfométricas destes corpos d'água. A idade e conseqüentemente o tempo de vida das represas são muito inferiores quando comparadas aos ambientes naturais. Segundo Tundisi & Matsumura Tundisi (2008), o tempo de retenção e características morfométricas e morfológicas da bacia e da represa influenciam no tempo médio de vida dos reservatórios. Os lagos apresentam ainda morfometria mais regular com suas máximas profundidades localizadas geralmente próxima ao centro. Segundo Dodds (2002), os reservatórios construídos nas bacias de drenagem dos rios e córregos apresentam o formato de cada braço se movendo para dentro de um canal de rio, gerando desta maneira um formato dendrítico. Este formato normalmente propicia baixas profundidades próximas aos deltas dos rios que os alimentam. Tais características, aliadas as modificações decorrentes do represamento das águas e transformação do ambiente lótico em outro lântico, promovem inúmeros impactos ambientais na bacia de drenagem. Em relação ao aspecto sedimentológico, as barragens geram uma redução das velocidades da corrente provocando a deposição gradual dos sedimentos carregados pelo curso d'água, o que ocasiona o assoreamento e diminui gradativamente a capacidade de armazenamento do reservatório, podendo vir a inviabilizar a operação do aproveitamento, além de ocasionar problemas ambientais de diversas naturezas (CARVALHO et al, 2000).

Apesar dos inúmeros impactos gerados pela sua construção, os reservatórios têm importância fundamental para o desenvolvimento social e econômico de uma região, contribuindo não só diretamente, com abastecimento e produção de energia, mas também “abrindo portas” para melhores alternativas de desenvolvimento local (TUNDISI, 2005). Assim, o represamento pode ser destinado a inúmeras finalidades, como obtenção de um volume adequado ao abastecimento de água, irrigação, alimentação (agricultura, pesca e piscicultura) altura de queda d’água suficiente para a geração de energia, recreação, navegação, dentre outras. No entanto, as represas construídas com a finalidade de abastecimento doméstico e industrial necessitam de maiores cuidados para preservação da qualidade do ambiente cuja degradação implica em uma forte elevação dos custos para tratamento da água, devendo dessa forma serem protegidas do acesso indiscriminado da população. Esses cuidados devem ser estendidos a toda a bacia de contribuição (SPERLING, 1999).

A represa de Vargem das Flores foi inaugurada no ano de 1972, para fins de abastecimento público, mas vem sendo utilizada, hoje, para inúmeras atividades. Ela está inserida entre os municípios de Betim e Contagem, sendo que este último detém a maior área da represa. A bacia hidrográfica de Vargem das Flores contempla 55% da área do município de Contagem, que recebe o maior volume de água, seguidos por Betim e Belo Horizonte (responsável por 15% do volume de fornecimento). A água tratada que é captada nesse reservatório abastece duas cidades dentre as três mais populosas do estado de Minas Gerais (Belo Horizonte e Contagem) (IBGE, 2010). Com base nessas particularidades, há de se concluir que o perfil apresentado pelo reservatório, constitui-se em um ponto focal de atração de grande elemento catalisador do processo de ocupação da bacia (SOUZA, 2003). Segundo Souza (2003), nas décadas de 80 e 90, a região do Retiro, a montante da represa, cresceu a uma taxa de quase 25% ao ano. Em consequência destas e outras características do seu entorno, o reservatório de Vargem das Flores vem sofrendo inúmeros impactos ambientais, sendo um dos mais preocupantes a perda de volume em decorrência do assoreamento. Nesse contexto, o presente estudo tem como objetivo estimar as principais características morfométricas do reservatório Vargem das Flores, discutir suas implicações na limnologia deste e gerar um diagnóstico do grau de assoreamento, através da comparação dos inventários batimétricos de 1972, 2000 e 2009. Além de oferecer um prognóstico acerca do tempo restante de vida útil do reservatório, considerando, sobretudo, sua função primordial como fonte de abastecimento público de água.

Material e Métodos

Área de Estudo

O reservatório de Vargem das Flores (coordenadas UTM WGS 84 (Coordenadas UTM WGS 84 23 K 587407,5 m E; 7797318,8 m S próximo a sua barragem) (**Figura 1**), inserido na bacia do Paraopeba e sub-bacia do ribeirão Betim, seu principal tributário, foi construído inicialmente com a finalidade de abastecimento da região metropolitana de Belo Horizonte. A represa está inserida entre os municípios de

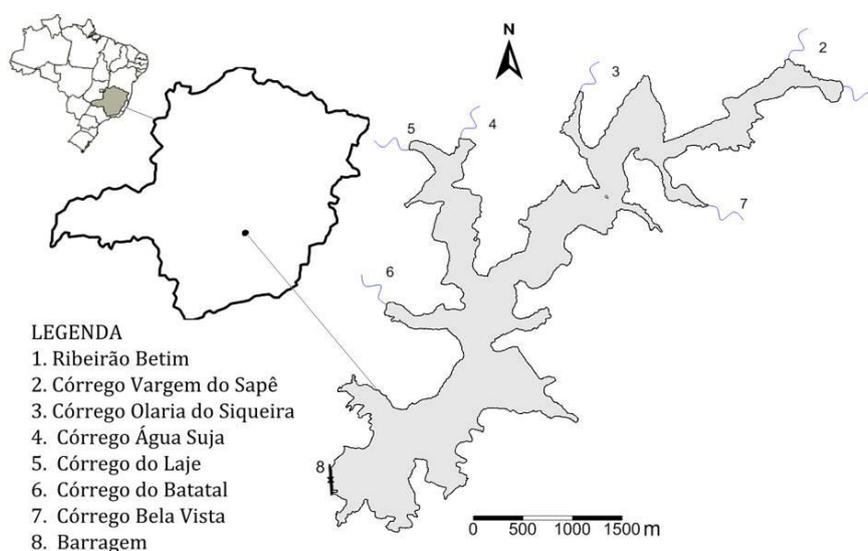


Figura 1. Localização do reservatório Vargem das Flores e seus tributários.

Betim (13%) e Contagem (87%) (GOMES, 2008).

O clima da região apresenta-se como tropical/mesotérmico semi-úmido, com duas estações bem definidas e precipitação média anual é de 1500 mm, com verão chuvoso (temperatura máxima média de 28° e mínima de 17°C) e inverno seco, com as menores temperaturas encontradas em junho e julho com médias máximas de 24° e mínima de 11° (SOUZA, 2003).

A região caracteriza-se historicamente por acelerado processo de urbanização e sistema de esgotamento sanitário deficitário atendendo apenas parte da população. Segundo Souza (2003) além do lançamento de esgotos nos tributários, o desmatamento, atividades agrícolas e o acúmulo de lixo no leito dos rios

contribuíram para degradação da bacia, sendo as regiões à montante dos tributários do ribeirão Betim e do córrego Água Suja as mais afetadas.

Algumas medidas de recuperação da bacia de drenagem vêm sendo tomadas nos últimos anos, dentre elas destaca-se a construção da estação de tratamento de esgotos de Nova Contagem (montante da represa), com reversão do lançamento do efluente tratado para o córrego do Onça no município de Esmeraldas, aumento da rede coletora de esgotos e retirada do lixo da orla, reflorestamento e programas de educação ambiental para conscientização dos usuários da represa (GOMES, 2008).

Coleta de Dados

Para coleta dos dados batimétricos da represa de Vargem das Flores, realizou-se uma campanha no fim do período seco (08 de outubro do ano de 2009), utilizando um ecobatímetro SonarLite (Ohmex Ltda.) acoplado à um D-GPS GTR-A[®] (TechGeo Ltda).

O transdutor foi submerso à profundidade 0,5m, preso à lateral da embarcação por uma haste, e percorreu, a uma velocidade constante de aproximadamente 8km.h⁻¹, um trajeto em zigue-zague por toda a área da represa. Para navegação, foi utilizado um GPS convencional (Garmin 76), a fim de se determinar a trajetória da embarcação de forma a cobrir uma maior área do reservatório (**Figura 2**). A cota apresentada pelo reservatório no dia da coleta foi de 870,70 m (fornecida pela COPASA). Na área onde a navegação com motor não foi possível, medidas pontuais de profundidade foram tomadas para composição dos dados batimétricos.

O pós-processamento foi realizado no laboratório, após os dados terem sido descarregados no computador utilizando o programa Util[®]. Os dados foram exportados em seguida para pós-correção. O pós-processamento das coordenadas geográficas foi realizado no programa *Ezsurv* versão 2.2 da VIASAT[®] utilizando como estação base os dados das estação de Belo Horizonte da RBMC (Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS) do IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística) via serviço FTP. O sistema de coordenadas e o *datum* utilizados foram, respectivamente, a Universa Transversa de Mercator (UTM) e o World Geodetic System 1984 (WGS-84).

A sincronização dos dados do D-GPS (pós-processadas) com os dados da sonda ecobatímetro foi feita utilizando um aplicativo na linguagem PASCAL, desenvolvido pelo LGAR (Laboratório de Gestão Ambiental de Reservatórios) – UFMG.

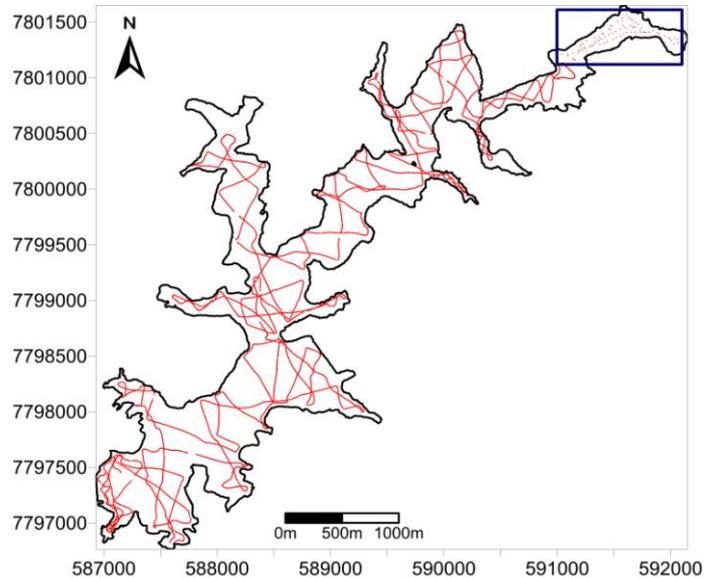


Figura 2. Transectos realizados na coleta batimétrica de 08 de outubro de 2009. Em destaque, no retângulo, os pontos coletados pontualmente e pontos inferidos.

Para obtenção de uma carta batimétrica com precisão submétrica, oito pontos controle (**Figura 3**) foram coletados com D-GPS GTR-A® (TechGeo Ltda.) em regiões do entorno da lagoa. Estes pontos foram pós-processados, da mesma forma que a batimetria, e posteriormente utilizados para georreferenciar a imagem para geração do *shape* do reservatório.

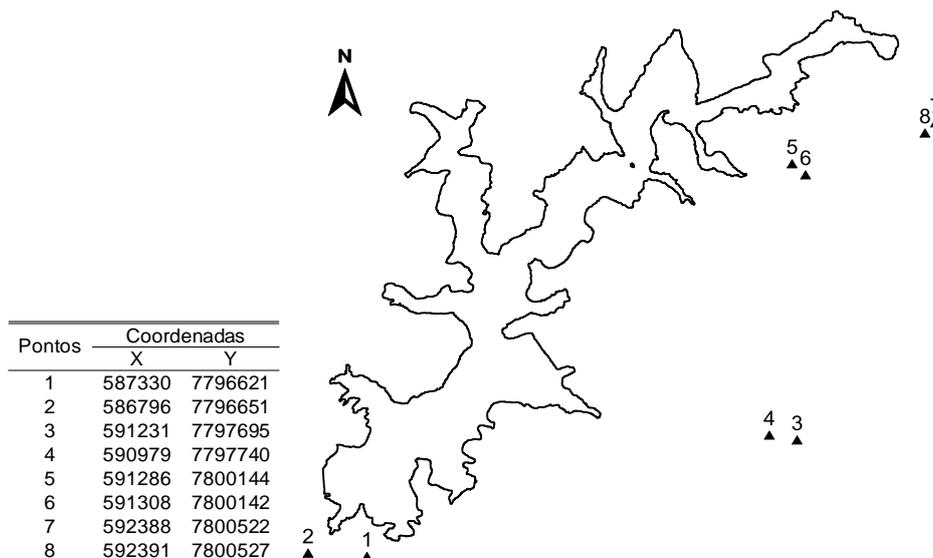


Figura 3. Pontos controle coletados e suas respectivas coordenadas em UTM, coletadas no dia 30 de julho de 2010.

Confecção da Carta Batimétrica e Cálculo dos Parâmetros Morfométricos

Inicialmente, no *software* Didger[®] versão 3.0 (Golden Software Inc.), uma imagem de alta resolução (próxima da cota altimétrica¹ encontrada no dia da coleta) do programa Google Earth Pro[®] (Google Inc.) foi calibrada com os pontos controle coletados no entorno do reservatório. No relatório gerado pelo próprio programa, os pontos controle que apresentaram maiores erros foram eliminados um a um, até que o erro atingiu valor zero (**Tabela 1**), restando apenas quatro pontos. Ainda no Didger[®] 3.0, a margem da represa foi contornada, sendo digitalizada e exportada para o *software* Surfer[®] 10 (Golden Software Inc.), para geração do arquivo *Blanking* (.bln), que permite sua visualização no programa Surfer sob a forma de imagem ou de planilha de coordenadas.

Tabela 1. Relatório da calibração gerado pelo *software* Didger[®] versão 3.0 (Golden Software Inc.).

Ponto	Coordenada X	Coordenada Y	Erro
PTO 2	586796	7796651	0
PTO 3	591231	7797695	0
PTO 5	591286	7800144	0
PTO 7	592388	7800522	0

Após a exportação do contorno para o *software* Surfer[®] 10, foi construída uma tabela com os dados de coordenadas e profundidade coletados em campo. Nesta tabela foram também inseridas as coordenadas do contorno do reservatório e, a elas, atribuídas valores de profundidade iguais a zero. Pela reticulação (*Gridding*), método de estimação de modelagem de superfícies, gerou-se um arquivo *Grid*. Segundo Landim (2000), este arquivo estabelece uma grade regular sobre a área estudada e calcula os valores nos nós da mesma, com base nos valores dos pontos já amostrados, sendo, portanto, um método de estimação indireto. Para se estimar os valores de profundidade dos pontos não amostrados, o arquivo *Grid* foi ajustado através do método de interpolação de dados Krigagem (*Kriging*). Este método de interpolação foi utilizado por ter uma boa precisão geral e fidelidade aos dados originais quando comparado a outros métodos (LANDIM, 2000) e por ser bastante utilizado na área de recursos hídricos (SANTOS & LUCENA, 2005).

¹ A imagem utilizada refere-se à data de 14 de junho de 2009, na qual a cota do reservatório (838,60m) apresentava-se superior à cota da data da coleta batimétrica (837,70m).

A partir dos dados batimétricos, em sub-rotinas do Surfer 10 foram obtidos os valores de profundidade máxima, volume, perímetro, área total da superfície (A) e a área entre as camadas de profundidade. O volume (V), gerado por três diferentes métodos (regra trapezoidal, regra de Simpson e regra de Simpson 3/8), foi estimado através da média aritmética destas três metodologias. As medidas de Largura máxima (L_{max}) (m) e Comprimento máximo (C_{max}) (m) foram também determinadas no *software* Surfer 10, através da ferramenta “Draw” e visualização das medidas dos objetos criados. As medidas de área entre as camadas foram obtidas a cada metro de profundidade, assim como o volume, para produção das curvas hipsográficas cota-profundidade-área, segundo metodologia de Cole (1983).

Os parâmetros morfométricos secundários estimados, seguindo metodologia de Sperling (1999), foram: Profundidade média (m) (Z_{med}) (**Equação 1**); Profundidade relativa (%) (Z_R) (**Equação 2**), Índice de Desenvolvimento do Perímetro (D_P) (**Equação 3**), Índice de Desenvolvimento do volume (D_V) (**Equação 4**) e Fator de Envolvimento (F_e) (**Equação 5**).

$$Z_{med} = \frac{V}{A} \quad \text{[Equação 1]}$$

$$Z_R = \frac{88,6 \times Z_{max}}{\sqrt{A}} \quad \text{[Equação 2]}$$

$$D_P = 0,28 \times \frac{\text{Perímetro}}{\sqrt{A}} \quad \text{[Equação 3]}$$

$$D_V = \frac{3 \times Z_{med}}{Z_{max}} \quad \text{[Equação 4]}$$

$$F_e = \frac{A_{bacia}}{A_{repressa}} \quad \text{[Equação 5]}$$

Determinação de áreas assoreadas

Para determinação das áreas assoreadas, foram estimadas as diferenças entre os volumes e áreas de levantamentos batimétricos anteriores (1972 e 2000), dados secundários, em relação ao levantamento realizado 2009. As perdas de volume e área foram então convertidas em deposição de sedimento. Estes dados foram retirados do relatório da HDC (HYDROLOGIC DATA COLLECTION ENGENHARIA

S/C Ltda.) resultante de um levantamento batimétrico encomendado pela COPASA, no ano de 2000.

Imagens de satélite (Google Earth Pro) foram também analisadas e visualmente identificadas e classificadas como possíveis locais de assoreamento. Estas áreas identificadas visualmente foram relacionadas com as profundidades encontradas na carta batimétrica. Das possíveis regiões classificadas como locais de assoreamento, as que apresentavam, pela batimetria, profundidade inferior a 0,5m foram então classificadas e definidas como assoreadas.

O cálculo da taxa de sedimentação média por ano foi estimado subtraindo o valor de volume atual pelo de data anterior e dividido pelo tempo. O tempo de vida útil foi calculado segundo Carvalho et al (2000) (**Equação 6**).

$$T = \frac{V}{S} \quad \text{[Equação 6]}$$

Onde:

T= tempo de assoreamento de um determinado volume (anos)

V = Volume do reservatório, total ou volume morto (m³)

S= volume de sedimento retido no reservatório (m³/ano).

Resultados e Discussão

Caracterização Morfométrica (2009)

Foram coletados 18.330 pontos com precisão submétrica, durante o inventário batimétrico, cobrindo quase toda a área do reservatório (**Figura 2**). Na área mais ao norte, não coberta com pontos, não foi utilizado o ecobatímetro, devido a sua baixa profundidade e dificuldade de navegação. Nela, foram tomadas medidas pontuais (manuais) e realizadas inferências. A carta batimétrica gerada para a data da coleta, outubro de 2009, está representada pela **Figura 4**.

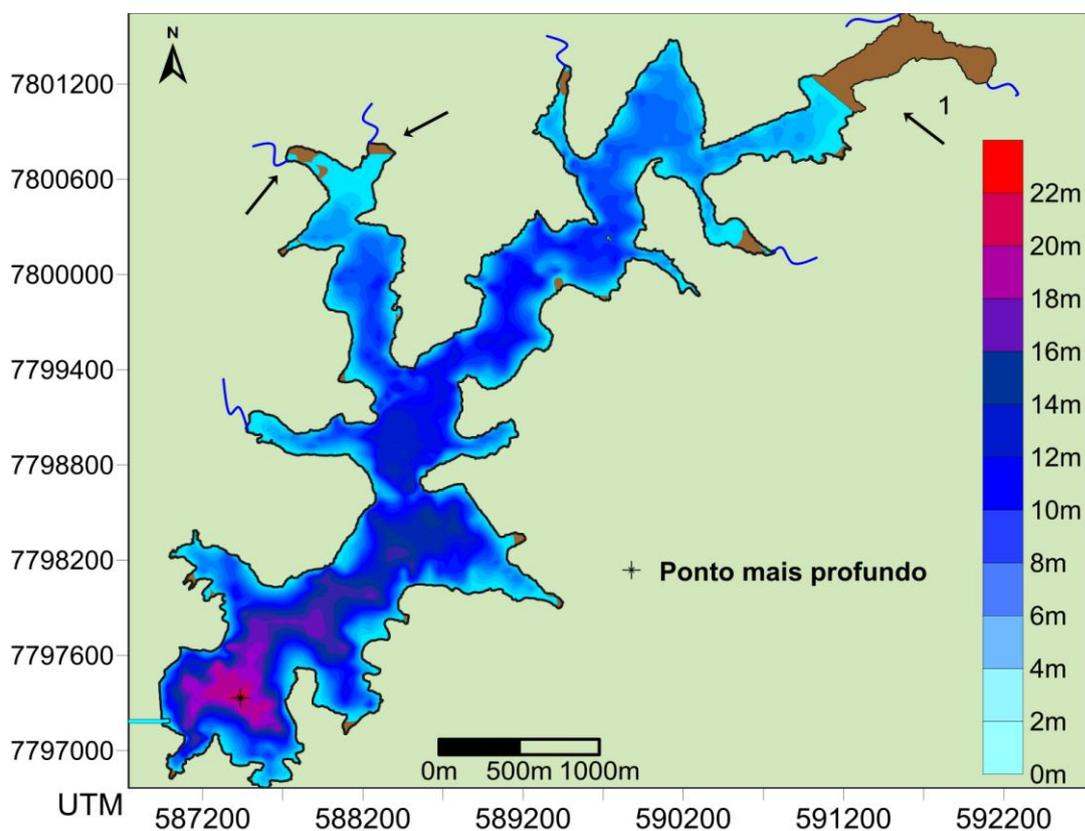


Figura 4. Carta batimétrica do reservatório de Vargem das Flores referente à cota de 837,37m de 08 outubro de 2009. As setas indicam as áreas assoreadas do reservatório, sendo a seta indicada pelo número 1 à região com maior perda de volume por assoreamento.

Através da carta batimétrica é possível visualizar que o ponto mais profundo (21,37m) do reservatório encontra-se próximo à barragem. As regiões assinaladas com as setas podem indicar as áreas assoreadas do reservatório. Através de sub-rotinas do Surfer 10, os parâmetros morfométricos primários foram obtidos e estão expostos na **Tabela 2**. A partir deles, os parâmetros morfométricos secundários foram então estimados.

Tabela 2. Parâmetros morfométricos do Reservatório de Vargem das Flores para a cota 837,70m.

PARÂMETROS MORFOMÉTRICOS			
PRIMÁRIOS		SECUNDÁRIOS	
Área (m ²) (A)	5,15x10 ⁶	Profundidade Média (m) (Z _{med})	5,63
Perímetro (m) (P)	44730	Profundidade Relativa (%) (Z _R)	0,83
Volume (m ³) (V)	29 x10 ⁶	Desenvolvimento do Perímetro (D _P)	5,52
Profundidade Max. (m) (Z _{max})	21,37	Desenvolvimento do Volume (D _V)	0,79
Comp. Máx. Efetivo (m) (C _{efetivo})	3870	Fator de Envolvimento (F _e)	47,95

Conforme Straskraba (1999), os reservatórios podem ser considerados pequenos quando apresentarem área $1 - 10^2 \text{ Km}^2$ e volume $10^6 - 10^8 \text{ m}^3$, perfil no qual a represa de Vargem das Flores se enquadra. Segundo Sperling (1999), a profundidade dos ambientes lênticos é um dos parâmetros morfométricos de maior relevância limnológica, uma vez que há diferenças marcantes entre ambientes rasos e profundos no que diz respeito ao comportamento destes. Cole (1983) afirma que a produtividade biológica dos lagos está geralmente relacionada com a profundidade média. Em ambientes mais rasos, a radiação solar pode alcançar toda a coluna d'água e, desta forma, esses geralmente apresentam produtividade maior que ambientes mais profundos. Quanto à profundidade relativa, a maioria dos lagos apresenta Z_r menores que 2%, embora lagos profundos com pequena área de superfície frequentemente tenham $Z_r > 4\%$ (WETZEL, 1983). A profundidade máxima (Z_{max}), média (Z_{med}) e relativa (Z_R) do reservatório Vargem das Flores foram, respectivamente, 21,37m, 5,63m e 0,85%. O que indica que este é um ambiente pequeno e raso, com baixa estabilidade térmica, estando mais suscetível à ação do vento. Quando se compara esses valores com outros reservatórios da Região Metropolitana de Belo Horizonte (RMBH) (**Tabela 3**), percebe-se que Vargem das Flores, mesmo sendo uma represa muito maior em área e perímetro e com profundidade máxima mais elevada, apresenta valores de Z_{med} e Z_R muito próximos destes outros reservatórios e da Lagoa Central (natural), demonstrando ser um reservatório raso, assim como estes outros corpos d'água.

O comprimento máximo efetivo é a distância entre os dois pontos mais distantes do lago, sem interrupção de terra, em uma linha reta. Este parâmetro representa o maior *fetch*, que segundo Esteves (2011), representa o grau de exposição da margem à ação do vento. Quanto maior for o *fetch*, maiores serão os efeitos do vento sobre a superfície dos lagos e reservatórios (TUNDISI & MATSUMURA-TUNDISI, 2008). O

comprimento máximo efetivo, indicativo da maior pista de vento da represa de Vargem das Flores é de 3.870m. Pistas de vento muito longas indicam maiores efeitos de vento e, por conseguinte, maiores alturas de ondas (COLE, 1983; SPERLING,1999). Assim, o efeito desse fator está relacionado, por exemplo, à dificuldade de estabelecimento de plantas aquáticas e condições de sedimentação (SPERLING, 1999).

Tabela 3. Parâmetros morfométricos da Lagoa Central e de reservatórios da RMBH de estudos realizados pelo LGAR.

Corpos d'água	A (m ²)	V (m ³)	P (m)	Z _{max} (m)	Z _{med} (m)	Z _R (%)	D _V	D _P	F _E
Lagoa da Pampulha	1.968.433	9.998.240	14.889	16,2	5,1	1,0	0,94	2,97	49,74
Lagoa do Nado	15.018	40.562	1.193	7,6	2,7	5,5	1,07	2,75	53,00
Lagoa Central (Lagoa Santa)	1.700.000	7.060.000	6.467	7,3	4,0	0,5	1,66	1,38	6,65
Reservatório de Ibirité	2.050.000	11.600.000	14.014	17,7	5,6	1,1	0,96	2,74	-
Reservatório de Vargem das Flores	5.151.798	29.007.704	44.73	21,4	5,6	0,8	0,79	5,52	47,95

Fonte: Lagoa da Pampulha (RESCK et al, 2007); Lagoa do Nado (BEZERRA-NETO & PINTO-COELHO, 2002); Lagoa Central (BRIGHENTI, 2009); Reservatório de Ibirité (PINTO-COELHO et al,

O índice de desenvolvimento do perímetro (D_p) é a medida do grau de irregularidade da margem, sendo que para um lago com o formato de um círculo perfeito, o valor de D_p é 1, enquanto que corpos d'água com valores mais altos que 3,5 são classificados como dendríticos (SPERLING, 1994). Por um lado, alto D_p reflete o potencial do desenvolvimento de grandes comunidades litorâneas (WETZEL, 1983), que implica em uma maior capacidade assimiladora de poluentes; em contrapartida, as margens de conformação irregular favorecem o processo de eutrofização (SPERLING, 1999). A represa de Vargem das Flores apresentou D_p de 5,52, caracterizando a como detentora de um alto grau de irregularidade das margens, podendo assim, ser classificada como um corpo d'água dendrítico. Essa característica certamente está associada a sua origem, quando a inundação e a elevação do nível da água acompanhou o perfil topográfico do terreno, formando braços diversos e alongados. O D_p da Lagoa Central (1,38) quando comparado ao de Vargem das Flores, enfatiza o grau de irregularidade da represa, concordando que lagos naturais apresentam irregularidade menor que os de origem antrópica.

A forma da bacia de acumulação do reservatório pode ser demonstrada pelo índice de desenvolvimento de volume (D_v) e pela interpretação das curvas hipsográficas

(Figura 5). O D_v indica principalmente as características do formato vertical, sendo que lagos e represas em forma de “U” (a maioria) apresentam $D_v > 1$, como é o caso da Lagoa Central, enquanto Lagos com $D_v = 1$ apresentam forma de um cone (SPERLING, 1999). Vargem das Flores apresentou $D_v = 0,79$, o mais baixo dentre os reservatórios da RMBH, estando mais próximo do formato de “V”, apresentando forma convexa. Este formato é característico de corpos d’água mais expostos à ação do vento, apresentando hidrodinâmica fortemente influenciada por estes.

Analisando a curva hipsográfica área-profundidade-volume de Vargem das Flores (Figura 5), é possível perceber a relação de aumento do volume acumulado e diminuição da área à medida que se segue em direção ao fundo do reservatório. Pode-se afirmar ainda que sua forma é convexa. Portanto, suas margens possuem baixa declividade na região rasa, ocorrendo um brusco aumento de declividade ao se aproximar da parte mais profunda. Comparando-a com as curvas hipsográficas da Lagoa da Pampulha (Figura 6), esta última apresenta-se aparentemente mais inclinada. No entanto, nota-se que à profundidade de 4m, tanto a Lagoa da Pampulha, quanto a represa Vargem das Flores, já apresentam mais de 50% de sua área e volume.

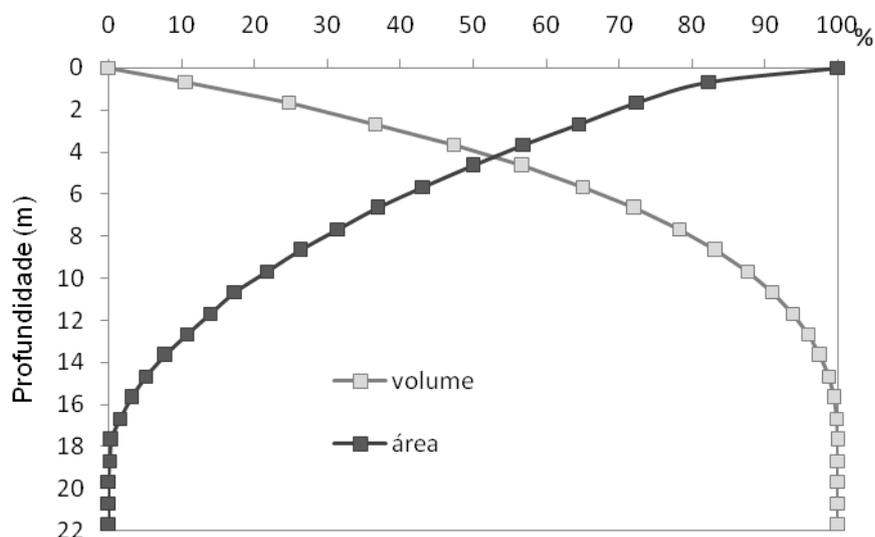


Figura 5. Curva hipsográfica do reservatório de Vargem das Flores (cota 837,7m).

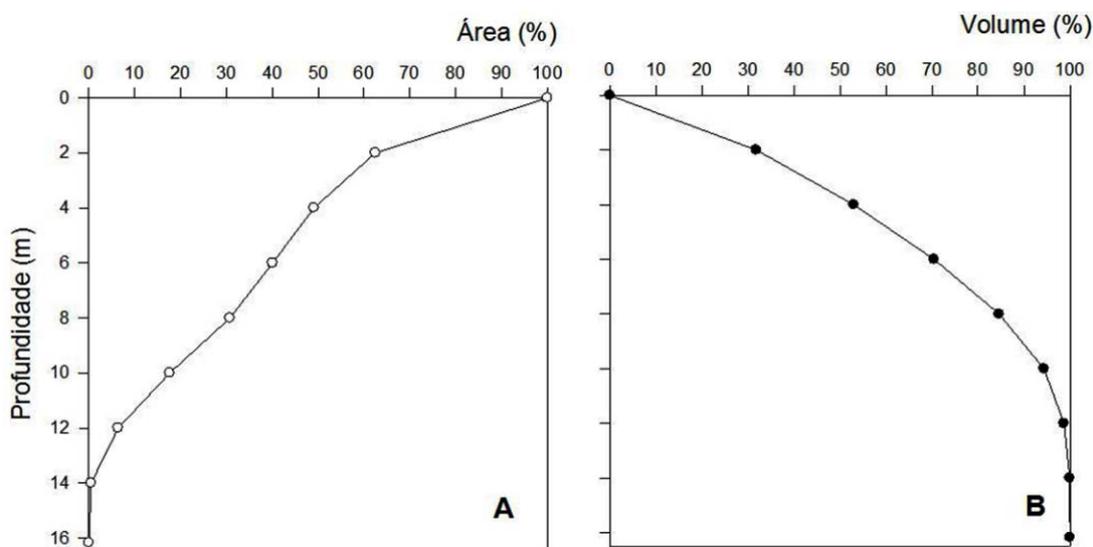


Figura 6. Curva hipsográfica da Lagoa da Pampulha (RESCK, 2007)

O fator de envolvimento (F_e) relaciona a área da bacia de drenagem, 247km² (HOLOS, 2009), com a área total do lago. Os altos valores de fator de envolvimento indicam que grandes quantidades de material sólido e nutrientes podem ser carregadas, provocando assoreamento e eutrofização do corpo d'água (SPERLING, 1994). Assume-se também que, quanto mais elevado o valor de F_e , maior a probabilidade da existência de assentamentos urbanos (SOUZA, 2003). Conseqüentemente, a capacidade diluidora do corpo d'água é pequena em relação à grande área de drenagem da bacia (SPERLING, 1999). Este é o caso de Vargem das Flores, que está mais propensa a fenômenos de origem antrópica como contaminação, assoreamento e eutrofização, assim como a Lagoa do Nado e a Pampulha.

Comparação Morfométrica

Os ambientes lacustres possuem tempos de vida limitados. Lagos naturais apresentam tempo de vida curto do ponto de vista geológico. Enquanto os reservatórios apresentam tempo de vida média na escala de décadas. Segundo estudo do Banco Mundial (CARVALHO et al, 2000), os reservatórios existentes em todos os países do mundo apresentaram um decréscimo em sua vida útil média de 100 para 22 anos. Essa perda se reflete nos parâmetros morfométricos das represas, como no caso do reservatório de Vargem das Flores em que tais parâmetros estão

apresentados na Tabela 4. Os valores demonstrados são referentes à cota 837m. A cota apresentada pelo reservatório no dia da campanha foi de 837,7 m. No entanto, os dados com os quais se pretende realizar comparações não apresentaram essa cota. Dessa forma, para não se fazer extrapolação, optou-se por trabalhar em cota inferior e mais próxima do valor encontrado no dia da coleta.

Tabela 4. Áreas e volumes do reservatório Vargem das Flores na cota 837m e percentuais em relação ao ano de 1972, nos anos de levantamento batimétrico.

Ano	Área (m ²)	% Área	Volume (m ³)	% Volume
1972	4.436.451	100	34.825.433	100
2000	4.154.011	93,6	29.966.884	86,0
2009	4.242.728	95,6	25.921.565	74,4

Fonte: Os dados de 1972 e 2000 pertencem ao relatório técnico da HDC (2000).

Os maiores valores de área e volume foram encontrados no ano de início de operação do reservatório (1972). Acredita-se que a discrepância dos valores de área do ano 2000 em relação aos outros anos seja em decorrência da exclusão da área demarcada pela seta um na **Figura 3**, no inventário realizado no ano de 2000. Isso fica mais claro quando se compara uma cota mais alta, 838m do ano 2000 (**Tabela 5**), com uma inferior, 837,7m no ano de 2009. À cota de 838m, esperava-se uma área maior que a encontrada em 2009, uma vez que o reservatório encontra-se em crescente processo de assoreamento. No entanto, o levantamento batimétrico de 2009 (a uma cota inferior) obteve uma área em torno de 10% maior que a de 2000 e um volume 15,55% menor. Considerando as diferenças de área apresentadas entre os anos de 2000 e 2009, esperava-se um maior volume no ano de 2009. Entretanto, o volume para a cota 837m em 2009 foi de 13,5% menor que o de 2000 e entre o período 1972 e 2000 a perda de volume foi de 13,95%. A razão entre a perda de volume e a diferença entre os anos analisados revela que na última década (2000-2009) a perda de volume por ano foi de 1,5%, sendo cerca de três vezes maior que nos primeiros 28 anos de operação do reservatório (0,49% por ano).

Tabela 5. Valores de área e volume por cota nos anos em que foram realizados inventário batimétrico.

Cota	1972		2000		2009	
	Área (m ²)	Volume (m ³)	Área (m ²)	Volume (m ³)	Área (m ²)	Volume (m ³)
838	4.844.423	39.464.375	4.620.625	34.352.133	-	-
837,7	-	-	-	-	5.151.798	29.007.704
837	4.436.451	34.825.433	4.154.011	29.966.884	4.242.728	25.921.565
836	4.050.200	30.583.573	3.749.729	26.016.739	3.733.382	21.861.417
835	3.685.236	26.717.291	3.611.783	22.336.198	3.317.105	18.424.858
834	3.341.115	23.205.520	3.262.256	18.900.661	2.932.314	15.306.452
833	3.017.387	20.027.644	2.861.333	15.841.056	2.574.025	12.556.028
832	2.713.595	17.163.496	2.699.011	13.061.279	2.222.750	10.151.608
831	2.429.272	14.593.514	2.340.969	10.542.407	1.900.315	8.092.305
830	2.163.944	12.298.184	2.018.429	8.364.699	1.620.206	6.335.267
829	1.917.130	10.258.892	1.728.180	6.493.271	1.354.258	4.851.430
828	1.688.335	8.457.444	1.519.831	4.870.074	1.113.481	3.616.490
827	1.477.057	6.875.924	1.237.737	3.493.702	894.175	2.617.413
826	1.282.782	5.497.145	919.458	2.419.039	714.523	1.809.253
825	1.159.865	4.276.337	747.702	1.586.937	549.377	1.182.913
824	979.456	3.207.947	597.515	915.731	402.823	712.511
823	808.621	2.315.272	344.212	450.651	262.090	378.729
822	648.114	1.588.383	195.672	184.182	160.076	173.895
821	498.881	1.016.511	86.122	46.980	78.222	57.689
820	362.156	587.813	1.034	4.878	18.162	8.801
819	239.641	289.015	597	405	2.840	1299
818	133.908	104.786	156	52	209	0
817	49.513	16.504	0	0	0	0
816	0	0	0	0	0	0

Fonte: Os dados de 1972 e 2000 referem-se ao relatório técnico da HDC 2000.

CARVALHO (1994), a partir de estudos realizados pela Eletrobrás/IPH em 1994, concluiu que a perda anual de capacidade de armazenamento dos reservatórios brasileiros é de aproximadamente 0,5%. O mesmo autor afirmou ainda que a erosão tem aumentado em função do aumento do crescimento da população e do uso do solo. Sendo assim, Vargem das Flores tem uma taxa de assoreamento três vezes maior que a média dos reservatórios do Brasil.

As áreas estimadas por cota do reservatório e os volumes acumulados representados na **Tabela 5** permitem visualizar como se dá o assoreamento na represa. Os dados apresentados são importantes, pois permitem fazer um diagnóstico da evolução e comportamento de deposição do sedimento, pela diferença de volume entre os estratos, uma vez que nos reservatórios total ou

parcialmente assoreados, o assoreamento visível geralmente é a menor parte do depósito (CARVALHO et al, 2000).

Apenas no ano de 1972 existem valores para a cota 817, indicando que, em algum momento nos primeiros 28 anos do reservatório, essa camada assoreou-se completamente. A partir da cota 821m até a mínima, os volumes do estudo realizado em 2009 apresentaram volumes maiores em relação ao ano de 2000 (**Tabela 5**). Acredita-se que esta diferença possa ser em razão das diferenças metodológicas, uma vez que as seções batimétricas realizadas no ano de 2000 foram mais esparsas e paralelas, enquanto as realizadas em 2009 foram em zigue-zague. De qualquer forma, foram coletados mais pontos em 2009, sendo que quanto maior o número de pontos obtidos, mais precisa é a carta batimétrica resultante (COLE, 1983).

Na **Figura 7** é apresentado o gráfico da relação de cota-volume do reservatório. Para tanto foram utilizados dados de levantamentos batimétricos anteriores (HDC, 2000), encomendados pela Companhia de Saneamento de Minas Gerais – COPASA, sendo 1972 o ano de início de operação do reservatório. Nota-se que, com o passar dos anos, as curvas tornaram-se mais curtas e deslocadas para cima, o que demonstra que o reservatório, com o tempo, vem perdendo capacidade de armazenamento. A **Tabela 6** detalha essa perda de volume por estrato e ilustra ainda o percentual de perda de volume nos intervalos de tempo amostrados.

A título de comparação das variações de área e volume, apesar da cota máxima encontrada no inventário batimétrico do ano de 2009 ter sido de 837,7m, optou-se por iniciar o intervalo entre os estratos pela cota 837m, uma vez que nos anos de 1972 e 2000 não existem dados para cota de 837,7m. Assim, decidiu-se trabalhar com dados de cotas existentes para os três anos. É possível notar que o volume por estrato diminui com o passar do tempo e as perdas de volume são claramente maiores nos estratos inferiores, uma vez que nas cotas inferiores, a curva de 2009 é a mais inclinada quase formando um ângulo de 90° com o eixo X (**Figura 7**). Ela também está mais próxima do eixo Y que as outras curvas, além de ser mais curta, indicando que as cotas superiores não alcançam grandes volumes, como as curvas de 1972 e 2000.

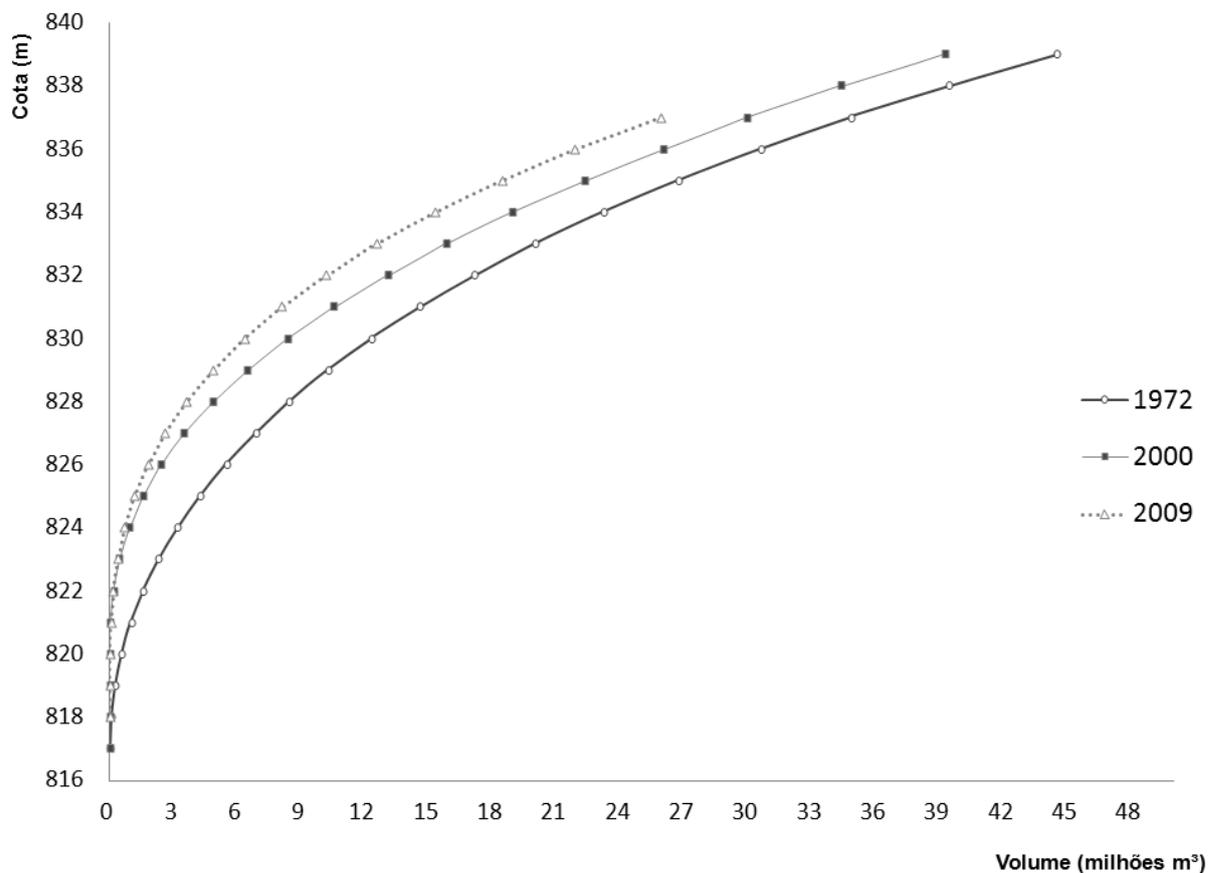


Figura 7. Relação Cota-Volume do reservatório de Vargem das Flores para o ano de 1972 (volume original), 2000 e 2009.

Na **Tabela 6**, os valores marcados com dois asteriscos (**) indicam que não houve perdas de volume nestes estratos nos intervalos de tempo considerados. Isso se deu provavelmente por diferenças de amostragem, conforme já discutido acima. Nos valores marcados com um asterisco (*), a ausência de perda, pode estar relacionada com a diferença de área amostrada no ano de 2009 em relação a 2000 (exclusão da área indicada pela seta 1 na **Figura 4**).

Tabela 6. Volumes por estrato e suas perdas percentuais e anuais por intervalo de tempo.

Estrato (m)	Volume por estrato (m ³)			Perda de Volume (%)		Perda anual de volume (%ano ⁻¹)	
	1972	2000	2009	1972-2000	2000-2009	1972-2000	200-2009
837 - 836	4.241.860	3.950.145*	4.060.148	6,88	-2,78*	0,25	-0,31*
836 - 835	3.866.282	3.680.541	3.436.559	4,80	6,63	0,17	0,74
835 - 834	3.511.771	3.435.537	3.118.406	2,17	9,23	0,08	1,03
834 - 833	3.177.876	3.059.605	2.750.425	3,72	10,11	0,13	1,12
833 - 832	2.864.148	2.779.777	2.404.419	2,95	13,50	0,11	1,50
832 - 831	2.569.982	2.518.872	2.059.303	1,99	18,25	0,07	2,03
831 - 830	2.295.330	2.177.708	1.757.039	5,12	19,32	0,18	2,15
830 - 829	2.039.292	1.871.428	1.483.837	8,23	20,71	0,29	2,30
829 - 828	1.801.448	1.623.197	1.234.940	9,89	23,92	0,35	2,66
828 - 827	1.581.520	1.376.372	999.076	12,97	27,41	0,46	3,05
827 - 826	1.378.779	1.074.663	808.161	22,06	24,80	0,79	2,76
826 - 825	1.220.808	832.102	626.340	31,84	24,73	1,14	2,75
825 - 824	1.068.390	671.206	470.402	37,18	29,92	1,33	3,32
824 - 823	892.675	465.080	333.782	47,90	28,23	1,71	3,14
823 - 822	726.889	266.469	204.833	63,34	23,13	2,26	2,57
822 - 821	571.872	137.202	116.207	76,01	15,30	2,71	1,70
821 - 820	428.698	42.102	48.888	90,18	**	3,22	**
820 - 819	298.798	4.473	7.502	98,50	**	3,52	**
819 - 818	184.229	353	1.299	99,81	**	3,56	**
818 - 817	88.282	52	-	99,94	100	3,57	100
817 - 816	16.504	-	-	100	-	3,57	-

Diagnóstico de Assoreamento

Através da carta batimétrica (**Figura 4**) é possível visualizar que as regiões assinaladas com as setas podem indicar as áreas assoreadas do reservatório. A seta 1 indica o campo de profundidades próximas a zero metros no reservatório, o que representa uma área de $0,24 \times 10^6 \text{m}^2$. Isto representa uma deposição de sedimento relativo a 4,75% da área total do reservatório. Acredita-se que este tipo de sedimentação seja do tipo depósito de delta, que segundo CARVALHO et al (2000), essa deposição é muito frequente e acontece quando há deposição de sedimentos à montante, próximo a um afluente, onde ocorre áreas de remanso de lagos e reservatórios. Assim, a forma de deltas arenosos auxilia na retenção dos sedimentos vindos de montante. Nesta região deságua o ribeirão Betim, principal afluente da represa e o córrego Vargem do Sapê.

Segundo Souza (2003), no reservatório de Vargem das Flores todos os tributários sofrem com o acúmulo de lixo, lançamentos de esgoto, desmatamento, atividades agrícolas, dentre outras, sendo que, o Ribeirão Betim e o córrego Água Suja são as áreas mais afetadas e as principais contribuintes como fonte de nutrientes (nitrogênio e fósforo). Desta forma, atribui-se a essa grande deposição de sedimentos, na região demarcada pela seta 1 (**Figura 4**), as atividades antrópicas decorrentes do elevado adensamento populacional ocorrido na última década.

Em relação à perda de volume, estima-se que o estrato que mais contribuiu para o assoreamento na última década tenha sido a camada entre as cotas 825-824m. O percentual anual de perda de volume para este estrato entre o ano de início de operação do reservatório (1972) e o ano de 2000 foi de 1,33% ao ano (**Tabela 6**), enquanto para o período de 2000 a 2009 a taxa foi de 3,32% ao ano. Deste modo, nesta última década o reservatório teve um incremento de quase 3 vezes no valor da taxa de deposição de sedimento em relação aos seus primeiros 28 anos de operação, neste estrato.

A camada entre as cotas 825 e 824m, referentes às profundidades de 8,67-7,67m, ocorre principalmente no final dos braços onde há entrada de tributários, alcançando as bordas do eixo central e também no entorno da ilha do reservatório (**Figura 7**). Acredita-se que neste estrato, as regiões que possam ter contribuído para essa perda de volume sejam, principalmente, as regiões demarcadas em vermelho na **Figura 8**. Uma vez que os valores que acompanham o contorno do eixo central aparentemente seguem um padrão normal em reservatórios, no qual as regiões mais próximas à margem apresentam valores inferiores aos mais centrais do eixo central, especula-se que tal perda tenha realmente acontecido na região da ilha e final do braço onde deságuam os Córrego do Laje e Córrego Água Suja. Essas duas áreas representam juntas cerca de 3,4% da área total do reservatório. Acredita-se que o padrão de deposição encontrado no braço dos córregos já referidos acima seja do tipo *depósito de delta* em função de ocorrerem dentro do reservatório (CARVALHO et al, 2000) na interseção do braço com o eixo central do reservatório. Segundo Thornton (1990), na zona de transição ocorre aumento da profundidade e a deposição de sedimentos é significativa, embora tenha um decréscimo das correntes da região de rio em direção a esta, existe ainda uma força advectiva atuante capaz de carrear sedimentos.

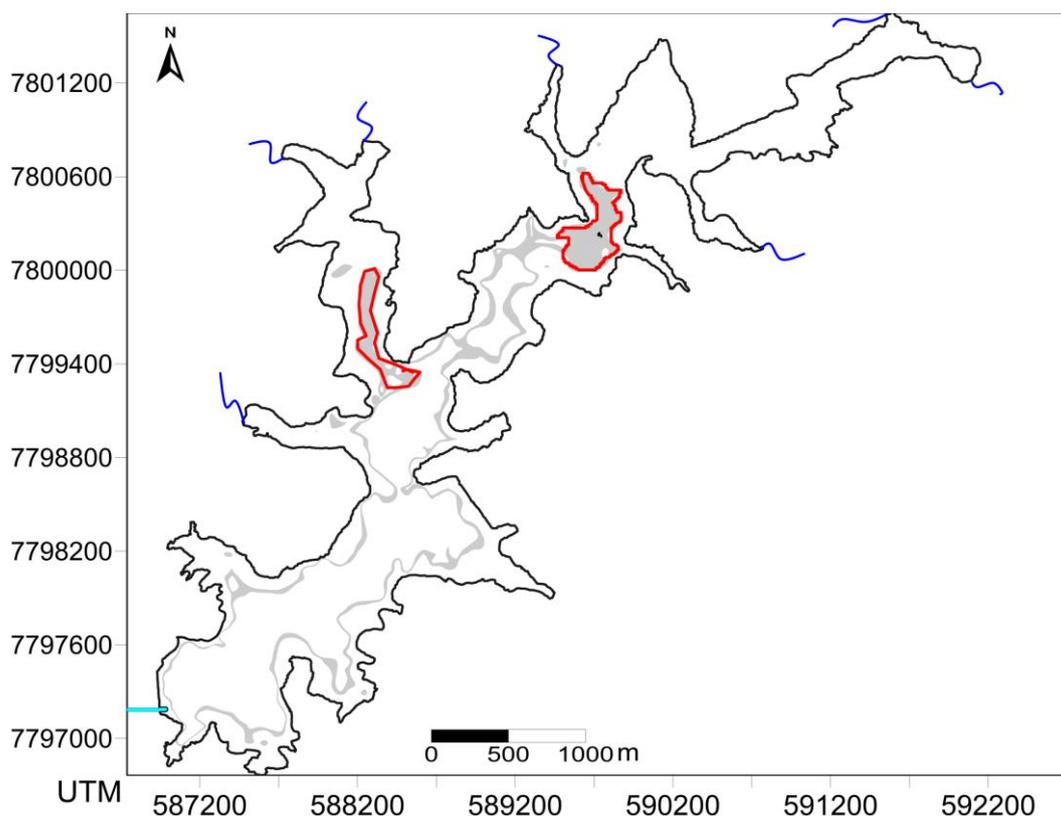


Figura 8. Área do reservatório destacando em cinza as regiões de ocorrência do intervalo 7,67-8,67 m, referente ao estrato entre as cotas 824-825m de profundidade e entrada dos tributários. Contorno em vermelho delimitando as maiores áreas de ocorrência deste estrato, que representa a camada onde houve maior perda de volume da represa.

Segundo dados de HDC (2000), nos primeiros doze anos de funcionamento do reservatório (1972-1984), o assoreamento foi relativo a 370.000m^3 e no período de 1984-2000 este valor foi de $5.237.529\text{m}^3$, as respectivas taxas anuais de assoreamento do reservatório estimadas foram de 0,07% e 0,77%. Comparando a taxa de 1972-1984 da taxa de 1984-2000, a diferença indica que há uma carga média de deposição de sedimento dez vezes maior no período de 1984-2000 que nos primeiros doze anos de funcionamento do reservatório. Nesse ritmo, consta no relatório que o volume morto remanescente estaria comprometido nos dez anos seguintes. No entanto, o levantamento atual revela que houve mudanças nas cargas de deposição de sedimento.

A **Tabela 7** ilustra a condição atual do reservatório Vargem das Flores no que se refere às perdas por assoreamento na última década. Apenas para a cota 820m os parâmetros foram calculados entre o período de 1972 a 2009, devido ao fato do volume para tal cota no ano de 2000 apresentar valor inferior ao de 2009. Uma vez que não foram encontrados relatos de intervenções no sentido de retirada de sedimento neste intervalo de tempo, considerou-se o ano 1972 como referência.

Tabela 7. Situação média de assoreamento na última década (2000-2009).

Descrição	Cota (m)	Volume Assoreado (m ³)	Volume Assoreado (%)	Volume remanescente (m ³)
Cota máxima	837,0	4.045.319	13,50	25.921.565
Soleira da descarga de fundo**	820,0	579.012	98,50	8.801
Soleira da última tomada d'água	828,1	1.283.114	25,54	3.739.984
Soleira da penúltima tomada d'água	831,8	2.788.906	22,26	9.739.748
Volume Morto	825,0	404.024	25,46	1.182.913

** Os valores estimados para a cota 820m referem-se ao intervalo de tempo de 1972-2009

O relatório de 2000 da HDC já alertava para um aumento na taxa de assoreamento e consequente comprometimento da captação de água na última tomada d'água. Como já citado, a previsão realizada pelo referido relatório era que, entorno de dez anos, haveria assoreamento de todo o volume do volume morto. Essas modificações geram inúmeros impactos na qualidade da água com consequentes efeitos ecológicos. A diminuição da velocidade de corrente em decorrência do confinamento das águas, pela diminuição da profundidade, aumenta o nível de nutrientes, reduz a concentração de oxigênio dissolvido e aumenta a produtividade biológica, podendo levar a eutrofização (CARVALHO et al, 2000). Essa pressão no sistema gera progressiva introdução de “filtros ecológicos” (TUNDISI & MATSUMURA-TUNDISI, 2008), levando a modificações na fauna e flora, como proliferação de macrófitas nas margens e alterações na qualidade do leito (CARVALHO, 1994), afetando a fauna bentônica.

A partir de um estudo técnico realizado em 1984, o relatório da HDC (2000) afirma que a cota máxima do volume morto² deveria se situar em torno de 3m abaixo da

² Volume morto corresponde à parcela do volume total do reservatório inativa ou indisponível para fins de captação de água. Corresponde ao volume do reservatório compreendido abaixo do NA operacional (LOPES & SANTOS, 2002).

soleira da última tomada de água. Mantendo este nível, o relatório justificava que não haveria comprometimento da qualidade da água captada nesta tomada. Assim, o nível máximo do volume morto deveria estar na cota 825,0 m. O estudo relatava ainda que, do ano de início de operação do reservatório até o ano do estudo (1984), já haviam sido transportados para o reservatório cerca de 144.300m³ de sedimento, representando uma perda de volume de 3,38% do volume morto (**Tabela 8**). A taxa média anual de sedimentos retidos no reservatório foi de 30.833m³ para os primeiros doze anos de operação, uma perda equivalente a 0,87% do volume total.

Tabela 8. Situação inicial da capacidade de abastecimento de armazenamento (1972)

Descrição	Cota (m)	Volume (m³)
Soleira da descarga de fundo	820	587.813
Soleira da última tomada d'água	828,1	8.627.380
Soleira da penúltima tomada d'água	831,8	16.626.628
Soleira do vertedor	838,64	42.651.672
Volume Morto	825	4.263.504

Fonte: Adaptado de HDC (2000).

A **Tabela 9** exibe a situação média de assoreamento do ano de 2000 até as cotas características do reservatório. O volume morto apresentou uma perda de 2.676.567m³ durante o período de 1972 a 2000, equivalente à perda de 62,78% do volume morto original. O volume anual de deposição de sedimentos para esta cota (825m) foi de 95.592m³. A esta mesma cota, entre os anos de 2000 a 2009, a perda por deposição de sedimento foi de 44.892m³.ano⁻¹. Percebe-se por esses valores uma redução na carga de sedimento para o reservatório. Entretanto, quando avaliadas as taxas percentuais de deposição de sedimento, em relação aos anos base, a atual taxa anual de deposição de sedimentos apresentada foi de 2,82%.ano⁻¹, enquanto a taxa anual estimada entre os anos de 1972-2000 foi de 2,24%.ano⁻¹. Assim, mesmo havendo uma diminuição do volume de sedimento no reservatório, devido à capacidade atual de armazenamento do reservatório, nesta cota, a taxa percentual de deposição de sedimento na última década apresentou-se superior à taxa dos primeiros 28 anos de operação do reservatório.

Tabela 9. Situação média de assoreamento até as cotas características do reservatório (1972-2000).

Descrição	Cota (m)	Volume Assoreado (m ³)	Volume Assoreado (%)	Volume remanescente (m ³)
Soleira da descarga de fundo	820,0	582.935	99,17	4.878
Soleira da última tomada d'água	828,1	3.604.282	41,78	5.023.098
Soleira da penúltima tomada d'água	831,8	4.097.974	24,65	12.528.654
Soleira do vertedor	838,6	5.237.529	12,27	37.414.141
Volume Morto	825,0	2.676.567	62,78	1.586.937

Adaptado de HDC Engenharia S/C Ltda.(2000)

Previsões - Vida Útil

Com base no inventário batimétrico atual, estima-se uma perda de volume de 4.045.318 m³ relativa a uma carga média anual de sedimento retido no reservatório de 449.479 m³ por ano. Houve um aumento de 2,5 vezes a taxa de deposição de sedimento quando comparado ao período de 1972-2000. A partir da taxa de assoreamento estimadas neste estudo, foram realizadas previsões de tempo necessárias para se perder volumes referentes a determinadas cotas (**Tabela 10**). Estima-se que, à atual taxa anual de perda de volume, seriam necessários 28 anos aproximadamente para se perder 50% do volume equivalente ao volume útil do reservatório, que se encontra entre as cotas 828,10 e 838,64m. A essa mesma taxa, um volume igual ao do volume morto estaria em menos de três anos totalmente assoreado. Em menos de dezoito anos o volume mínimo operacional (cota 830m) do reservatório estaria comprometido e em menos de 60 anos o reservatório perderia completamente seu espelho d'água.

Tabela 10. Estimativas de tempo necessário para assoreamento de determinadas cotas com base em suas respectivos taxas de deposição de sedimento por ano

COTA	TEMPO (ANOS)	
	1972-2000*	2000-2009**
837	172,7	57,7
828,1	28,9	8,3
831,8	72,2	21,7
825	9,1	2,9

* taxa anual de assoreamento 173519 m³

** taxa anual de assoreamento 449479 m³

Conclusões

Com base nas diferenças entre as taxas médias de assoreamento, entre os anos de 1972 e 2009, foi possível caracterizar dois períodos em relação à deposição de sedimento. No primeiro, de 1972 a 2000, ocorreram profundas modificações na estrutura ocupacional da bacia hidrográfica, gerando um grande crescimento na produção de sedimentos. No segundo momento, última década, o reservatório experimentou um incremento na taxa de assoreamento, recebendo em apenas nove anos a mesma quantidade de sedimentos que o reservatório recebeu nos seus 28 primeiros anos de operação. A taxa de deposição de sedimentos cresceu cerca de 2,5 vezes, reduzindo assim, nessa mesma taxa sua vida útil.

As estimativas de tempo de vida útil para o reservatório foram inferidas com base em grandes dados referentes a longos intervalos de tempo (1972 a 2000 e 2000 a 2009). Entretanto, foi possível perceber que a taxa de deposição de sedimento no reservatório de Vargem das Flores aumentou com o passar dos anos. Deste modo, pela carência de dados contínuos de monitoramento batimétrico e de estudos sedimentológicos, acredita-se que a situação do reservatório seja mais crítica do que a apresentada e que os tempos para assoreamento das cotas apresentadas tenham sido superestimados.

O presente trabalho demonstrou a necessidade de uma intervenção frente à magnitude do estado de assoreamento do reservatório de Vargem das Flores. Nesse sentido, medidas são de complexa realização quando o sedimento é derivado da ocorrência de erosão em toda a área de drenagem da bacia, sendo de difícil acesso a entidade responsável (CARVALHO et al, 2000), no caso a COPASA. No entanto, existem muitos programas de controle de sedimento que podem ser implementados, sendo os de maior importância, os de prevenção.

Recomendações

Se a principal fonte de carga de sedimentos são os rios, medidas de controle preventivas e corretivas nas cabeceiras dos rios, calhas e em sua foz (no reservatório) são de suma importância. Medidas de controle de erosão na bacia também são muito eficazes na prevenção no aporte de sedimento para o reservatório. Carvalho et al (2000) apresentam uma série de medidas mitigadoras e de cunho preventivo, no entanto serão apresentadas dentre as mais eficientes, as que foram consideradas mais viáveis, no sentido de causar menos impactos e de gerar retorno mais rápido e duradouro:

- Implantação de um sistema de rede sanitária eficiente.
- Recomposição de biótopos de amortecimento de cheias.
- Controle de erosão na bacia:
 - Reflorestamento das áreas do entorno,
 - Contenção ou proteção de taludes,
 - Fiscalização e controle das terraplanagens,
 - Controle da erosão em ravinas e voçorocas.
- Controle de erosão nos cursos d'água e margens de reservatórios:
 - Proteção com vegetação ciliar,
- Novas alternativas para drenagens de águas superficiais, urbana e rural.
- Controle do aporte de lixo.
 - Coleta seletiva e reciclagem

Obras de dragagem como medidas corretivas em reservatórios são caras e geralmente aplicadas a pequenos reservatórios. No entanto, a alocação para deposição do material retirado e os impactos gerados no revolvimento são grandes problemas dessa iniciativa. Essa decisão exige grande conhecimento técnico e envolve outras áreas de conhecimento e, portanto, não será indicada neste estudo. Contudo, sabe-se que estas medidas não retornarão as características de origem do reservatório, mas acredita-se que são soluções que poderiam mitigar e prolongar a vida útil da represa Vargem das Flores.

Referências Bibliográficas

BEZERRA-NETO, J.F. & PINTO-COELHO, R.M. 2008. *New morphometric study of Lake Dom Helvécio, Parque Estadual do Rio Doce (PERD), Minas Gerais: utilization of advanced methodology for bathymetric mapping*. Acta Limnologica Brasiliensia. 20: 117-130.

BEZERRA-NETO, J.F. & PINTO-COELHO, R.M. 2002. *A morfometria e o estado trófico de um reservatório urbano: Lagoa do Nado, Belo Horizonte, Estado de Minas Gerais*. Acta Scientiarum. 24: 285-290.

BRIGHENTI, L.S. 2009. *Avaliação limnológica da lagoa central (município de lagoa santa – mg): uma abordagem espacial*. Dissertação (Mestrado em Ecologia, Conservação e Manejo da Vida Silvestre) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

CARVALHO, N.O. 1994. *Hidrossedimentologia Prática*. Rio de Janeiro: CPRM. 372p.

CARVALHO, N.O.; FILIZOLA JÚNIOR, N.P.; SANTOS, P.M.C. & LIMA, J.E.F.W. 2000. *Guia de avaliação de assoreamento de reservatórios*. Brasília: ANEEL. 140p.

COLE, G.A. 1983. *Textbook of limnology*. 3ª Edição. Illinois: Waveland Press. Prospect Heights. 412p.

DODDS, W.K. 2002. *Freshwater ecology: concepts and environmental applications*. San Diego: Academic Press. 569p.

ESTEVES, F.A. 2011. *Fundamentos de limnologia*. 3ª Edição. Rio de Janeiro: Interciências. 606 p.

FREIRE, B.M. & PINTO-COELHO, R.M. 1986. *Composição e distribuição horizontal do zooplâncton no reservatório de Vargem das Flores, Betim/Contagem, Minas Gerais*. Ciência e Cultura 38(5): 919-927.

GOMES, L.N.L. 2008. *Estudo da associação entre parâmetros bióticos e abióticos e a ocorrência de florações de cianobactérias no Reservatório de Vargem*

das Flores – Minas Gerais. Tese (Doutorado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

HDC (HYDROLOGIC DATA COLLECTION ENGENHARIA S/C Ltda.). 2000. *Levantamento batimétrico do reservatório da Lagoa Várzea das Flores*. Relatório técnico. Belo Horizonte. 12p.

HOLOS Engenharia Sanitária e Ambiental Ltda. 2009. *Plano diretor das águas da bacia hidrográfica do Rio Paraopeba*. Disponível em: < http://www.aguado-paraopeba.org.br/arquivos/doc_resumo_paraopeba_5114.pdf >. Acesso em: 18 ago. 2011.

IBGE (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA), 2010. *Censo 2010*. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/cidadesat/topwindow.htm?1> >. Acesso em: 12 jan. 2012.

LANDIM, P.M.B. 2000. *Introdução aos métodos de estimação espacial para confecção de mapas*. IGCE, Rio Claro: UNESP. 20p.

LOPES, J.E. & SANTOS, R.C.P. 2002. *Capacidade de reservatórios*. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Disponível em: <http://www.fcth.br/public/cursos/phd5706/phd5706_Reservatorios.pdf>. Acesso em: 03 dez. 2011.

PINTO-COELHO, R.M; BRIGHENTI, L.S.; BEZERRA-NETO, J.F.; MORAIS JÚNIOR, C.A. & GONZAGA, A.V. 2010. *Effects of sampling effort on the estimation of spatial gradients in a tropical reservoir impacted by an oil refiner*. *Limnologica*. 40: 126-133.

RESCK, R.P. 2007. *Avaliação morfológica e estudo da variação horizontal de parâmetros limnológicos do reservatório da Pampulha (Belo Horizonte - MG)*. Dissertação (Mestrado em Ecologia, Conservação e Manejo da Vida Silvestre) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

SANTOS, N.C.F. & LUCENA, L.R.F. 2005. *Levantamento batimétrico automatizado das lagoas do Jiqui e Pium, litoral sul de Natal-RN: uma alternativa viável na avaliação de reservas hídricas superficiais*. Natal: EMPARN. 21p.

SOUZA, A.D. 2003. *Variações espaciais e temporais de parâmetros de qualidade de água em um reservatório tropical (Represa de Vargem das Flores – Contagem – MG) e suas implicações com aspectos limnológicos*. Tese (Doutorado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

SPERLING, E.V. 1994. Morphometric features of some lakes and reservoirs in the state of Minas Gerais. *In: PINTO-COELHO, R.M. et al (Ed.) Ecology and human impact in lakes and reservoirs in Minas Gerais with special reference to future development and management strategies*. Belo Horizonte: SEGRAC. 71-76.

SPERLING, E.V. 1999. *Morfologia e lagos e represas*. Belo Horizonte: DESA/UFMG. 137p.

THORNTON, K.W. 1990. Perspectives on reservoir limnology. *In: THORNTON, K.W.; KIMMEL, B.L. & PAYNE, F.E (Ed.) Reservoir Limnology: Ecological Perspectives*. Somerset: John Wiley & Sons, Inc. 246p.

TUNDISI, J.G. 2005. Gerenciamento integrado de bacias hidrográficas e reservatórios – Estudos de caso e perspectivas. *In: NOGUEIRA, M.G.; HENRY, R. & JORCIN, A. (Ed.). 2005. Ecologia de reservatórios: impactos potenciais, ações de manejo e sistemas em cascata*. São Carlos: RiMa. 472p.

TUNDISI, J.G.; MATSUMURA-TUNDISI, T. 2008. *Limnologia*. Oficina de São Paulo: Textos. 631p.

VIANA, T. 2009. *Estudo do conteúdo de calor e suas influências sobre variáveis limnológicas em reservatórios de abastecimento de água*. Tese (Doutorado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

WETZEL, R.G. 1983. *Limnology*. Philadelphia: Saunders Company. 767p.

Capítulo II

Limnologia espacial e compartimentação longitudinal de um reservatório tropical periurbano (Vargem das Flores - Minas Gerais, Brasil).

Resumo

O presente trabalho objetiva realizar um estudo da variação horizontal dos parâmetros limnológicos, gerar um modelo de compartimentação longitudinal e avaliar o estado trófico do reservatório de Vargem das Flores. Para tanto, realizou-se uma coleta, no final da estação seca (06.10.2010), dos principais parâmetros limnológicos em 27 estações amostrais, sendo que em uma delas foi realizado um perfil vertical. As cartas temáticas foram obtidas pela utilização da krigagem como método de interpolação. Estas foram geradas a fim de se visualizar os padrões de espacialização das variáveis físicas e químicas. Análises de componente principal (PCA), regressões lineares e estatística descritiva foram utilizadas para inferir relações entre o meio biótico e abiótico e produzir informações sobre a estrutura do habitat. Foi utilizado um índice de classificação de estado trófico para lagos tropicais, com base no fósforo total, para caracterizar a represa. Os resultados indicaram que o reservatório recebe um elevado aporte de nutrientes via tributário, principalmente do íon amônio e fósforo total. Grandes teores de nitrato também foram encontrados em regiões do reservatório que estão associadas a fontes difusas. Em associação destes dados com estudos anteriores, acredita-se que as altas taxas de entrada de PT, íon amônio e nitrato estejam relacionadas com o incipiente sistema de esgotamento sanitário e por atividades relacionadas ao uso do solo em sua bacia. A análise da PCA revelou que as estações próximas a entradas de tributários estavam fortemente correlacionadas. O modelo de compartimentação longitudinal de reservatórios encontrou diferentes zonas de rio e de transição muitas vezes se sobrepondo. Os índices de estado trófico revelaram, pelo elevado valor de PT, que o reservatório Vargem das Flores é um ambiente eutrófico.

Abstract

The objective of the present investigation is to provide information related to the longitudinal variation of limnological parameters in the urban tropical reservoir. The collection was carried in the late dry season (October, 6th, 2010). We analyzed the main limnological along 27 sampling points. In one sampling station, vertical profile was done. We used the kriging, principal components analysis (PCA) and linear regressions to infer possible correlations between the biotic and abiotic features and provide information of the structure of the habitat. Index was used for classification of trophic status based on tropical lakes, based on TP, to characterize the trophic index of the reservoir. The results of the study showed the reservoir receives a high input of nutrients through the rivers, principally ammonia-N and total phosphorus. Large amounts of nitrate were also found in parts of the reservoir that possibly are associated with diffuse sources. In combination these data with previous studies, we believe that these high rates of entry TP, ammonia and nitrate are related to the incipient sewage system and activities related to landuse in the basin. The PCA analysis showed that stations near the entrances of streams were strongly correlated and the model of longitudinal subdivision of reservoirs found different areas of the riverine and transition zone. The indices of trophic state revealed that Vargem das Flores reservoir is an eutrophic environment.

Introdução

Os estudos sobre os ecossistemas aquáticos, sobretudo de corpos d'água continentais, contribuíram para o refinamento dos conceitos ecológicos e em métodos para avaliar, remediar e restaurar os ambientes aquáticos e preservar os organismos que os habitam (DODDS, 2002). No entanto, o crescimento da população humana, associado a um grande aumento no consumo, determinou um novo patamar na demanda de recursos naturais e de produção de resíduos (ANDREOLI et al., 2011). Portanto, frente aos desafios que a urbanização acelerada impõe ao consumo e à distribuição de água, estudos de conservação e recuperação dos ambientes aquáticos são imperativos.

Como todos os demais ecossistemas aquáticos, os reservatórios sofrem grande influência do uso da sua bacia de drenagem (WETZEL, 2001). Em áreas urbanas, esses ambientes tornam-se mais susceptíveis a grandes alterações, uma vez que enfrentam uma grande pressão imposta pela ocupação antrópica e suas atividades na bacia hidrográfica. O escoamento superficial da água nesses locais, aliado à impermeabilização do solo, aumenta a velocidade e a capacidade de arraste, levando ao consequente aumento das concentrações de sedimentos e potencialização dos processos erosivos, gerando maiores cargas poluidoras (POLETO & MARTINEZ, 2011).

De maneira geral, pode-se dizer que a qualidade de uma determinada água é função das condições naturais e do uso e da ocupação do solo na bacia hidrográfica (SPERLING, 2005). Segundo Novotny (2003), a eutrofização é causada pelo aumento no aporte de fósforo e nitrogênio via tributários e escoamento superficial. Esse aporte de nutrientes pode ter origem em fontes pontuais, via esgotos ou descarga industrial, sendo relativamente mais fáceis de identificar, quantificar e controlar (CARPENTER et al., 1998), ou pode ocorrer via poluição difusa. Esta fonte não-pontual pode ser resultado de mudanças no uso ou no tipo de uso do solo, não sendo possível determinar uma única origem ou fonte, tais como água de chuva, as áreas de água de escoamento da forma urbana ou sistema de fossa séptica (SHRESTHA et al., 2008)

A quantidade de energia capturada, estocada e potencialmente utilizada em um ecossistema lacustre pode ser relativamente estimada pela simples aplicação da relação empírica baseada nas variáveis tais como produtividade primária, biomassa

algal, transparência da água e ou concentração de nutrientes (LIND *et al.*, 1993). Desta forma, os índices de classificação de estado trófico de lagos e reservatórios vêm sendo aplicados no estabelecimento de estratégias de manejo. Estes foram propostos visando resumir as variáveis analisadas em um número que possibilite observar a evolução da qualidade da água no tempo e no espaço e que sirva para facilitar a interpretação de variáveis ou indicadores (GASTALDINI *et al.*, 1994).

Para preservação e recuperação dos reservatórios é necessário compreender algumas diferenças entre esses ambientes artificiais e os lagos naturais. Segundo Thornton (1990), os reservatórios ocorrem ao longo de um “continuum” do fluxo do rio para a barragem com gradientes longitudinais resultando no estabelecimento de três distintas zonas possuindo propriedades físicas, químicas e biológicas únicas, sendo estas: A zona de rio, região mais rasa e estreita, onde deságuam os tributários, com fluxo relativamente alto, força advectiva suficiente para expressivo transporte de material e reduzida penetração de luz, conseqüentemente com limitada produtividade primária. A zona de transição, com significativo processo de sedimentação, aumento da penetração de luz e da produtividade primária. Por fim, a zona lacustre, mais próxima da barragem, onde a penetração de luz na coluna d’água é suficiente para promover a produtividade primária que pode sofrer potencial limitação por nutrientes. Deste modo, devido ao contínuo fluxo de água em direção à barragem e da variação do tempo de residência, os reservatórios podem ser considerados sistemas de transição entre rios e lagos, com mecanismos de funcionamento específicos, dependentes da bacia e dos usos do sistema, apresentando dinâmica própria, reflexo do seu tempo de residência, morfometria e profundidade (ANGELINI, 1999).

O presente trabalho teve por objetivo realizar um estudo da variação horizontal dos parâmetros limnológicos do reservatório de Vargem das Flores, a fim de se identificar as áreas de degradação ecológica, sua relação com atividades antrópicas, bem como fornecer informações sobre o sistema que podem vir a contribuir como base para futuros planos de manejo e monitoramento da represa. O reservatório foi escolhido por ser um importante manancial de abastecimento de água para Belo Horizonte (contribuindo com 15% do abastecimento) e para sua região metropolitana e por apresentar um histórico de problemas relacionados à eutrofização.

Material e Métodos

Área de Estudo

Vargem das Flores (Coordenadas UTM WGS 84 23 K 587407,5 m E; 7797318,8 m S) é um reservatório periurbano localizado entre os municípios de Contagem (que detém 87% da sua área) e Betim (com os 13% restante), na região metropolitana de Belo Horizonte, MG. Ele é formado principalmente pelo represamento dos ribeirões Betim e Água Suja, os quais pertencem à margem direita do rio Paraopeba, afluente do rio São Francisco, e que nasce dentro da área urbana de Contagem (**Figura 1**) (VIANA, 2009).

A represa, inaugurada em 1972, foi construída com a finalidade de abastecimento de água para as cidades de Contagem, Betim e Belo Horizonte. No entanto, a beleza cênica, as características favoráveis à prática de esportes náuticos e os atrativos das áreas marginais da lagoa, associada a sua localização, culminaram na situação de usos múltiplos que o reservatório se encontra atualmente. Como Vargem das Flores não possui área de proteção específica no seu entorno, está constantemente sob a ação de fatores negativos à conservação da qualidade de suas águas, já que todos os tipos de atividades são executadas na sua área de contribuição direta bem como em suas águas (VIANA, 2009).

Quanto aos aspectos relativos à sazonalidade, a represa de Vargem das Flores pode ser considerada regularizada e bem definida. A radiação solar na área da bacia é forte e intensa (média anual de 2600 h/ano). O clima apresenta-se como tropical/mesotérmico semi-úmido. Entre os meses de outubro a março (período chuvoso e quente), a temperatura máxima média é de 28°C e a temperatura mínima média é de 17°C. Entre os meses de abril a setembro (período seco e frio), as menores temperaturas ocorrem entre os meses de junho e julho, com temperatura máxima de 24°C e mínima média de 11°C. Os meses de abril, maio, setembro e outubro podem ser considerados meses de transição. A precipitação média anual em Vargem das Flores é de 1500 mm, com umidade relativa do ar oscilando entre 65% em agosto e setembro, a 80% em dezembro (SOUZA, 2003).

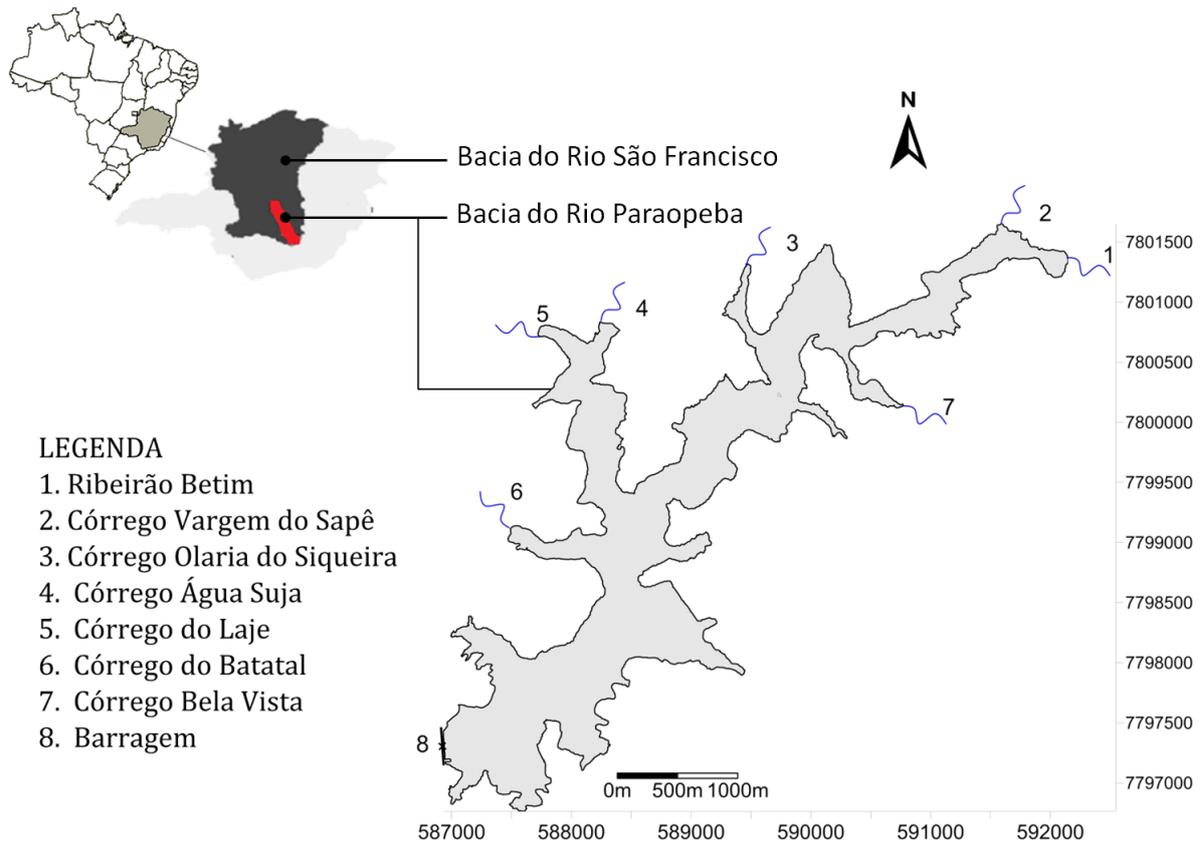


Figura 1. Localização do reservatório Vargem das Flores e seus tributários (coordenadas em sistema UTM).

Coleta de Dados Limnológicos

A coleta das variáveis físicas, químicas e biológicas foram realizadas entre as 10:45 e as 16:45 horas, no dia 06 de outubro do ano de 2010, final da estação seca. Foi realizada a amostragem em 27 estações (**Figura 2 e Tabela I**), sendo que em um dos pontos, o mais profundo, foi feito um perfil vertical. Em todos os pontos, a coleta dos parâmetros físicos e químicos foi feita sub superficialmente, à profundidade de 0,5m.

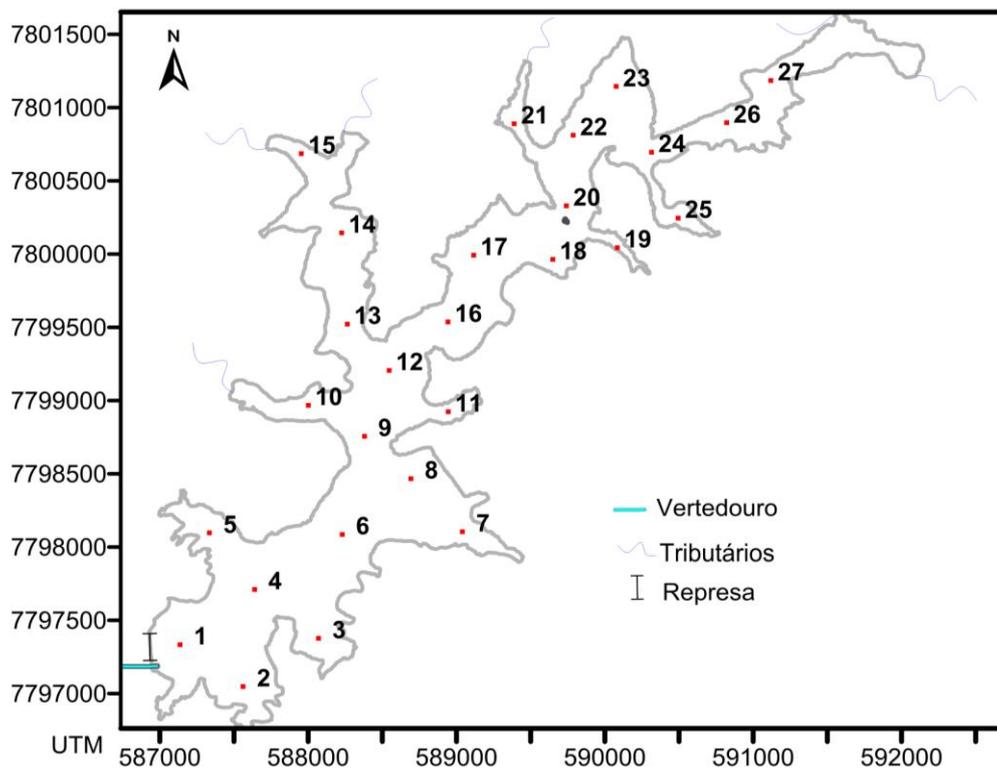


Figura 2. Localização das estações amostrais no reservatório Vargem das Flores, onde foram coletados os dados limnológicos. Mapa gerado através do programa *Surfer 10*.

Tabela 1. Coordenadas em UTM das estações de coleta amostradas no dia 06 de outubro de 2010.

Coordenadas (UTM)			Coordenadas (UTM)		
X	Y	Estações amostrais	X	Y	Estações amostrais
587137,02	7797334,12	1	587954,28	7800685,64	15
587562,03	7797047,44	2	588942,32	7799536,28	16
588069,82	7797376,26	3	589115,75	7799991,88	17
587639,46	7797710,86	4	589649,44	7799963,23	18
587335,21	7798096,19	5	590084,81	7800044,23	19
588229,43	7798086,18	6	589741,19	7800329,69	20
589040,66	7798105,23	7	589389,26	7800890,01	21
588693,03	7798467,14	8	589787,24	7800810,19	22
588380,22	7798756,83	9	590076,23	7801143,48	23
588001,15	7798968,21	10	590314,97	7800695,42	24
588944,09	7798922,94	11	590493,79	7800246,13	25
588545,96	7799206,32	12	590820,93	7800895,88	26
588263,62	7799522,26	13	591119,55	7801185,16	27
588226,92	7800144,79	14			

Variáveis Físicas e Químicas

As variáveis físicas e químicas foram coletadas em 27 estações amostrais, cobrindo toda a área do reservatório. No ponto mais profundo da represa, foi realizado um perfil vertical. A temperatura (°C), a condutividade elétrica ($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$) e o oxigênio dissolvido foram medidos *in situ* na sub superfície através da sonda multi-analisadora YELLOW SPRINGS modelos 556 MPS. A transparência da água foi medida por meio da extinção do disco de Secchi. A turbidez (NTU) foi analisada em laboratório com o turbidímetro Digimed modelo DM-C2.

Para a determinação da concentração de sólidos totais dissolvidos foi utilizado o método Gravimétrico, segundo APHA (1998). Para tanto, duas réplicas de cada amostra de água foram filtradas (250ml), utilizando-se filtros de fibra de vidro (Schleider and Schüll, 47 mm de diâmetro). Os filtros foram previamente calcinados em mufla, à temperatura de 400°C por 4 horas e pesados antes do uso. Os filtros contendo os resíduos foram levados à estufa, à temperatura de 100 °C por 2 horas e, em seguida, pesados. Posteriormente, os filtros foram transferidos para a mufla e novamente foram incinerados e pesados. Deste modo, o cálculo dos sólidos totais em suspensão (S.T.) (**Equação 1**), sólidos inorgânicos em suspensão (S.I.) (**Equação 2**) e sólidos orgânicos em suspensão (S.O.) (**Equação 3**) foi realizado da seguinte forma:

$$\text{S.S.T. (mg.L}^{-1}\text{)} = \frac{(A - B) \times 1000}{V} \quad \text{[Equação 1]}$$

Onde:

A= peso do papel filtro + resíduo (após secagem em estufa)

B= peso do papel filtro antes da filtração

V= volume da amostra usado em ml

$$\text{S.S.I. (mg.L}^{-1}\text{)} = \frac{(A - C) \times 1000}{V} \quad \text{[Equação 2]}$$

Onde:

A= peso do papel filtro + resíduo (após secagem em estufa)

C= peso do papel filtro + resíduo (após mufla)

V= volume da amostra usado em mL

$$\text{S.S.O. (mg.L}^{-1}\text{)} = \text{S.S.T} - \text{S.S.I}$$

[Equação 3]

Onde:

S.S.T= Sólidos totais em suspensão

S.S.I= Sólidos inorgânicos em suspensão

As análises da série nitrogenada (íon amônio, nitrito e nitrato) foram determinadas a partir de amostras congeladas, previamente filtradas a vácuo, utilizando o filtro de fibra de vidro GFC de 47 mm de diâmetro. O íon amônio foi determinada pelo método do nitroprussiato (KOROLEFF, 1976). O nitrito foi determinado pelo método da sulfanilamida associada ao alfa-naftil-etilenodiamina (BARNES & ROLKARD, 1951). O nitrato foi reduzido a nitrito através da adição do cádmio amalgamado (MACKRETH *et al.* 1978). O nitrogênio total (NT) foi determinado pelo método 4500-Norg (APHA, 1998), que tem como método a conversão do nitrogênio de compostos orgânicos em amônio na presença de sulfato de potássio e ácido sulfúrico.

O fósforo total foi obtido a partir de amostras congeladas, não filtradas, submetidas previamente à digestão com perssulfato, pelo método de Murphy & Riley (1962).

Parâmetros biológicos

Para análise da clorofila-a, a água foi filtrada a vácuo, em filtros Schleider and Schüll, com 47 mm de diâmetro, sendo mensurada pelo método de Lorenzen (1967). O método consiste na extração da clorofila-a a frio usando a acetona 90% como solvente orgânico. Posteriormente o extrato foi lido num espectrofotômetro regulado para um comprimento de onda na faixa do vermelho (663 nm) e com correção para turbidez (750 nm). Foi feita também a leitura da amostra acidificada para diferenciar as concentrações de clorofila-a das concentrações de seus produtos (feopigmentos).

Análises Estatísticas

Utilizou-se a análise de regressão linear simples e estatística descritiva para estudar as relações entre as variáveis limnológicas. Também foi utilizada uma análise de PCA para verificar a correlação entre as estações amostrais e os parâmetros limnológicos. Segundo Melo & Hepp (2008), quando as variáveis respostas possuem

escalas distintas, não faz muito sentido comparar valores absolutos, uma solução seria padronizar cada variável pelo seu desvio padrão. Assim, todos os parâmetros foram divididos pelos seus respectivos desvios padrão.

Confecção das Cartas Temáticas

As cartas temáticas foram confeccionadas através do programa *Surfer*[®] 10 (Golden Software Inc.) utilizando-se a krigagem³ como método interpolador. O método da krigagem utiliza distâncias ponderadas e estimação por médias móveis, pelo qual os pesos adequados são obtidos a partir de um variograma, representativo da média das diferenças ao quadrado dos valores irregularmente distribuídos de Z_i a intervalos de distâncias especificados (LANDIM, 2000). A krigagem é indicada para a espacialização de dados geológicos, pedológicos, geomorfológicos, parâmetros hidrológicos entre outros, em que se reconhece a existência de correlação espacial e/ou controle direcional (VIEIRA, 2009).

³ Krigagem (ou *Kriging*): É um método de interpolação que estima valores a pontos não amostrados. Utilizando o princípio da Primeira Lei de Geografia de Tobler, que diz que unidades de análise mais próximas entre si são mais parecidas do que unidades mais afastadas, a krigagem utiliza funções matemáticas para acrescentar pesos maiores nas posições mais próximas aos pontos amostrais e pesos menores nas posições mais distantes, e criar assim os novos pontos interpolados com base nessas combinações lineares de dados.

Resultados e Discussão

Caracterização limnológica

Os resultados das variáveis limnológicas coletadas e analisadas no Laboratório de Gestão Ambiental de Reservatórios estão sumarizados na **Tabela 2**.

Os perfis verticais de condutividade e temperatura realizados próximo à barragem, no ponto mais profundo da represa, indicaram estratificação, o que é comum para lagos tropicais nessa época do ano (**FIGURA 3**). À medida que se aprofundou na coluna d'água, houve uma diminuição da temperatura (que variou entre 26° e 20°C). Estrutura semelhante à da temperatura, foi observada para a condutividade elétrica, até a profundidade de 16m. Logo após, a condutividade apresentou súbito aumento nas maiores profundidades. O aumento da condutividade na zona mais profunda está relacionado com a composição do sedimento e com a elevada taxa de decomposição de matéria orgânica.

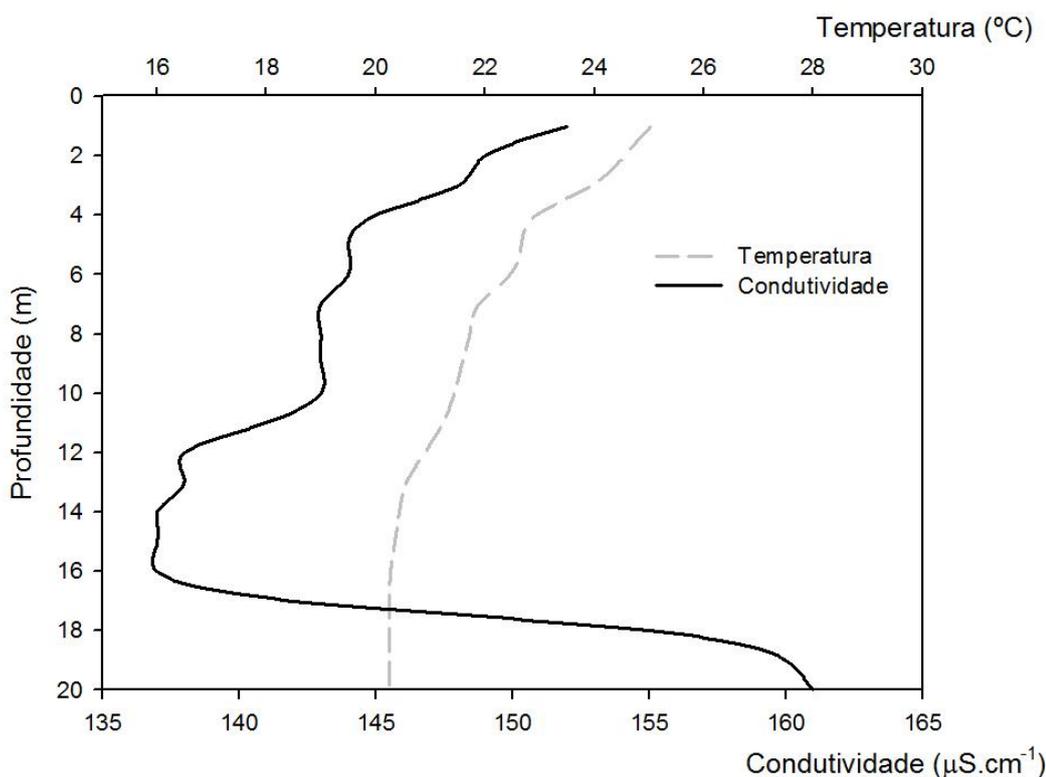


Figura 3. Perfil vertical de temperatura, oxigênio dissolvido (O.D.) e condutividade da represa Vargem das Flores, na estação 1, na coleta do dia 06 de outubro de 2010.

Tabela 2. Variáveis limnológicas medidas na sub-superfície das diferentes estações amostrais do reservatório Vargem das Flores, no dia 06.10.2010.

Estações Amostrais	S.S.T. (mg.L ⁻¹)	S.S.I. (mg.L ⁻¹)	S.S.O. (mg.L ⁻¹)	NT (µg.L ⁻¹)	NO ₃ ⁻ (µg.L ⁻¹)	NO ₂ ⁻ (µg.L ⁻¹)	NH ₃ (µg.L ⁻¹)	PT (µg.L ⁻¹)	Condut (µS.cm ⁻¹)	O.D. (mg.L ⁻¹)	Turb (NTU)	Secchi (m)	pH	Temp. (°C)	Hora
1	0,9	0,00	0,90	572,0	757,7	17,3	184,0	89,8	154,0	7,0	83,6	2,1	7,9	24,6	10:45
2	1,1	0,20	0,90	801,9	454,7	16,3	262,1	81,5	152,0	7,2	117,0	2,0	8,1	25,6	16:44
3	0,9	0,05	0,85	538,1	679,9	18,9	217,9	127,2	157,0	6,7	126,0	1,8	8,1	26,5	16:33
4	0,8	0,00	0,80	885,2	724,6	16,4	178,8	77,4	154,0	7,2	139,0	1,8	8,2	25,7	16:21
5	1,2	0,10	1,10	320,6	291,1	16,6	267,4	168,8	155,0	6,9	184,0	1,4	8,3	26,4	16:14
6	0,8	0,05	0,80	643,6	495,8	17,3	392,4	89,8	154,0	7,4	131,0	1,8	8,0	25,5	16:03
7	0,7	0,00	0,80	1450,4	779,2	18,9	285,6	131,4	159,0	6,6	121,0	1,9	8,3	27,3	15:50
8	1,0	0,00	1,00	616,3	889,1	18,1	251,7	85,7	152,0	7,7	150,0	1,8	7,9	25,9	15:39
9	1,1	0,10	1,00	273,8	740,7	17,3	426,2	110,6	158,0	6,9	162,0	1,7	8,1	26,4	15:29
10	1,0	0,05	0,95	943,8	851,6	18,1	288,2	85,7	157,0	7,2	116,0	1,9	8,1	26,0	15:20
11	1,0	0,10	0,95	583,1	924,9	18,5	368,9	77,4	156,0	7,5	137,0	1,9	8,0	25,3	15:09
12	0,9	0,05	0,85	915,8	304,5	17,3	288,2	85,7	158,0	7,0	135,0	2,0	8,2	26,3	15:02
13	0,9	0,15	0,80	931,5	671,0	18,7	496,5	85,7	164,0	7,2	201,0	1,6	8,2	26,2	14:24
14	1,2	0,25	0,95	950,4	626,3	19,9	561,6	102,3	167,0	7,4	270,0	1,1	7,9	26,1	14:34
15	7,1	5,00	2,10	4362,5	161,5	27,2	845,5	202,0	309,0	6,7	123,0	0,2	7,6	27,1	14:45
16	0,9	0,15	0,75	961,4	710,3	17,5	298,6	118,9	159,0	7,6	178,0	1,8	8,1	25,8	14:11
17	4,3	0,25	4,05	445,7	435,9	18,1	366,3	81,5	156,0	7,9	132,0	1,5	7,9	25,4	13:57
18	0,9	0,20	0,70	288,1	536,9	17,6	355,9	69,0	160,0	7,4	164,0	1,7	8,0	26,3	13:46
19	2,1	1,40	0,75	644,9	631,7	17,3	335,1	110,6	159,0	7,7	447,0	0,8	7,8	25,8	13:35
20	0,7	0,05	0,70	585,6	587,0	18,1	392,4	77,4	161,0	8,1	138,0	1,7	7,9	25,7	13:00
21	1,3	0,70	0,60	573,3	539,6	18,7	350,7	94,0	160,0	8,2	250,0	1,4	8,0	25,9	12:48
22	0,7	0,25	0,50	748,5	730,0	21,3	371,5	77,4	161,0	8,0	137,0	1,4	7,9	25,8	12:39
23	0,8	0,25	0,60	690,5	726,4	21,6	457,5	114,8	159,0	8,3	135,0	1,5	7,9	25,1	12:29
24	1,9	1,35	0,60	865,1	470,8	17,3	618,9	102,3	168,0	8,0	510,0	0,7	7,7	25,5	12:10
25	3,6	2,65	0,95	608,5	477,9	18,3	371,5	123,1	156,0	8,2	111,0	0,3	7,5	25,2	12:19
26	4,2	-1,50	5,70	378,1	448,4	27,5	769,9	143,9	186,0	7,8	107,0	0,2	7,4	25,7	12:00
27	6,0	4,45	1,55	1848,4	120,4	25,2	699,6	156,3	187,0	8,2	119,0	0,2	7,4	25,1	11:42

Para avaliação do grau de homogeneidade da distribuição horizontal das variáveis limnológicas, utilizou-se o coeficiente de variação (PETERNELLI, 2011). As variáveis que apresentaram distribuição longitudinal mais heterogênea, representada pelo coeficiente de variação foram sólidos totais (95%), nitrogênio total (89%), íon amônio (43%), turbidez (57%) e transparência de Secchi (42%). Enquanto os parâmetros com distribuição mais homogênea foram oxigênio dissolvido (6,8%), pH (3,2%) e temperatura (2,3%).

A transparência de Secchi (**Figura 4**) variou entre 0,2 e 2,1m. A variação foi positivamente relacionada com o aumento da profundidade (**Figura 4**). A associação entre essas duas variáveis foi estatisticamente significativa ($r= 0,7$ e $p= 0,037$), assim como a relação da turbidez com a profundidade (**Figura 5**), que variou inversamente com o aumento da profundidade ($r= -0,25$ e $p= 0,044$). A maior transparência e conseqüentemente menor turbidez à medida que se aumenta a profundidade pode estar relacionada com as características morfométricas e os padrões de desenvolvimento longitudinal em reservatórios.

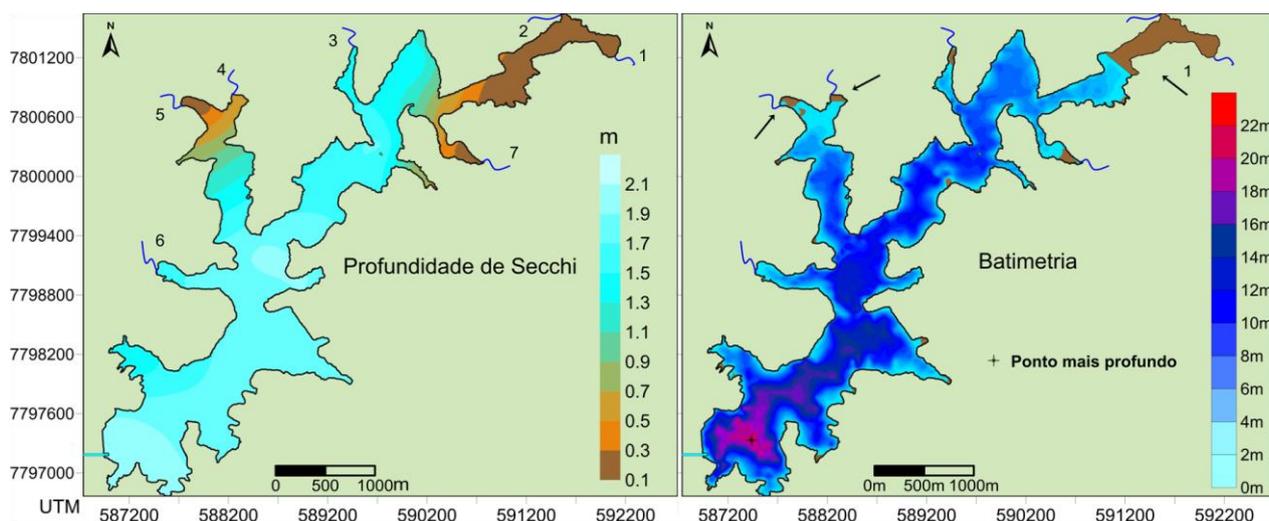


Figura 4. Carta temática da profundidade de Secchi (à esquerda) para o reservatório de Vargem das Flores, na campanha de 06 de outubro de 2010. Os números indicam as áreas de entrada dos tributários: 1. Ribeirão Betim, 2. Córrego Vargem do Sapê, 3. Córrego Olaria do Siqueira, 4. Córrego Água Suja, 5. Córrego do Laje, 6. Córrego Batatal e 7. Córrego Bela Vista. Carta batimétrica (à direita). As setas indicam as áreas assoreadas, sendo que a seta indicada pelo número 1 representa a área mais assoreada. (Fonte: Capítulo 1).

Segundo Thornton et al (1990), ao longo do *continuum* do fluxo do rio até a barragem, há a formação de três zonas, sendo a zona de rio ou lótica a mais próxima dos tributários com menores profundidades, relativamente estreita e bem misturada, com forças advectivas auxiliando no transporte de significativas quantidades de material fino particulado. Essa zona é caracterizada por uma intensa descarga de nutrientes e reduzida produtividade primária, resultante da alta turbidez. Sendo rasa

e bem misturada, essa zona apresenta-se bem oxigenada, embora a degradação de matéria orgânica alóctone represente significativa demanda de oxigênio. Como há um aumento da sedimentação e da disponibilidade de luz no sentido rio-barragem, a produtividade primária também aumenta na segunda região, conhecida como zona de transição. Finalmente, na região lântica, chamada de zona lacustre do reservatório, próxima à barragem, há um aumento da transparência e conseqüentemente elevação da disponibilidade de luz.

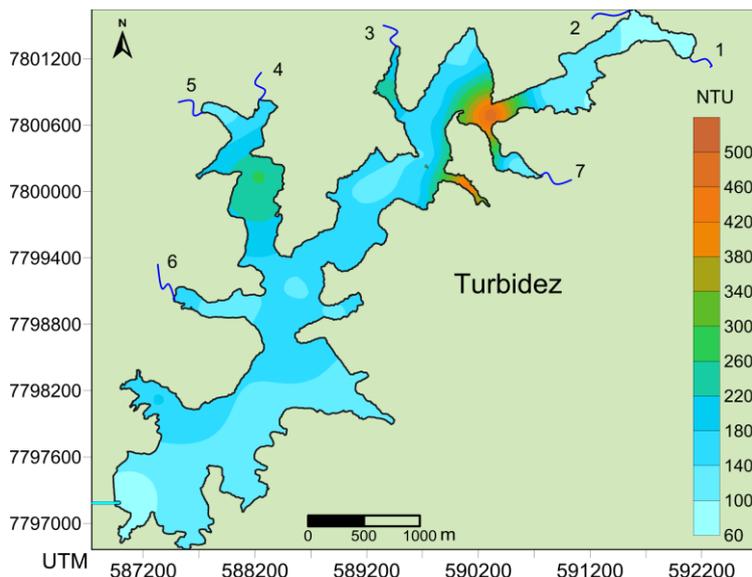


Figura 5. Carta temática de turbidez do reservatório de Vargem das Flores referente à coleta limnológica realizada em 06.10.2010.

O braço de entrada dos tributários Vargem do Sapê e Ribeirão Betim e do Córrego Bela Vista, foram encontrados os maiores valores de O.D. (**Figura 6**) apesar da distribuição ao longo do reservatório não ter apresentado grandes variações (6,6 a 8,3 mg.L⁻¹). O O.D. apresentou correlação negativa significativa com a temperatura ($r=-0,75$ e $p= 0,0002$) e com o pH ($r= -0,28$ e $p= 0,002$) (**Figura 6**). O alto coeficiente de correlação da temperatura e O.D. está no fato da temperatura ser um dos principais fatores de interferência na solubilidade do oxigênio, assim como a pressão, uma vez que com a diminuição da temperatura há um aumento da concentração de saturação do oxigênio dissolvido (COLE, 1983).

O reservatório apresentou-se levemente alcalino em toda sua extensão, com valores de pH variando entre 7,4 e 8,3. Estes valores podem estar relacionados à fotossíntese, no qual tal processo retira acidez carbônica, elevando desta forma o pH. Analisando a correlação entre estes parâmetros (ph e clorofila-a), encontrou-se uma relação positiva significativa ($r=0,30$ e $p=0.003$). Os menores valores de pH

foram encontrados na entrada de alguns tributários. Segundo Maier (1987), uma pequena diminuição no pH pode também estar associado ao aumento no teor de matéria orgânica que leva a conseqüente queda na quantidade de oxigênio dissolvido disponível no corpo d'água. Investigando essa relação, encontrou-se uma associação negativa significativa ($r= -0,45$ e $p= 0,018$) entre os sólidos em suspensão - fração orgânica (**Figura 6**) e o pH, o que leva a acreditar que a entrada de matéria orgânica via tributários pode ter sido a razão dos menores valores de pH nestas áreas. Entretanto a correlação entre matéria orgânica em suspensão e O.D. não foi significativa ($r= -0,58$ e $p= 0,40$). Acredita-se que a condição de oxigênio nos braços de entrada dos tributários seja mais fortemente influenciada pelas condições de mistura devido à velocidade de fluxo dos rios, como sugerido por Thornton (1990), que propriamente pelo aporte de matéria orgânica.

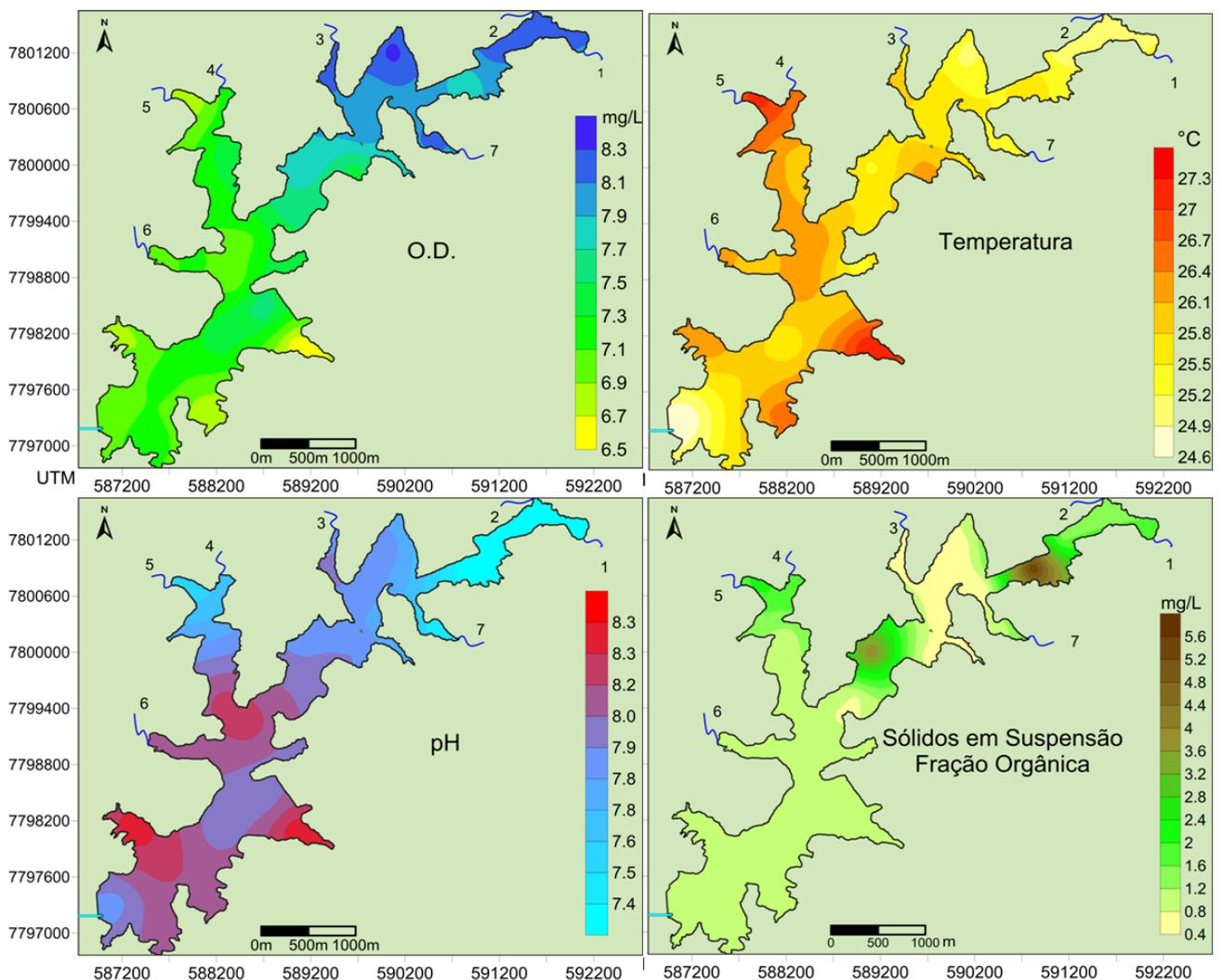


Figura 6. Cartas temáticas do reservatório de Vargem das Flores para a campanha de 06 de outubro de 2010: Temperatura (acima, à direita); Oxigênio dissolvido (O.D.) (acima, à esquerda); pH (abaixo, à esquerda) e Sólidos em suspensão – fração orgânica (abaixo e à direita). Os números indicam as áreas de entrada dos tributários: 1. Ribeirão Betim, 2. Córrego Vargem do Sapê, 3. Córrego Olaria do Siqueira, 4. Córrego Água Suja, 5. Córrego do Laje, 6. Córrego Batatal e 7. Córrego Bela Vista.

As cartas temáticas de condutividade e sólidos totais em suspensão (S.S.T.) apresentaram padrões semelhantes, estando fortemente associadas ($r= 0,74$ e $p= 0,00$) (**Figura 7**). A transparência de Secchi também está inversamente relacionada ao padrão S.S.T. ($r=-0,81$ e $p= 0,00$) e de condutividade ($r= -0,57$ e $p= 0,002$). A turbidez, apesar de não apresentar associação significativa com os sólidos totais ($r= 0,07$ e $p= 0,72$) e com o Secchi ($r= 0,27$ e $p= 0,16$), apresentou padrão semelhante ao de S.S.T. e ao de condutividade, com valores mais elevados nos braços de entrada de tributários.

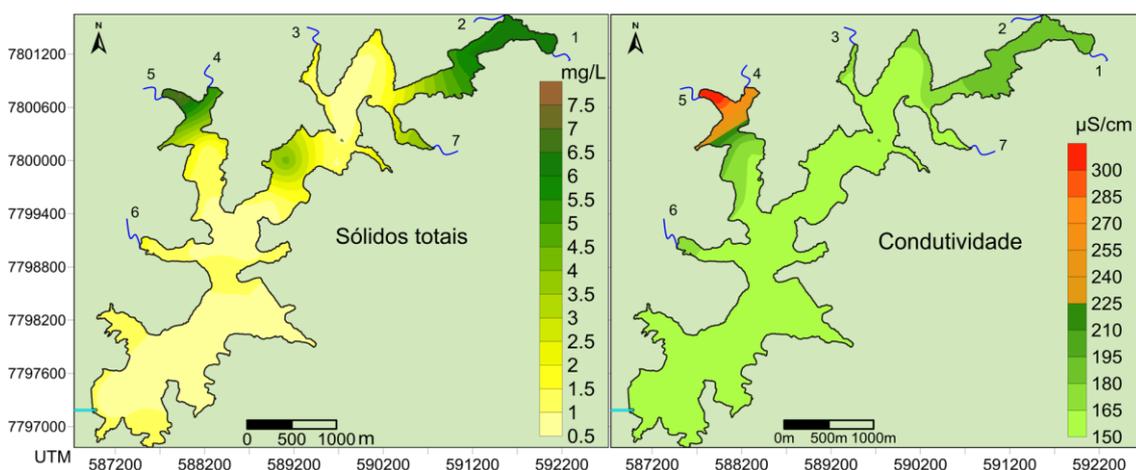


Figura 7. Cartas temáticas do reservatório de Vargem das Flores para a campanha de 06 de outubro de 2010: Sólidos totais em suspensão (à esquerda) e Turbidez (à direita). Os números indicam as áreas de entrada dos tributários: 1. Ribeirão Betim, 2. Córrego Vargem do Sapê, 3. Córrego Olaria do Siqueira, 4. Córrego Água Suja, 5. Córrego do Laje, 6. Córrego Batatal e 7. Córrego Bela Vista.

A condutividade pode estar correlacionada a sistemas produtivos uma vez que altas concentrações de nutrientes na água promovem elevada condutividade (DODDS, 2002). Acredita-se que a alta concentração de S.S.T., juntamente com elevadas concentrações de NT e PT, explique os elevados valores de condutividade nessa região. Segundo Cole (1983), a condutividade e os sólidos totais geralmente apresentam uma relação positiva.

A maior parte do material que entra na bacia hidrográfica provavelmente se faz através de pequenos rios e córregos (DODDS, 2002). O padrão dos sólidos totais, assim como da condutividade, se reflete na importância dos tributários no aporte de impurezas para o reservatório. Desta forma, o aumento de material na coluna d'água eleva a turbidez, diminuindo a incidência de luz em maiores profundidades, levando a menores valores de Secchi.

Comparando os dados de monitoramento da COPASA (**Tabela 3**), por um período de 7 anos, para a mesma época da coleta amostral realizada neste trabalho (final da estação seca), pode-se afirmar que os intervalos de valores da série amostral (com valores entre <2 e 13 mg.L⁻¹) foram bastante semelhantes aos da coleta realizada do presente trabalho (entre 0,80 e 7,10 mg.L⁻¹).

Tabela 3. Série de dados de monitoramento da COPASA de Sólidos Totais em Suspensão entre os anos de 2003 a 2010 em quatro estações amostrais

SST (mg/L)							
Data	Est A	Data	Est B	Data	Est C	Data	Est D
set/03	2	ago/03	2,4	ago/03	<2	ago/03	5
out/04	13	out/04	7	out/04	8	out/04	9
out/05	5	out/05	3	out/05	7	out/05	4
set/06	5	out/06	4	out/06	6	out/06	6
out/07	5	ago/07	3,4	ago/07	4	ago/07	3,6
set/08	<2	out/08	<2	out/08	2	out/08	4
out/09	<2	out/09	10	out/09	<2	out/09	<2
out/10	<2	out/10	<2	out/10	<2	out/10	<2

Os dados da série histórica foram coletados em quatro pontos amostrais e estes estão representados na **Figura 8**, juntamente com os 27 pontos coletados no atual levantamento limnológico, a fim de se verificar quais estações estão mais próximas para comparação dos valores de ambos os conjuntos de dados. Assim, comparou-se por proximidade de estações os valores da Estação A com o ponto 1; a Estação B com o ponto 12; a Estação C com os pontos 13 e 14 e os valores da Estação A com o ponto 20 (**Tabela 4**). Os dados do ano de 2010 de ambas as estações não divergiram tanto, no entanto comparando a média dos dados de monitoramento com os dados de 2010, observa-se que os valores de SST já se apresentaram mais elevados ao longo dos 7 anos expostos aqui.

Tabela 4. Comparação dos dados de monitoramento da COPASA (ano de 2010 e média dos 7 anos) e dos dados coletados no ano de 2010 pelo LGAR, por estação de coleta.

DADOS	Local	Valores	Local	Valores	Local	Valores	Local	Valores
LGAR	Pto 1	0,90	Pto 12	0,90	Pto 13 e 14	0,95 a 1,20	Pto 20	0,75
Copasa 2010	Est. A	<2	Est. B	<2	Est. C	<2	Est.D	<2
Copasa média		4.5		4.225		4.125		4.45

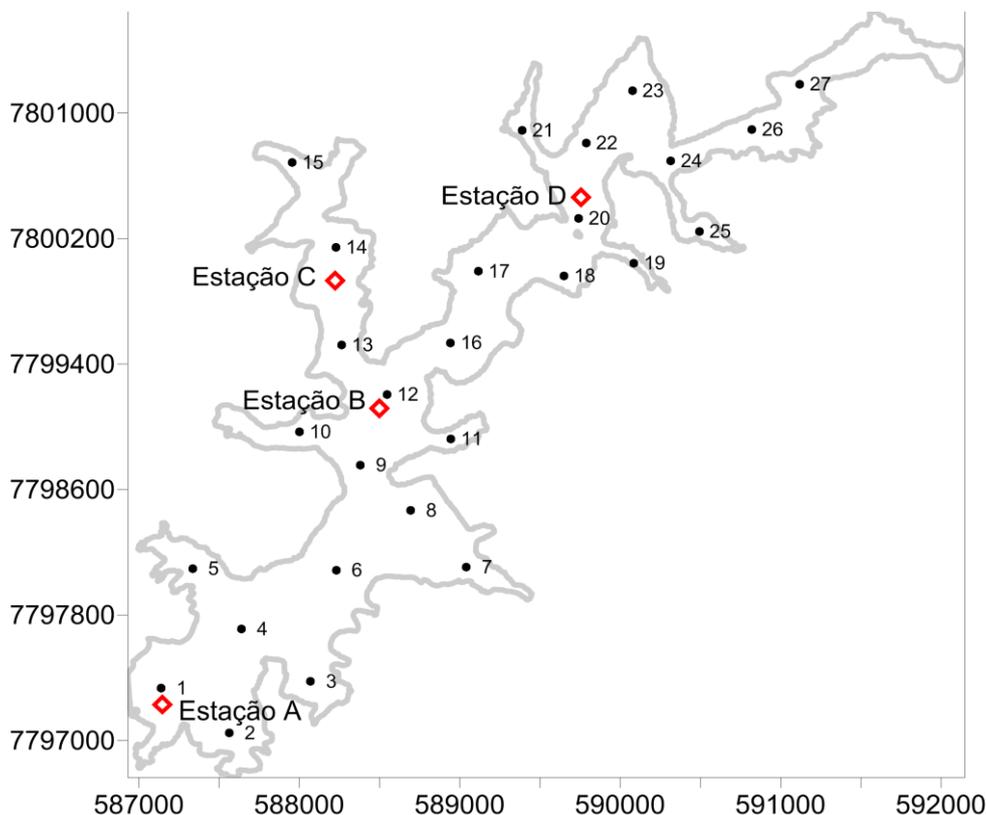


Figura 8. Localização das estações de monitoramento da COPASA em vermelho (Estações A, B, C e D). As marcações em vermelho simbolizam os 27 pontos em que foram realizadas a coleta limnológica de 2010.

Os valores de condutividade encontrados no reservatório Vargem das Flores são bastante elevados, principalmente por serem dados de estação seca, onde presume-se valores inferiores ao da estação chuvosa. Valores de condutividade superiores a $200 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ refletem o profundo grau de degradação ambiental existente em toda a bacia, principalmente considerando o fato de que o teor normal de condutividade para águas naturais não contaminadas na RMBH fica aquém dos $100 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ (FREIRE & PINTO-COELHO, 1986).

Com relação ao padrão da distribuição da série nitrogenada (**Figura 9**), observa-se que a maior contribuição de entrada de nitrogênio inorgânico no sistema, via tributários, é realizada pela íon amônio. O fósforo total (**Figura 10**) segue o mesmo padrão. Elevados valores de NT, NO_2^- , NH_3^+ e PT indicam contaminação por esgoto e/ou atividade agrícola. A complexa distribuição de nitrato e elevados valores em áreas que não recebem diretamente contribuição por tributário indicam que essa contaminação difusa é resultante do escoamento superficial, resultante das atividades de uso do solo de sua bacia de drenagem.

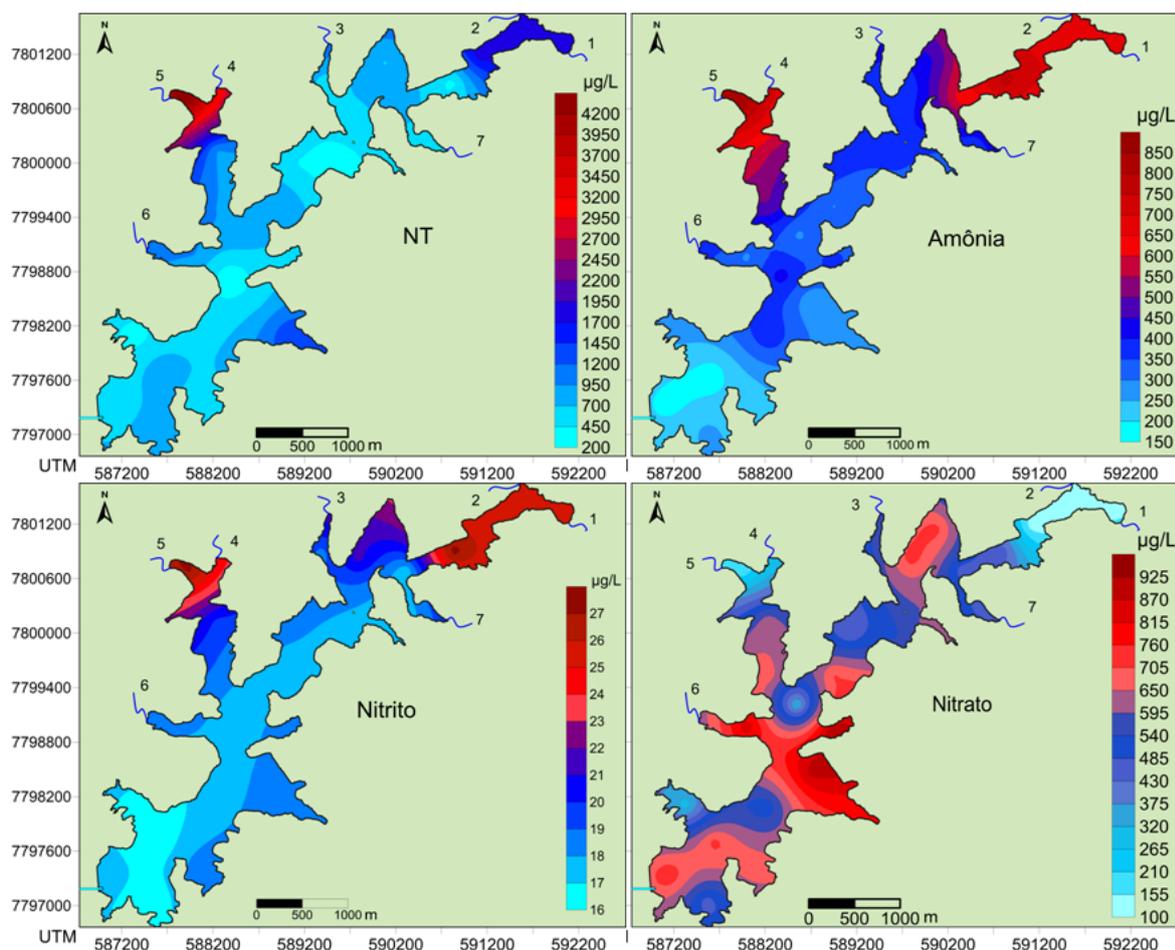


Figura 9. Cartas temáticas do reservatório de Vargem das Flores para a campanha de 06 de outubro de 2010: Nitrogênio total (acima, à esquerda); Íon amônio (acima, à direita); Nitrito (abaixo, à esquerda) e Nitrate (abaixo, à direita). Os números indicam as áreas de entrada dos tributários: 1. Ribeirão Betim, 2. Córrego Vargem do Sapê, 3. Córrego Olaria do Siqueira, 4. Córrego Água Suja, 5. Córrego do Laje, 6. Córrego Batatal e 7. Córrego Bela Vista.

O nitrogênio inorgânico é altamente solúvel e abundante em águas que recebem altas concentrações de nitrogênio, resultantes da descarga de esgotos domésticos ou de atividades agrícolas (TUNDISI & MATSUMURA-TUNDISI, 2008). O nitrito é ocasionalmente encontrado em águas naturais, especialmente quando esgoto está presente e pode ser um problema devido sua natureza tóxica (DODDS, 2002). Seus valores são reduzidos quando comparados aos de nitrate e do íon amônio, visto que é uma espécie química que está em constante processo de redução, se transformando em íon amônio, ou oxidação, transformando-se em nitrate. Já a distribuição do íon amônio em água doce é altamente variável regionalmente, sazonalmente e espacialmente dentro dos lagos e dependente do nível de produtividade do lago e da extensão da poluição de matéria orgânica (WETZEL, 1983).

Os padrões de compartimentação espacial encontrados nas cartas temáticas de NT, íon amônio e nitrito apontam para grande contaminação dos tributários por esgoto e atividades agrícolas. Já a carta temática de nitrato apresenta um padrão complexo de distribuição, demonstrando valores maiores na margem sul do reservatório (estações 7, 8 e 11). Dados da COPASA (1998 *apud* SOUZA, 2003), em estudo sobre “Uso e ocupação do solo e as cargas difusas de poluentes por sub-bacia” no ano de 1998, indicam que essa região é ocupada por sítios e moradias de ocupação esporádica e empreendimentos de atividades comerciais (como hotéis e pousadas), industriais e mineração (pedreira). No tributário Córrego do Batatal, os elevados valores de nitrato, de acordo com o uso e ocupação do solo (**Tabela 5**), podem ser pela atividade de agricultura e a área florestada, assim como nos outros pontos (22 e 23), onde os valores de nitrato foram elevados. Portanto, há uma maior influência de esgotos na bacia do Ribeirão Betim e Vargem do Sapê e no braço do Córrego Água Suja e do Córrego do Laje (**Tabela 5**), quando comparado aos outros tributários, o que justifica os altos valores do íon amônio.

Tabela 5. Uso e ocupação do solo por sub bacia (situação em 1998).

Sub-bacia	Área seca (há)	Área (%)		
		Florestas	Rural	Urbana
Ribeirão Betim	3.447	41	34	25
Córrego V do Sapê	2.919	59	40	1
Córrego Bela Vista	1.053	59	38	3
Córrego Água Suja	2.624	50	27	24
Córrego do Laje	310	63	37	0
Córrego Batatal	172	73	25	2
Contribuição direta	1.101	65	29	6

Fonte: adaptado de Souza (2003)

Comparando os dados de monitoramento da COPASA (**Tabela 6**) de NT no final da estação seca, percebe-se que os valores da série amostral variaram ao longo dos anos. Não foi possível comparar os dados da COPASA do ano de 2010 com os dados do LGAR, visto que não foi realizada coleta neste período. No entanto, nos anos anteriores os valores de NT foram bastante quando comparados aos encontrados nas estações próximas coletadas no ano de 2010 (**Figura 8 e Tabela 2**).

Tabela 6. Série de dados de monitoramento da COPASA de nitrogênio total entre os anos de 2003 a 2010 em quatro estações amostrais

N total (mg/L)							
Data	Est. A	Data	Est. B	Data	Est. C	Data	Est. D
set/03	SD	ago/03	<0,02	ago/03	SD	ago/03	0,16
out/04	0,27	out/04	0,12	out/04	0,17	out/04	SD
out/05	0,28	out/05	0,35	out/05	0,35	out/05	0,32
set/06	3,42	out/06	3,02	out/06	2,58	out/06	3,14
out/07	3,08	ago/07	1,68	ago/07	1,96	ago/07	2,91
set/08	0,88	out/08	11,65	out/08	4,26	out/08	6,22
out/09	SD	out/09	SD	out/09	SD	out/09	SD
out/10	SD	out/10	SD	out/10	SD	out/10	SD

SD - sem dados

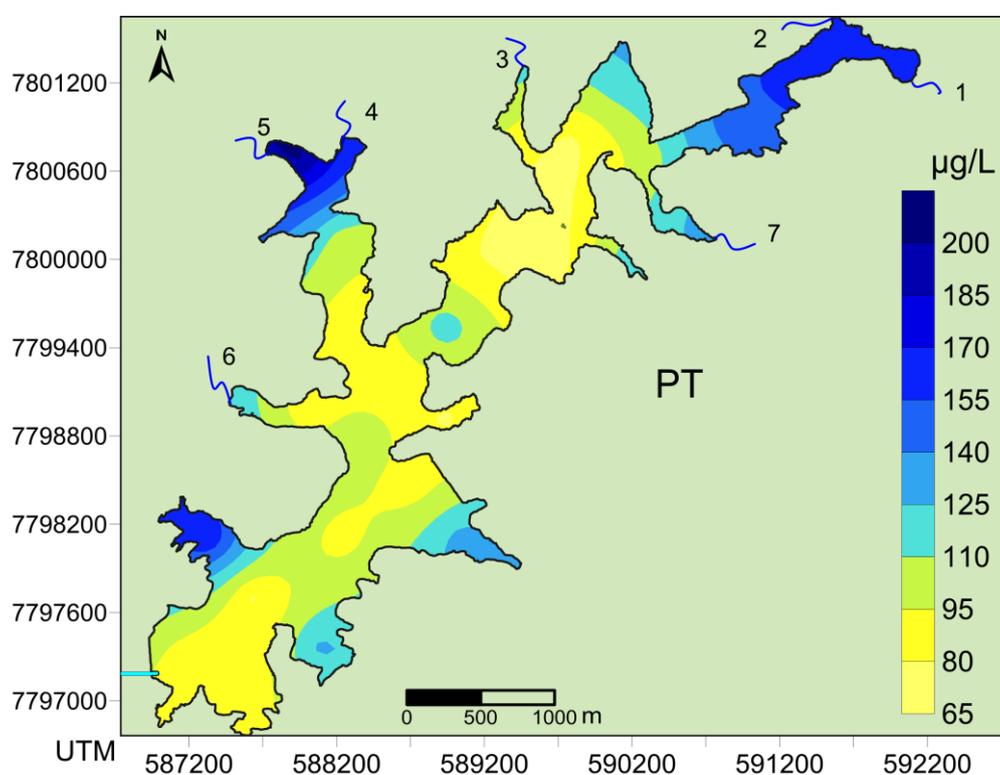


Figura 10. Carta temática de fósforo total do reservatório Vargem das Flores para a coleta de 06 de outubro de 2010.

As mais importantes fontes artificiais de fosfato, maior parcela do PT, são os esgotos domésticos e industriais e o material particulado de origem industrial contido na atmosfera. Em muitas regiões, notadamente nas industrializadas e com elevada densidade populacional, as fontes artificiais de fosfato são mais importantes que as naturais (ESTEVES, 2011). O conteúdo de fósforo na precipitação é geralmente menor que $30 \mu\text{g.L}^{-1}$ em regiões não poluídas, esse valor pode ultrapassar $100 \mu\text{g.L}^{-1}$

em precipitações e próximas a agregados urbanos industriais (WETZEL, 1983). Em Vargem das Flores, localizada em um parque industrial (município de Contagem), os valores de PT variaram entre 69 e 202 $\mu\text{g.L}^{-1}$. Esses valores de PT indicam que o reservatório está sofrendo processo de eutrofização, principalmente nas regiões dos tributários receptores de efluentes que tiveram suas margens alagadas, formando remansos que dificultam sua autodepuração (NAVAL & BRITO, 2003).

Segundo Diniz (2003), à montante dos tributários Ribeirão Betim e Córrego Água Suja, verifica-se densa ocupação, com intensa concentração de empreendimentos de prestação de serviços, atividades comerciais e industriais, tradição pecuária e agricultura, o que representa um importante processo de desfiguração geológica, topográfica. A incipiência do sistema de esgotamento sanitário, cuja rede coletora e o tratamento do mesmo atendem apenas a uma parcela reduzida da população total da bacia, difunde o uso crescente de fossas negras, sumidouros unifamiliares, caminhões limpa-fossa e outras alternativas menos efetivas para a preservação do ambiente de cabeceira desses tributários. Assim, os padrões de uso do solo na bacia requerem, com urgência, um disciplinamento de sua ocupação e uso.

Avaliação do grau de trofia

A fim de se avaliar o grau de trofia do reservatório, utilizou-se índice de classificação de estado trófico. Essas classificações dos ecossistemas aquáticos são úteis, pois permitem a comparação da produtividade de ecossistemas dentro e entre eco regiões, além de fornecer uma aproximação para a determinação do grau de eutrofização (DODDS, 2002). Existem diversos índices de classificação (CARLSON, 1977; OECD, 1982; VOLLENWEIDER, 1968) que utilizam diversas variáveis – como: PT, NT, Cla e profundidade de Secchi – e apresentam diferentes valores limites.

Os lagos e reservatórios tropicais apresentam os mesmos impactos com relação à eutrofização que sistemas de água doce de regiões temperadas. Entretanto, segundo Tundisi & Matsumura-Tundisi (2008), diferenças quanto à temperatura, precipitação e sazonalidade produzem outras características que tornam difíceis a comparação entre os ambientes tropicais e temperados. Assim, índices relativos a ambientes temperados deveriam ser usados com cautela em ambientes tropicais. Portanto, optou-se por fazer uso de um índice de classificação com base em reservatórios tropicais.

Salas & Martino (1991) propuseram que lagos e reservatórios situados em regiões tropicais, geralmente, apresentam valores de fósforo total maiores que em regiões temperadas, o nitrogênio como um fator importante e que o metabolismo do ambiente aquático é mais acelerado. Funceme (2002) relata que alguns limnólogos consideram o estado trófico através da probabilidade de ocorrência, pois é quase impossível determinar precisamente o estado trófico de um reservatório. A **Figura 11** apresenta a probabilidade do nível trófico para lagos tropicais em função da concentração de PT. Desta forma, a represa de Vargem das Flores que exibiu variação do fósforo total de 69 a 202 $\mu\text{g.L}^{-1}$, com média de 106 $\mu\text{g.L}^{-1}$, pelo índice de Salas & Martino (1991), apresentou maior probabilidade de ser um ambiente eutrófico, sendo as chances de aproximadamente 80%.

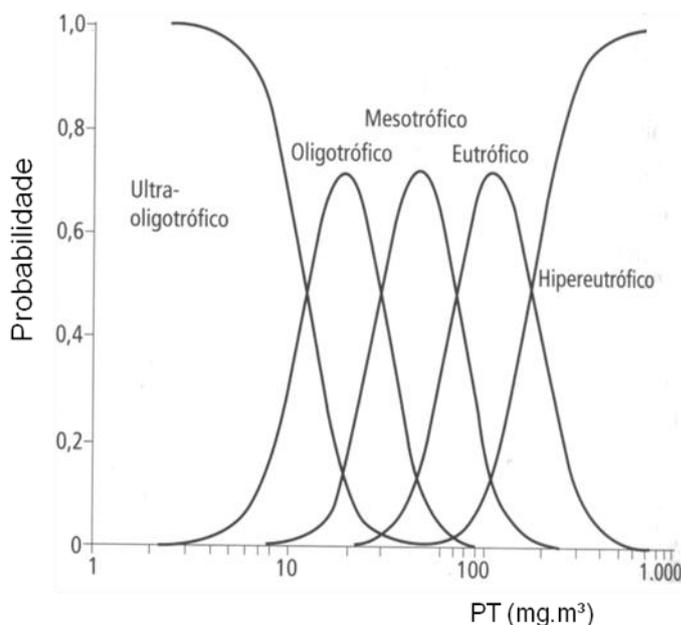


Figura 11. Distribuição probabilística de nível trófico de lagos tropicais em função da concentração de fósforo total (SALAS & MARTINO, 1991).

Devido a problemas na análise de NT em algumas estações, para avaliar o nutriente limitante no reservatório de Vargem das Flores realizou-se uma relação entre o nitrogênio inorgânico (NI) e o fósforo total. Esta teve a finalidade de se obter uma aproximação da relação atômica NT:PT proposta por Vollenweider (1989), na qual sendo a razão entre estes nutrientes maior do que 9, significaria que o corpo d'água sofreria potencial limitação por fósforo, enquanto uma razão NT:PT menor do que 9, seria um indicativo de que o nitrogênio seria o nutriente limitante.

No reservatório de Vargem das Flores, apenas 7 das 27 estações apresentaram razão NI:PT menor do que 9, sendo que estes valores inferiores estiveram muito próximos deste limite. O valor médio da razão para todo o reservatório foi de 10,2. Deste modo, acredita-se que o reservatório é potencialmente limitado pelo PT, uma vez que a razão utilizada para tal averiguação é um valor subestimado, pois os valores de nitrogênio orgânico não foram contabilizados nesta aproximação.

Quando analisada a distribuição longitudinal de clorofila-a (**Figura 12**), esta apresentou, aparentemente, uma relação positiva com a distribuição do PT. Essa relação de associação entre estes dois parâmetros pode ser mais um indicativo de que o fósforo é o fator limitante do reservatório.

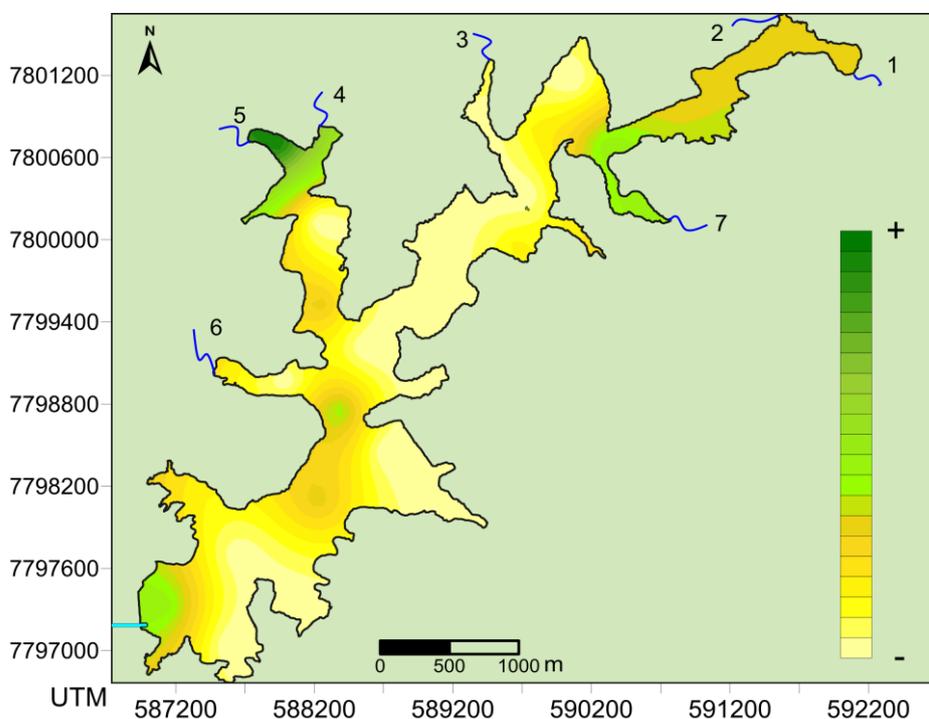


Figura 12. Carta temática da distribuição da concentração de clorofila-a, da coleta do dia 06 de outubro de 2010.

Os dados de clorofila-a também apresentaram problemas, possivelmente nas leituras realizadas pelo espectrofotômetro. Os valores resultantes da análise foram julgados incoerentes com a situação do reservatório, sendo apenas utilizada uma escala de inferência, quanto à maior e menor concentração da mesma. Apesar da incoerência dos valores, uma vez que o mesmo erro esteve embutido em todas as amostras, acredita-se que a relação de maior e menor concentração de clorofila-a na carta temática apresenta-se consistente e, portanto, está apresentada na **Figura 12**.

Modelo de compartimentação do reservatório Vargem das Flores

A autocorrelação espacial (forma de dependência estatística entre as observações coletadas ao longo do espaço) é uma característica geral das variáveis ecológicas e pode influenciar os testes estatísticos clássicos (PINTO *et al*, 2003). Sendo assim, a abordagem geoestatística é mais hábil em tratar as variáveis de interesse, como variáveis regionalizadas e demonstrar seu atual padrão de distribuição espacial, pois alivia a hipótese de independência, permitindo a autocorrelação espacial nos resíduos (WANG & LIU, 2005). Deste modo, a espacialização, sob a forma de mapas temáticos de variáveis limnológicas, permite identificar regiões com águas mais ou menos comprometidas, as relações entre elas, focos pontuais de degradação bem como padrões espaciais e a presença de compartimentalizações na represa, auxiliando na compreensão do funcionamento físico, químico e biológico desse ecossistema aquático (RESCK, 2007).

Os mapas temáticos gerados para a represa Vargem das Flores apresentaram padrões que sugerem uma compartimentação do reservatório. A fim de se realizar uma proposição a respeito do reservatório apresentar-se compartimentado, uma PCA foi realizada para determinar quais as estações estavam mais correlacionadas e quais parâmetros físicos e químicos correspondiam a essa correlação.

A partir da análise de PCA pôde-se extrair dois componentes que juntos explicaram 60,88% da variância total dos dados (componente 1 (C1): 36,01%; componente 2 (C2): 24,87%. Para a extração desses dois componentes, foram feitas diferentes combinações entre as variáveis coletadas, até atingir uma análise de componentes principais com expressiva representatividade na caracterização da represa. Analisando os dois componentes, as estações que mais contribuíram para as variações foram a 27 e 15, tendo maior correlação entre as variáveis condutividade, NO_2^- , NT e PT; seguidas pelas estações 14, 25 e 26 e positivamente relacionados com as variáveis NH_3^+ e S.T. (**Figura 13**).

A partir dos resultados da PCA, utilizaram-se as variáveis (NT, PT, NH_3^+ , NO_2^- , condutividade e secchi) que apresentaram maior correlação com as estações de entrada de tributários (14, 15, 25, 26 e 27), para construção de um gráfico representativo da compartimentalização do reservatório. Para tal representação, esperava-se encontrar curvas com valores mais altos próximos aos tributários,

valores intermediários na zona de transição e menores na zona lacustre, conforme modelo proposto por Thornton (1990). No entanto, a representação de um gráfico (Figura 14), considerando as estações desde o ribeirão Betim até o ponto mais próximo da barragem, gerou uma curva uma série de picos. Sendo estes picos na curva relativos às variáveis que oscilavam ao longo do reservatório, concluiu-se que este apresentava mais de uma zona de rio e transição. As estações 14,15, 26 e 27 foram estatisticamente diferentes das outras.

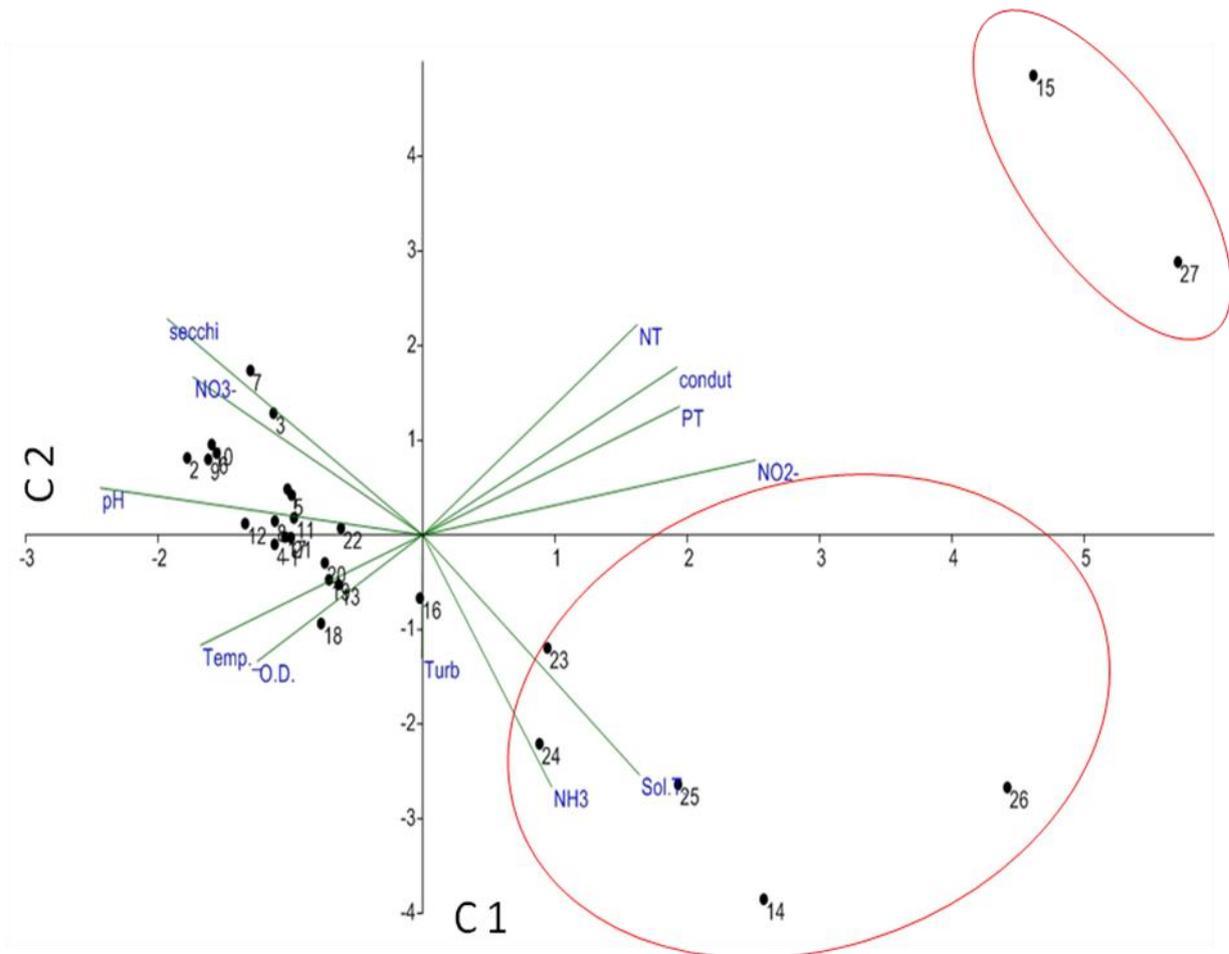


Figura 13. Análise de Componente Principal do reservatório Vargem das Flores comparando a correlação entre as variáveis limnológicas e as estações amostrais. As circunferências em vermelho indicam os grupos de estações mais correlacionadas positivamente.

Observando novamente a PCA, os agrupamentos 15 e 27 e o grupo das estações 14, 25 e 26, pôde-se interpretar que estas estações representam zonas de rio. Outra PCA foi realizada, desta vez retirando 14, 15, 25, 26 e 27, com o intuito de verificar se a grande variação destas estações poderia estar “ocultando” variações de outras, que por sua vez poderiam representar algum outro agrupamento, mas por estar em

magnitude inferior, não foi possível observar na primeira PCA. Nesta última, as estações 21, 22, 23 e 24, apresentaram maiores variações.

Como vários parâmetros apresentaram distribuição semelhante, optou-se por trabalhar com menor número dos mesmos, para facilitar a visualização. Para cada zona de rio (pontos 15 e 25) foi gerado um gráfico com a distribuição das variáveis sólidos totais, condutividade e Secchi.

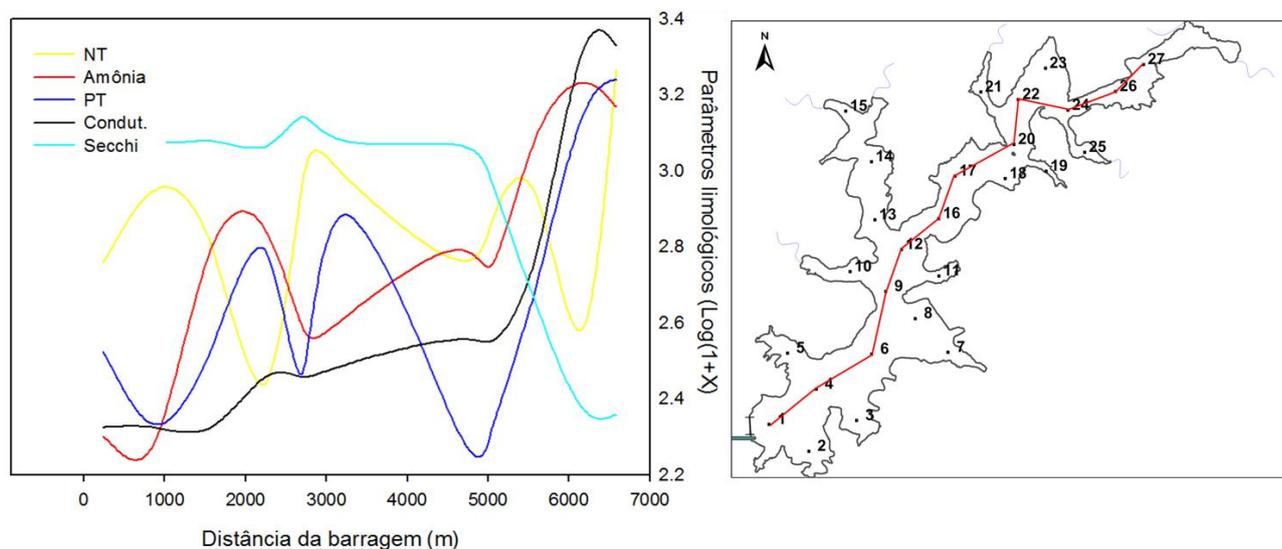


Figura 14. Comportamento das variáveis limnológicas ao longo do reservatório Vargem das Flores (à esquerda). À direita, mapa da represa Vargem das Flores com todas as estações amostrais utilizadas para coleta e em vermelho os transectos com as estações utilizadas para confecção do gráfico.

.Para o tributário Bela Vista (estação amostral 25) e para o braço dos Córrego Água Suja e Córrego do Laje (estação 15) foram obtidos respectivamente as **Figura 15** e **Figura 16**. A zona lacustre em ambos os gráficos apresenta a mesma extensão. A sobreposição desta zona foi interpretada como a confirmação de tal compartimento, uma vez que foi encontrado na segunda PCA um agrupamento contendo estas estações, com exceção da estação 7. Acredita-se que o aporte difuso de nutrientes, em decorrência das atividades empregadas de uso do solo, seja a causa da variação desta estação.

A zona de transição na **figura 15** apresenta-se melhor definida, enquanto na segunda figura há uma sobreposição das zonas de rio e de transição, sendo que esta última não se apresentou claramente definida.

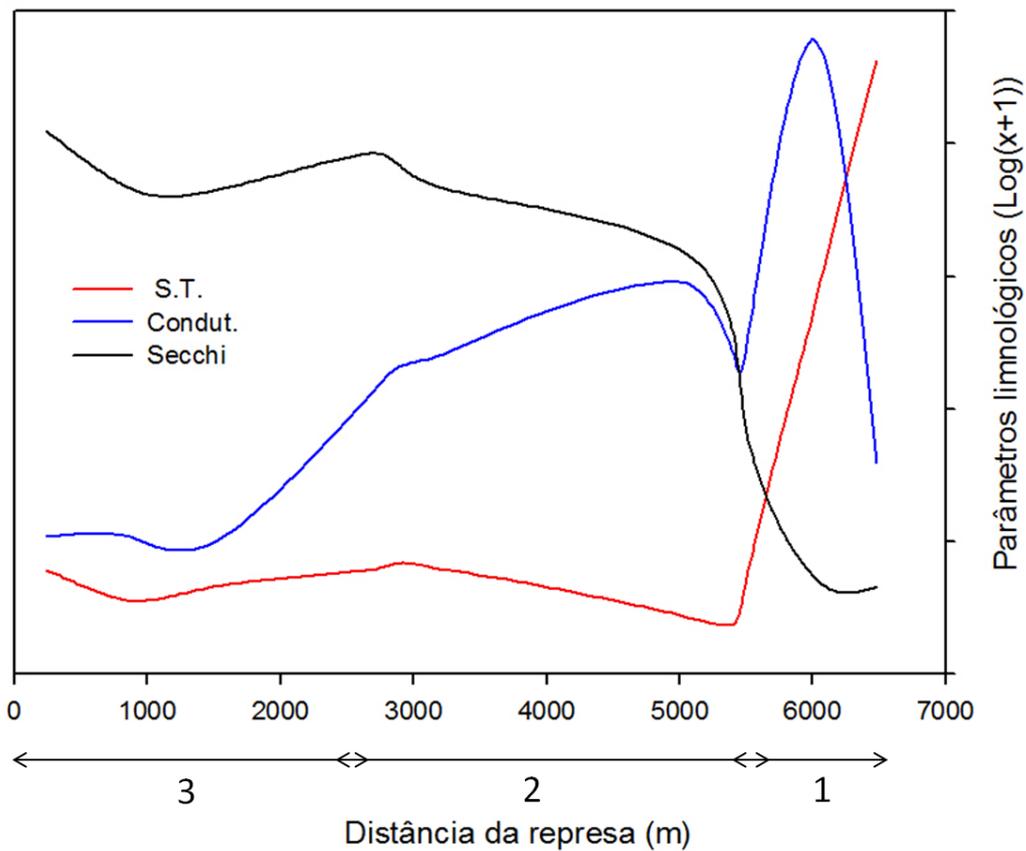
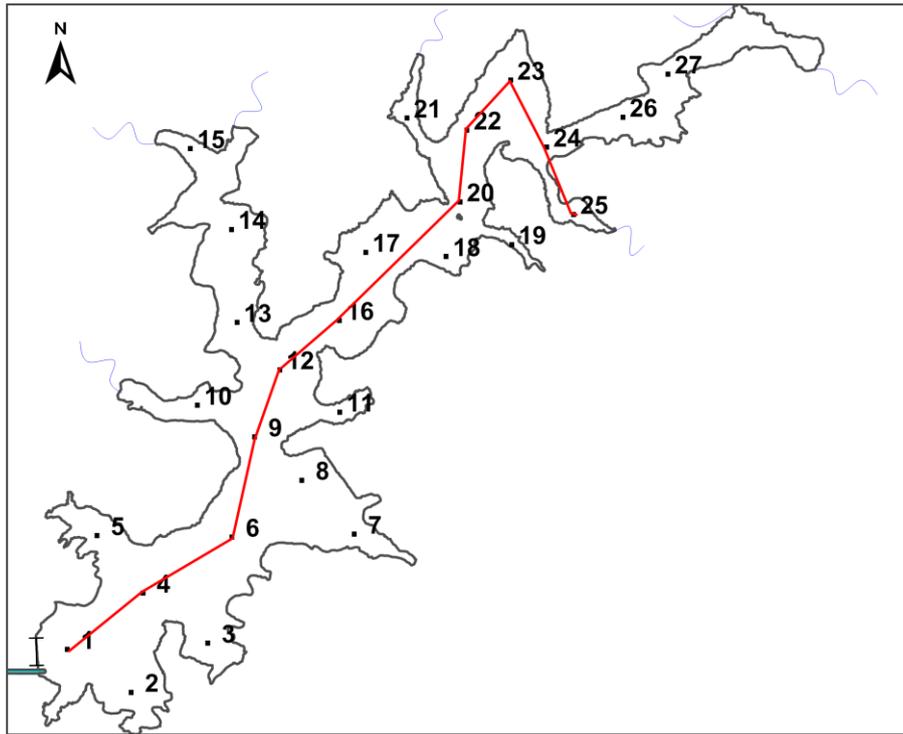


Figura 15. Mapa da represa Vargem das Flores com todas as estações amostrais e em vermelho os transectos com as estações utilizadas para confecção do gráfico (acima) Comportamento das variáveis limnológicas a partir do tributário Bela Vista até a barragem, no reservatório Vargem das Flores (abaixo). Os números indicam as zonas: 1. Zona de rio, 2. Zona de transição e 3. Zona lacustre.

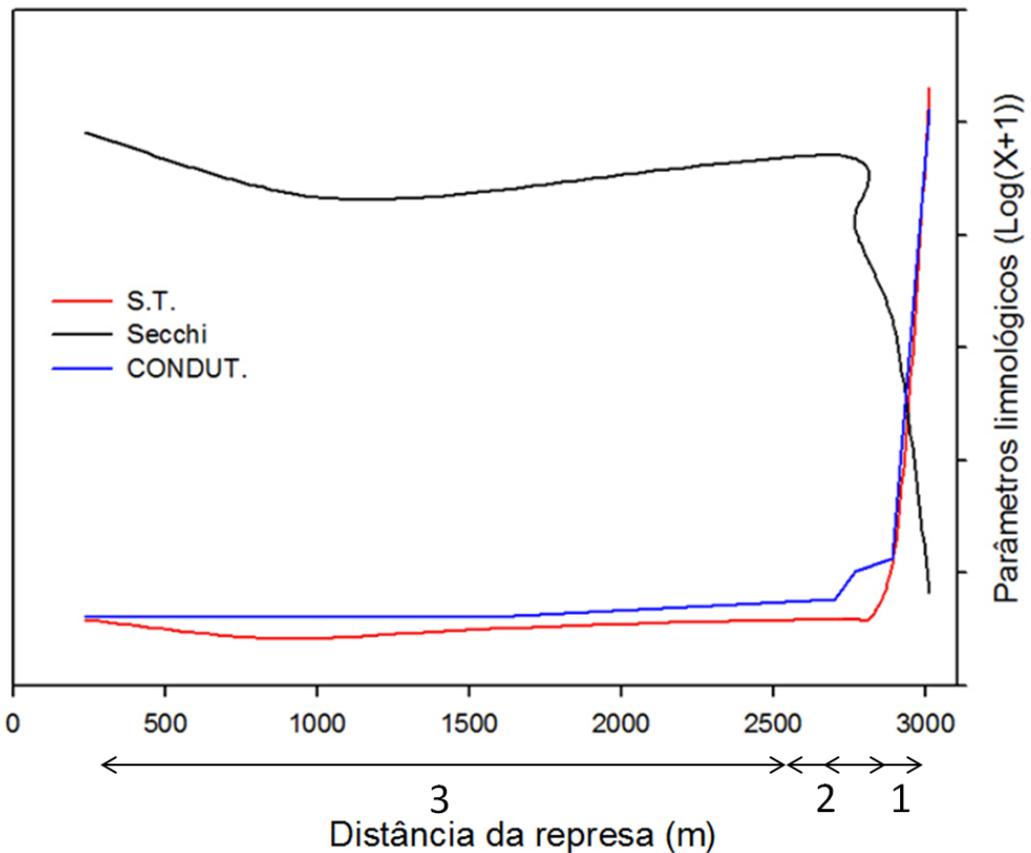
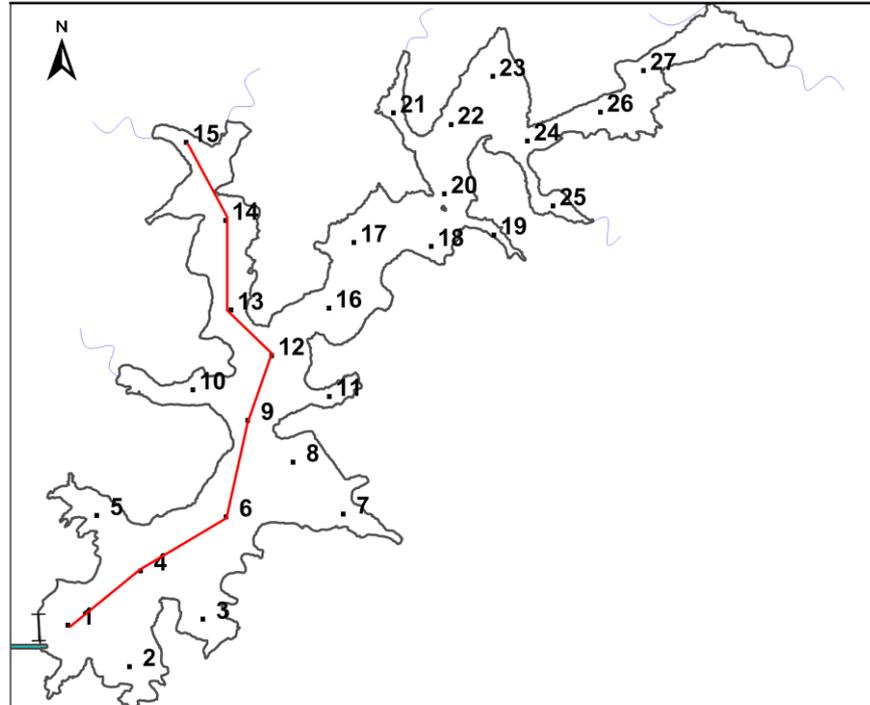


Figura 16. Mapa da represa Vargem das Flores com todas as estações amostrais e em vermelho os transectos com as estações utilizadas para confecção do gráfico (acima). Comportamento das variáveis limnológicas a partir dos tributários Água Suja e Córrego do Laje até a barragem, no reservatório Vargem das Flores (abaixo). Os números indicam as zonas: 1. Zona de rio, 2. Zona de transição e 3. Zona lacustre.

Vários gráficos foram construídos, incluindo-se e excluindo-se estações, na tentativa de se encontrar o padrão descrito por Thornton (1990). Em todos estes gráficos encontrou-se maiores valores de condutividade, sólidos totais e nutrientes nas zonas próximas à entrada de tributários e menores valores na zona lacustre. O oposto foi observado para o Secchi. No entanto, os valores intermediários, que representariam a zona de transição, oscilaram ao longo do eixo central do reservatório.

Desta forma, a morfometria do reservatório implica em sobreposição de zonas de rio e transição ao longo do mesmo. O seu formato dendrítico e os inúmeros tributários que o adentram tornam mais difícil a definição exata destas zonas. Além disso, fontes difusas de nutrientes no reservatório interferiram na definição de algumas estações amostrais. Entretanto, foi possível a construção de um mapa delimitando tais zonas, como proposta para um modelo de compartimentação do reservatório Vargem das Flores (**Figura 17**).

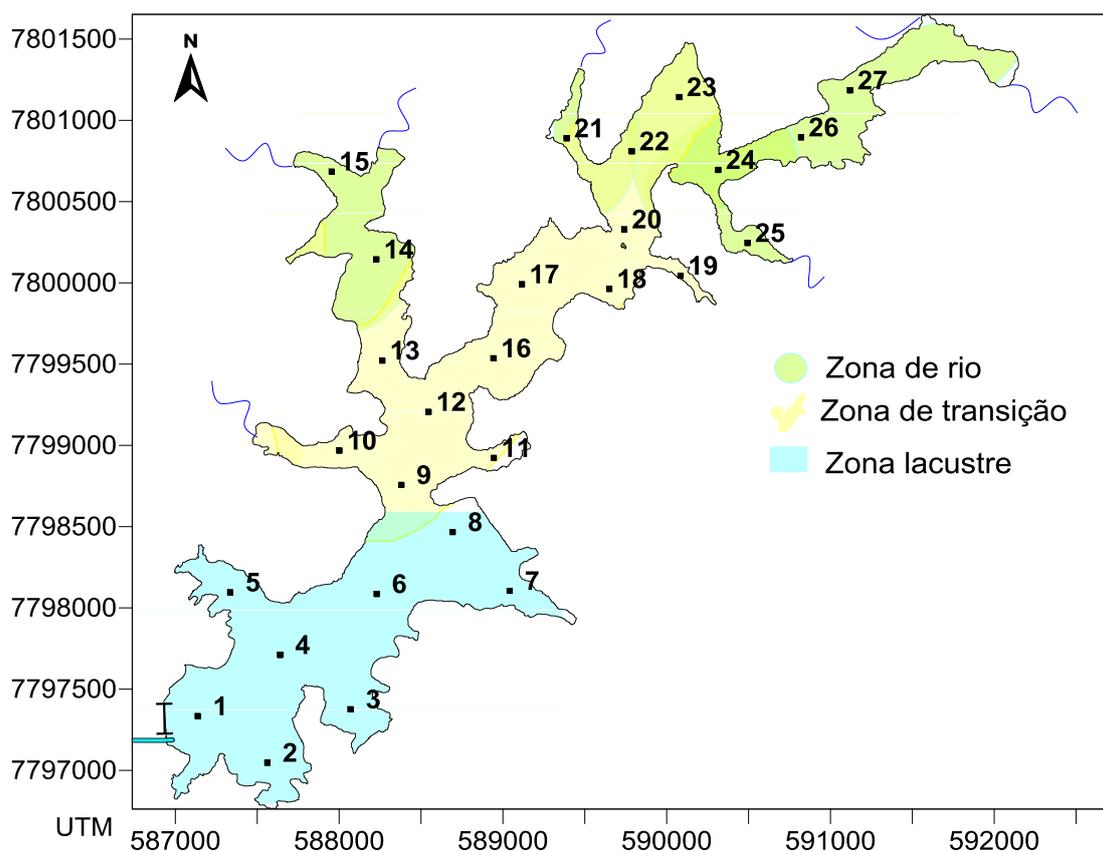


Figura 17. Proposição da compartimentação longitudinal do reservatório Vargem das Flores, com base na distribuição horizontal de variáveis físicas e químicas.

Conclusões

O reservatório de Vargem das Flores é um ecossistema sob contínua interferência antrópica. As atividades no seu entorno, relacionadas ao uso do solo e ao incipiente sistema de esgotamento sanitário são as prováveis causas relativas à qualidade da água e a variação longitudinal apresentada pela represa.

O reservatório recebe PT, assim como grande aporte de outros nutrientes via tributários e fontes difusas. Acredita-se que o fósforo seja potencialmente o nutriente limitante no sistema. Utilizando índices de estado trófico e o fósforo como nutriente, foi demonstrado que o reservatório sofre de eutrofização cultural, tendo sido classificado como eutrófico. Portanto, há grande necessidade de um manejo do reservatório e principalmente da bacia na qual ele está inserido, já que a maior parte de poluição que chega a represa se faz via tributários.

O modelo de compartimentação longitudinal para o reservatório demonstrou a sua heterogeneidade e a importância dos tributários, no aporte de nutrientes. A forte correlação entre as estações amostrais próximas aos córregos que deságuam na represa e de algumas variáveis químicas demonstraram essa importância. O modelo de compartimentação horizontal do reservatório de Vargem das Flores, conforme o descrito por Thorton (1990), é mais complexo, com mais de uma zona de rio e transição ao longo do reservatório, resultante da intrincada morfometria da represa. O modelo de compartimentação do reservatório, aqui proposto, poderia ser aplicado a outros reservatórios nos quais se queira trabalhar com essas definições de zonas.

A despeito de pesquisas unicamente temporais (tendo apenas uma única estação amostral), apenas os estudos que consideram variações espaciais são capazes de demonstrar a heterogeneidade do ambiente, que podem auxiliar no entendimento da dinâmica do mesmo e servir de subsídio para um adequado manejo do ecossistema.

A partir da análise dos dados coletados, demonstrou-se que o reservatório de Vargem das Flores é um ambiente heterogêneo e tal característica é importante para o entendimento da distribuição de algumas variáveis ambientais. Portanto, o presente trabalho gerou uma série de informações relevantes para geração de planos de manejo do reservatório de Vargem das Flores.

Referências bibliográficas

APHA - AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION. 1998. *Standard methods for the examination of water and wastewater*. 20ª Edição. Washington: APHA/WEF/AWWA.

ANDREOLI, C.V. et al. 2011. Eutrofização e a estrutura dos estudos *In: CUNHA, C.L.N.; CARNEIRO, C.; GOBBI, E.F. & ANDREOLI, C.V. (Ed.). 2011. Eutrofização em reservatórios: Gestão preventiva. Estudo interdisciplinar na Bacia do Rio Verde, PR. Curitiba: UFPR. 515p.*

ANGELINI, R. 1999. Ecossistemas e modelagem ecológica. *In: POMPÊO, M.L.M. 1999. Perspectivas da limnologia no Brasil. São Luís: Gráfica e Editora União. 191p.*

BARNES, H. & ROLKARD, A.R. 1951. *Analyst*. 599p.

BRIGHENTI, L.S. 2009. *Avaliação limnológica da lagoa central (município de Lagoa Santa – MG): uma abordagem espacial*. Dissertação (Mestrado em Ecologia, Conservação e Manejo da Vida Silvestre) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

CARLSON, R.E. 1977. *A trophic state index for lakes*. *Limnology and Oceanography*. 2(2): 361-369

CARPENTER, S.R.; CARACO, N.F.; CORRELL, D.L.; HOWARTH, R.H.; SHARPLEY, A.N. & SMITH, V.H. 1998. *Nonpoint pollution of surface waters with phosphorus and nitrogen*. *Ecological Applications*. 8(3): 559-568.

COLE, G.A. 1983. *Textbook of limnology*. 3ª Edição. Illinois: Waveland Press. Prospect Heights. 412p.

DODDS, W.K. 2002. *Freshwater ecology: concepts and environmental applications*. San Diego: Academic Press. 569p.

DODDS, W.K. 2006. *Eutrophication and trophic state in rivers and streams*. *Limnology and Oceanography*. 51(2): 671-680.

ESTEVEES, F.A. 2011. *Fundamentos de limnologia*. 3ª Edição. Rio de Janeiro: Interciências. 606p.

FREIRE, B. & PINTO-COELHO, R.M. 1986. *Composição e distribuição horizontal do zooplâncton no reservatório de Vargem das Flores, Betim/Contagem, Minas Gerais*. *Ciência & Cultura*. 38(5):919-928.

FUNCEME - Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos. 2002. *Projeto estudo da qualidade das águas em reservatórios superficiais da bacia Metropolitana*. Fortaleza: FUNCEME. 80p.

GASTALDINI, M.C.C.; SOUZA, M.D.S.; THOMAS FILHO, D.F. & SILVA, G. 1994. Diagnóstico do Reservatório do Vacacaí-Mirim através de Índices de Qualidade da Água. *In: David da Motta Marques. (Org.). Qualidade das Águas Continentais do Mercosul*. 1ª Edição. Porto Alegre: ABRH. 420p.

KOROLEFF, F. 1976. Determination of nutrients. *In: GRASSHOFF, K. 1976. Methods of seawater analysis*. New York: Verlag Chemie Weinheim. 317p.

LANDIM, P.M.B. 2000. *Introdução aos métodos de estimação espacial para confecção de mapas*. IGCE. Rio Claro: UNESP. 20p.

LIND, O.T.; TERRELL, T.T. & KIMMEL, B.L. 1993. Problems in reservoir trophic-state classification and implications for reservoir management. *In: STRASKRABA, J. G. et al. (Ed.). 1993. Comparative reservoir limnology and water quality management*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers. 291p.

LORENZEN, C.J. 1967. *Determination of chlorophyll and pheo-pigments: spectrophotometric equations*. *Limnology and Oceanography*. 12:343-346.

MACKERETH, F.Y.H.; HERON, J.G. & TALLING, J. 1978. *Water analysis: Some revised methods for limnologists*. Freshwater Biological Association. 36:108-114.

MAIER, M.H. 1987. *Ecologia da bacia do rio Jacaré Pepira (47°55" - 48°55"W; 22°30" - 21°55"S - Brasil): qualidade da água do rio principal*. *Ciência e Cultura*. 39(2):164-185.

MELO, A.S. & HEPP, L.U. 2008. *Ferramentas estatísticas para análise de dados provenientes de biomonitoramento*. Oecologia Brasiliensis 12(3):463-486.

MURPHY, J. & RILEY, J.P. 1962. *A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters*. Analytica Chimica Acta. 27:31-36.

NAVAL, L.P. & BRITO, T.G. 2003. *Avaliação da qualidade da água do reservatório da UHE Luis Eduardo Magalhães, determinando o grau de influencia das ETEs de Palmas neste meio*. Disponível em: < <http://www.bvsde.paho.org/bvsAIDIS/PuertoRico29/navy.pdf> > Acesso em: 08 jan. 2012.

NOVOTNY, V. 2003. *Water quality diffuse pollution and watershed management*. 2ª Edição. Boston: John Wiley and Sons. 864p.

OECD - ORGANIZATION FOR ECONOMIC COOPERATION AND DEVELOPMENT. 1982. *Eutrophication of waters: monitoring, assesment and control*. Paris: OECD Cooperative Programme on Monitoring of Inland Waters (Eutrophication Control).

PAERL, H.W.; VALDES, L.M.; PEIERLS, B.L.; ADOLF, J.E. & HARDING JUNIOR, L.W. 2006. *Anthropogenic and climatic influences on the eutrophication of large estuarine ecosystems*. Limnology and Oceanography. 51:448-462.

PAULA, T.P. 2011. *Diagnóstico e modelagem matemática da qualidade da água em trecho do rio Piabinha/RJ*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro.

PETERNELLI, L.A. 2005. *INF 162 - Estatística I*. Disponível em: <http://www.ime.usp.br/~rvicente/Paternelli_Cap2.pdf>. Acesso em: 14 dez. 2011.

PINTO, M.P.; BINI, L.M. & DINIZ-FILHO, J.A.F. 2003. *Análise quantitativa da influência de um novo paradigma ecológico: autocorrelação espacial*. Acta Scientiarum: Biological Sciences, Maringá, 25(1): 137-143.

POLETO, C. & MARTINEZ, L.L.G. 2011. *Sedimentos urbanos: Ambiente e água*. HOLOS Environment. 11:1-15.

RESCK, R.P. 2007. *Avaliação morfológica e estudo da variação horizontal de parâmetros limnológicos do reservatório da Pampulha (Belo Horizonte - MG)*. Dissertação (Mestrado em Ecologia, Conservação e Manejo da Vida Silvestre) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

SALAS, H.J. & MARTINO, P. 1991. *A simplified phosphorus trophic state model for warm-water tropical lakes*. Water Research. 25:341-350.

SHRESTHA, S.; KAZAMA, F. & NEWHAM, L.T.H. 2008. *A framework for estimating pollutant export coefficients from long-term in-stream water quality monitoring data*. Environmental Modelling & Software. 23: 182-194.

SOUZA, A.D. 2003. *Variações espaciais e temporais de parâmetros de qualidade de água em um reservatório tropical (Represa de Vargem das Flores – Contagem – MG) e suas implicações com aspectos limnológicos*. Tese (Doutorado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

SPERLING, E.V. 1999. *Morfologia e lagos e represas*. Belo Horizonte:UFMG.

SPERLING, M.V. 2005. *Princípios do tratamento biológico de águas residuárias*. Volume 1. 3ª Edição. Belo Horizonte: DESA-UFMG.

THORNTON, K.W.Q. 1990. Perspectives on reservoir. *In: THORNTON, K. W., B.L. KIMMEL & F.E. PAYNE (Ed.). 1990. Reservoir Limnology: Ecological Perspectives*. Somerset: John Wiley & Sons, Inc. 246p.

TUNDISI, J.G. & MATUMURA-TUNDISI, T. 2008. *Limnologia*. São Paulo: Oficina de Textos. 631p.

VIANA, T.H. 2009. *Estudo do conteúdo de calor e suas Influências sobre variáveis limnológicas em reservatórios de abastecimento de água*. Tese (Doutorado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

VIEIRA, E.M. 2009. *Contribuição metodológica para a pré-identificação de áreas adequadas à implantação de parques aquícolas no reservatório de Nova Ponte – Minas Gerais*. Tese (*Doctor Scientiae*) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.

VOLLENWEIDER, R.A. 1989. Global problems of eutrophication and its control. *In: SALANKI, J. & HERODEK, S. Conservation and Management of Lakes*. Budapeste: Akadémiai Kiadó. 664p.

WANG, X. J. & LIU, R. M. 2005. *Spatial Analysis and Eutrophication Assessment for Chlorophyll a in Taihu Lake*. *Environmental Monitoring and Assessment*. 101: 167–174.

WETZEL, R.G. 1983. *Limnology*. Philadelphia: Saunders Company. 767p.

Capítulo III

Distribuição horizontal de zooplâncton e a hidrodinâmica de um reservatório tropical periurbano (Vargem das Flores - Minas Gerais, Brasil)

Resumo

Este trabalho objetivou avaliar a distribuição espacial da clorofila-a e zooplâncton em função da hidrodinâmica de um reservatório periurbano tropical (Reservatório de Vargem das Flores, Betim/Contagem, MG). Embora a comunidade fitoplanctônica e zooplanctônica raramente se distribua homoganeamente nesses corpos d'água, a maioria dos estudos se concentra na sua variação vertical. A coleta foi realizada em 27 pontos amostrais, ao longo do eixo longitudinal do reservatório de Vargem das Flores (zonas de rio, intermediária e lacustre) no dia 06/10/2010, no final da estação seca. A clorofila-a foi coletada na camada sub superficial e sua concentração foi estimada através do método de Lorenzen (1967). O zooplâncton foi coletado através de um arrasto vertical à profundidade de 1m, com rede de plâncton de 30 cm de diâmetro e 68 μ m de abertura de malha. A abundância zooplanctônica foi determinada a partir da contagem em câmaras de Sedgwick-Rafter com capacidade de 1 mL sob microscópio óptico Leica DMLB. Um mínimo de 350 indivíduos adultos foi contado. Neste estudo consideraram-se apenas os principais componentes do zooplâncton: os microcrustáceos e rotíferos. A densidade final foi estimada em ind/L. Os valores da concentração de clorofila-a e da densidade de zooplâncton foram interpolados através da *kriging* no *software* Surfer 10 e as cartas temáticas geradas. Uma malha de elementos finitos foi construída no *software* Argus One da Argus Holding Ltda, com 886 elementos quadráticos, respeitando o limite do reservatório de Vargem das Flores. No *software* SisBaHiA, modelo hidrodinâmico tridimensional para o reservatório de Vargem das Flores foi calibrado com os dados de batimetria, malha de elementos finitos, vazão, vento e contorno do reservatório. Após a geração do modelo hidrodinâmico, este foi utilizado para originar o modelo lagrangeano, responsável pela geração dos dados de tempo de residência do reservatório. Os resultados do modelo hidrodinâmico e do tempo de residência foram utilizados para comparar com a distribuição horizontal de fitoplâncton e zooplâncton. As maiores concentrações de clorofila-a coincidiram com a direção dominante do vento no momento da coleta e com o tempo de residência. A distribuição de zooplâncton foi determinada tanto pelo tempo de residência, quanto pelo padrão de escoamento do reservatório. Os resultados obtidos sugerem que, de maneira geral, o reservatório de Vargem das Flores é caracterizado por diferentes regiões influenciadas principalmente pela entrada dos tributários, morfometria e hidrodinâmica própria desse sistema, bem como a extensão e uso de sua respectiva bacia de drenagem, provavelmente constituindo os fatores determinantes da estruturação do fitoplâncton e zooplâncton nesse ecossistema.

Abstract

This study aimed at evaluating the spatial distribution of chlorophyll-a and zooplankton as a function of the hydrodynamics of an urban tropical reservoir (Vargem das Flores Reservoir, Betim / Contagem, MG). Although phytoplankton and zooplankton are rarely evenly distributed in the water bodies, most studies concentrate on their vertical distribution, making the horizontal variation less known. Data were collected on 27 points along the longitudinal axis of the Vargem das Flores reservoir (riverine, intermediate and lacustrine zones) on October, 6th, 2010 at the end of the dry season. The chlorophyll-a was collected in the sub-surface layer and its concentration was estimated by the method of Lorenzen (1967). Zooplankton was collected by vertical hands (1m) with plankton net, with a diameter of 30 cm and 68 μ m mesh size, until the depth of one meter. The abundance of zooplankton was determined by counting in a Sedgwick-Rafter chambers with a capacity of 1 mL, in an optical microscope Leica DMLB, adjusted twenty times. A minimum of 350 adults by zooplankton were counted. The sub-samples were collected with a pipette-type Hensen-Stempel (1mL). This study considered only the main components of the zooplankton, microcrustaceans and rotifers. The final density was estimated individual by liter. The amounts of chlorophyll-a and the zooplankton density were interpolated by kriging using the software Surfer 10, where the thematic maps were generated. A finite element mesh was built for the Vargem das Flores reservoir with 886 quadratic elements, respecting the limit of the reservoir, in the software ArgusOne of Argus Holding Ltda. In SisBaHiA software, the three-dimensional hydrodynamic model for the Vargem das Flores reservoir was fed with the bathymetry data, finite element mesh, flow, wind and contour of the reservoir. After the generation of hydrodynamic model, it was also used to generate the Lagrangian model, responsible for generating data residence time of the water. The results of the hydrodynamic model and the residence time were compared with the horizontal distribution of phytoplankton and zooplankton. The highest concentrations of chlorophyll-a coincided with the dominant direction of wind and residence time of the water. The distribution of zooplankton was determined both by the chlorophyll and the flow pattern of the reservoir. The results suggest that, in general, the Vargem das Flores reservoir is characterized by different regions mainly influenced by the entry of the tributaries, morphometry and hydrodynamics of the system itself, as well as the extent and use of its respective drainage basin, probably constituting the factors determining the structure of phytoplankton and zooplankton in this ecosystem.

Introdução

Os reservatórios, ambientes artificiais construídos pelo homem, apresentam inúmeras diferenças em relação aos lagos naturais. Dentre estas diferenças, a circulação da água é uma das mais importantes. A circulação dos corpos d'água é um importante fator na determinação da distribuição longitudinal de nutrientes e organismos como o fito e o zooplâncton (FORD, 1990). Um grande avanço no entendimento da circulação dos corpos d'água se deu através da modelagem computacional. Deste modo, a circulação da água visualizada através de simulações hidrodinâmicas, geradas por modelos computacionais, permite a compreensão de uma série de fenômenos, como a distribuição dos organismos planctônicos.

Devido ao contínuo fluxo de água em direção à barragem e da variação do tempo de residência, os reservatórios podem ser considerados sistemas de transição entre rios e lagos, com mecanismos de funcionamento específicos, dependentes da bacia e dos usos do sistema, apresentando dinâmica própria, reflexo do seu tempo de residência, morfometria e profundidade (ANGELINI, 2004). Suas características morfométricas e sua posição na bacia hidrográfica fazem com que o reservatório funcione como um acumulador de informações processadas ao longo de sua bacia hidrográfica, sendo decodificadas pelas comunidades biológicas, refletidas por alterações na composição fito e zooplanctônica (TUNDISI, 1985). Portanto, os reservatórios são depositários de todos os eventos presentes e passados de sua bacia de drenagem, e a dinâmica, a estrutura, o funcionamento e a caracterização do ecossistema aquático repousa, em parte, sob a influência externa (HENRY, 1990).

Embora pesquisas sobre a riqueza de espécies ou biodiversidade tenham sido um tema central na ecologia atual, vários estudos têm se concentrado na relação entre biodiversidade e funcionamento dos ecossistemas, existindo poucos estudos na investigação da distribuição longitudinal da riqueza de espécies de zooplâncton (TAKAHASHI et al, 2005). As pesquisas ecológicas durante muito tempo tiveram grande enfoque na questão temporal, conseqüentemente negligenciando a dimensão espacial (PINTO et al, 2003).

A distribuição longitudinal do fitoplâncton em reservatórios geralmente segue um padrão comum, com altas concentrações dessa comunidade na zona de transição, uma vez que, na zona fluvial ocorre limitação por luz, apesar da disponibilidade de nutrientes, e em seguida, a relativa fertilidade da zona de mistura diminui em direção

à barragem, pois o suprimento de nutrientes, introduzido por processos advectivos é reduzido com o distanciamento do influxo do rio, e a produção do fitoplâncton torna-se mais dependente da regeneração in situ dos nutrientes (TUNDISI, 1996).

Segundo Archambault et al (1998), o zooplâncton é considerado, frequentemente, organismos tipicamente passivos, que permanecem à deriva, devido à velocidade horizontal da corrente normalmente exceder sua velocidade de natação. Sendo assim, a hidrodinâmica aparentemente seria o suficiente para explicar a distribuição e retenção destes. Harvey et al (2001) concluíram que os resultados do estudo sobre a relação da hidrodinâmica na composição e abundância de zooplâncton na Baía Hudson apoiavam a hipótese de que a estrutura da comunidade biológica local, que vai desde o fitoplâncton até o meso e macro-zooplâncton, era uma função de variações nas características hidrodinâmicas, através de sua ação na temperatura da superfície da água, salinidade, estratificação e condições de mistura, conduzindo a uma diferenciação espacial das comunidades de fitoplâncton e conseqüentemente da de zooplâncton.

Marzolf (1990) propôs um modelo teórico no qual a distribuição de zooplâncton para o eixo longitudinal dos reservatórios poderia se dar por três padrões distintos, sendo determinada preponderantemente pela velocidade das correntes e exportação de material como argila, nutrientes, matéria orgânica dissolvida e fitoplâncton. O primeiro padrão considerava que se a velocidade da corrente e o tempo de residência da água fossem os únicos controles, então a densidade de zooplâncton aumentaria numa curva não linear no sentido rio-barragem. O segundo padrão teria como fator de primeira importância a exportação de material dos rios para a barragem, com redução das correntes nesse sentido e conseqüentemente queda da capacidade de transporte de material. Este segundo padrão teria como resposta a diminuição exponencial da densidade de zooplâncton no sentido da barragem. O último padrão de distribuição é resultante dos processos de velocidade das correntes e da exportação de material com o mesmo grau de influência, tendo a distribuição de zooplâncton semelhante a uma curva assintótica com assimetria positiva.

Os componentes do microzooplâncton, mesozooplâncton e macrozooplâncton⁴ apresentam grandes variações espaciais e temporais em composição e estrutura de comunidades (TUNDISI & MATSUMURA-TUNDISI, 2008). Segundo Esteves (2011) a disponibilidade de alimento, a existência de diferenças limnológicas, aspectos sazonais e de condição de trofia e relações de competição e predação têm sido associadas à variação da comunidade zooplânctônica, assim como fatores como o vento e correntes. No entanto, muitos estudos (ARCHAMBAULT et al., 1998; CASTEL & VEIGA, 1990; HARVEY et al., 2001; RODRIGUES et al., 2007; SANTOS et al., 2011, TAKAHASHI et al., 2005) sugerem a hidrodinâmica como o fator preponderante na distribuição espacial de zooplâncton dos corpos d'água. Entretanto, os estudos ecológicos baseados em modelação numérica, que incluem, em particular, a simulação do zooplâncton, são ainda escassos (RODRIGUES, 2009).

O transporte de uma dada substância em um corpo d'água, ou mesmo de organismos como o fito e zooplâncton, é dominado pela advecção⁵ (transporte forçado pelo sistema de correntes). Pode-se afirmar que há uma enorme relação de dependência entre a simulação hidrodinâmica e os processos de transporte (CUNHA et al., 2002). Então, a correta caracterização da circulação hidrodinâmica é o primeiro passo no estudo da dispersão de escalares passivos. Neste contexto, entender a circulação da água nestes ambientes é imperativo, uma vez que esta influencia na distribuição espacial dos poluentes e sedimentos e na dinâmica de nutrientes (PAZ, 2005) e nos aspectos básicos de funcionamento que interferem significativamente no ciclo de vida, na distribuição e na biomassa dos organismos aquáticos (TUNDISI & MATSUMURA-TUNDISI, 2008).

Segundo Bates et al. (2005), a aplicação de técnicas de dinâmica computacional de fluidos aplicadas a problemas ambientais aumentou acentuadamente na última década. A melhoria dos modelos e da velocidade de processamento e da capacidade de armazenamento dos computadores, além do desenvolvimento de tecnologias para levantamento dos dados de campo, permitiram maior precisão e rapidez na

⁴ Microzooplâncton é composto por protozoários e rotíferos. O mesozooplâncton é composto por crustáceos, cladóceros e copépodes ciclopoídes e calanóides. E o macrozooplâncton é representado por larvas de insetos, como os *Chaoborus*. (TUNDISI & MATSUMURA-TUNDISI, 2008)

⁵ Transporte advectivo pode ser definido como o movimento da substância de uma posição para outra no espaço, ocasionado pelo campo de velocidades da água, forçado por um sistema de correntes produzido por influxo de rios, descargas a jusante e/ou efeitos do vento na superfície.

obtenção de resultados produzidos para esse tipo de enfoque. Os modelos desempenham um papel importante, tanto no estabelecimento de diagnósticos sobre os problemas do ecossistema, quanto no auxílio da elaboração de prognósticos sobre eventuais medidas remediadoras (NEVES, 2001). Portanto, a modelagem computacional representa um avanço na gestão ambiental integrada de recursos hídricos. Esse enfoque representa uma forma de otimização de custos em diagnósticos, ao permitir interpolação e extrapolação de dados de campo na realização de prognósticos em estudos de licenciamento ambiental (KAUFMANN, 2009).

Objetivos

Dentro desse contexto, o presente trabalho pretende realizar um estudo com o objetivo de identificar os principais fatores que condicionam a espacialização da comunidade fitoplanctônica e zooplanctônica do reservatório Vargem das Flores no período estudado. Desta forma, pretende-se averiguar se a hidrodinâmica local é capaz de explicar a distribuição horizontal fito e zooplanctônica, através da geração de um modelo hidrodinâmico para o reservatório Vargem das Flores.

Hipóteses & Predições

H.1 – A distribuição do fitoplâncton e do zooplâncton segue o padrão de escoamento das águas, obtido no modelo hidrodinâmico, assim como os maiores tempos de residência.

P.1 – O fitoplâncton, por apresentar limitada movimentação ativa, tem sua distribuição determinada pela hidrodinâmica do reservatório, sendo que a maior concentração de clorofila-*a* será encontrada em regiões de maior tempo de residência.

P.2 – O zooplâncton, por possuir limitada capacidade de natação, em relação às correntes de água, apresentará maior densidade em áreas onde a troca de água ocorrer mais lentamente.

Material e Métodos

Área de Estudo

O reservatório de Vargem das Flores (Coordenadas UTM WGS 84 587407,5; 7797318,8) (**Figura 1**) está inserido na bacia do Paraopeba e sub-bacia do ribeirão Betim, seu principal tributário. Ele foi construído inicialmente com a finalidade de abastecimento da região metropolitana de Belo Horizonte. A represa está inserida entre os municípios de Betim (13%) e Contagem (87%) (GOMES, 2008).

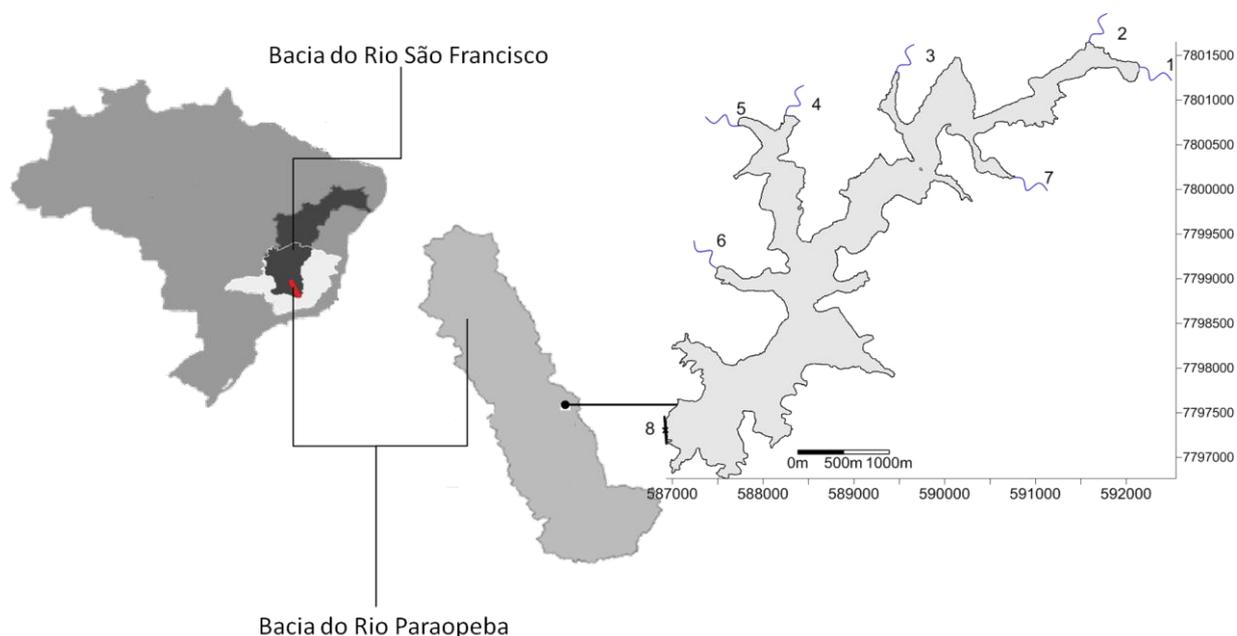


Figura 1. Localização do reservatório Vargem das Flores e seus tributários: 1. Ribeirão Betim; 2. Córrego Vargem do Sapê; 3. Córrego Olaria do Siqueira; 4. Córrego Água Suja; 5. Córrego do Laje; 6. Córrego do Batatal; 7. Córrego Bela Vista; 8. Barragem.

O clima da região apresenta-se como tropical/mesotérmico semi-úmido, com duas estações bem definidas compreendendo o período chuvoso e quente de outubro a março e seco e frio de abril a setembro (SOUZA, 2003).

Coleta de Dados Limnológicos

A coleta das variáveis biológicas foi realizada no dia 06 de outubro do ano de 2010, final da estação seca. Foi realizada a amostragem em 27 estações (**Figura 2**).

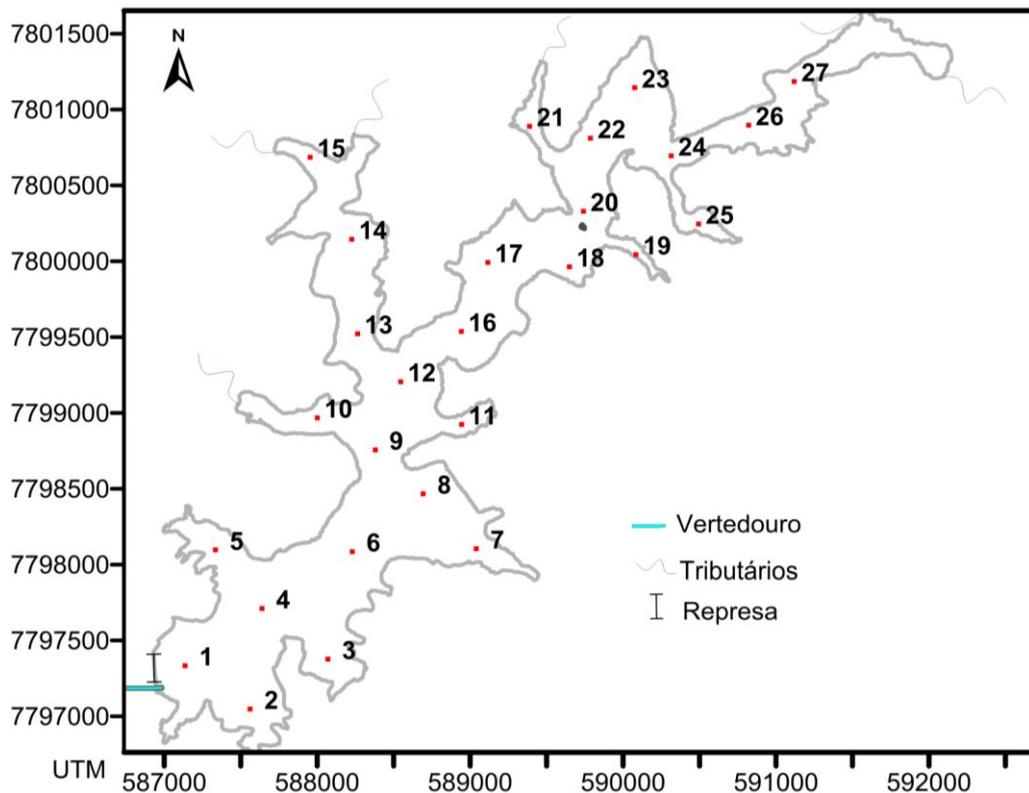


Figura 2. Pontos amostrados na coleta de 06 de outubro de 2010, no reservatório Vargem das Flores.

Parâmetros biológicos

Para análise da clorofila-a, a água foi filtrada a vácuo, em filtros Schleicher & Schüll, com 47 mm de diâmetro, pelo método de Lorenzen (1967). O método consiste na extração da clorofila-a a frio usando acetona a 90% como solvente orgânico. Posteriormente o extrato foi lido num espectrofotômetro regulado para um comprimento de onda na faixa do vermelho (663 nm) e com correção para turbidez (750 nm). Foi feita também a leitura da amostra acidificada para diferenciar as concentrações de clorofila-a das concentrações de seus produtos (feopigmentos).

O zooplâncton foi coletado através de um arrasto vertical à profundidade de 1m, com rede de plâncton de 30 cm de diâmetro e 68µm de abertura de malha. As amostras coletadas foram acondicionadas em frascos de material plástico devidamente etiquetado e fixado em solução de formaldeído a 4%. A abundância zooplânctônica das amostras foi determinada a partir da contagem em câmaras de Sedgwick-Rafter com capacidade de 1 mL sob microscópio óptico Leica DMLB, em aumento vinte vezes. Um mínimo de 350 indivíduos adultos foi contado. As sub-amostras foram obtidas com pipeta do tipo Hensen-Stempel de 1mL. Neste estudo, consideraram-se

apenas os principais componentes do zooplâncton: os microcrustáceos e rotíferos. A densidade final foi estimada em ind.L⁻¹.

Malha de Elementos Finitos

Tendo o contorno do reservatório digitalizado, o arquivo foi importado para o programa Argus ONE da Argus Holding Ltda. Neste, a malha de dados finitos quadrangulares (**Figura 5**) foi elaborada, num total de 886 elementos, respeitando o limite do reservatório. A composição da malha de elementos finitos para a discretização do domínio foi realizada de forma a evitar elementos com grandes distorções geométricas e diferenças significativas de tamanho entre elementos vizinhos, contribuindo assim para maior precisão dos resultados.

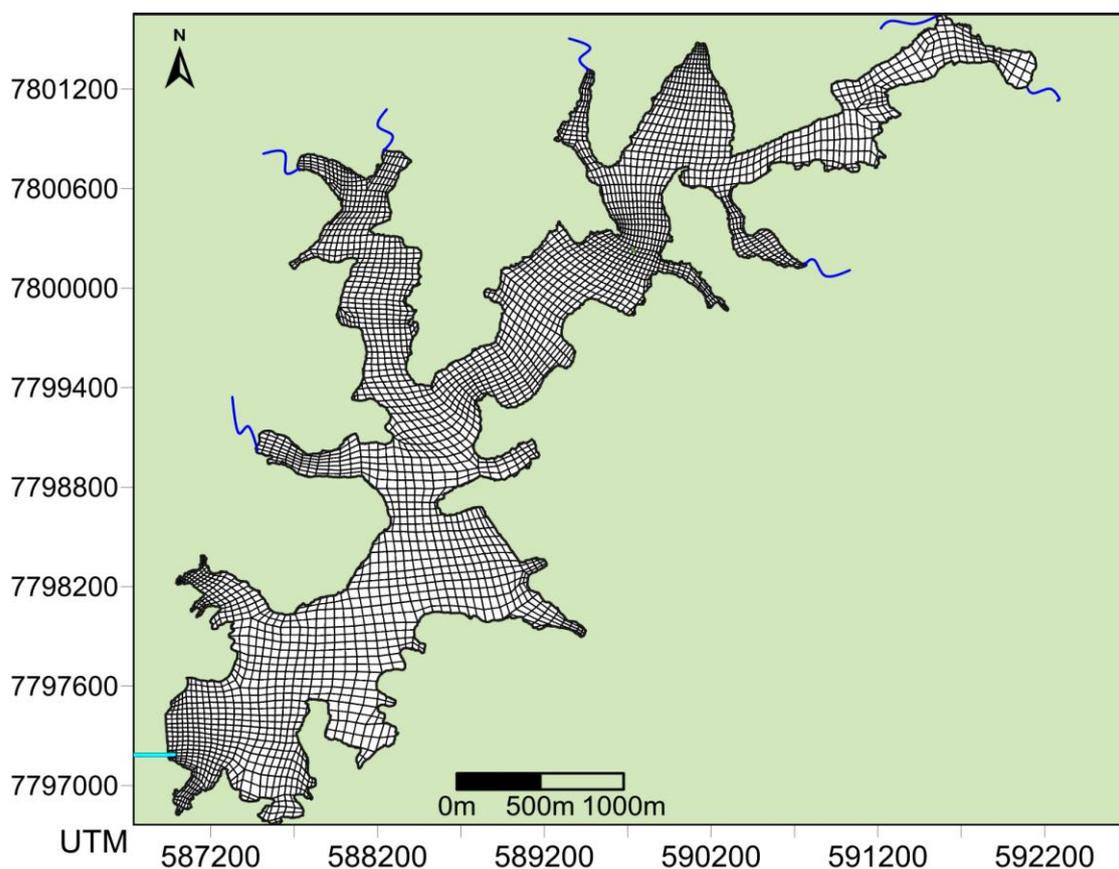


Figura 3. Malha de elementos finitos quadráticos do reservatório Vargem das Flores, confeccionada com 886 elementos, no *software* Argus ONE da Argus Holding Ltda.

Modelagem computacional

Neste trabalho foi utilizada como ferramenta para modelagem computacional o SisBAHIA[®] (versão 8.5) – Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental – que trabalha com uma superposição de módulos. Trata-se de um sistema profissional registrado pela Fundação COPPETEC, órgão gestor de pesquisa da COPPE/UFRJ - Instituto Aberto Luiz Coimbra de Pós Graduação e Pesquisa de Engenharia (COPPE). A variação da quantidade de movimento advectivo foi simulada pelo modelo hidrodinâmico 2DH e 3D, que calcula as variáveis determinantes da circulação do corpo d'água, constituindo a base para os modelos de transporte.

O módulo do SisBAHIA contém um modelo para simular a circulação hidrodinâmica na versão 3D - capaz de calcular campos de velocidades tridimensionais, obtendo os perfis de velocidade ao longo da profundidade – e modelo bidimensional promediado na vertical (2DH), em que as variações das grandezas são médias na coluna d'água (PINHEIRO, 2008). Ambos os modelos foram utilizados, assim como o módulo que contém um modelo de transporte lagrangeano advectivo-difusivo com reações cinéticas, em versão 2DH e 3D.

A etapa de pré-processamento incluiu a obtenção de medidas quantitativas para as grandezas envolvidas no modelo. Estas informações consistem nos dados de entrada do modelo, que devem ser organizados e preparados de acordo com o modelo numérico elaborado (PAULA, 2011).

As etapas de implementação do modelo numérico hidrodinâmico incluíram a modelagem geométrica, com geração do mapa base (capítulo 1) e malha numérica; a interpolação dos dados batimétricos (capítulo 1) e de rugosidade do fundo nos pontos da malha numérica; a definição das condições iniciais; a definição das condições de contorno e; a definição dos dados de vento. O detalhamento da calibração dos modelos hidrodinâmico e lagrangeano está descrito no **Anexo 1**.

Dados de vento e vazão

Para alimentação do modelo, foram necessárias as seguintes etapas (**Figura 6**): (a) aquisição de dados de velocidade e direção do vento; (b) vazão dos tributários do reservatório Vargem das Flores; (c) malha de elementos finitos e; (d) batimetria.

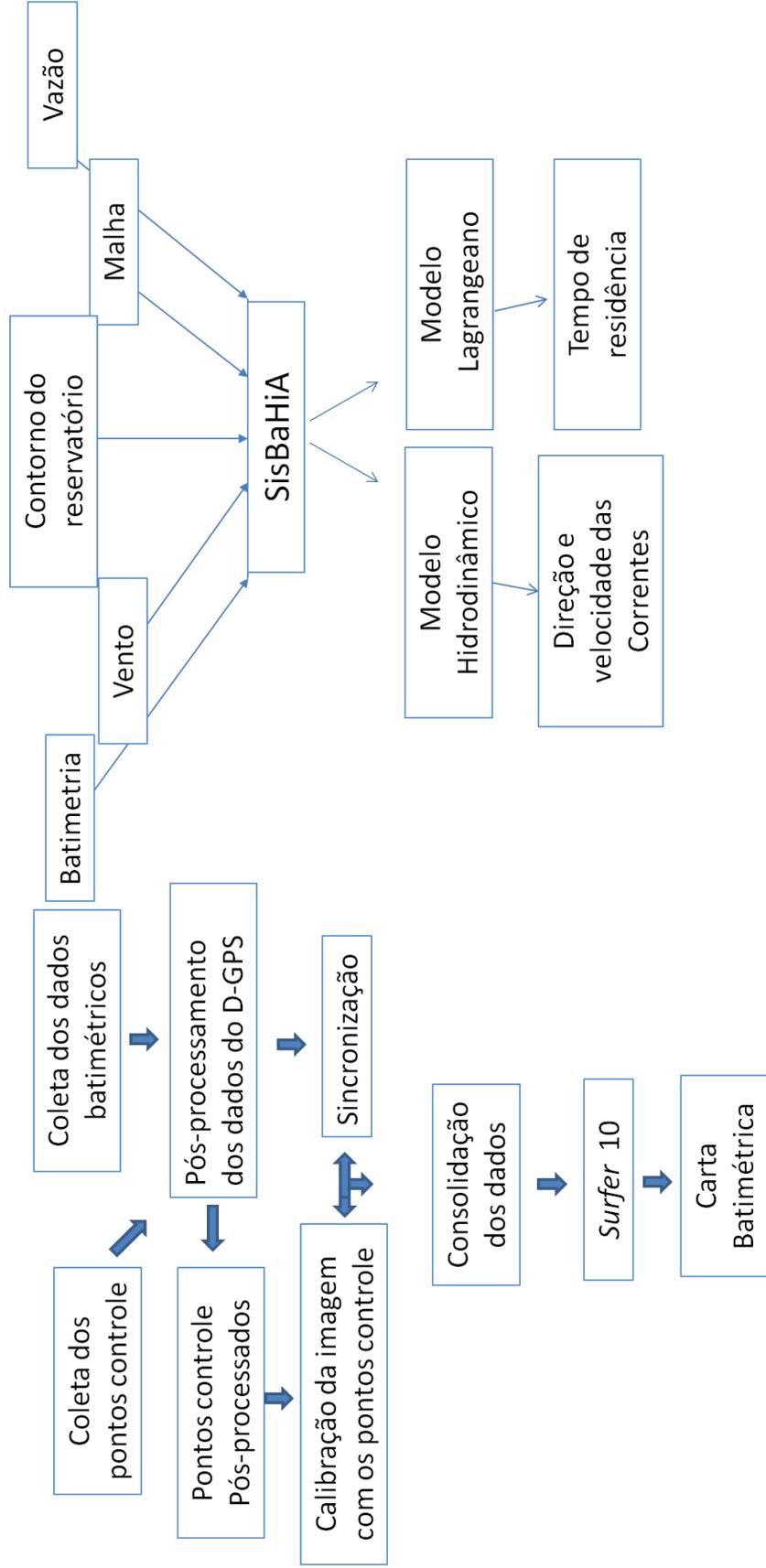


Figura 4. Fluxograma simplificado das etapas envolvidas na confecção da carta batimétrica (à esquerda) e na calibração do modelo hidrodinâmico (à direita).

Os dados de vento foram obtidos através do INMET (Instituto Nacional de Meteorologia), pela estação convencional de Belo Horizonte-MG (via serviço FTP), localizada à aproximadamente 18 km da barragem da represa de Vargem das Flores. Foi obtida uma série histórica de ventos, no entanto, para calibração do modelo, foram utilizados apenas ventos de um intervalo de 30 dias, período no qual a data da coleta dos dados biológicos está inserida. A aquisição dos dados foi realizada no ano de 2010.

Os dados de vazão foram obtidos através do relatório “Plano Diretor das Águas da Bacia Hidrográfica do Rio Paraopeba”, realizado em 2009 pela Holos Engenharia Sanitária e Ambiental Ltda. Este relatório está disponibilizado via página da web do Consórcio Intermunicipal da Bacia Hidrográfica do rio Paraopeba (CIBAPAR). Tal relatório continha apenas os valores de vazão para alguns tributários. Os dados dos outros tributários foram obtidos de trabalho de Souza (2003).

Resultados e Discussão

Caracterização batimétrica

Foram coletados 18.330 pontos com precisão submétrica, durante o levantamento batimétrico, cobrindo quase toda a área do reservatório. Na área mais ao norte, não coberta com pontos, não foi utilizado o ecobatímetro, devido a sua baixa profundidade e dificuldade de navegação. Nesta área foram tomadas medidas pontuais. A carta batimétrica foi gerada para a data da coleta, de 08 de outubro de 2009.

Através da carta batimétrica é possível visualizar que o ponto mais profundo (21,37m) do reservatório encontra-se próximo à represa. A carta batimétrica gerada encontra-se representada na **Figura 7**.

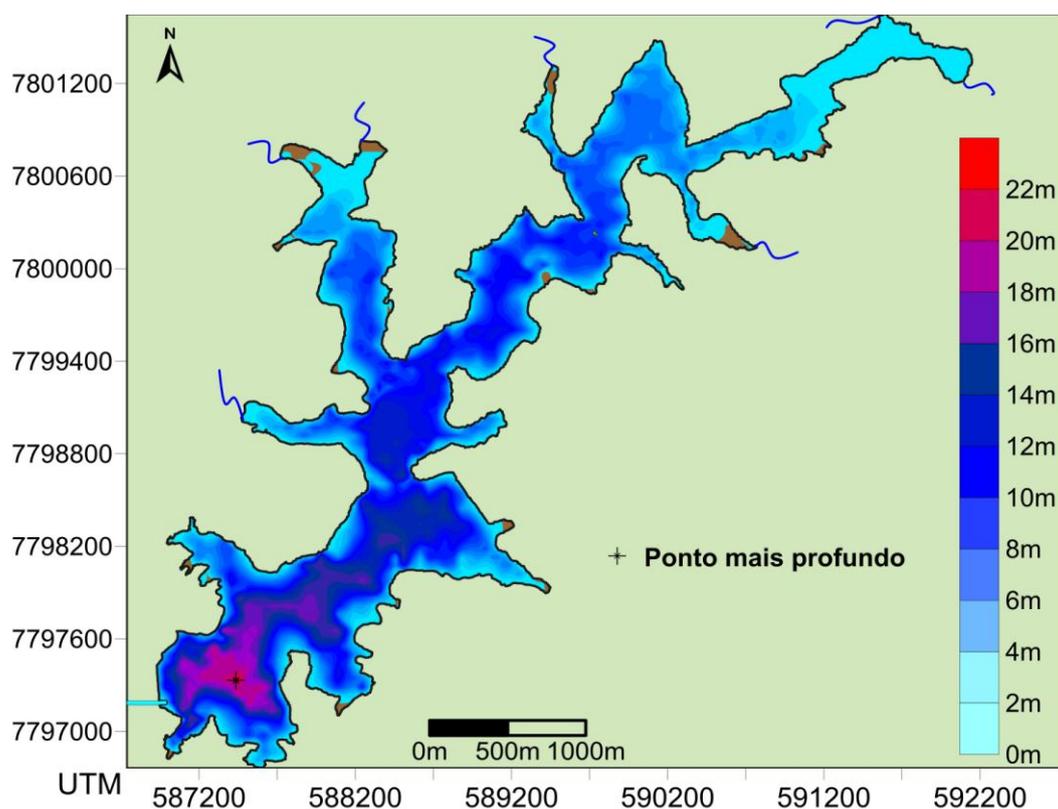


Figura 5. Carta batimétrica do reservatório de Vargem das Flores para a cota de 837,7m.

Modelagem Hidrodinâmica

O modelo hidrodinâmico foi calibrado e simulou um período de 30 dias, referente à data de 21 de setembro a 21 de outubro de 2010. Durante esse período observou-se que os ventos predominantes apresentaram angulação de 90° azimute, variando sua intensidade de 2 a 3m.s^{-1} (**Figura 8**).

O vento às 12 horas, do dia 06 de outubro de 2010, data da coleta limnológica, apresentou valores de intensidade de 2m.s^{-1} e direção azimute de 90° . Por conseguinte, o valor de vento para o dia da coleta condiz com o padrão de ventos apresentado para o período analisado.

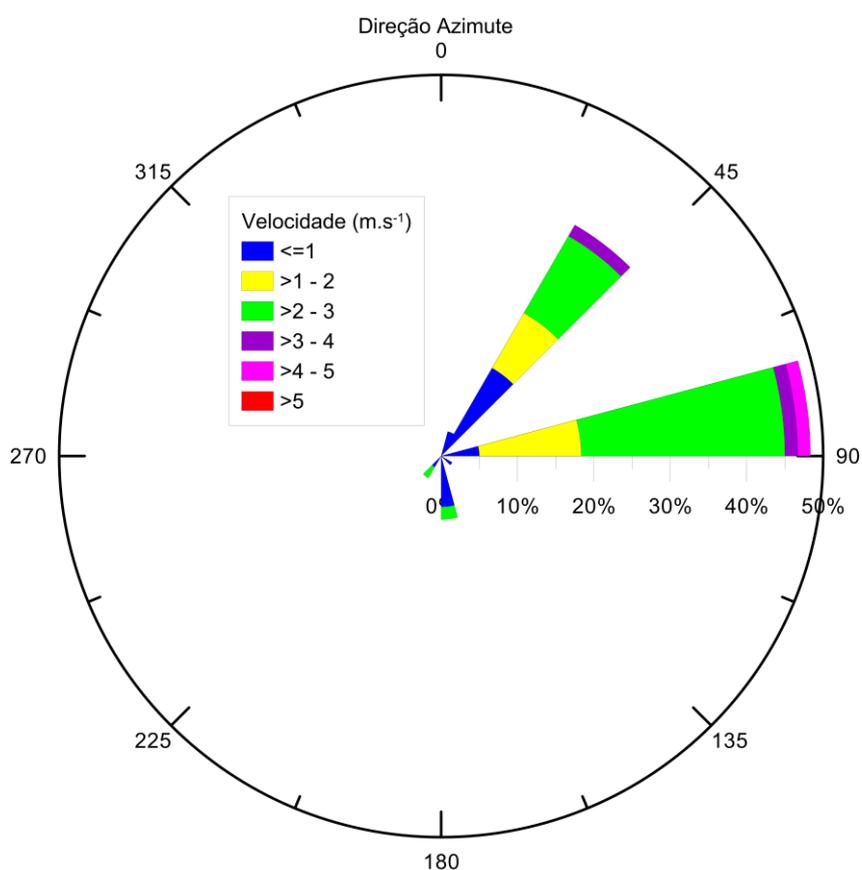


Figura 6. Carta de vento para o período de 30 dias de simulação do modelo hidrodinâmico (21 de setembro a 21 de outubro de 2010). Dados fornecidos pelo INMET.

Foram verificados dados de vento para o período de uma década, a fim de se observar se o padrão de ventos do mês condizia com tal período. Observou-se que a representação de ventos do período de simulação de 30 dias entre os meses de setembro e outubro do ano de 2010, enquadrava-se no padrão de 10 anos de ventos, referentes ao intervalo dos anos de 2000 a 2010 (**Figura 9**).

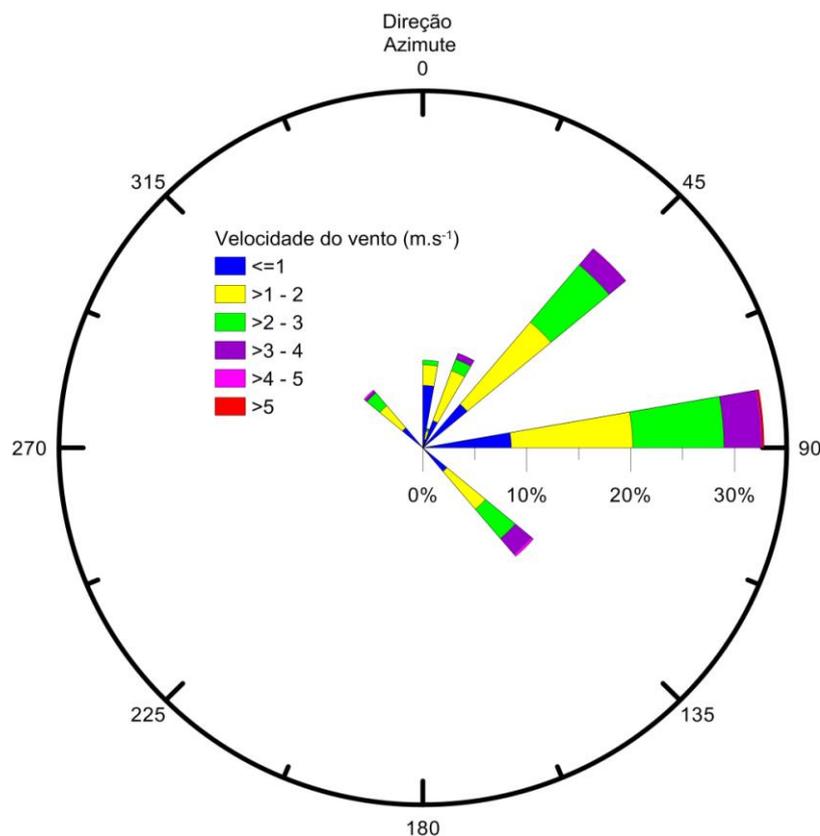


Figura 7. Carta de vento para o período de 10 anos (03 de novembro de 2000 a 03 de novembro de 2010). Dados fornecidos pelo INMET.

Com relação à circulação da água em corpos d'água rasos como lagoas, estuários, zonas costeiras e banhados, onde os processos horizontais são mais importantes e predominam sobre os verticais, a coluna d'água é usualmente assumida como bem misturada, com pouca ou nenhuma estratificação vertical (ROSMAN, 1989). Nestes casos são normalmente empregados os modelos hidrodinâmicos bidimensionais horizontais (2DH), que se caracterizam por utilizar as equações da continuidade e dinâmicas integradas na vertical (PAZ, 2005).

O reservatório de Vargem das Flores é um reservatório raso, com profundidade média de 5,8m e máxima de 20,6m (para a cota 836,78m). Entretanto, na data da coleta, para a qual o modelo foi calibrado, o reservatório apresentou-se estratificado.

Os modelos tridimensionais se aplicam a corpos d'água com significativa variação vertical ou quando o movimento da substância de interesse está relacionado às correntes junto ao fundo, como é o caso de sedimentos, ou junto à superfície, por exemplo, no cálculo de deriva de corpos flutuantes (ROSMAN, 2011). Além disso, o modelo é capaz de calcular campos de velocidades tridimensionais, obtendo os perfis de velocidade ao longo da profundidade, permitindo comparações das correntes advectivas por nível de profundidade do reservatório. Dessa forma, optou-se pela utilização do modelo hidrodinâmico tridimensional (MH-3D), uma vez que os dados com os quais se pretende realizar interpretação de sua distribuição foram coletados na subsuperfície do reservatório.

Observando os campos de velocidades residuais obtidas pelo MH-3D (**Figura 10**), para a profundidade de um metro, verifica-se que as velocidades são baixas em todo o domínio do reservatório de Vargem das Flores e não ultrapassam $0,11\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, exceto nos deltas de alguns tributários, como o do Córrego Água Suja, onde as velocidades residuais são intensificadas pela vazão, alcançando $0,24\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$.

A circulação gerada pelo MH-3D difere com relação à velocidade e direção das correntes, quando comparadas as profundidades. A influência do vento na circulação superficial (1m) afeta a velocidade e a direção da corrente nas águas, tendo os vetores da corrente superficial a mesma angulação apresentada pelo vento. Quando comparados os resultados de 1m com a camada de 10m de profundidade do reservatório, é possível perceber como a influência da forçante vento sobre a circulação superficial é mais acentuada. Nas correntes de estratos de maiores profundidades (**Figura 11**), observa-se que seus vetores não seguem os vetores da corrente superficial. À medida que se aprofunda na coluna d'água, o vento vai perdendo o seu grau de influência na determinação da direção e velocidade do escoamento e a influência dos tributários cresce.

Segundo Thornton (1990), na maioria dos lagos e reservatórios o vento é a principal fonte de energia cinética e de mistura, mas fluxos de entrada de rios podem gerar escoamento, dependendo da densidade do mesmo, em diferentes profundidades, gerando correntes de fundo. Desta forma, a influência na determinação do escoamento à profundidade de 10m é mais influenciada pelo influxo dos tributários, tendo o vento um papel secundário no controle desta. Com relação aos valores de

velocidade de correntes no domínio do reservatório, quando comparados com os da camada superficial, estes são inferiores em uma ordem de grandeza.

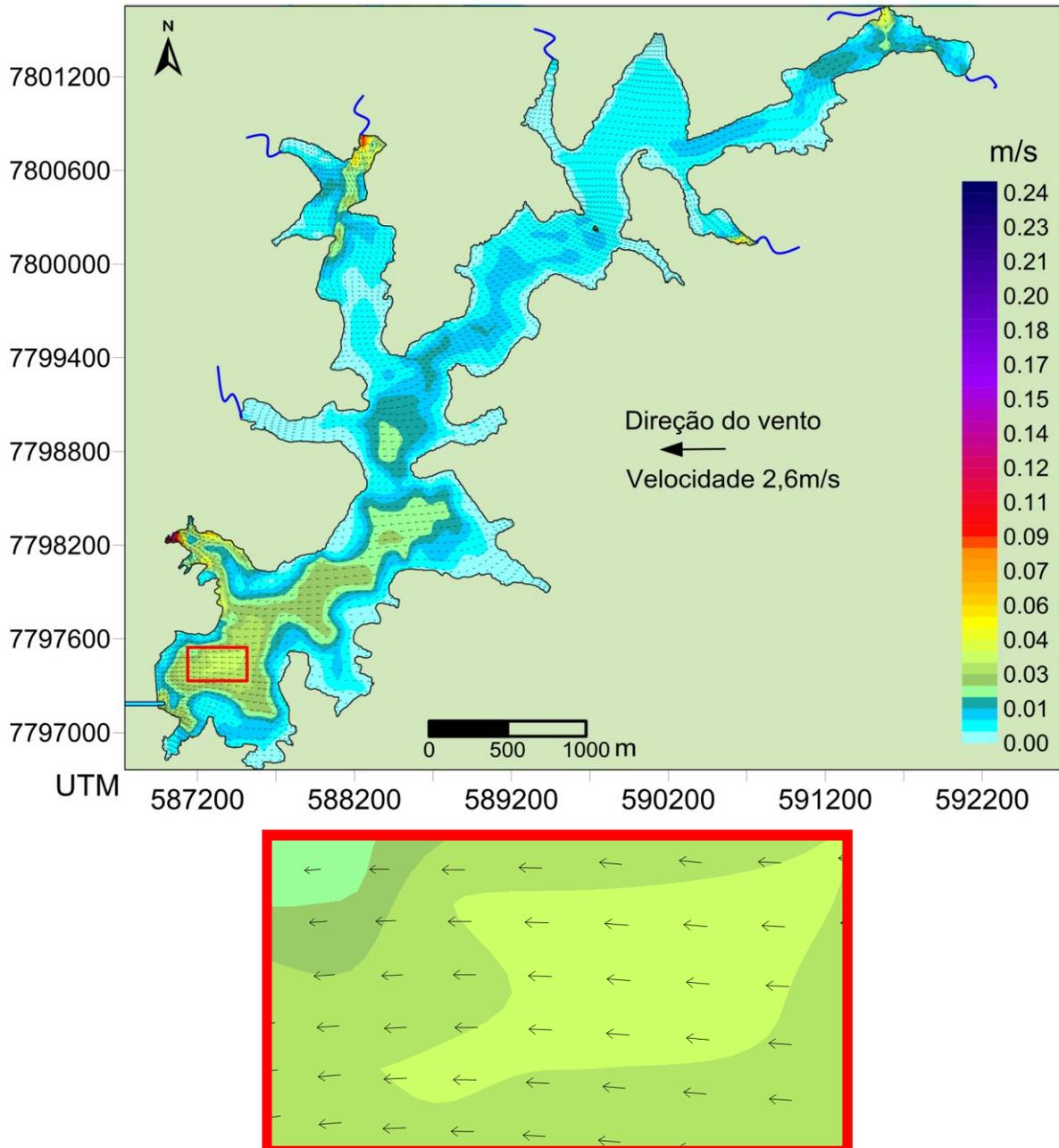


Figura 8. Campo de velocidades das correntes de água determinado pelo modelo Hidrodinâmico para o instante de simulação 1.339.200s (a um metro de profundidade), referente às 12 horas da data da coleta de 06.10.10, com ventos de direção 90° Azimute e velocidade de $2,6\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$. Área destacada pelo retângulo vermelho em maior aumento, ilustrando o campo de velocidades de corrente na mesma direção do vento.

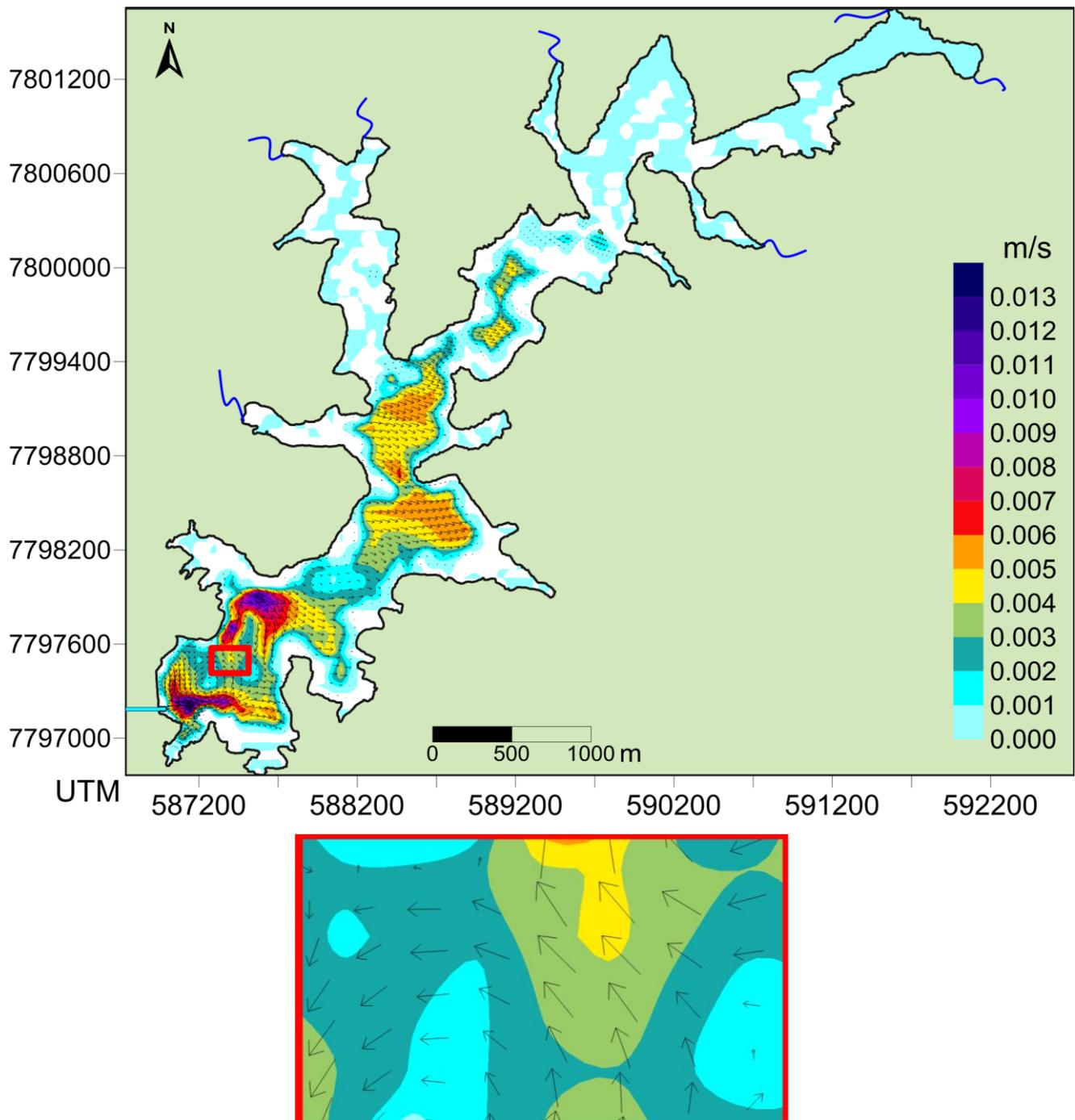


Figura 9. Campo de velocidades determinado pelo modelo Hidrodinâmico para o instante de simulação 1.339.200s (a 10m de profundidade), referente às 12 horas da data da coleta de 06.10.10, com ventos de direção 90° Azimute e velocidade de $2,6\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$. Área destacada pelo retângulo vermelho em maior aumento, ilustrando o campo de velocidades de corrente.

O padrão de circulação no reservatório não diferiu entre o instante inicial da coleta e o final. Isso porque os dados de vento fornecidos ao modelo apresentaram intervalo de doze horas. Deste modo, como a magnitude e angulação do vento, nos dados utilizados para calibração do modelo, não variaram durante o período da coleta, não

houve variação nas velocidades e direção das correntes, uma vez que os valores de vazão dos tributários para calibração do modelo foram constantes.

Fica claro que a circulação superficial do reservatório é dominada pela ação do campo de vento. Durante o dia, principalmente nas horas mais quentes, quando as velocidades são quase sempre mais elevadas, a ocorrência de ventos é mais comum. Assim, a magnitude e angulação do vento geram a corrente superficial que se movimenta em função do mesmo. Sendo possível afirmar que neste estrato, a influência dos tributários na circulação tem menor importância.

O Modelo de Transporte Lagrangeano (ML) estimou os tempos de troca ou renovação de massas de água entre os diferentes compartimentos do reservatório de Vargem das Flores. Este é aplicado a constituintes passivos, que não influenciam no comportamento hidrodinâmico, são apenas transportados através das massas d'água, como é o caso dos organismos planctônicos. O modelo ML-3D foi rodado para o tempo de um ano (365 dias) e o resultado dos tempos de retenção do reservatório Vargem das Flores está apresentado na **Figura 12**. Os tempos de residência da água no reservatório foram determinados a fim de se verificar sua influência na distribuição do fito e zooplâncton. Foi escolhida a profundidade de 1m, uma vez que nesta profundidade foram realizadas as coletas de fitoplâncton e zooplâncton.

Como se pode observar na **Figura 12**, os tempos de residência apresentaram valores mais altos nas zonas de rio ou também chamadas de zonas lólicas e na parte norte do eixo central. Esperava-se que nas regiões de contribuição dos tributários, devido ao influxo de água, os tempos de retenção fossem menores. Acredita-se que os valores superiores dos tempos de retenção das águas nas regiões de contribuição de tributários possam ser explicados pelo padrão de dominância dos ventos. Como já demonstrado pelo modelo hidrodinâmico, o vento desempenha um papel primário na definição do padrão de circulação das correntes superficiais. Isso pode ser melhor entendido simulando a condição de que se em uma região as correntes de vento fossem sempre contrárias ao sentido da barragem, esperar-se-ia que estas se renovassem em um tempo extremamente superior ao que ocorre com o restante da coluna d'água. Para se investigar a distribuição de organismos com limitada mobilidade, como o fitoplâncton, este seria um modelo mais explicativo, devido a diferença existente no comportamento dos tempos de renovação entre as profundidades.

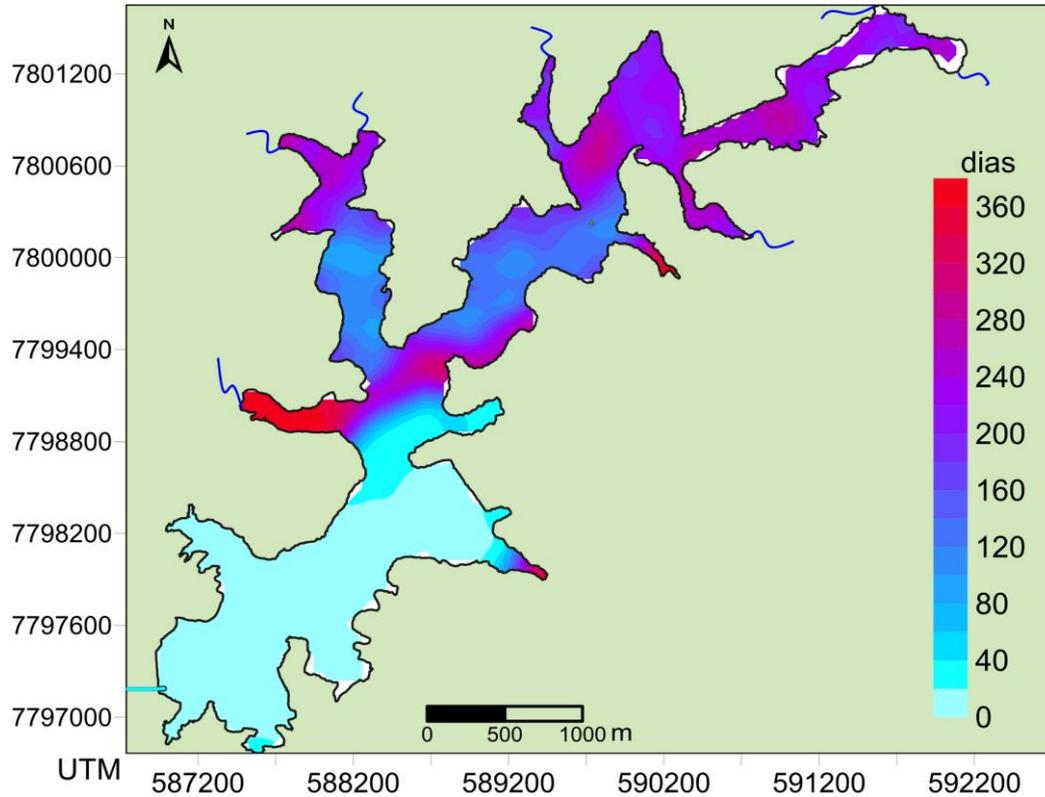


Figura 10. Tempos de residência do reservatório Vargem das Flores gerada pelo modelo 3D a profundidade de 1m.

Apenas a título de comparação, um tempo de residência médio da coluna da água foi simulado, empregando-se um MH-2DH (**Figura 13**). Observa-se que as áreas com maiores tempos de retenção são semelhantes às obtidas a partir do modelo 3D. A diferença entre os tempos de residência está representada nos valores na região do eixo central, onde os tempos gerados pelo modelo 2DH são inferiores aos obtidos pelo modelo 3D.

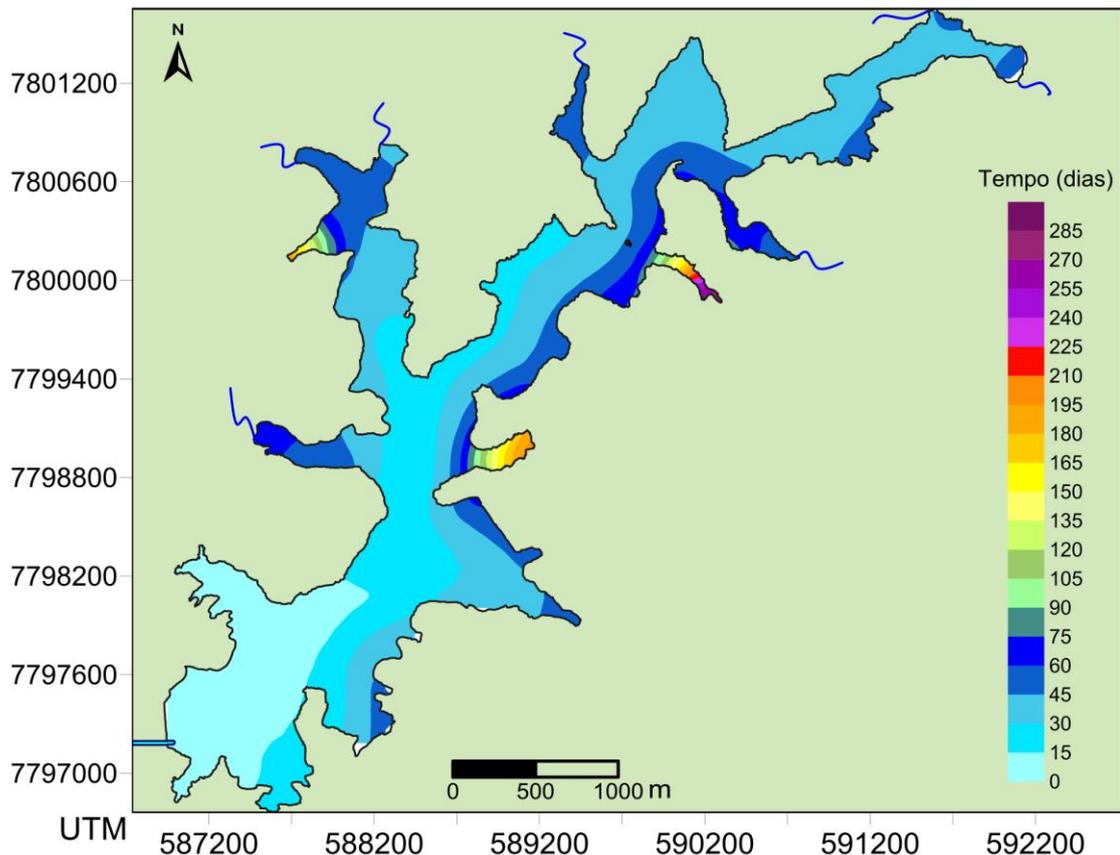


Figura 11. Tempos de residência do reservatório Vargem das Flores gerada pelo modelo 2DH a profundidade de 1m.

Distribuição longitudinal de fitoplâncton e zooplâncton

A densidade fitoplanctônica foi estimada através da concentração de clorofila-a. Enquanto o zooplâncton foi contado e sua densidade foi estimada por indivíduos por litro. Os valores de zooplâncton e clorofila-a de cada estação foram interpolados pelo método da krigagem e obtidas cartas temáticas.

A maior concentração de clorofila (**Figuras 14**) foi encontrada no braço de entrada do principal tributário, onde foram medidos os maiores tempos de residência. Esse resultado já era esperado, uma vez que nessas áreas a produtividade primária é geralmente maior, resultante da taxa de reprodução superior do fitoplâncton em relação à taxa de perda de biomassa (CAMPBELL et al., 1998; TUNDISI, 1990; TUNDISI & MATSUMURA-TUNDISI, 2008), ocasionada por lavagem hidráulica e choque mecânico. Tundisi & Matsumura-Tundisi (2008) relatam que os processos de produtividade primária são influenciados pela disponibilidade de nutrientes e pela

capacidade do fitoplâncton em reproduzir-se para repor a biomassa perdida a jusante pela vazão defluente. Contudo, deve-se considerar que a distribuição da biomassa fitoplanctônica e a composição de espécies do fitoplâncton nos reservatórios dependem, além das inter-relações de fatores físicos estudados nesse trabalho, de fatores químicos, como concentração de nutrientes e distribuição relativa dos diferentes íons dissolvidos na água e fatores biológicos como interação das espécies.

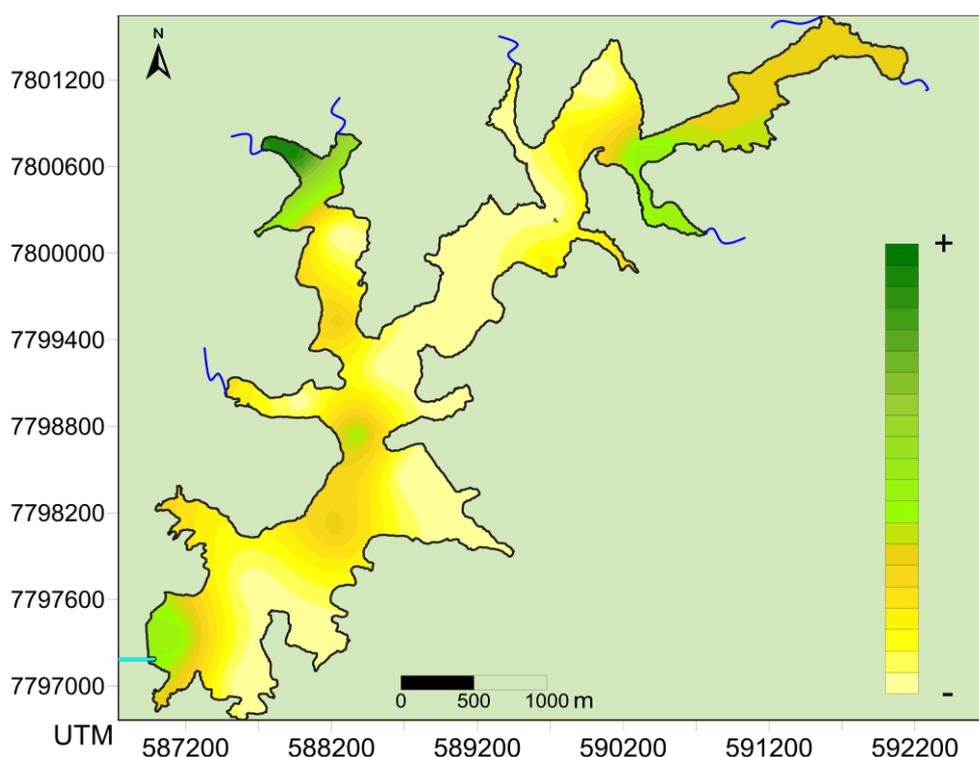


Figura 12. Carta temática da distribuição horizontal de clorofila-a no reservatório Vargem das Flores coletado na profundidade de 1m, no dia 06.10.2010.

Quando analisados valores de nutrientes, observa-se que a clorofila-a apresenta maiores concentrações em áreas com maiores quantidades de nutrientes, como o PT, NT e íon amônio (**Ver capítulo II**). A variação longitudinal desses nutrientes apresentou padrão similar ao da clorofila-a, demonstrando que tanto os tempos de residência das águas, quanto a disponibilidade de nutrientes interferem na distribuição do fitoplâncton. No entanto, os nutrientes não explicam a grande concentração de clorofila-a próxima a região do vertedouro. Acredita-se que a razão para o padrão apresentado pela clorofila, seja a condição de circulação de água gerada pela torre de captação localizada nessa região. A captação de água superficial, aliada ao vento, geram um padrão de circulação de água nessa região,

como demonstrado pela **Figura 15**, que poderia explicar a condição de concentração de clorofila.

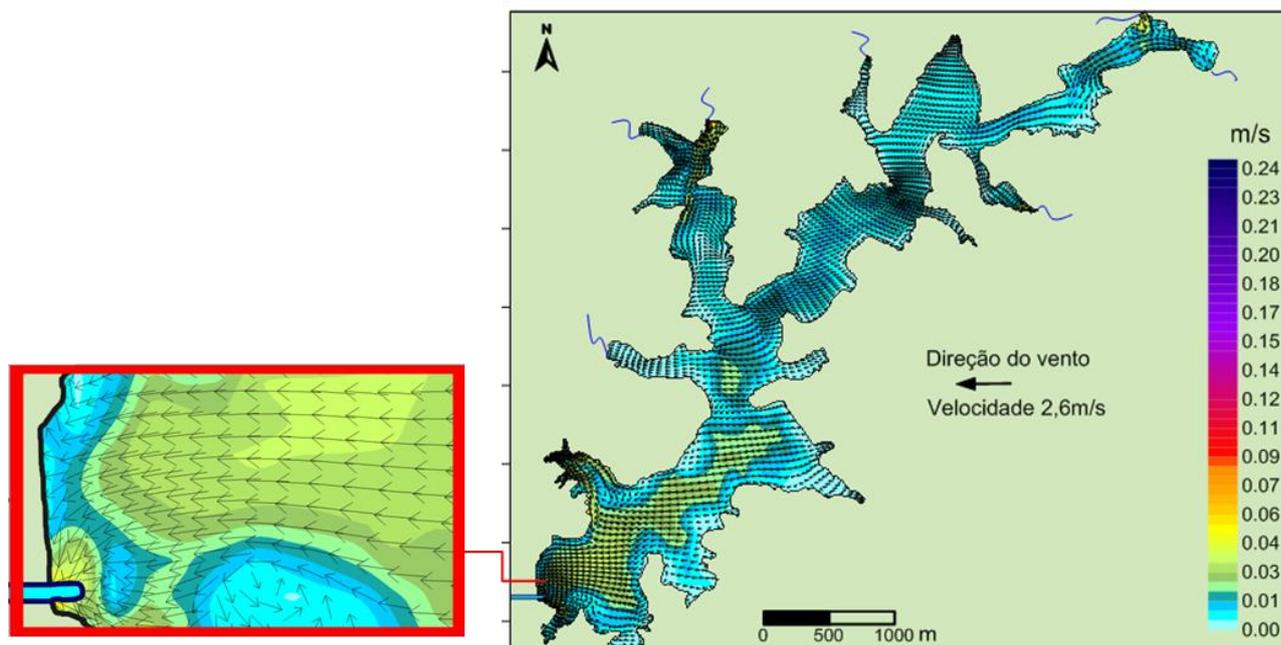


Figura 13. Campo de velocidades determinado pelo modelo Hidrodinâmico 3D à profundidade de 0,5m para o instante de simulação 1.339.200s (a 10m de profundidade), referente às 12 horas da data da coleta de 06.10.10, com ventos de direção 90º Azimute e velocidade de 2,6m.s⁻¹. Área destacada pelo retângulo vermelho em maior aumento, ilustrando o campo de velocidades de corrente de água na região da torre de captação de água.

Com relação à distribuição de zooplâncton (**Figura 16**), as estações que apresentaram maiores densidades de zooplâncton total foram a 24, seguida pelas 5 e 14. O ponto 24 se encontra na área de confluência dos braços do córrego Bela Vista com o córrego Vargem do Sapê e Ribeirão Betim. O ponto 14 também se encontra em um braço com contribuição de tributários, o córrego Água Suja e córrego do Laje. Já o ponto 5, o mais próximo da barragem, se encontra num pequeno braço, sem contribuição de rios. As estações que se encontram na zona de rios, também apresentaram maiores concentração de clorofila-a.

Harvey et al.(1997), em estudo realizado na Baía Hudson, observou que a distribuição de zooplâncton correspondia estreitamente a distribuição espacial de fitoplâncton. Em outro estudo realizado também na Baía Hudson por Harvey et al (2001), os resultados apoiavam a hipótese de que a estrutura da comunidade biológica local, que vai desde o fitoplâncton até o meso e macro-zooplâncton, era uma função de variações nas características hidrodinâmicas, através de sua ação na temperatura da superfície da água, salinidade, estratificação e condições de mistura,

conduzindo a uma diferenciação espacial das comunidades de fitoplâncton e consequentemente das comunidades de zooplâncton.

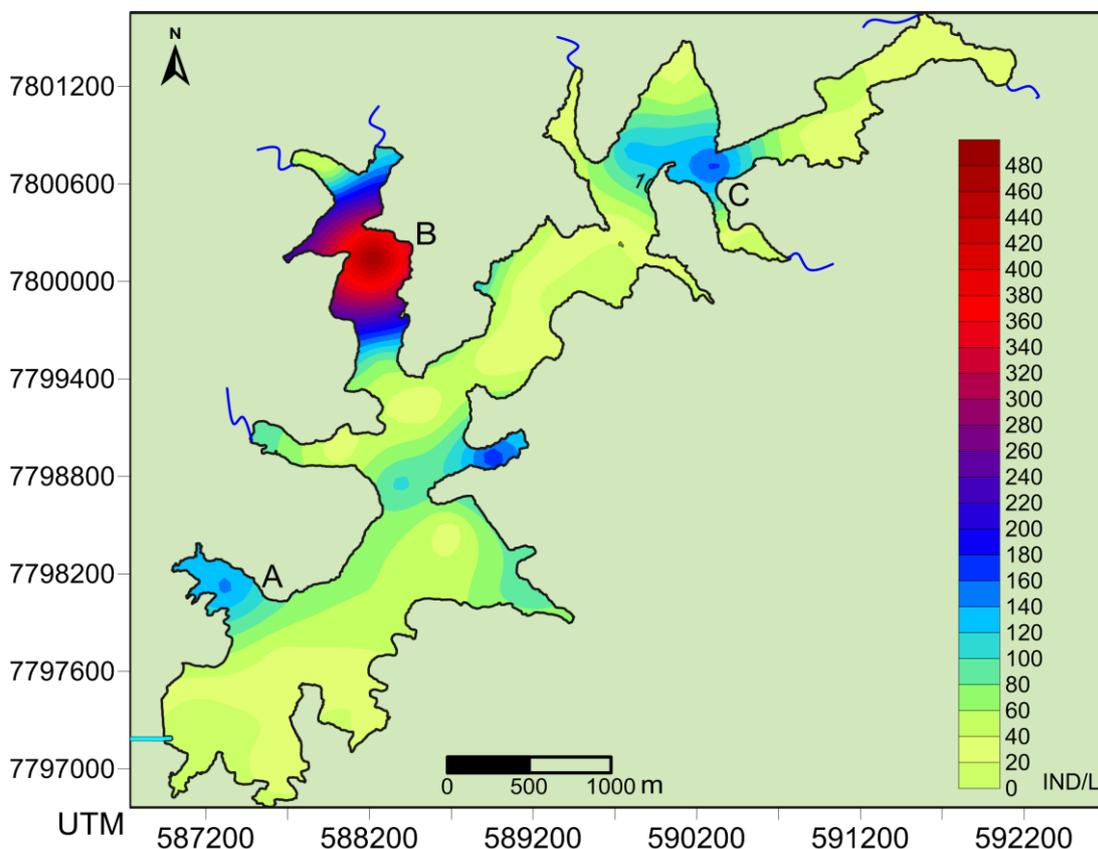


Figura 14. Carta temática da distribuição horizontal de zooplâncton por grandes grupos no reservatório Vargem das Flores coletado na profundidade de 1m, no dia 06.10.2010. As letras denominam as áreas de maior densidade de zooplâncton.

As áreas A, B e C apresentaram maior densidade de zooplâncton total (**Figura 16**). As áreas B e C tiveram também elevados tempos de residência (**Figura 12**). Os tempos de retenção poderiam explicar esses elevados valores somente nas áreas B e C. Entretanto, na área A, o valor dos tempos de retenção não explicam a alta densidade de zooplâncton. Porém, quando se analisa o escoamento gerado pelo modelo hidrodinâmico 3D, observa-se que nessa área há formação de um vórtice, com o “aprisionamento” das correntes (**Figura 17**). Acredita-se que o padrão de circulação apresentado no braço A poderia explicar a alta densidade do zooplâncton nessa região.

Analisando a distribuição de clorofila-a e nutrientes no reservatório (**Capítulo II**), observou-se que a concentração de clorofila poderia explicar as elevadas densidades de zooplâncton, assim como os tempos de retenção, apenas nas regiões B e C da **Figura 16**. Já a concentração de PT foi condizente com o padrão de

distribuição de zooplâncton, nas três regiões destacadas. Alguns trabalhos em estuários observaram a existência de uma relação positiva entre a densidade de zooplâncton e a poluição orgânica (ATTAYDE & BOZELLI, 1998; SANCHES & CAMARGO, 1995; SOUZA-PEREIRA & CAMARGO, 2004). De acordo com Souza-Pereira & Camargo (2004), com a introdução de matéria orgânica dissolvida e particulada, pelo lançamento de esgotos orgânicos, há um aumento da quantidade de bactérias e protozoários que, provavelmente, são uma importante fonte de alimento para as formas jovens de algumas espécies de zooplâncton, especialmente copépodos estuarinos, gerando uma elevação na densidade desses organismos. Desta forma, acredita-se que o alto aporte de nutrientes, principalmente de fósforo e nitrogênio total, para o reservatório influenciou também a distribuição de zooplâncton.

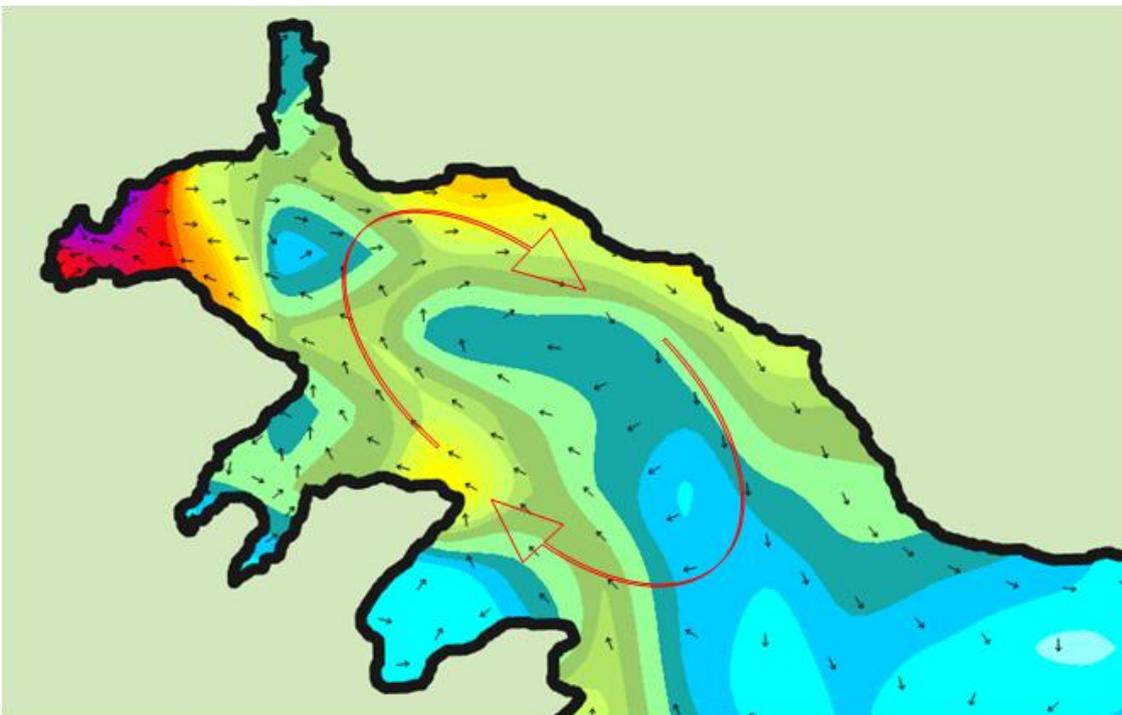


Figura 15. Campo de vetores das correntes determinado pelo modelo Hidrodinâmico 3D para o instante de simulação referente às 12:00 horas do dia da coleta de 06.10.10, na área A. As setas em vermelho indicam a formação do vórtice.

Considerando que tanto a disponibilidade de alimento (clorofila e nutrientes-PT), quanto à hidrodinâmica seriam passíveis de explicar o padrão de distribuição de zooplâncton no reservatório de Vargem das Flores, aplicando-se tais informações ao modelo proposto por Marzolf (1990), o padrão em que melhor se encaixaria a distribuição zooplânctônica, seria aquele descrito por uma curva Gaussiana. Esse padrão descreve que tanto a exportação de material quanto a velocidade das

correntes influenciariam a distribuição do zooplâncton. No entanto, o reservatório de Vargem das Flores não apresentou claramente este padrão.

Acredita-se que a morfometria do reservatório, aliada as características de uso e ocupação do solo, do qual decorre o aporte de nutrientes via tributários e cargas difusas de nutrientes, geraram uma complexa distribuição longitudinal de zooplâncton que não pode ser respondida por nenhum dos padrões propostos por Marzolf.

Estudo de Matsumura-Tundisi e Tundisi (2005) apresentou a teoria de que inúmeros tributários na represa de Barra Bonita representam um processo de heterogeneidade espacial, no qual a descarga de cada tributário produz uma fronteira de massas de água de diferentes densidades e concentrações de nutrientes, aumentando a heterogeneidade espacial e a capacidade de expansão de nichos alimentares e de condições abióticas favoráveis. Desta forma, as particularidades do entorno do reservatório geraram uma grande variação horizontal, o que influenciou numa grande heterogeneidade espacial. Esta última, aliada ao padrão de circulação superficial da água causada pelo vento, determinou a complexa distribuição de zooplâncton no reservatório de Vargem das Flores.

Conclusão

O vento foi a principal forçante responsável pelo padrão de escoamento superficial das águas no reservatório de Vargem das Flores, que por se tratar de um reservatório de pequeno porte, apresentou também circulação hidrodinâmica de todo o corpo d'água resultante da ação do mesmo. O vento foi igualmente importante na definição dos tempos de residência do reservatório, no qual os maiores valores de tempos de retenção das águas foram compatíveis com a direção de ventos predominantes no reservatório.

Os principais forçantes na distribuição espacial da clorofila foram o vento e a disponibilidade de nutrientes. A hidrodinâmica pode ter sido um dos fatores preponderantes na distribuição da clorofila. Desta forma, o tempo de residência da água e o padrão de escoamento determinado pelo vento no dia da coleta foram passíveis de explicar o padrão encontrado.

A densidade de zooplâncton foi maior em regiões com mais altas concentrações de clorofila-a e PT, em braços onde há deflúvio de tributários com elevado aporte de nutrientes, combinados com altos tempos de residência das águas. O reservatório de Vargem das Flores apresenta em sua bacia de contribuição e no entorno do reservatório uma forte pressão antrópica, com elevado aporte de nutrientes através de fontes pontuais e difusas de contaminação. Assim, o padrão longitudinal de distribuição de zooplâncton apresentado pelo reservatório foi bastante heterogêneo, influenciado tanto pela disponibilidade de nutrientes quanto pela hidrodinâmica. Sendo assim, não foi possível determinar nenhum dos padrões descritos por Marzolf (1990) como sendo passível de explicar a distribuição horizontal de zooplâncton encontrada no reservatório de Vargem das Flores.

Os modelos são importantes ferramentas, pois permitem integrar informações espacialmente dispersas e auxiliar na interpretação de medições feitas em estações pontuais, como as apresentadas neste trabalho, com a clorofila-a e zooplâncton. Assim, o modelo hidrodinâmico obtido para o reservatório Vargem das Flores, assim como os tempos de retenção gerados a partir deste, apresentaram-se passíveis de explicar a distribuição longitudinal do fito e zooplâncton.

Referências Bibliográficas

ATTAYDE, J.L. & BOZELLI, R.L. 1998. *Assessing the indicator properties of zooplankton assemblages to disturbance gradient by canonical correspondence analysis*. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences. 55:1789-1797.

ANGELINI, R. 1999. Ecosistemas e modelagem ecológica. *In*: POMPÊO, M.L.M. 1999. *Perspectivas da limnologia no Brasil*. São Luís: Gráfica e Editora União. 191p.

ARCHAMBAULT, P.; ROFF, J.C.; BOURGET, E.; BANG, B. & INGRAM, G.R. 1998. *Nearshore abundance of zooplankton in relation to shoreline configuration and mechanisms involved*. Journal Plankton Research. 20:671–690.

BATES, P.D.; LANE, S.N. & FERGUNSON, R.I. 2005. *Computational fluid dynamics: Applications in environmental hydraulics*. West Sussex: John Wiley & Sons. 531p.

CAMPBELL, C.E.; KNOECHEL, R. & COPEMAN, D. 1998. *Evaluation of factors related to increased zooplankton biomass and altered species composition following impoundment of a Newfoundland reservoir*. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences. 55: 230–238.

CASTEL, J. & VEIGA, J. 1990. *Distribution and retention of the copepod Eurytemora affinis hirundoides in a turbid estuary*. Marine Biology. 107:119-128.

CUNHA, C.L.N.; MONTEIRO, T.C.; ROSMAN, P.C.C. 2002. *Modelagem bidimensional de transporte de escalares não-conservativos em corpos d'água rasos*. Revista Brasileira de Recursos Hídricos. 7(2):120-129.

ESTEVES, F.A. 2011. *Fundamentos de limnologia*. 3ª Edição. Rio de Janeiro: Interciências. 606p.

FORD, D.E. 1990. Reservoir transport process. *In*: Perspectives on reservoir limnology. *In*: THORNTON, K.W.; KIMMEL, B.L. & PAYNE, F.E (Ed). *Reservoir limnology: Ecological perspectives*. Somerset : John Wiley & Sons, Inc. 246p.

GOMES, L.N.L. 2008. *Estudo da associação entre parâmetros bióticos e abióticos e a ocorrência de florações de cianobactérias no Reservatório de Vargem das Flores – Minas Gerais*. Tese (Doutorado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

HARVEY, M.; THERRIAULT, J.C. & SIMARD, N. 2001. *Hydrodynamic control of late summer species composition and abundance of zooplankton in Hudson Bay and Hudson Strait (Canada)*. Journal Plankton Research. 23:481-496.

HARVEY, M.; THERRIAULT, J.C. & SIMARD, N. 1997. *Late-summer distribution of phytoplankton in relation to water mass characteristics in Hudson Bay and Hudson Strait (Canada)*. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences. 54:1937–1952

HENRY, R. 1990. *Estrutura espacial e temporal do ambiente físico e químico e análise de alguns processos ecológicos na Represa de Jurumirim (Rio Paranapanema, SP) e na sua bacia hidrográfica*. Botucatu: UNESP. 242p.

HOLOS Engenharia Sanitária e Ambiental Ltda. 2009. *Plano diretor das águas da bacia hidrográfica do Rio Paraopeba*. Disponível em: < http://www.aguado-paraopeba.org.br/arquivos/doc_resumo_paraopeba_5114.pdf >. Acesso em: 18 ago. 2011.

IBGE (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA), 2010. *Censo 2010*. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/cidadesat/topwindow.htm?1> >. Acesso em: 12 jan. 2012.

INMET- Instituto Nacional de Meteorologia. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/>>. Acesso em: 10 dez. 2010.

LORENZEN, C.J. 1967. *Determination of chlorophyll and pheo-pigments: spectrophotometric equations*. Limnology and Oceanography. 12: 343-346.

KAUFMANN, C.L.G. 2009. *Estudo hidrodinâmico e de qualidade de água após revitalização da circulação do canal do Fundão, Baía de Guanabara – RJ*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Oceânica) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

MARZOLF, G.R. 1990. Reservoirs as environments for zooplankton. In: THORNTON, K.W. et al. (Ed.). 1990. *Reservoir limnology: ecological perspectives*. Somerset: John Wiley. 246p.

MATSUMURA-TUNDISI, T. & TUNDISI, J.G. 2005. *Plankton richness in a eutrophic reservoir (Barra Bonita Reservoir, SP, Brazil)*. Hydrobiologia. 542:367-378.

NEVES, R.; SILVA, A.; BRAUNSCHWEIG, F.; LEITÃO, P.C.; PACHECO, R.; PINA, P. & PITA, G.A. 2001. Hidroinformática e Optimização da Gestão de Ecosistemas Aquáticos. In: *Seminário A Hidroinformática em Portugal*. 2001. Lisboa: LNEC. 13p.

PAULA, T.P. 2011. *Diagnóstico e modelagem matemática da qualidade da água em trecho do rio Piabanha/RJ*. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

PAZ, A.R.; REIS, L.G.M. & LIMA, H.V.C. 2005. *Uso de modelagem hidrodinâmica visando a segmentação de corpos d'água rasos para enquadramento: o caso do Lago Guaíba (RS)*. João Pessoa: XVI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. 20p.

PINHEIRO, L.A. 2008. *Vulnerabilidade e sensibilidade ambiental de praias da Baía de Guanabara ao derramamento de petróleo e derivados*. Dissertação (Mestrado em Ciências - Geologia) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

PINTO, M.P.; BINI, L.M. & DINIZ-FILHO, J.A.F. 2003. *Análise quantitativa da influência de um novo paradigma ecológico: autocorrelação espacial*. Acta Scientiarum: Biological Sciences. 25(1):137-143.

RODRIGUES, M.; OLIVEIRA, A.; QUEIROGA, H.; ZHANG, Y.J; FORTUNATO, A.B. & BAPTISTA, A.M. 2008. *Integrating a circulation model and an ecological model to simulate the dynamics of zooplankton*. Estuarine and Coastal Modeling. 427-446.

RODRIGUES, M.; OLIVEIRA, A.; QUEIROGA, H. & ZHANG, Y.J. 2009. *Three-Dimensional Modeling of the Lower Trophic Levels in the Ria de Aveiro (Portugal)*. Ecological Modelling. 220:1274-1290.

ROSMAN, P.C.C. 2011. *Referência Técnica do SisBaHiA – SISTEMA BASE DE HIDRODINÂMICA AMBIENTAL*. Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ. 241p.

ROSMAN, P.C.C. 1989. Modelos de circulação em corpos d'água rasos. In: Silva, R.V. 1989. *Métodos numéricos em recursos hídricos*. ABRH.156-221.

SANCHES, A.K. & CAMARGO, A.F.M. 1995. *Efeitos da poluição orgânica em um ambiente de mangue da Ilha de Cananéia: Evidências à partir de variáveis físico-químicas e composição do zooplâncton*. Naturalia. 20:125-133.

SANTOS, F.V.; LANSAC-TOHA, F.A. & BONECKER, C.C. 2011. *Estrutura das assembléias de cladóceros em reservatórios nos estados de São Paulo e Paraná: gradientes espaciais e grau de trofia*. Oecologia Australis.15(3): 494-510.

SOUZA, A.D. 2003. *Variações espaciais e temporais de parâmetros de qualidade de água em um reservatório tropical (Represa de Vargem das Flores – Contagem – MG) e suas implicações com aspectos limnológicos*. Tese (Doutorado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

SOUZA-PEREIRA, P.E. & CAMARGO, A.F.M. 2004. *Efeito da salinidade e do esgoto orgânico sobre a comunidade zooplanctônica, com ênfase nos copépodes do estuário do rio Itanhaém, Estado de São Paulo*. Acta Scientiarum. Biological Sciences. 26(1): 9-17.

TAKAHASHI, E.M.; LANSAC-TÔHA, F.A.; VELHO, L.F.M. & BONECKER, C.C. 2005. *Longitudinal distribution of cladocerans (Crustacea) in a Brazilian tropical reservoir*. Acta Limnologica Brasiliensia. 17(3):257-265.

THORNTON, K.W. 1990. Perspectives on reservoir limnology. In: THORNTON, K.W.; KIMMEL, B.L. & PAYNE, F.E (Ed.). *Reservoir limnology: Ecological perspectives*. Somerset: John Wiley & Sons, Inc. 246p..

TUNDISI, J.G. 1985. *Represas artificiais: Perspectivas para o controle e manejo da qualidade da água para usos múltiplos*. IV Simpósio Brasileiro de Hidrologia e Recursos Hídricos.

TUNDISI, J.G. 1990. *Distribuição espacial, sequência temporal e ciclo sazonal do fitoplâncton em represas: fatores limitantes e controladores*. Revista Brasileira de Biologia. 50(4):937-955.

TUNDISI, J.G.; MATSUMURA-TUNDISI, T. 2008. *Limnologia*. Oficina de São Paulo: Textos. 631p.

VIEIRA, E.M. 2009. *Contribuição metodológica para a pré-identificação de áreas adequadas à implantação de parques aquícolas no reservatório de Nova Ponte – Minas Gerais*. Tese (Doctor Scientiae) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.

Conclusão Geral

Segundo Sperling (2005), ao estudar a qualidade da água de um determinado corpo hídrico deve-se contrapor dois conceitos importantes da Engenharia Ambiental: o primeiro seria a qualidade de uma água existente e o segundo a qualidade desejável para uma água. A qualidade de uma água existente é função das condições naturais e da forma de uso e ocupação do solo na bacia hidrográfica da qual o corpo hídrico faça parte. Já a qualidade desejável para uma água é dependente do fim a que se destina a mesma. Contrapondo estes dois conceitos e aplicando-os ao reservatório de Vargem das Flores, é possível afirmar que, sendo este um importante manancial de abastecimento de água para a região metropolitana de Belo Horizonte, que a qualidade de suas águas é incompatível com a finalidade a qual se destina. Desta forma, inúmeros problemas foram identificados neste trabalho, relacionados à qualidade da água e a perda de volume em decorrência do assoreamento.

As estimativas dos parâmetros morfométricos nesse estudo são de grande importância para gestão ambiental do sistema. Essas características permitem principalmente a avaliação da evolução de assoreamento nos corpos d'água. A partir de um inventário batimétrico realizado no ano de 2009, observou-se que o reservatório de Vargem das Flores apresenta uma crescente taxa de deposição de sedimentos em sua bacia de acumulação. Na última década a perda de volume de água no reservatório foi quase três vezes maior quando comparada aos primeiros 28 anos de funcionamento. Com base em cálculo da taxa de assoreamento do reservatório para o período de 2000 a 2009, obteve-se a estimativa de que em menos de 28 anos o reservatório perderá o equivalente a 50% do seu volume útil. No entanto, em decorrência da carência de dados contínuos de monitoramento batimétrico e de estudos sedimentológicos, acredita-se que essa taxa tenha sido subestimada e que a situação do reservatório seja mais crítica do que a apresentada. Sendo assim, nesse mesmo espaço de tempo, a perda por assoreamento pode ser mais intensa que a estimada.

Além da avaliação de perda de volume, o estudo morfométrico permite a realização de estudos relacionados à qualidade da água e distribuição dos organismos. A importância do parâmetro índice de desenvolvimento de perímetro pode ser visualizada quando se observa a contínua interferência antrópica, relacionadas ao

uso do solo. O formato dendrítico aliado às atividades no seu entorno, acarretam para o reservatório um grande aporte de material via fonte difusa. A combinação da intrincada morfometria do reservatório com o uso e ocupação do solo no reservatório de Vargem das Flores demonstrou uma complexa compartimentação do reservatório, não observando o padrão clássico proposto por Thorton (1990).

Observou-se que o reservatório recebe grande aporte de fósforo, provável nutriente limitante, assim como grande aporte de outros nutrientes via tributários e fontes difusas. Foi demonstrado que o reservatório sofre de eutrofização cultural, tendo sido classificado como eutrófico. Tal variação longitudinal das variáveis só foi possível observar devido ao grande número de estações amostrais avaliadas neste estudo. Desta forma, chama-se a atenção para a importância do número de pontos amostrais, de forma que estes sejam suficientes para cobertura de toda a área do corpo d'água. Somente deste modo é possível observar a existência da heterogeneidade espacial, gerando resultados fidedignos à realidade do ecossistema. Assim, pode-se generalizar que o reservatório de Vargem das Flores, devido a sua complexa morfometria, sofra uma rápida degradação ecológica como é observado em outros sistemas urbanos similares do ponto de vista de comprometimento de bacia.

O vento foi a principal força responsável pelo padrão de circulação hidrodinâmica do reservatório de Vargem das Flores. O vento também foi importante na definição dos tempos de residência do reservatório, no qual os maiores valores de tempos de retenção das águas foram compatíveis com a direção de ventos predominantes no reservatório.

Com relação à distribuição espacial dos organismos planctônicos, os principais fatores foram o vento e a disponibilidade de nutrientes. Sendo que o tempo de residência da água e o padrão de escoamento determinado pelo vento no dia da coleta foram passíveis de explicar o padrão de distribuição encontrado. A densidade de zooplâncton foi bastante heterogênea, influenciada tanto pela disponibilidade de nutrientes quanto pela hidrodinâmica. Sendo assim, não foi possível determinar nenhum dos padrões descritos por Marzolf (1990) como sendo passível de explicar a distribuição horizontal de zooplâncton encontrada no reservatório de Vargem das Flores.

Com base nas informações geradas neste trabalho é possível afirmar que o reservatório de Vargem das Flores apresenta um quadro preocupante e necessita de urgente intervenção que priorizem programas preventivos e corretivos de controle de sedimentos e de manejo da qualidade de suas águas, sendo necessário o manejo principalmente da bacia na qual ele está inserido, já que a poluição que chega a represa se faz tanto via tributários, quanto difusa. Sugere-se também o uso de ferramentas de modelagem, devido sua importância, uma vez que estes são grandes aliados no entendimento da evolução dos processos de degradação, vistos que os padrões de vento, como demonstrado neste trabalho favorecem e ou determinam a distribuição de organismos, assim como nutrientes.

ANEXO I – Calibração dos Modelos Computacionais

Até a obtenção dos resultados da modelagem computacional e interpretação dos mesmos pelo modelador existem vários passos envolvidos neste processo. A etapa de calibração do modelo é essencial e merece maior atenção, uma vez que assegura se o modelo desenvolvido é capaz de representar de maneira adequada o fenômeno de interesse (PAULA, 2011). Para tanto, será apresentado o sistema SisBAHIA e alguns dos passos importantes na calibração dos modelos hidrodinâmico e lagrangeano, utilizados neste trabalho.

O SisBAHIA

O SisBAHIA[®] - Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental é um sistema profissional de modelos computacionais registrado pela Fundação Coppetec, órgão gestor de convênios e contratos de pesquisa do COPPE/UFRJ – Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós Graduação e Pesquisa de Engenharia (COPPE) da Universidade Federal do Rio de Janeiro (ROSMAN, 2011).

O SisBAHIA[®] apresenta diversos módulos como o modelo hidrodinâmico, modelo de transporte euleriano, modelos de qualidade de água e eutrofização, modelos de transporte de sedimentos e evolução morfológica do fundo, modelo de transporte lagrangeano – determinístico, modelo de transporte lagrangeano – probabilístico, modelo de campo próximo para emissários e fontes pontuais, modelo de geração de ondas, modelo de propagação de ondas e módulo de análise & previsão de marés. No entanto, neste estudo apenas fez-se uso do modelo hidrodinâmico e modelo de transporte lagrangeano – determinístico, que serão detalhados a seguir, segundo Rosman (2011).

1. Modelo Hidrodinâmico: é um modelo de circulação hidrodinâmica 3D ou 2DH otimizado para corpos de água naturais. Resultados podem ser tanto 3D quanto 2DH, dependendo dos dados de entrada. “Otimizado” é usado no sentido de um modelo planejado para ótima representação de escoamentos em domínios naturais com geometria complexa. Processos de calibração são minimizados devido a fatores como: discretização espacial via elementos finitos quadráticos e transformação σ , permitindo ótimo mapeamento de corpos de água com linhas de costa e batimetrias complexas, campos de vento e atrito do fundo podendo variar dinamicamente no tempo e no espaço e modelagem de turbulência multiescala baseada em Simulação

de Grandes Vórtices (*LES*). Podem-se incluir efeitos de gradientes de densidade acoplando modelos de transporte de sal e calor dos Modelos de qualidade de água, a modelos hidrodinâmicos. Pode-se também incluir evolução morfológica do fundo, com acoplamento de modelo de transporte de sedimentos descrito abaixo.

O SisBHIA possui um modelo hidrodinâmico de linhagem FIST (*Filtered in Space and Time.*), otimizado para corpos de água naturais. A linhagem FIST representa um sistema de modelagem de corpos de água com superfície livre composta por uma série de modelos hidrodinâmicos, nos quais a modelagem da turbulência é baseada em técnicas de filtragem, semelhantes àquelas empregadas na Simulação de Grandes Vórtices (*LES - Large Eddy Simulation*).

2. Modelo de Transporte Lagrangeano - Determinístico: é um modelo de uso geral para simulação de transporte advectivo-difusivo⁶ com reações cinéticas, para camadas selecionadas de escoamentos 3D ou 2DH. Este modelo é especialmente adequado para simulações de vários tipos de problemas, por exemplo:

1. Plumões de emissários ou pontos de lançamento de efluentes ao longo da costa. Permite a simulação de plumões de esgoto com vazões variáveis e taxas de decaimento (*T90*) variáveis de acordo com época do ano, horas do dia, condições de cobertura de nuvens, etc.
2. Derrames de óleo, instantâneos ou por período definido. No caso o modelo pode seguir as mesmas curvas de balanço de massa do ADIOS2, e pode incluir efeitos da dinâmica de Fay na fase inicial do derrame.
3. Transporte de detritos flutuantes, inclusive óleos e graxas.
4. Determinação de tempos de residência em corpos de água, permitindo obter mapas de isolinhas de tempos de residência em diferentes setores de corpos de água com geometria complexa.

Segundo Pinheiro (2008), é importante ressaltar que o SisBAHIA trabalha com um conjunto de programas que auxiliam desde sua fase de implementação até a visualização dos resultados, sendo estes:

_ Argus One®: programa utilizado para a geração e edição de malhas de elementos

⁶ É o transporte que considera a advecção e a difusão. A advecção consiste no transporte de material ou energia através de um fluido em movimento onde estes elementos se movem na direção das linhas de fluxo com velocidade igual à velocidade média do fluido. Enquanto a difusão é causada por um gradiente de potencial químico, que resulta na migração do soluto de regiões de maior concentração para as de menor concentração.

finitos, diretamente importáveis pelo SisBAHIA;

_ Grapher®: programa utilizado pelo SisBAHIA para a apresentação dos resultados em forma de gráficos;

_ Surfer®: programa utilizado pelo SisBAHIA para a apresentação dos resultados em forma de mapas.

Malha e Domínio de Modelagem

Antes de iniciar a calibração do modelo hidrodinâmico é necessário o preenchimento da malha e domínio da modelagem. Nesta etapa de calibração foram importados os mapas, confeccionados anteriormente no *software* Surfer 10.0® e a malha de elementos finitos, que foi construída manualmente no programa *Argus ONE* da Argus Holding Ltda.

A malha, toda confeccionada com elemento quadrangulares, foi formada com um total de 886 elementos, apresentando um total de 4107 nós, sendo 2982 nós internos (referentes a nós de água), 1124 nós de contorno de terra (referentes ao contorno do reservatório) e 3 nós de contorno aberto (nós referentes ao vertedouro). A cota do reservatório no dia da coleta limnológica diferiu da cota altimétrica do dia da coleta batimétrica. A correção de cotas foi realizada no próprio SisBAHIA.

Na etapa de alimentação do modelo referente aos nós, a tabela de batimetria foi importada e interpolada pelo método da krigagem, via comunicação com o *software* Surfer® 10.0. A interpolação gerou valores de profundidade para cada nó da malha. A rugosidade do fundo foi determinada com base nos valores recomendados pelo por Abbot & Basco (1989 *apud* ROSMAN, 2011).

Segundo Sampaio (2003), a amplitude da rugosidade equivalente do fundo depende do tipo de material encontrado e granulometria correspondente. O coeficiente de rugosidade traduz a resistência ao escoamento associada ao fundo do reservatório. Dessa forma, para determinação desse valor é necessário o conhecimento dos sedimentos presentes no leito do corpo de água, uma vez que a rugosidade do fundo é função direta do material componente do leito. Assim, foi determinado um valor constante de 0,03m de rugosidade do fundo para todos os nós, levando em consideração a rugosidade característica dos reservatórios (**Tabela 1**).

Quanto à determinação das fronteiras⁷, na região onde se localizava o vertedouro, selecionou-se os nós referentes a tal posição e atribuiu-lhes a característica de contorno aberto.

Tabela 1. Valores recomendados para a amplitude da rugosidade equivalente de fundo, ϵ , para uso no módulo 2DH do modelo FIST3D. (Adaptado de ABBOT & BASCO, 1989 *apud* ROSMAN, 2011).

Terreno ou leito de terra	
Leito com transporte de sedimentos	$0.0070\text{m} < \epsilon < 0.0500\text{m}$
Leito com vegetação	$0.0500\text{m} < \epsilon < 0.1500\text{m}$
Leito com obstáculos	$0.1500\text{m} < \epsilon < 0.4000\text{m}$
Fundo de pedra ou rochoso	
Fundo de alvenaria	$0.0003 < \epsilon < 0.0010\text{m}$
Fundo de pedra lisa	$0.0010\text{m} < \epsilon < 0.0030\text{m}$
Fundo de asfalto	$0.0030\text{m} < \epsilon < 0.0070\text{m}$
Fundo com pedregulho	$0.007 < \epsilon < 0.0150\text{m}$
Fundo com pedras médias	$0.0150 < \epsilon < 0.0400\text{m}$
Fundo com pedras	$0.0400\text{m} < \epsilon < 0.1000\text{m}$
Fundo com rochas	$0.1000\text{m} < \epsilon < 0.2000\text{m}$
Fundo de concreto	
Fundo de concreto liso	$0.0001\text{m} < \epsilon < 0.0005\text{m}$
Fundo de concreto inacabado	$0.0005\text{m} < \epsilon < 0.0030\text{m}$
Fundo de concreto antigo	$0.0030\text{m} < \epsilon < 0.0100\text{m}$

Modelo Hidrodinâmico

Ao fim do preenchimento das informações referentes à malha e domínio de modelagem, iniciou-se a entrada dos dados para alimentação do modelo hidrodinâmico (MH). A malha anteriormente preenchida foi então selecionada no MH e os tempos de simulação foram preenchidos. O modelo foi gerado para obtenção de resultados para um intervalo de tempo de 30 dias. O período de 30 dias é um tempo

⁷ As fronteiras ou contornos, neste caso os de terra, representam as margens do domínio de modelagem. Nele são representadas as margens, estuários, desembocaduras de rios de interesse e ilhas e ilhotas do espelho d'água.

suficiente para avaliar o fenômeno de distribuição dos organismos planctônicos, uma vez que se pretende obter os dados de corrente para o dia da coleta limnológica. Os instantes são pedidos em segundos, assim, o instante inicial foi 0s, o final de 2.592.000 segundos e o passo de tempo foi de 40s. O passo de tempo refere-se ao *Número de Courant*, que pode ser calculado pela equação do *Número de Courant médio* (Cr) (**Equação 1**).

$$Cr = \Delta t \times \sqrt{\left(\frac{1}{\Delta x^2} + \frac{1}{\Delta y^2}\right)} \times (|\vec{V}| + \sqrt{gH}) \quad \text{[Equação 1]}$$

A equação acima leva em consideração o passo de tempo que se deseja (Δt); o espaçamento médio longitudinal dos nós da malha (Δx^2); o espaçamento médio transversal dos nós da malha (Δy^2); o módulo da velocidade da corrente e a raiz quadrada da aceleração da gravidade (g) multiplicada pela profundidade média (H).

O modelo 3D foi selecionado e configurado para cálculo de quinze níveis ao longo da coluna d'água. O modo de cálculo do modelo foi via módulo analítico-numérico, recomendado por Rosman (2011). O método analítico-numérico que possui algumas aproximações, mas apresenta resultados extremamente acurados em escoamentos tipicamente barotrópicos, porque as variações das acelerações advectivas ao longo da coluna d'água podem ser desprezadas, tratando-se de um método mais eficiente computacionalmente que o método puramente numérico (KAUFMANN, 2009) e, desta forma, atendendo ao estudo proposto.

Em fronteiras, no item parâmetros, foram selecionados valores permanentes para todos os nós da fronteira aberta e de terra. Para o modo dos vértices configurou-se todos os nós com o mesmo tratamento, também recomendado pelo Rosman (2011). O tipo de valores inseridos foram os de vazão. Ainda em fronteiras, no item contornos, todos os nós terrestres que se localizavam na entrada de tributários foram classificados como nó do tipo 6 (**Tabela 2**) e foram determinados o ângulo de entrada do fluxo d'água, assim como a vazão nodal (as definições de ângulo de entrada do fluxo de água dos tributários e cálculo da vazão nodal estão descritas no manual do SisBAHIA (ROSMAN, 2011). Os valores das vazões e ângulos estão dispostas na **tabela 3**. Para os nós de fronteira aberta foi selecionado o tipo 2 (**tabela 4**). Esta categorização do contorno aberto permite que a própria hidrodinâmica do reservatório defina a vazão de saída. O talude da margem, que é por definição o plano inclinado que limita (neste caso) a margem do reservatório, teve o valor de 1, atribuído para todos os nós, ou seja, o talude foi 1 na horizontal para 1 vertical.

Tabela 2. Opções de nós de terra para alimentação do modelo hidrodinâmico e suas características.

Tipo de Nó	Descrição das características
0	Fluxo ou velocidade normal é dado explicitamente, como em margens, rios, etc. Esse é o caso mais comum e deve ser usado preferivelmente para nós com velocidade normal nula (nó de contorno impermeável). O FIST3D calculará o ângulo α_{Nx} entre a direção normal e o eixo x, a partir da geometria e batimetria da malha dadas e desprezará valores de α_{Nx} dados.
1	Fluxo ou velocidade normal é calculado implicitamente, como função da elevação da superfície livre local e talude do fundo (m) na direção normal, vide equação (154). Ou seja, o contorno é permeável como se houvesse alagamento e secamento para além do nó. Deve-se tomar cuidado com o valor de m; portanto para especificar esse valor a batimetria deve estar adequadamente representada, . O FIST3D interrompe a execução se m computado for maior que o parâmetro m_{max} .
2	Mesmo que tipo 0, mas com o ângulo α_{Nx} entre a direção normal e o eixo x fornecido explicitamente para o nó.
3	Fluxo ou velocidade normal é dado explicitamente, como em margens, rios, etc. Além disso, a velocidade tangencial é nula. Se esse modo for usado com a velocidade normal nula, isso corresponde a velocidade igual zero no nó. Em alguns casos, pode ser necessária a utilização de uma malha refinada na região próxima à margem a fim de obter-se bons resultados. Este tipo é melhor do que o tipo 0 para nós com afluxos, como por exemplo rios.
4	Indicativo de cantos convexos salientes. Refere-se aos nós onde ocorre separação de escoamento antes de uma zona de recirculação.
5	Indicativo de cantos côncavos mortos, possui o mesmo efeito do tipo 3 com fluxo ou velocidade normal nulo. Esse é um nó de velocidade nula.
6	Combinação dos tipos 2 e 3. Esse também é melhor que o tipo 0 para nós com afluxos, como por exemplo rios.
7	Mesmo que tipo 1, mas com o ângulo α_{Nx} entre a direção normal e o eixo x fornecido explicitamente para o nó.
8	Mesmo que tipo 1, mas com o talude m da direção normal fornecida explicitamente para o nó. Se for o caso, o FIST3D dá um aviso, mas considerará o valor de m dado mesmo que este seja maior m_{max} .
9	Combinação dos tipos 7 e 8 com velocidade tangencial = 0.

Fonte: SISBAHIA (2011)

Tabela 3. Vazão nodal e tipo de nó selecionado para cada tributário da represa Vargem das Flores.

Tributários	Nº dos nós	Tipo de nó	Ângulo de entrada	Vazão nodal (m.s ⁻¹)
Ribeirão Betim	3	6	-28,34	-0,076
Córrego Vargem do sapê	68	6	107,87	-0,077
Córrego Olaria	424	6	78,44	-0,021
Ribeirão Água suja	966, 963	6	132,11	-0,024
Ribeirão do Laje	1084	6	175,75	-0,015
Córrego do Batatal	2392	6	163,81	-0,007
Córrego Bela Vista	206	6	-15,06	-0,008

Tabela 4. Tipos de nós para nós de fronteira aberta

Tipo de nó	Descrição das características
0	Caso mais comum. O FIST3D calculará o ângulo α_{Nx} entre a direção normal e o eixo x a partir da geometria e batimetria da malha dadas e desprezará valores de α_{Nx} dados.
1	O ângulo α_{Nx} entre a direção normal e o eixo x fornecido pelo modelador é considerado quando ocorrer uma situação de afluxo nesse nó. Ou seja, o afluxo acontecerá na direção imposta.
2	O ângulo α_{Nx} entre a direção normal e o eixo x fornecido pelo modelador é sempre considerado. Ou seja, tanto o afluxo como o efluxo acontecerão nesse nó na direção imposta.

Fonte: SISBAHIA (2011).

No parâmetro variáveis meteorológicas, apenas os dados de vento foram inseridos. Estes foram considerados variáveis no tempo e uniformes no espaço e a entrada dos dados foi referente a um período de tempo de 30 dias (**tabela 5**) e o intervalo considerado no modelo foi de 43200s. Os dados de vento foram adquiridos através do INMET (Instituto Nacional de Meteorologia), pela estação convencional de Belo Horizonte - MG (via serviço FTP).

No item resultados foi configurado o intervalo de tempo dos resultados espacial e temporal. Para ambos foi inserido o valor de 10.800s. O modelo foi então verificado para averiguar se os dados estavam consistentes e foi executado por um período de cinco dias, para uma “rodada de aquecimento”. No parâmetro condições iniciais foi importado os dados da “rodada de aquecimento” e novamente realizou-se a verificação e execução do modelo, desta vez para o intervalo de tempo de interesse,

trinta dias. Os resultados obtidos na forma de mapas temáticos e gráficos foram respectivamente visualizados nos programas *Surfer 10* e *Grapher 8*.

Tabela 5. Dados de vento de 30 dias do período (21 de setembro a 21 de outubro de 2010) adicionados ao modelo hidrodinâmico.

Intervalo de tempo (s)	Intensidade (m.s ⁻¹)	Direção (°)	Intervalo de tempo (s)	Intensidade (m.s ⁻¹)	Direção (°)
0	2.1	5	1296000	1	23
43200	2.6	5	1339200	2.6	9
86400	2.1	5	1382400	2.1	9
129600	2.1	9	1425600	0.5	5
172800	2.1	9	1468800	1.5	9
216000	2.1	5	1512000	1.5	36
259200	1.5	9	1555200	0.5	27
302400	2.6	9	1598400	1.5	9
345600	2.6	9	1641600	3.1	9
388800	2.1	9	1684800	2.1	5
432000	1	9	1728000	4.1	9
475200	2.6	5	1771200	1.5	9
518400	3.1	5	1814400	1	9
561600	1.5	9	1857600	1.5	9
604800	2.1	23	1900800	2.1	9
648000	0.5	18	1944000	1.5	9
691200	0.5	5	1987200	2.1	9
734400	1.5	32	2030400	2.1	5
777600	1	18	2073600	2.1	9
820800	0.5	14	2116800	2.1	9
864000	0.5	18	2160000	2.1	9
907200	0.8	5	2203200	2.6	9
950400	0.5	18	2246400	0.5	5
993600	1	27	2289600	1.5	5
1036800	0.5	32	2332800	1.5	5
1080000	1	9	2376000	1.5	36
1123200	2.6	9	2419200	1	36
1166400	2.6	9	2462400	1.5	9
1209600	2.6	9	2505600	1	5
1252800	1	5	2548800	2.1	5

Fonte: Inmet (2010)

Modelo Lagrangeano

Os dados iniciais de entrada do modelo lagrangeano (ML) foram realizados conforme modelo hidrodinâmico. Primeiramente selecionou-se a malha. A aplicação do ML só pode ser realizada mediante a existência de resultados de circulação hidrodinâmica. Desta forma, realizou-se a seleção do modelo hidrodinâmico já executado. Selecionou-se então o passo de tempo e o instante final de simulação do modelo. O passo de tempo utilizado foi o mesmo do modelo hidrodinâmico (40 segundos) e o intervalo de tempo que o modelo foi configurado para que o ML fosse gerado foi de um ano. O MH obtido apresentava resultado apenas para um período de trinta dias. Entretanto o ML foi configurado para um período 365 dias. Para que fosse possível obter resultados para esse período, foi selecionada a opção de simulação do modelo hidrodinâmico em ciclo. Assim, os resultados do tempo de residência foram obtidos e podem ser visualizados na escala de tempo de horas ou de dias.

Referência Bibliográfica

ABBOTT, M. & BASCO, D. 1989. Computational fluid dynamics: an introduction for engineers. In: ROSMAN, P.C.C. 2011. *Referência Técnica do SisBaHiA – SISTEMA BASE DE HIDRODINÂMICA AMBIENTAL*. Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ. 241p.

INMET- Instituto Nacional de Meteorologia, Disponível em:<http://www.inmet.gov.br/>>. Acessado em 10 dez. de 2010.

KAUFMANN, C.L.G. 2009. *Estudo hidrodinâmico e de qualidade de água após revitalização da circulação do canal do Fundão, Baía de Guanabara – RJ*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Oceânica) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

PAULA, T.P. 2011 *Diagnóstico e modelagem matemática da qualidade da água em trecho do rio Piabanha/RJ*. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

PINHEIRO, L.A. 2008. *Vulnerabilidade e sensibilidade ambiental de praias da Baía de Guanabara ao derramamento de petróleo e derivados*. Dissertação (Mestrado em Ciências - Geologia) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

ROSMAN, P.C.C. 2011. *Referência Técnica do SisBaHiA – SISTEMA BASE DE HIDRODINÂMICA AMBIENTAL*. Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ. 241p.

SAMPAIO, M. 2003. *Estudo de circulação hidrodinâmica 3D e trocas de massas d'água da Baía de Guanabara*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

