

Universidade Federal de Juiz de Fora
Programa de Pós-Graduação em Ecologia

Flaviane de Fátima Cândida de Souza

**Modelagem do regime térmico e caracterização
do estado trófico de um reservatório tropical de
abastecimento público**

Juiz de Fora

2012

Flaviane de Fátima Cândida de Souza

Modelagem do regime térmico e caracterização do estado trófico de um reservatório tropical de abastecimento público

Dissertação apresentada ao Instituto de Ciências Biológicas, da Universidade Federal de Juiz de Fora, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ecologia Aplicada ao Manejo e Conservação de Recursos Naturais.

Orientador: Prof. Dr. Celso Bandeira de Melo Ribeiro

Co-orientadores: Prof. Dr. Carlos Ruberto Fragoso Júnior

Pesq. Dr. Marcelo Henrique Otenio

Juiz de Fora

2012

Souza, Flaviane de Fátima Cândida de.

Modelagem do regime térmico e caracterização do estado trófico de um reservatório tropical de abastecimento público / Flaviane de Fátima Cândida de Souza. – 2012.

79 f. : il.

Dissertação (Mestrado em Ecologia)—Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2012.

1. Hidrodinâmica. 2. Eutrofização. I. Título.

CDU 532

**MODELAGEM DO REGIME TÉRMICO E CARACTERIZAÇÃO DO ESTADO TRÓFICO
DE UM RESERVATÓRIO TROPICAL DE ABASTECIMENTO PÚBLICO.**

Flaviane de Fátima Cândida de Souza

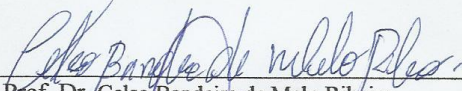
Orientador: Prof. Dr. Celso Bandeira de Melo Ribeiro

Co-orientadores: Prof. Dr. Carlos Ruberto Fragoso Júnior

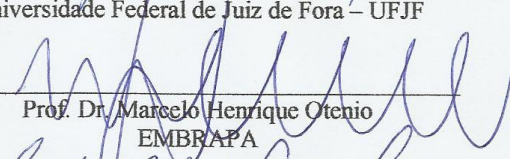
Prof. Dr. Marcelo Henrique Otenio

Dissertação apresentada ao
Instituto de Ciências Biológicas,
da Universidade Federal de Juiz
de Fora, como parte dos
requisitos para obtenção do Título
de Mestre em Ecologia Aplicada
ao Manejo e Conservação de
Recursos Naturais.

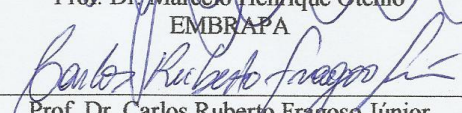
Aprovada em 03 de fevereiro de 2012.



Prof. Dr. Celso Bandeira de Melo Ribeiro
Universidade Federal de Juiz de Fora – UFJF



Prof. Dr. Marcelo Henrique Otenio
EMBRAPA



Prof. Dr. Carlos Ruberto Fragoso Júnior
Universidade Federal de Alagoas – UFAL

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus que sempre esteve ao meu lado iluminando meus pensamentos e me conduzindo nos caminhos que se abriram para mim.

Aos meus pais, Francisco e Marcionília, por nunca pouparem esforços para me confortar com palavras de carinho e atenção mesmo sem entender exatamente o que eu fazia. Eles são meus maiores exemplos de perseverança, de luta, de coragem e de dignidade. Obrigada pai por não permitir que eu desistisse, obrigada mãe por me orientar nas horas mais conturbadas.

Aos meus irmãos, Adriano, Anísia e Fabiana, que compartilharam momentos importantes e decisivos neste trabalho, além de boas conversas de incentivo e por sempre me proporcionarem momentos de alegrias. Valeu maninhos lindos. Não posso deixar de agradecer aos momentos compartilhados com meu sobrinho João Gabriel, o nosso bebê. Cada palavra que ele consegue pronunciar a família inteira baba.

Agradeço à UFJF pela formação em Geografia, onde construí um pensamento crítico compartilhando idéias com professores que me incentivaram a continuar estudando, prestar o mestrado. Ao PGECOL que acolheu e, em especial, ao José Carlos que sempre me salvou com os “pepinos” de viagens, agendamento de coletas, “tira-dúvidas” e pela amizade.

Ao meu orientador, Celso Bandeira, pela dedicação e paciência. Obrigada por me conduzir nessa trajetória acadêmica, pelos livros, pelas conversas e pelos ensinamentos. Devo muito deste trabalho a você. Obrigada por acreditar em mim.

Aos co-orientadores, Marcelo Henrique Otenio por me acolher na Embrapa, me auxiliar na pesquisa de qualidade da água, por me apresentar o projeto “Monitores Ambientais de Recursos Hídricos” e pelas infindáveis discussões, e ao Carlos Ruberto Fragozo Júnior por me receber no Centro de Tecnologia da UFAL em Maceió, me ensinar a engatinhar no vasto caminho da modelagem ecológica, pela paciência e pelo incentivo.

Ao pessoal do LEA, o Rafael Almeida, o Gladson, a Fran, a Marcela, o Felipe, a Fernanda, enfim, todos que me orientaram nas horas que precisei. A Simone e a Michele pelas conversas e amizade. Muito obrigada a todos!

À CAPES pela bolsa no primeiro ano de mestrado, que garantiu a minha estadia em Juiz de Fora para realizar minhas coletas, compra de livros e meu primeiro computador.

Ao presidente da CESAMA, André Borges, por permitir o acesso à represa de São Pedro e por nos receber de portas abertas para realização deste trabalho. E a todos da CESAMA que nos receberam muito bem, em especial ao senhor Jorge da ETA São Pedro que forneceu os dados de vazão e contribuiu muito com as conversas realizadas.

Ao 4º Batalhão de Bombeiros Militar pelo auxílio na disponibilização de um barco para realização das coletas dentro da represa e, principalmente, ao cabo Demétrius que nunca deixou de auxiliar nos trabalhos de campo.

À Embrapa Gado de Leite pelo financiamento das análises laboratoriais, através do Marcelo Otenio, e pelas conversas com o pesquisador Marcos Hott e com a Letícia.

À Estação Climatológica Principal da UFJF, na pessoa da Andréia que sempre me recebeu muito bem na estação, e ao INMET pelo fornecimento dos dados climatológicos.

Ao Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental pelo fornecimento de equipamentos para medição de vazão e pelas orientações do professor Homero.

Às minhas companheiras de campo Estela, Claudinha, Priscila e Ilka, que não pouparam esforços para me ajudar com as coletas. Muito obrigada, meninas, por compartilhar momentos tão importantes para mim.

À banca professor Dr. Carlos Ruberto Fragoso Júnior da UFAL e ao pesquisador da Embrapa Dr. Marcelo Henrique Otenio por aceitarem prontamente contribuir neste trabalho.

Por fim, agradeço a todos os que participaram direta ou indiretamente deste trabalho, pelo apoio e pela torcida

“Nossa loucura é a mais sensata das emoções; tudo o que fazemos deixamos como exemplo para os que sonham um dia serem assim como nós: LOUCOS... mas FELIZES!!!”

Mário Quintana

RESUMO

RESUMO

Os mananciais de abastecimento público localizados em área urbana vêm sofrendo forte pressão do setor imobiliário que por vezes não poupa o entorno dos mananciais frente a expansão da mancha urbana. Os estudos desses ambientes considerando o sistema físico bacia hidrográfica são importantes para o conhecimento das alterações ocorridas ao longo do processo de urbanização. Neste contexto, este trabalho teve como objetivo principal proporcionar uma visão sistêmica do reservatório de São Pedro, Juiz de Fora/MG, com base na avaliação do seu comportamento térmico através da modelagem, além de avaliar seu estado trófico. Foi utilizado o modelo IPH-ECO para simular a temperatura superficial da água com base em elementos climatológicos e condições de contorno (vazões de entrada e saída do reservatório). A modelagem ocorreu de Julho de 2010 a Junho de 2011, onde os parâmetros temperatura da água e oxigênio dissolvido foram monitorados. Os ensaios de fósforo total foram realizados visando a caracterização do grau de eutrofização deste reservatório através do cálculo do índice de estado trófico (IET). Os resultados mostraram uma baixa fertilização do reservatório, com predominância do enquadramento oligotrófico segundo a classificação de Carlson modificada por Toledo. A simulação da temperatura da água se mostrou de forma eficiente com representatividade acima de 90 %. As temperaturas se comportaram de forma satisfatória no processo da modelagem, considerando as vazões dos tributários. As simulações de temperatura da água, em média pelos três pontos de saída selecionados no modelo, ficaram em torno de 21,95 °C e as temperaturas observadas, também em média pelos três pontos, ficaram em torno de 22, 21 °C. Portanto a representatividade do modelo se mostrou eficiente para o reservatório de São Pedro. A contribuição dos afluentes se mostrou muito importante para as simulações hidrodinâmicas, pois a variação das vazões limita ou regulariza as temperaturas deste reservatório.

Palavras-chave: Modelagem; Eutrofização; Temperatura da água; Hidrodinâmica.

ABSTRACT

The public water supply sources located in an urban area has come under heavy pressure from the real estate industry that sometimes does not spare the surroundings of springs forward the expansion of urban sprawl. Studies of these environments considering the physical system watershed are important to understanding the changes in the process of urbanization. In this context, this study aimed to provide a systemic view of the reservoir of São Pedro, Juiz de Fora / MG, based on evaluation of their thermal behavior through modeling, assessing its trophic state. We used the IPH-ECO model to simulate the surface temperature of the water on the basis of climatological and boundary conditions (flow rates in and out of the reservoir). The modeling was July 2010 to June 2011, where the parameters water temperature and dissolved oxygen were monitored. The total phosphorus tests were conducted to characterize the degree of eutrophication of the reservoir by calculating the trophic state index (IET). The results showed a low fertilization of the reservoir, with a predominance of oligotrophic environment according to the classification modified by Carlson Toledo. The simulation of the temperature of the water proved so efficient with over 90% representation. Temperatures behaved satisfactorily in the process of modeling, considering the flow of the tributaries. The simulations of water temperature on average by three points selected in the model output, were around 21.95 ° C and the observed temperatures, again on average by three points, were around 22, 21 ° C. Therefore, the representativeness of the model is efficient for the shell of São Pedro. The contribution of the tributaries was very important for the hydrodynamic simulations, as the variation of flow limits or regulates the temperature of the reservoir.

Word-keys: Modeling; Eutrophication; Water temperature; Hydrodynamic.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Evolução do processo de eutrofização em um lago ou represa.....	25
Figura 2: Representação dos processos físicos em bacia hidrográfica.....	29
Figura 3: Representação espacial do domínio de um ecossistema aquático com o aumento da complexidade morfológica.....	31
Figura 4: Localização da bacia em estudo.....	37
Figura 5: Expansão da mancha urbana na bacia do córrego São Pedro.....	38
Figura 6: Distribuição das classes de solo encontradas na BHRSP.....	40
Figura 7: Ocupação da BHRSP através de imagem do Google Earth.....	41
Figura 8: Cotas hipsométricas da BHRSP.....	43
Figura 9: Distribuição dos pontos amostrais.....	45
Figura 10: Sonda para medir OD e temperatura da água.....	48
Figura 11: Ecobatímetro (interface).....	48
Figura 12: Levantamento batimétrico.....	48
Figura 13: Discretização da malha (as células cinzas não contemplam o reservatório)....	49
Figura 14: Batimetria do reservatório de São Pedro.....	50
Figura 15: Contador de giros.....	51
Figura 16: Molinete hidrométrico.....	51
Figura 17a: Largura em intervalos de 40 cm.....	51
Figura 17b: Desenho esquemático da seção transversal.....	51
Figura 18: Local de medição da vazão no Córrego São Pedro.....	52
Figura 19: Pontos de saída selecionados no modelo IPH-ECO.....	53

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Eficiência amostral das classes definidas.....	42
Tabela 2: Definição do coeficiente superficial para cada tipo de cobertura do solo.....	42
Tabela 3: Localização dos pontos de amostragem.....	45
Tabela 4: Dados climatológicos de entrada do modelo.....	46
Tabela 5: Área das bacias e respectivos coeficiente de retardamento.....	50
Tabela 6: Vazões estimadas e observados nos tributários.....	52
Tabela 7: IET de Carlson (1977).....	55
Tabela 8: IET de Toledo et al. (1983).....	56
Tabela 9: Resultados das análises de fósforo total.....	57
Tabela 10: Valores máximo permitidos (VMP) para as Classes.....	58
Tabela 11: Valores de temperatura da água observados “in loco”.....	59
Tabela 12: Cálculo da Raiz do Erro Médio Quadrático.....	63
Tabela 13: Resultados do IET de Carlson.....	65
Tabela 14: Resultados do IET de Carlson modificado por Toledo et. al (1983).....	67
Tabela 15: Enquadramento - Fósforo Total (mg/L).....	69
Tabela 16: Enquadramento – Oxigênio Dissolvido (mg/L).....	70

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Ponto de saída que representa a área central do reservatório (Ponto 4).....	60
Gráfico 2: Ponto de saída que representa a margem esquerda do reservatório (Ponto 5)..	60
Gráfico 3: Ponto de saída que representa a margem direita do reservatório (Ponto 6).....	61
Gráfico 4: Variação da temperatura com e sem os afluentes (Ponto 5).....	62
Gráfico 5: Regressão Linear para o Ponto 4.....	64
Gráfico 6: Regressão Linear para o Ponto 5.....	64
Gráfico 7: Regressão Linear para o Ponto 6.....	65
Gráfico 8: Variação dos IETs determinantes das classes.....	67

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
1.1 Objetivos.....	16
2 REVISÃO DE LITERATURA	17
2.1 DISPOSIÇÕES LEGAIS.....	17
2.2 GERENCIAMENTO DE RESERVATÓRIOS.....	19
2.2.1. Ferramentas de apoio ao gerenciamento de um reservatório.....	22
2.3 EUTROFIZAÇÃO E BACIA HIDROGRÁFICA.....	23
2.4 MODELAGEM EM ECOSSISTEMAS AQUÁTICOS.....	26
2.5 O MODELO IPH-ECO.....	33
2.6 TEMPERATURA DA ÁGUA.....	34
2.7 FÓSFORO TOTAL.....	35
3 MATERIAIS E MÉTODOS	36
3.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....	36
3.2 COBERTURA DO SOLO DA BHRSP.....	40
3.3 ETAPAS PARA A MODELAGEM COM IPH-ECO.....	44
3.3.1. Seleção dos locais de amostragem.....	44
3.3.2. Dados climatológicos.....	46
3.3.3. Monitoramento de parâmetros de qualidade da água.....	47
3.3.4. Levantamento batimétrico.....	48
3.3.5. Estimativa das vazões.....	49
3.3.6. Medição de vazão de entrada e saída do reservatório.....	50
3.3.7 Locais de simulação do modelo.....	53
3.3.8 Cálculo da Raiz do Erro Quadrático Médio e da Regressão Linear.....	54
3.4 ÍNDICE DE ESTADO TRÓFICO.....	55
3.5 POPULAÇÃO E ENQUADRAMENTO.....	57
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	59
4.1 MODELAGEM DA TEMPERATURA DA ÁGUA.....	59
4.1.1 Simulações da temperatura da água.....	59
4.1.2 Representatividade considerando os afluentes.....	61

4.1.3 Comparação entre os valores observados e estimados.....	62
4.2 NÍVEL TRÓFICO DO RESERVATÓRIO DE SÃO PEDRO.....	65
4.3 APORTE DE FÓSFORO E CLASSES HÍDRICAS.....	69
5 CONCLUSÕES	71
6 REFLEXÕES FINAIS E RECOMENDAÇÕES	73
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	75

1 INTRODUÇÃO

A água é um recurso natural que tem gerado conflitos internos e externos em muitos países, seja por disponibilidade (condições de aproveitamento) ou problemas de gestão, principalmente por parte do Estado, ou no bojo das complexas relações de poder estabelecidas na sociedade no que diz respeito ao acesso e ao custo.

O avanço da mancha urbana somado ao aumento da demanda por água potável e a precariedade de ações efetivas (equipamentos urbanos e serviços de abastecimento de água, coleta e tratamento de esgoto), como também é o caso do brasileiro, tem colocado em evidência novos questionamentos sobre o uso deste recurso pelas cidades, pois numa escala global “desde as últimas décadas do século XX verifica-se uma tendência de superação da população rural pela população urbana” (RIBEIRO, 2008).

As discussões que abarcam a problemática ambiental têm ganhado força e espaço em todo o mundo, principalmente as abordagens concernentes à gestão e ao planejamento dos recursos hídricos, onde o pivô das ações deve se estabelecer na lógica do desenvolvimento sustentável. Essas abordagens são fundamentais às perspectivas sustentáveis, principalmente quando a unidade de bacia hidrográfica é considerada como sistema físico com características próprias e unidade compatível para ações interventivas a partir de estudos integrados.

Os estudos sobre a qualidade da água em reservatórios naturais ou artificiais são de suma importância para avaliar a condição trófica desse ambiente aquático e as consequências das diferentes formas de ocupação humana na bacia de contribuição do mesmo. A disponibilidade de água, tanto em quantidade como em qualidade, é um dos principais fatores limitantes ao desenvolvimento das cidades (ANDREOLI et al., 1999). Assim, o crescimento das cidades influencia diretamente a disponibilidade hídrica dos mananciais de abastecimento, pois quanto mais uma cidade demanda por água em quantidade e principalmente em qualidade, mais estará exigindo de seus mananciais.

A qualidade da água é uma abordagem que atualmente preocupa o mundo inteiro, pois a expansão das cidades, associado a degradação ambiental, acabam por precarizar as condições de vida na disputa por este recurso.

1.1 OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo proporcionar uma visão mais abrangente do reservatório de São Pedro, localizado no município de Juiz de Fora – MG, que consiste em um manancial urbano, através da modelagem do regime térmico com o modelo IPH-ECO. Este modelo será utilizado para melhor compreender a dinâmica dos processos físicos tomando o parâmetro temperatura para uma avaliação qualitativa deste reservatório. O trabalho também objetiva realizar a caracterização do índice de estado trófico, através do parâmetro fósforo total, observando a qualidade das águas desse sistema ambiental complexo.

Tomando essas temáticas à luz de experimentos em campo de temperatura da água e fósforo total, juntamente com a avaliação de uma série de 12 meses dos elementos climatológicos as questões que se colocam são: É possível representar a condição térmica do reservatório de São Pedro com um modelo hidrodinâmico 2DH? Além disso, o reservatório tem passado por alterações significativas na qualidade das águas resultando em eutrofização quando da avaliação do parâmetro fósforo total?

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 DISPOSIÇÕES LEGAIS

O século XX foi marcado pela preocupação com meio ambiente, que resultou, no Brasil, na elaboração e implementação de políticas públicas de caráter ambiental, principalmente a partir da década de 1970. Segundo Cunha & Coelho (2009) é possível identificar três tipos de políticas ambientais: as regulatórias, as estruturadas e as indutoras. As políticas regulatórias dizem respeito à elaboração de legislação específica para estabelecer ou regulamentar normas de acesso aos recursos naturais e criar aparatos que garantam o cumprimento da lei. Já as políticas estruturadas implicam intervenção direta do poder público ou de organismos não-governamentais na proteção ao meio ambiente. Por fim, as políticas indutoras implicam em ações que objetivam influenciar o comportamento de indivíduos ou grupos sociais. A esta última podem ser incluídas as certificações ambientais, pois são formuladas com objetivo de influir no comportamento dos consumidores.

A discussão e divulgação dos problemas ambientais ganharam força e maior abrangência no início do século XXI. A restrição de espaço e a necessidade de atender cada vez mais as demandas de energia, água e alimento têm colocado alguns paradigmas a serem vencidos, os quais se relacionam principalmente à qualidade ambiental e à distribuição, além da disponibilidade dos recursos naturais e os custos tanto econômicos quanto sociais.

Sobre problemas de gestão, Souza (2000) coloca que considerando uma sub-bacia hidrográfica como unidade de planejamento ambiental, pode-se resgatar, por exemplo, dentro dos princípios da ecologia da paisagem os meios para compreender as transformações que ocorrem no espaço, tomando como análise a complexidade da atividade humana. E a realidade, traz em sua essência, atributos bióticos e abióticos diversos interdependentes. Afirma ainda ser nesta unidade que a realização de estudos detalhados e progressivos, pode permitir a percepção da relação entre o clima, os solos, o organismo vivo e os aspectos sócio-econômicos, sem que haja perda do sentido de conjunto (sistema).

A Resolução CONAMA nº 430, de 11 de Maio de 2011, dispõe sobre a classificação dos corpos hídricos e diretrizes ambientais para o enquadramento dos mesmos, dentre outras providências. O teor dessa Resolução, já iniciado desde a década de 80, ratifica a preocupação com as questões ambientais exigindo estudos aprofundados sobre os recursos naturais e seu

uso pela sociedade. O enquadramento de um corpo hídrico, por exemplo, não é baseado no estado ou uso atual em que ela se encontra, mas sim nas condições que deveria estar para atender as necessidades dos seus usos preponderantes (BRASIL, 2011).

A partir desta Resolução as águas foram classificadas da seguinte maneira: águas doces, águas salobras e águas salinas. As águas doces foram agrupadas em 5 classes diferentes (Especial, 1, 2, 3 e 4), definindo que enquanto não forem aprovados os enquadramentos, as águas doces serão consideradas como Classe 2.

Os parâmetros e os padrões considerados para o enquadramento expressam as condições qualitativas do corpo hídrico. O “parâmetro de qualidade da água” pode ser definido como substâncias ou outros indicadores representativos da qualidade da água, enquanto o “padrão” é definido como valor limite adotado como requisito normativo de um parâmetro de qualidade de água ou efluente (BRASIL, 2011).

A poluição aquática e seus efeitos adversos alcançaram proporções alarmantes em todo o mundo. Grande parte dos ecossistemas aquáticos sofre algum tipo de impacto direto ou indireto por poluentes advindos dos centros urbanos e/ou das instalações industriais, o que intensivamente prejudica a capacidade de resiliência dos recursos naturais. A intensa utilização dos recursos hídricos, aliada à falta de planejamento e de gestão adequada dos usos e ocupação do solo, pode gerar graves problemas econômicos e ambientais, especialmente nas áreas urbanas (MACHADO, 2001).

Um parâmetro importante que pode refletir o estado da intervenção ambiental em uma bacia hidrográfica é o estado de conservação do recurso hídrico, pois a qualidade das águas de um manancial está sob ameaça da ação degradadora de certas substâncias poluentes presentes na área desta bacia. Estas podem originar-se de fontes pontuais ou localizadas, como os esgotos domésticos e os efluentes industriais ou, de fontes difusas, não localizadas, como águas de escoamento superficial, as águas de infiltração etc. O despejo de esgoto doméstico “in natura” tem trazido graves consequências aos corpos hídricos pelos prejuízos ecológicos e pelo comprometimento da disponibilidade de água com qualidade satisfatória, além de reduzir o tempo de vida útil dos ambientes aquáticos.

Neste contexto, a bacia hidrográfica que é composta por um conjunto de canais de escoamento inter-relacionados que formam a bacia de drenagem, definida como a área drenada por um determinado rio ou por um sistema fluvial (CHRISTOFOLLETI, 1980), apresenta-se como unidade de planejamento e gestão dos recursos hídricos exercendo função importante para o processo de ordenamento territorial.

Essa abordagem deve considerar a bacia hidrográfica como unidade físico-territorial à gestão e planejamento ambiental representando um mosaico paisagístico particular, que direciona não somente a preservação dos recursos hídricos, mas dos recursos naturais. A representação espacial dessas unidades funcionais de planejamento resguarda paisagens, onde ocorrem interações ambientais, colaborando para que sejam eleitas unidades de planejamento territorial/ambiental adequadas para extrapolar a simples gestão dos recursos hídricos (NASCIMENTO, 2010).

A Política Nacional de Recursos Hídricos, implementada pela Lei 9.433/97, representa o instrumento para o balizamento das ações que visem assegurar a sustentabilidade dos recursos hídricos. Uma das principais diretrizes previstas nesta Lei diz respeito à gestão sistemática dos recursos hídricos, sem dissociação dos aspectos de quantidade e qualidade. Dentro desta ótica, vale a pena destacar dois instrumentos para boa gestão dos recursos hídricos: o enquadramento dos corpos d'água em classes, segundo os usos preponderantes da água, e a outorga de direito de uso dos recursos hídricos (BRASIL, 1997).

Desta maneira, torna-se urgente a elaboração de políticas públicas, tanto regulatórias, estruturadas e principalmente as indutoras que visem a preservação e conservação dos recursos naturais, que suportem as perspectivas dentro da lógica do desenvolvimento sustentável. Schiel et al. (2003) afirmam que qualquer metodologia adotada, que tenha por finalidade a mudança de atitude e a tomada de consciência, pode promover estratégias que levem os envolvidos à sensibilização e à busca de soluções em seu cotidiano, em sua realidade mais próxima.

2.2 GERENCIAMENTO DE RESERVATÓRIOS

Os reservatórios são formados em pontos estrategicamente mais baixos no solo de uma bacia hidrográfica, que refere-se a um compartimento geográfico natural delimitado por divisores de água. Este compartimento é drenado superficialmente por um curso d'água principal e seus afluentes (FERNANDES & SILVA, 1994). Assim, os reservatórios apresentam-se como objeto espacial cabível aos estudos integrados ambientais.

Os reservatórios constituem ecossistemas adequados para avaliação dos impactos causados pelas atividades humanas que podem acarretar riscos ao equilíbrio e à manutenção da quantidade e a qualidade da água, uma vez que estas variáveis estão relacionadas com o uso do solo (FERNANDES & SILVA, 1994; BARUQUI & FERNANDES, 1985).

A localização de um reservatório, no contexto de uma bacia hidrográfica, permite um estudo pontual de problemas de poluição difusa, tornando mais fácil a identificação de focos de degradação de recursos naturais, da natureza dos processos de degradação ambiental instalados e o grau de comprometimento da produção sustentada existente.

Em compartimentos naturais, como as bacias e sub-bacias hidrográficas, os recursos hídricos constituem indicadores das condições dos ecossistemas no que se refere aos efeitos do desequilíbrio das interações dos respectivos componentes. Assim, pode-se determinar com razoável consistência prioridades nas intervenções técnicas para correção e mitigação de impactos ambientais negativos que ocorram nestes ambientes.

O estudo de reservatórios calhou muito bem às análises com fins para o planejamento integrado do uso e ocupação dos espaços rurais e urbanos, principalmente por ser compatível com os estudos de produtividade e sustentabilidade desses espaços tendo em vista o crescimento e o desenvolvimento sustentado na compatibilização das atividades econômicas com qualidade ambiental. De um modo geral, a abordagem de planejamento das atividades da sociedade e do uso dos recursos naturais tem falhado por dissociarem as questões sócio-econômicas dos aspectos ambientais. Existe uma carência do conhecimento das dinâmicas ambientais e sócio-econômicas e do conflito entre as questões de desenvolvimento sócio-econômico e a capacidade de suporte dos ecossistemas.

O volume de informações sobre a condição de um reservatório é capaz de auxiliar no direcionamento dos avanços urbanos e importantes tomadas de decisão quando da avaliação de riscos e impactos ambientais. Além disso, essas informações de forma organizada são necessárias para o diagnóstico, prognóstico e análise integrada dos processos ocorridos no entorno de um reservatório.

Atualmente, os conflitos gerados concernentes ao acesso e escassez, enfim da discussão do direito à água, como ressalta Ribeiro (2008), são agravados pelo uso da água doce na esfera privada de maneiras irresponsáveis com fins de acumulação de capital. Este cenário tem apresentado, de forma conspícua, a urgência de políticas públicas que norteie os usos deste recurso.

A abordagem geográfica e ecológica remete à relação sociedade-natureza, ou seja, na forma com que a sociedade se organiza para explorar os recursos naturais disponíveis. A partir de então surgem os problemas metodológicos ao se discutir ferramentas que suportem a integração sociedade-natureza dentro de sua complexidade. Daí a importância do conhecimento territorial somado ao conhecimento teórico-metodológico para elaboração de prognoses e hipóteses mais fortalecidas, no gerenciamento dos recursos naturais.

De acordo com Setti et al (2001), a definição de métodos adequados para a projeção das necessidades de água é um dos aspectos essenciais de uma política da gestão dos recursos hídricos. O crescimento demográfico somado à expansão da mancha urbana traz consigo o aumento da demanda por serviços públicos de saneamento, como o abastecimento de água, tratamento de efluente e gerenciamento de resíduos sólidos, por exemplo. Portanto, os órgãos gestores agregam responsabilidades que necessitam de respaldo técnico e ferramentas de gestão para conduzir ações norteadoras desses serviços.

Sobre isso Ribeiro (2008) afirma que:

“As manchas urbanas exigem muita água para a produção do espaço urbano e para suprir as demais necessidades de seus habitantes. É cada vez mais caro prover água a populações das grandes cidades e das metrópoles. Seus gestores enfrentam dificuldades em manter seus mananciais e em destinar adequadamente resíduos sólidos ou esgotos, os quais acabam contaminando corpos d’água e aquífero.”

Para conhecer as condições qualitativas de um ambiente aquático é necessária uma pesquisa detalhada e eficiente para obter o maior número de informações possíveis, que auxiliem nos apontamentos para os usos sustentáveis. Segundo Andreoli et al. (1999):

“As informações sobre a definição de mananciais, suas áreas de influência e conseqüências ao desenvolvimento devem ser amplamente demonstradas através de instrumentos específicos de informação para os diferentes níveis (escolas, políticos, agricultores, ONGs, associações profissionais, associações de empresários e trabalhadores, sindicatos etc.).”

Notadamente as informações sobre a condição de uma água devem ser consideradas dentro de um campo de coexistência de diversos fenômenos inter-relacionados (naturais e humanos). Além disso, os recursos hídricos são bens de relevante valor para a promoção do bem-estar de uma sociedade, já que a água é um bem de consumo final ou intermediário na quase totalidade das atividades humanas (TUCCI, 2001).

No contexto de análise da complexidade da atividade humana, o homem se apropria da natureza para satisfazer seus interesses e cria mecanismos de suporte para tal processo exploratório. A exemplo disso, é possível citar a própria construção de reservatórios que pode ser considerada uma das grandes experiências humanas na modificação da paisagem em regiões onde não se tinham corpos naturais de água (ODUM & BARRETT, 2007), para fins de consumo, irrigação, controle de inundação entre outros.

A água de um reservatório é o resultado da drenagem de sua bacia, sua qualidade e, portanto suas características físicas, químicas, biológicas e ecológicas, são dependentes diretamente das ações (uso e ocupação) que se realizam no solo dessa bacia, bem como do grau de controle que se tem (ou não se tem) sobre essas fontes.

2.2.1. Ferramentas de apoio ao gerenciamento de um reservatório

No concernente a ferramentas até então disponíveis, pode-se dizer que a modelagem matemática e computacional apresentam-se como soluções com grande potencial para fornecer subsídios a projetos, além de auxiliar na tomada de decisão no gerenciamento de sistemas ambientais complexos, como os reservatórios. Os modelos são ferramentas que ajudam na obtenção de uma visão dinâmica dos processos naturais, pois permitem a integração de dados dispersos espacialmente, com a possibilidade de prever situações ao simular cenários futuros (ROSMAN, 2001).

Desta maneira, um modelo calibrado pode indicar o porquê de algumas alternativas de manejo serem melhores do que outras, constituindo uma importante ferramenta em estudos de impacto ambiental, além de poder somar suas informações a um acervo de outras informações a serem consideradas no processo de tomada de decisão (ROSMAN, 2001). Esses dados disponíveis de forma organizada permitem uma análise significativa das reais condições do ambiente em estudo, pois os levantamentos sobre a situação ambiental de uma determinada área revelam “um parecer sobre a saúde do ecossistema”(GUERRA et al., 1999).

Assim como a utilização de modelos pode trazer resultados relevantes à ações de intervenção, o sensoriamento remoto também se apresenta como uma ferramenta em potencial para compreensão de processos naturais e induzidos pelo homem. Os sensores coletam dados com intuito de gerar informação sobre uma área, um objeto ou um fenômeno.

Segundo Ribeiro (2002), o sensoriamento é o “descendente” natural da fotografia convencional com a evolução das técnicas que permitem detectar a registrar outras formas de radiação eletromagnética além da luz visível. Assim como os modelos, o sensoriamento remoto teve seu crescimento lado a lado com a ciência da computação, principalmente a partir dos anos 50 e 60. Com a evolução das tecnologias, o sensoriamento remoto não se remetia apenas a diferentes tipos de imagens e sensores, mas também, devido ao emprego de técnicas de processamento de imagens digitais, propiciou a geração de produtos mais variados do que oferecia até então pelas técnicas e sensores fotográficos tradicionais.

A utilização da técnica de sensoriamento remoto requer uma definição clara do problema a resolver, não deixando de analisar as possibilidades de solução desse problema a partir desse instrumento.

O sensoriamento remoto é uma ferramenta estratégica que pode ser utilizada para o planejamento e gestão de bacias hidrográficas, pois a aquisição de informações sobre objetos ou áreas ou fenômenos da superfície terrestre utilizando sensores vem a calhar com os dados que necessitam ser processados para instrumentalizar as ações impetradas na bacia hidrográfica. Sejam esses dados: tipos e ocorrência de solos e de vegetação, distribuição dos corpos hídricos e ocupação humana na forma de mancha urbana.

2.3 EUTROFIZAÇÃO E BACIA HIDROGRÁFICA

A eutrofização é um fenômeno de alteração do estado natural de um corpo hídrico, as vezes perceptível a olho nu, porém difícil de controlar seus avanços por diversos fatores explicativos a começar pela detecção das principais fontes poluidoras.

O aumento da concentração de nutrientes, especialmente fósforo e nitrogênio, em ecossistemas aquáticos, provoca este fenômeno denominado eutrofização. Esse “enriquecimento” tem como conseqüência o aumento das produtividades nesses ecossistemas.

O processo de eutrofização pode ocorrer de forma natural ou artificial. Quando ocorre de forma natural é um processo lento e contínuo que resulta do aporte de nutrientes trazidos pelas chuvas e pelas águas do escoamento superficial. Quando esse processo é induzido pelo homem, ou seja, de forma artificial, o aporte de nutrientes pode ter diferentes origens, tais como: efluentes domésticos, efluentes industriais, atividades agrícolas, entre outras (ESTEVES, 1998).

Sobre isso Von Sperling (2006) afirma que, mesmo em condições naturais e de ausência de interferência humana, ou seja, áreas ocupadas por matas e florestas, o lago tende a reter sólidos que se sedimentam, formando uma camada de lodo no fundo. A partir dos fenômenos de decomposição do material sedimentado, há um aumento, ainda incipiente, da quantidade de nutrientes na massa líquida. Em decorrência disso pode haver uma progressiva elevação na população de plantas aquáticas na massa líquida e, conseqüentemente, de outros organismos situados em níveis superiores na cadeia trófica.

A eutrofização natural pode ser considerada como “envelhecimento natural” do lago que ocorre de forma gradual e muito lenta, já a artificial pode ser chamada de “envelhecimento precoce” de ecossistemas aquáticos (ESTEVES, 1998). Quando este

processo é acelerado, há um aumento desordenado na produção de biomassa, impossibilitando a sua absorção pelo sistema aquático com a mesma velocidade e provocando, assim, um desequilíbrio ecológico.

Também utiliza-se o termo eutrofização cultural para indicar a poluição orgânica resultantes das ações humanas (ODUM & BARRETT, 2007). Portanto, esse processo está intimamente ligado ao aumento da população, da industrialização, do uso de fertilizantes químicos na agricultura, enfim, com toda forma de uso e ocupação do solo na bacia de contribuição. E, principalmente, pela taxa de fluxo de entrada e de saída da água, de materiais e organismos de outras partes da bacia de drenagem, que determina o funcionamento e a relativa estabilidade desses ecossistemas aquáticos ao longo dos anos, asseveram os autores.

Quando há uma elevação no aporte de nutrientes, principalmente nitrogênio e fósforo, conseqüentemente pode ocorrer uma elevação nas populações de algas e outras plantas. Dependendo da capacidade de assimilação do corpo d'água, essa população de algas pode atingir valores elevados podendo chegar a superpopulações, constituindo uma camada superficial (VON SPERLING, 2006). Esses eventos de superpopulação de algas são denominados “floração das águas”.

Considerando o processo da eutrofização percebe-se a importância do papel da bacia hidrográfica como uma unidade fisiográfica, limitada por divisores topográficos, que recolhe a precipitação, age como um reservatório de água e sedimentos, defluindo-os em uma seção fluvial única, denominada exutório (VON SPERLING, 2007). As análises de qualidade de uma amostra de água podem revelar o estado de conservação desse ambiente aquático, pois “os resultados de todas as atividades exercidas na bacia hidrográfica podem ser medidos efetivamente nos ecossistemas aquáticos e particularmente nos reservatórios como resposta dos parâmetros físicos, químicos e biológicos” (TUNDISI, 1988). A Figura 1 ilustra o processo evolutivo de eutrofização de um lago ou represa, em função da alteração do uso e ocupação do solo da bacia de contribuição.

EVOLUÇÃO DO PROCESSO DE EUTROFIZAÇÃO DE UM LAGO OU REPRESA

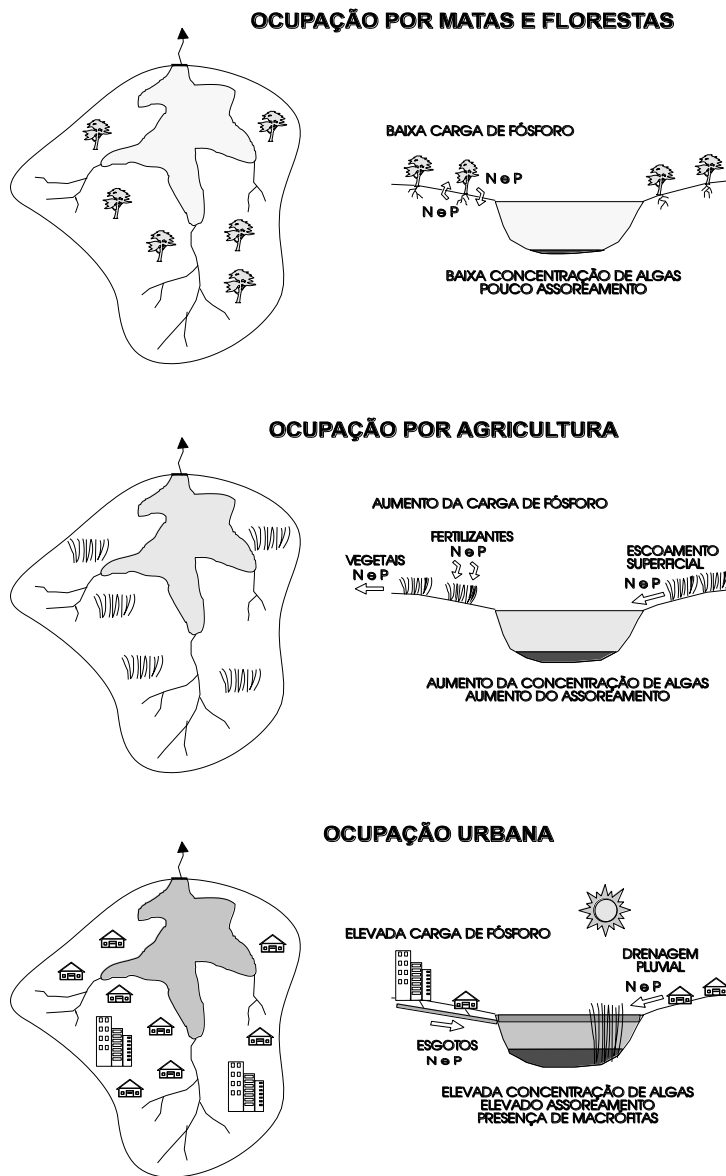


Figura 1: Evolução do processo de eutrofização em um lago ou represa. Associação entre o uso e ocupação do solo e a eutrofização (VON SPERLING, 2006).

O processo acelerado da eutrofização pode ser considerado um desequilíbrio no ambiente aquático, pois acarreta inúmeros efeitos negativos nos corpos d'água como destaca Azevedo-Neto (1988): a) o desenvolvimento intenso e descontrolado de macrófitas aquáticas e fitoplâncton; b) degradação da qualidade da água com alterações de composição, cor, turbidez, transparência, etc., aumento da decomposição orgânica, causando, conseqüentemente, maior consumo de oxigênio dissolvido até anoxia, c) liberação de gases e produção de maus odores, d) produção de substâncias tóxicas, e) prejuízos consideráveis para o uso da água em abastecimento, irrigação, aproveitamentos hidrelétricos, recreação, turismo

e paisagismo, etc. Esses efeitos afetam a qualidade da água provocando o empobrecimento de um determinado ecossistema aquático por torná-lo pouco produtivo.

É importante ressaltar que o balanço entre os aspectos positivos e negativos do excesso de nutrientes em um lago dependerá, na maioria das vezes, da capacidade do corpo d'água em assimilar esses nutrientes.

2.4 MODELAGEM EM ECOSSISTEMAS AQUÁTICOS

Segundo Fragoso (2009), os primeiros modelos aplicados a corpos d'água surgiram devido aos problemas de alocação da carga de esgoto gerada nos centros urbanos. Frente a esta problemática foi desenvolvido, por Streeter e Phelps em 1925, um modelo aplicado no Rio Ohio/EUA. O avanço computacional, a partir da década de 60, permitiu a ampliação do emprego dos modelos hidrodinâmicos e de qualidade da água. Estes modelos foram aplicados em sistemas bidimensionais, tais como, estuários e baías. Já na década de 70, com o aumento da problemática da eutrofização, foram desenvolvidos os primeiros modelos biológicos.

Este autor esclarece que com a rápida evolução dos computadores tornou-se viável o armazenamento e manipulação de grande quantidade de dados possibilitando melhor entendimento da dinâmica dos processos ambientais com a utilização de modelos matemáticos.

A crescente necessidade de ferramentas e técnicas que ajudem no planejamento e administração dos problemas relacionados aos recursos hídricos reforça a idéia de que os modelos podem ser de grande valia nestas questões. Os modelos matemáticos, numéricos e computacionais para descrição de comportamentos ambientais estão emergindo como uma das alternativas mais promissoras.

Sendo assim é possível realizar cálculos precisos, com grande velocidade e com estrutura para absorver grande quantidade de informações e dados, podendo desta maneira, contemplar os principais aspectos qualitativos e quantitativos em ambientes aquáticos.

A modelagem consiste em estabelecer hipóteses sobre a estrutura ou o comportamento de um sistema e, através dela, procura-se explicar as propriedades desse sistema e prever suas reações a estímulos.

Etapa importante para o processo da modelagem é conhecer o objeto de estudo para, sabiamente, conduzir os dados de entrada (*inputs*) e melhor interpretar os dados de saída (*outputs*), garantindo a eficiência e seriedade do processo.

A modelagem ambiental objetiva representar a realidade tal como é observada ou medida, e por isto dificilmente pode representar toda a complexidade das múltiplas interações nos sistemas ambientais, várias delas não mensuráveis ou quantificáveis (VON SPERLING, 2007).

O processo da modelagem consiste em estabelecer hipóteses sobre a estrutura ou o comportamento de um sistema físico e, através dela procura-se explicar as propriedades desse sistema e prever suas reações a estímulos. A partir da modelação de reservatórios é possível representar o seu grau de trofia, além de antever os impactos decorrentes de uma descarga de resíduos, por exemplo.

Para se ter idéia da realidade de um lago ou reservatório um modelo normalmente se expressa em termos de gráficos, estatísticos ou matemáticos. Um modelo utilizado para compreender a eutrofização evidencia as cargas de nutrientes dos mananciais e os processos existentes dentro do lago ou do reservatório (IETC, 2001).

Modelos são apenas ferramentas de propiciam a obtenção de informações organizadas de forma adequada e, para tanto o modelador deve conhecer a essência do fenômeno de interesse, que são os movimentos ou transportes de substâncias e propriedades nos corpos d'água que se quer estudar com objetivo de otimizar um projeto ou gerir, assim descreve Rosman (2001).

Neste sentido, Rosman (2001) descreve que as observações iniciais de um dado fenômeno são qualitativas, tendo por intuito propiciar um entendimento das causas, efeitos e agentes intervenientes. Num segundo momento, parte-se para observações quantitativas, fazendo-se medições das grandezas das causas, efeitos e agentes intervenientes inferidos na etapa de observação qualitativa.

Compreender as interações e relevância dos agentes intervenientes de um fenômeno observado é de extrema importância para justificar um trabalho no qual a modelagem trará respostas que suportará determinadas ações. O uso de modelos necessita de um objetivo específico que pode se configurar em um objeto de estudo para um ambiente aquático, como a eutrofização, a capacidade de resiliência, o controle de poluentes, a produção primária, interações entre comunidades e etc. Estudos através da modelagem podem garantir apontamentos promissores desde que seja assumida a seriedade dos dados que resguardam as reais condições de um ambiente.

Neste sentido, Von Sperling (2007), ressalta que deve-se ter de forma clara os objetivos do exercício da modelagem matemática. Tais objetivos definem a estrutura do modelo a ser utilizado e os esforços a serem alocados a trabalhos de campo e laboratório. A

etapa inicial no procedimento da modelagem é a concepção do sistema, tais como representação física do corpo d'água e seleção do sistema e variáveis e serem medidas e modeladas.

Este autor apresenta como possíveis utilizações dos modelos matemáticos de qualidade das águas os seguintes itens:

- Pesquisa: aumento da compreensão de um sistema; substituição de estudos de laboratório ou em escala piloto.

- Gerenciamento/planejamento: planejamento a longo prazo.

- Previsão de condições futuras: estudos de adequação a padrões de qualidade para o corpo d'água; alocação de cargas poluidoras.

- Planejamento de níveis e eficiências no tratamento de esgotos.

- Permissão de descargas (outorga para lançamentos).

- Controle em tempo real: avaliação de eventos transientes (poluição acidental, eventos de chuva); avaliação de comportamentos sazonais, controle integrado de estações de tratamento de esgotos e do corpo d'água receptor.

Os dados ambientais são em geral escassos, porém imprescindíveis para estudos, projetos, diagnósticos, gestão e gerenciamento de corpos d'água. Essa escassez decorre do alto custo envolvido no levantamento dos mesmos. Esses são obtidos de variáveis ambientais, séries temporais de valores medidos em poucos pontos distribuídos na área de interesse.

Monitorar os parâmetros ambientais é importante para compreender melhor os processos do objeto de estudo, no caso o reservatório de São Pedro, considerando os principais elementos que compõem a paisagem sofrendo interferência intrínseca à lógica de causa-efeito em uma bacia (sistema). Os processos físicos mais relevantes desse sistema são mostrados na Figura 2.

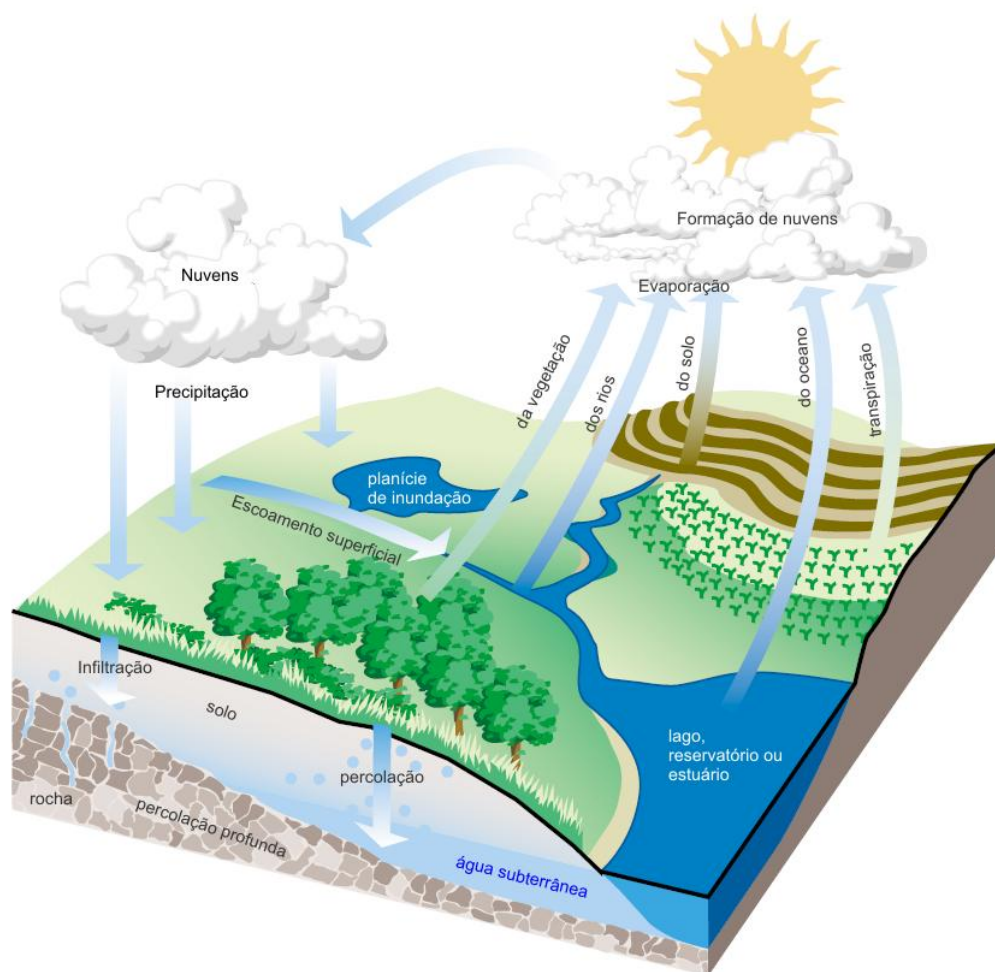


Figura 2: Representação dos processos físicos em bacia hidrográfica (FRAGOSO et. al, 2009)

Para Fragoso et al. (2009) uma gestão ambiental requer a reformulação da evolução da política ambiental, cujos princípios e objetivos dessa política são:

1. Identificar e avaliar os problemas ambientais.
2. Formular cenários de evolução.
3. Definir prioridades e metas.
4. Medidas e instrumentos de política.
5. Implementação e controle.

Para atender a esses itens supracitados faz-se necessário considerar a aplicação de metodologias que forneçam subsídios para ações estratégicas, além de servir para consolidar um banco de dados prestando a diversos usos, como, por exemplo, as séries temporais que os modelos necessitam para simulações suficientes e eficientes estariam disponíveis nesse banco de dados.

Atualmente, diversos modelos de qualidade da água têm sido utilizados para simular fenômenos ocorridos em ecossistemas aquáticos com finalidade de melhor conhecer a dinâmica dos processos e influência dos agentes forçantes para, a partir dessa compreensão, prever cenários futuros em ambientes aquáticos. Esses modelos consideram parâmetros físicos, químicos e biológicos para estimar e prever a qualidade da água. São desenvolvidos através da implementação computacional de várias formulações de processos que provocam o desequilíbrio dos corpos d'água. Também é importante destacar que todo modelo baseia-se em princípios matemáticos, equações e coeficientes para padronizar taxas, principalmente aquelas que podem ser consideradas constantes.

A modelagem matemática é caracterizada por um conjunto de equações representativas de um determinado fenômeno ou processo e é desenvolvida através da aplicação de princípios de conservação de massa, energia e quantidade de movimento. Estes princípios são utilizados, de forma organizada, para modelagem hidrodinâmica e de qualidade da água.

Dentre os modelos de qualidade da água, podem ser citados:

- a) o SisBaHiA (Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental), desenvolvido no Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia - COPPE da Universidade Federal do Rio de Janeiro (ROSMAN, 2001), é um sistema profissional de modelos computacionais com resultados 2DH ou 3D e pode ser utilizado para simulação em lagos, reservatórios e estuários;
- b) o ELCOM (Estuary and Lake Computer Model) acoplado ao CAEDYM (Computacional Aquatic Ecosystem Dynamics Model) ambos desenvolvidos pelo CWR (Center of Water Research) da Universidade da Austrália (HODGES, B.; DALIMORRE, 2010), que pode ser utilizado em ambientes límnicos, estuários e áreas costeiras com enfoque nos parâmetros temperatura e salinidade, com resultados em 3D;
- c) o QUAL2K (uma versão mais completa do QUAL2-E), desenvolvido na Universidade de Tufts (CHAPRA, 2006), em Massachusetts- EUA, é utilizado em rios e riachos com resultados em uma dimensão (1D);
- d) o programa em Excel QUAL-UFMG, desenvolvido na Universidade Federal de Minas Gerais (VON SPERLING, 2007), baseado no modelo QUAL2-E, é utilizado em rios com resultados em uma dimensão (1D);
- e) o IPH-ECO, desenvolvido no Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (FRAGOSO, 2009), é utilizado em lagos,

reservatórios e estuários com resultados em 2DH e 3D. Este último modelo será melhor discutido adiante.

A escolha do melhor modelo a ser aplicado em um determinado ambiente pode ser considerada parte do trabalho de modelagem, já que existem diversos modelos com variadas adequações e possibilidades de representações. Neste caso, o modelador ou usuário de um modelo deve conhecer seu ambiente de estudo para alcançar seu objetivo através da modelagem.

Além da relevância das condições ambientais intervenientes para aplicação de um modelo, sejam elas o solo, a geologia, a vegetação, o clima e o uso do solo, os modelos podem ser separados em tipos de acordo com a morfologia do ambiente (Figura 3):

- Unidimensional (1D): o sistema caracteriza-se por variações em uma direção das variáveis de estado. Ex: rios e reservatórios profundos estratificados.
- Bi ou Tridimensional (2D ou 3D): o sistema apresenta grande heterogeneidade espacial tanto na vertical como na horizontal. Ex: lagos e reservatórios.

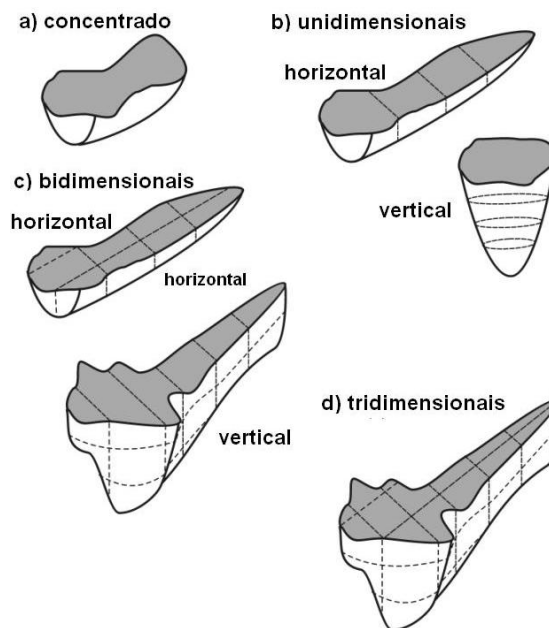


Figura 3: Representação espacial do domínio de um ecossistema aquático com o aumento da complexidade morfológica (FRAGOSO et al., 2009).

Muitos e variados modelos de ecossistemas aquáticos foram desenvolvidos e publicados durante as últimas quatro décadas, justificando forte interesse em se obter os processos essenciais de um ecossistema aquático em um modelo. No entanto, apesar de algumas tentativas terem sido feitas, as publicações que tratam das abordagens simultâneas no

ecossistema lacustre de modelagem ainda são escassas. A qualidade ecológica desses ambientes está ameaçada por um grande número de fatores de estresse antrópico, em particular a eutrofização e outros tipos de poluição, exploração excessiva, espécies invasoras, mudanças no uso do solo e na hidrologia da bacia, além das alterações climáticas (MOOIJ et al., 2010).

Ainda segundo esses autores, há também uma desvantagem para o grande número e variedade de modelos publicados. Esses seriam os dois desafios para novos progressos neste domínio. No que diz respeito à quantidade, pode acontecer de um novo modelo ser semelhante em sua abordagem a um modelo já existente. Assim, seria mais rentável aplicar ou adotar um modelo existente em vez de inventar um. Com relação à variedade há o risco da abordagem adotada em qualquer modelo específico ser muito estreita e ignorar as abordagens e formatos de modelagem que poderiam ajudar ou até mesmo ser essencial para ganhar conhecimento fazendo previsões.

Para que a utilização de um modelo seja suficiente e eficiente este mesmo deve ser capaz de (FRAGOSO, 2009): (a) representar a hidrodinâmica do sistema a partir da determinação dos fluxos quantitativos do meio; (b) estimar a dinâmica de nutrientes através da modelagem dos mecanismos de transporte das substâncias, principalmente fósforo e nitrogênio; (c) avaliar a produção primária disponível no meio, retratando os mecanismos biológicos relacionados ao fitoplâncton; e (d) avaliar as condições climáticas, como a radiação solar, que influenciam no crescimento de plantas aquáticas. Cabe aqui ressaltar que é possível utilizar um modelo sem atender a todos os seus dados de entrada, depende do interesse e objetivo a ser alcançado através da modelagem.

A escolha de um modelo mais apropriado para representar um determinado fenômeno em um dado corpo d'água é uma questão de custo e benefício (ROSMAN, 2001). Um modelo mais geral se aplica a qualquer caso, porém os custos envolvidos podem ser muito grandes. Deve-se considerar que para um determinado sistema, alguns processos são menos importantes que outros, podendo assim ser simplificado.

2.5 O MODELO IPH-ECO

O modelo ecológico IPH-ECO (FRAGOSO, 2009) é um sistema computacional desenvolvido no Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), voltado especialmente para o atendimento dos processos físicos, químicos e biológicos de corpos d'água rasos e profundos, tais como lagos, reservatórios e

estuários. Descreve as mais importantes interações hidrodinâmicas e abióticas, além dos principais processos bióticos, com a finalidade de auxiliar no entendimento comportamental de um determinado ecossistema aquático (FRAGOSO et al., 2009).

Este modelo possui um módulo hidrodinâmico acoplado com módulos de qualidade da água e biológico, com a finalidade de auxiliar o entendimento comportamental de um determinado ecossistema aquático. Matematicamente, o modelo é composto por um grande número de equações diferenciais acopladas à variáveis de estado (FRAGOSO, 2009). Fatores ambientais, tais como, luz, temperatura, radiação solar, vento, precipitação e evaporação podem ser levados em consideração no modelo, além dos fatores bióticos e abióticos.

O IPH-ECO foi aplicado na lagoa Mangueira, um lago raso subtropical no sul do Brasil, onde as simulações apresentaram aspectos sobre a estrutura e funcionalidade deste ecossistema frente à perturbações, como por exemplo dependendo da concentração de ortofosfato e da turbidez este ambiente pode oscilar entre dois estados alternativos estáveis (alta e baixa transparência da água) (FRAGOSO, 2009). Nesta aplicação também foi sugerido que podem ocorrer profundas alterações na composição do fitoplâncton com aumento sistemático da concentração de ortofosfato.

Nada obstante, ainda foi útil para descrever a dinâmica do ecossistema do lago Engelsholm, na Dinamarca, antes e depois da biomanipulação deste ambiente, onde o modelo conseguiu razoavelmente prever a mudança para um estado de alta transparência após a biomanipulação, porém a mudança na composição do fitoplâncton foi difícil de representar (FRAGOSO, 2009).

Para este trabalho foi utilizado o módulo de qualidade da água somado ao módulo hidrodinâmico (bidimensional) do IPH-ECO para simulação da variável ambiental temperatura das águas do reservatório de São Pedro.

2.6 TEMPERATURA DA ÁGUA

As variações de temperatura em um ecossistema aquático fazem parte do regime climático normal e os corpos hídricos naturais apresentam variações sazonais e diurnas, além da estratificação vertical. A temperatura superficial é influenciada por fatores climáticos, tais como: latitude, altitude, estação do ano, além da taxa de fluxo, período do dia e profundidade. Porém, esta temperatura pode ser elevada por despejos industriais e usinas termoelétricas, por exemplo.

Fato é que a temperatura desempenha um papel de controle no meio aquático, condicionando as influências de uma série de parâmetros físicos e químicos (viscosidade, tensão superficial, condutividade térmica, solubilidade e etc.). Os organismos aquáticos possuem limites de tolerância térmica superior e inferior, temperaturas ótimas para o crescimento, temperatura preferida em gradientes térmicos e limitações de temperatura para migração – desova e incubação do ovo (CETESB, 2011).

Seguindo o ponto de vista da engenharia de meio ambiente, conhecer a variação da temperatura em um corpo d'água é particularmente importante por três motivos: as descargas de efluentes em diferentes temperaturas pode causar efeitos negativos no ecossistema aquático, a temperatura influencia as reações químicas e biológicas e a variação da temperatura afeta a densidade da água, e como consequência, altera os processos de transporte (COPPE/UFRJ, 2011).

A modelagem da temperatura da água depende das séries temporais dos elementos climáticos, principalmente as forçantes de temperatura do ar e radiação solar. O monitoramento da temperatura da água aferido na superfície de um corpo hídrico raso é muito representativo, pois, as dimensões horizontais predominam sobre a dimensão vertical e a estratificação em sistemas rasos praticamente não existe.

Lima (2010) simulou a temperatura de um lago tropical raso (Lago Manacás da Universidade Federal de Juiz de Fora) utilizando o modelo ELCOM-CAEDYM com resultados satisfatórios na superfície do lago. As simulações chegaram a apresentar erro de 20%, o que constituiu uma boa representação. Os maiores erros foram observados no final do período modelado. Neste trabalho também foi realizada a simulação da temperatura na região intermediária e no fundo do lago, porém não foram obtidos resultados significativos com o modelo ELCOM-CAEDYM.

2.7 FÓSFORO TOTAL

O fósforo é liberado das rochas fosfatadas pela ação erosiva da chuva e do vento. Os fosfatos são dissolvidos na água, ficando no solo ou sendo carreados para rios, oceanos e águas subterrâneas (MOTA, 1997). O mesmo autor afirma que, embora este elemento seja essencial para a flora aquática, geralmente é encontrado em pequenas quantidades em rios e lagos, onde seu teor pode se aumentar devido à poluição por fontes difusas ou localizadas provocando desequilíbrios ecológicos.

Segundo Von Sperling (2007), as principais fontes de fósforo em um corpo d'água são: drenagem pluvial (áreas com matas e florestas, agrícolas e urbanas) e esgotos. Dentre estas a mais importante é a drenagem pluvial, principalmente ao se considerar as áreas agrícolas que apresenta valores elevados e também uma ampla variabilidade, dependendo da capacidade de retenção do solo, irrigação, fertilizantes, defensivos agrícolas e condições climáticas. Já a drenagem urbana, apesar de apresentar valores mais elevados de fósforo, possui uma variabilidade menos ampla. E nas áreas de mata e florestas a drenagem pluvial transporta menor quantidade de fósforo, pois este nutriente não está superabundando no sistema, já que, teoricamente, o ecossistema se encontra próximo ao equilíbrio, ou seja, sem grandes excessos, nem grandes faltas dos principais elementos.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A Represa de São Pedro, também conhecida como Represa dos Ingleses ou Cruzeiro de Santo Antônio, localizada na Mesorregião da Zona da Mata Mineira/Microrregião de Juiz de Fora, nas coordenadas $21^{\circ} 46' 34,8''S/43^{\circ} 24' 27,2''W$ e altitude média de 850m, no perímetro urbano do município de Juiz de Fora-MG, Região Oeste da cidade. Atualmente, consiste em um manancial urbano inserido em uma área apontada como vetor de crescimento pelo Plano Diretor (PREFEITURA DE JUIZ DE FORA, 1999) do município.

Criada em 1963, a represa teve início da sua operação somente em 1967. A produção de água da Estação de Tratamento de Água (ETA São Pedro), localizada no bairro São Pedro, é de 120L/s, variando de acordo com o nível da represa, e hoje constitui um importante manancial de abastecimento público, operado e mantido pela Companhia de Saneamento Municipal – CESAMA. Este manancial fica a 8Km da densa malha urbana e corresponde a 8% do abastecimento à população dessa cidade (CESAMA, 2011).

Sob o clima Cwb (tropical de altitude) – clima mesotérmico com secas de inverno e chuvas concentradas de verão e verões brandos ou moderadamente quentes, na classificação de Koppen (MACHADO, 2010), a bacia hidrográfica da reservatório de São Pedro (BHRSP) ocupa uma área de 13,04 Km² e seus principais afluentes são o Córrego São Pedro (margem esquerda) e o Córrego Grota do Pinto (margem direita). A bacia do córrego São Pedro tem seu exutório no rio Paraibuna que deságua na margem direita do rio Paraíba do Sul no município de Três Rios – RJ. A localização da bacia hidrográfica do reservatório de São Pedro na área urbana de Juiz de Fora é mostrada na Figura 4.

Com relação ao uso e ocupação do solo foi realizada uma classificação supervisionada na área de contribuição da bacia (BHRSP) a partir de imagem gratuita do INPE/2010, satélite Landsat 5. Foi aplicada a metodologia da classificação supervisionada pelo método da máxima verossimilhança – Maxver, através do software ArcGIS 9.3, da ESRI®.

Este método consiste em selecionar um grupo de pixels (amostra) em uma imagem que correspondam a uma dada classe de uso do solo já definida e, quando todas as classes estiverem identificadas é possível transpor para toda a área trabalhada o enquadramento em classes. Basicamente, o software identifica a classe de cada pixel, com base nos parâmetros média e desvio padrão dos grupos de pixels de cada área de treinamento (amostras) para toda extensão da imagem. Essa classificação é denominada supervisionada por que as amostras de

treinamento de cada classe são definidas por identificação visual, pois quando da transposição de classes os resultados podem não ser eficientes na imagem.

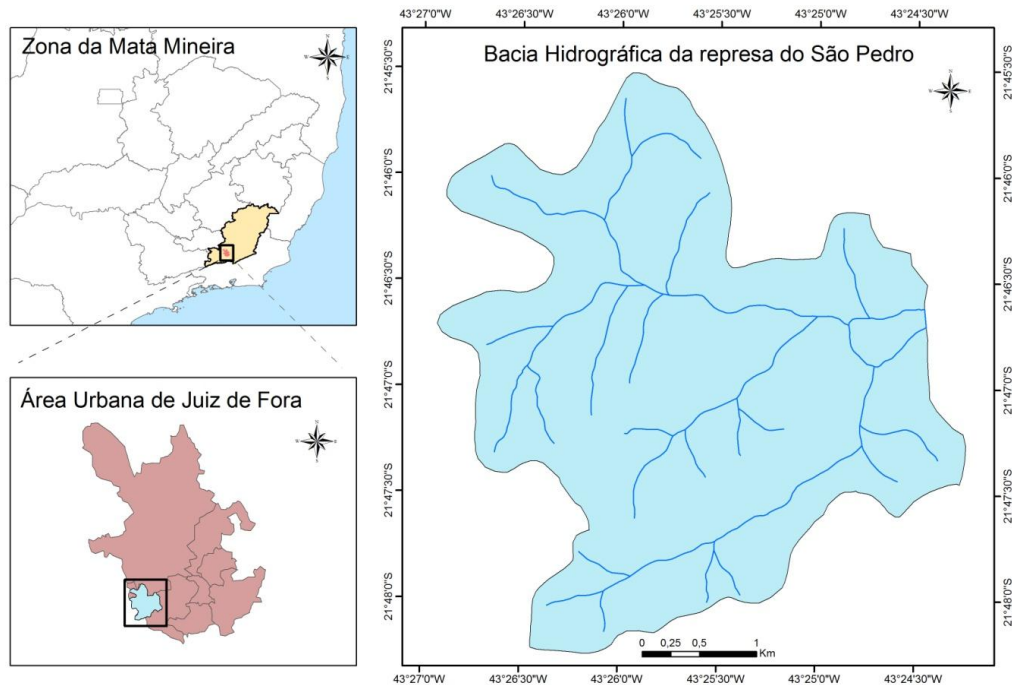


Figura 4 : Localização da bacia em estudo

Este reservatório ocupa uma área que apresentam um rico processo de ocupação e consolidação territorial. Sua área de entorno pode ser caracterizada como de baixa densidade de ocupação humana, com usos ainda rurais. Porém, presença da rodovia BR-040 (duplicada) e a implantação da “Via São Pedro” (BR-440 em curso) tem incentivado a valorização da área. Esta represa é protegida contra a entrada de pessoas e animais, apesar de não existir uma legislação municipal de proteção da bacia e do manancial, o que a torna mais vulnerável à exploração imobiliária.

A BHRSP pode ser considerada uma sub-bacia da bacia do córrego São Pedro, representando o alto curso deste córrego. Até 1965, segundo Latuf (2004) não existia mancha urbana nesta bacia e somente no ano de 2000, com a expansão dessa mancha de jusante para montante, é que pode-se perceber uma correspondência de 1,29% de ocupação nesta bacia. A mancha urbana ocupou, em 2000, 41,85% da bacia do córrego São Pedro.

A implantação da Avenida Independência, que passou a fazer rapidamente a ligação com o centro da cidade; a instalação do Campus da UFJF, no bairro São Pedro; a elaboração, pela Prefeitura de Juiz de Fora, no final da década de 1970, do “Projeto Cidade Alta”, um

plano que visava à ocupação efetiva de toda a região; a localização do aeroporto e do estádio municipal nas imediações e, destacadamente, a implantação da rodovia BR 040, no início da década de 1980, tornou toda a região uma área caracterizada pelo franco processo de expansão urbana (MACHADO et al., 2008). O processo de ocupação da bacia do Córrego São Pedro vem ocorrendo no sentido de jusante para montante, como mostra a Figura 5, onde a mancha urbana se expande para cotas altimétricas mais elevadas.

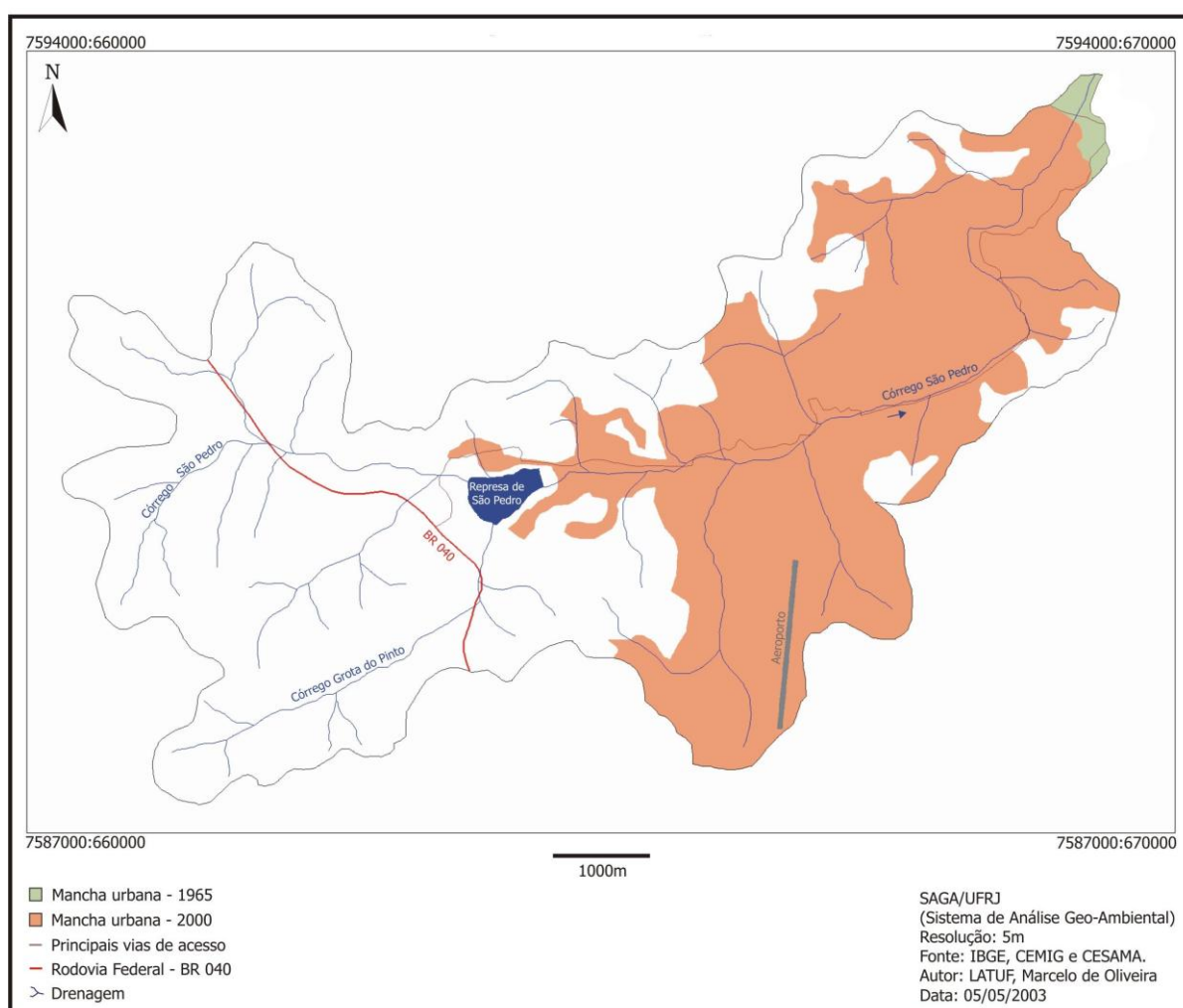


Figura 5: Expansão da mancha urbana na bacia do córrego São Pedro (LATUF, 2004).

O histórico de ocupação da bacia do córrego São Pedro pode ser dividido em duas fases principais e cujo limite pode ser definido pelas décadas de 1960/70, pois é a partir desse momento que o crescimento demográfico e uma série de intervenções na estrutura urbana da cidade passa a “incentivar” a ocupação local (MACHADO et al., 2008). Os autores afirmam ainda que até esse momento (década de 1960), a maioria das atividades desenvolvidas na

bacia tinha características predominantemente rurais, com destaque para as atividades agropecuárias.

A ocupação efetiva só foi intensificada após a implantação de inúmeras medidas de caráter urbano (equipamentos urbanos citados anteriormente), que venceram o isolamento topográfico local e induziram a ocupação. Nesta região a especulação imobiliária age comprando as terras ao preço de alqueires ou hectares, para futuramente vendê-las como quinhões de loteamentos fechados, ao preço de metro quadrado (MACHADO et al., 2008).

É importante destacar que, segundo a Deliberação Normativa COPAM nº 016, de 24 de Setembro de 1996, que dispõe sobre o enquadramento das águas estaduais da bacia do rio Paraibuna embasado na Resolução CONAMA nº 20/1986, o Córrego São Pedro enquadra-se como Classe 1 de suas nascentes até o ponto de captação na barragem da Represa de São Pedro, área sob influência da BHRSP. Contudo, o córrego São Pedro é enquadrado com Classe 2 da barragem até sua foz no Paraibuna.

A Resolução CONAMA nº 357/2005 revoga a Resolução citada anteriormente que é revogada pela Resolução CONAMA nº 430/2011 e, portanto, este enquadramento carece de revisão o que este trabalho também realizará com base nas análises dos parâmetros oxigênio dissolvido e fósforo total considerando o no período de monitoramento, qual seja de julho de 2010 à junho de 2011.

3.2 COBERTURA DO SOLO DA BHRSP

A Figura 6 apresenta o resultado da classificação supervisionada da cobertura do solo na área da bacia (BHRSP) pelo método Maxver.

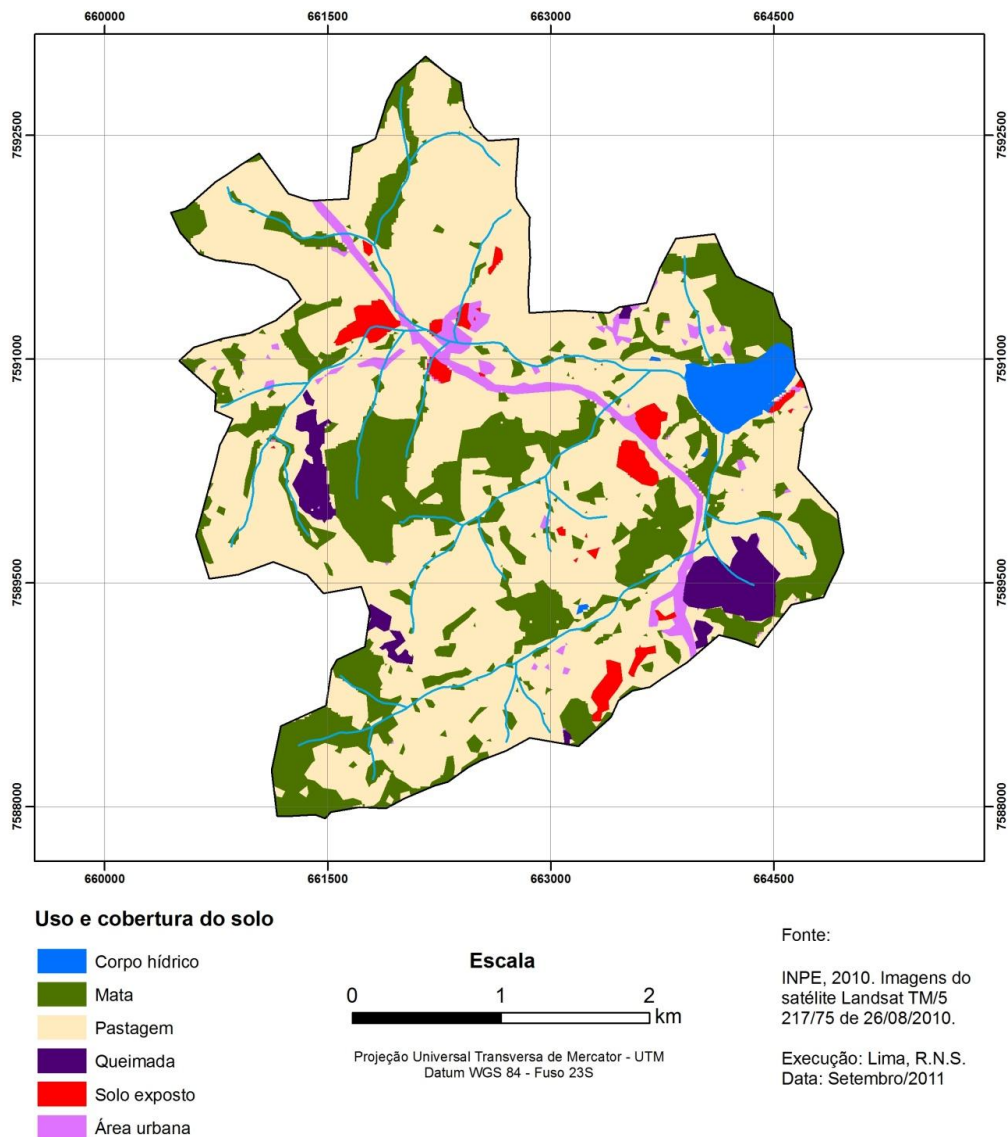


Figura 6: Distribuição das classes de solo encontradas na BHRSP

Apesar da pouca representatividade das áreas urbanas apresentadas na Figura 6, com destaque para o equipamento urbano BR-040 (bem identificada na cor rosa na Figura 6), a aplicação do método da máxima verossimilhança na área da bacia do manancial de São Pedro permitiu uma correlação com o modelo digital do terreno identificando áreas de mata preservada nos altos dos morros e encostas com ausência de cobertura vegetal.

A utilização deste método acarreta o risco de não obter uma amostra suficientemente representativa para as classes definidas. Porém, a predominância em pastagens nas classes enquadradas, embora seja discutível, resguarda a preocupação com a ausência de cobertura vegetal e/ou substituição de matas por pastagens.

As classes encontradas através desta metodologia apresentam resultados compatíveis com as áreas de matas e corpos hídricos, porém as áreas de pastagens, que apresentou aspecto dominante, certamente encobriram áreas de ocupação humana que podem ser melhor observadas na Figura 7, que corresponde a imagem do Google Earth do ano de 2011.

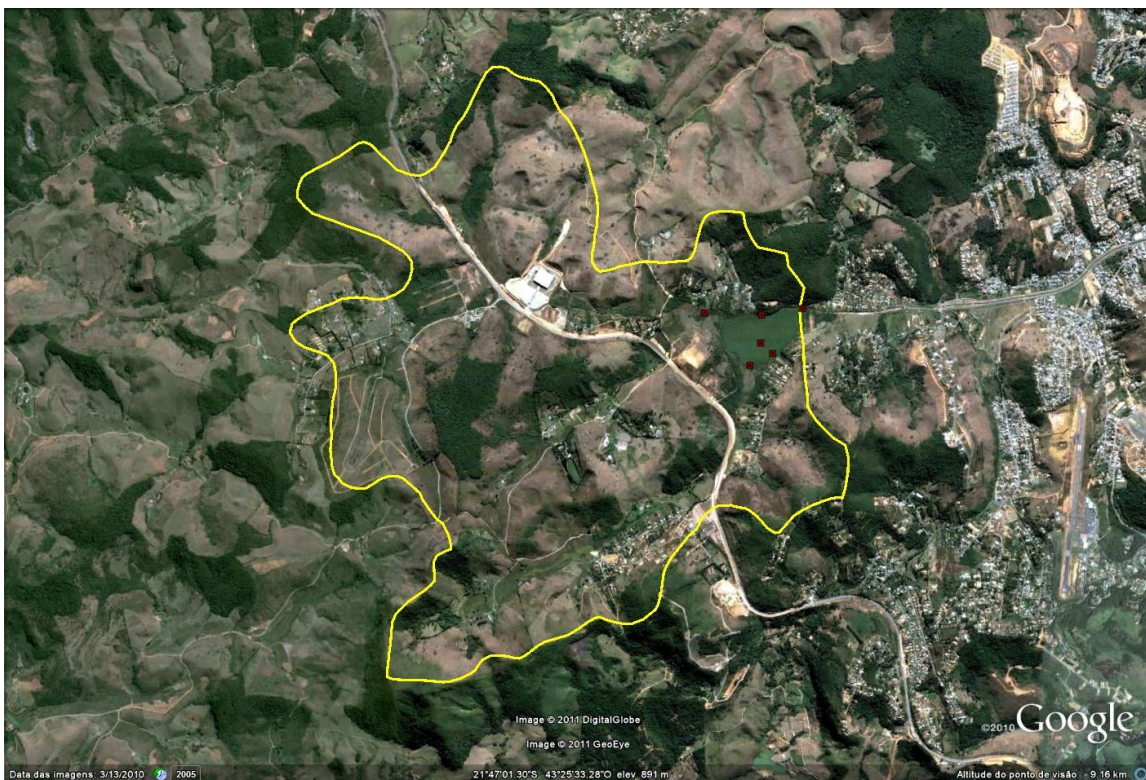


Figura 7: Ocupação da BHRSP através de imagem do Google Earth

A classe área urbana não representou toda ocupação humana, principalmente aquelas que se consolidaram margeando os corpos hídricos. As contribuições de cada classe na bacia encontradas através da metodologia adotada são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1: Eficiência amostral das classes definidas

CLASSE	Área (km ²)	%
Corpo hídrico	0.28	2.12
Mata	3.19	24.47
Pastagem	8.43	64.65
Queimada	0.43	3.31
Solo exposto	0.29	2.25
Área urbana	0.42	3.23
TOTAL	13.04	100

A partir do resultado de classificação da cobertura do solo foi possível determinar o valor do coeficiente de escoamento superficial “C” médio para a bacia hidrográfica, conforme apresenta a Tabela 2 e assim, realizar o cálculo das estimativas de vazão através do Método Racional Modificado para os córregos São Pedro e Grota do Pinto, necessários para alimentar o modelo hidrodinâmico.

Tabela 2: Definição do coeficiente superficial para cada tipo de cobertura do solo

Tipo de Cobertura do Solo	Valor de “C”
Mata	0,20
Área Urbana	0,80
Pasto/Solo Exposto	0,30
Água	0,0

Fonte: Tucci (2001)

O cálculo do coeficiente de escoamento superficial (C) médio foi obtido pela média ponderada entre os coeficientes de cada tipo de cobertura do solo (Tabela 2) e as respectivas áreas das classes de uso do solo da bacia (Tabela 1), onde chegou-se ao resultado de 0,33 que corresponde o valor médio representativo para o coeficiente de escoamento superficial da bacia.

O modelo digital do terreno, mostrada na Figura 8, foi obtido através de imagens SRTM com dados de altimetria estereoscópica e a drenagem retirada da carta topográfica do IBGE na escala de 1:50.000, ambos trabalhados no software ArcGIS.

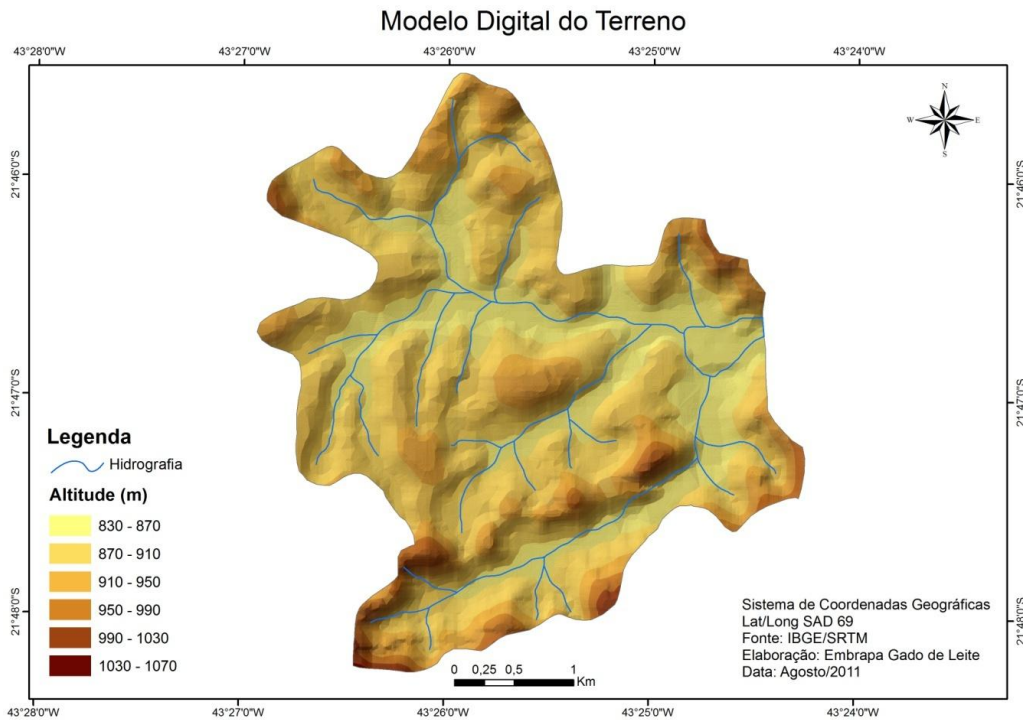


Figura 8: Cotas hipsométricas da BHRSP

A partir da obtenção das cotas altimétricas é possível tecer algumas considerações frente ao tema uso e ocupação de uma bacia, pois a consolidação territorial também depende das condições topográficas. Comparando as Figuras 7 e 8 pode-se perceber que a ocupação humana ocorre predominantemente ao longo dos vales dos córregos São Pedro e Grota do Pinto, onde as elevações das terras se encontram entre os 800 e 900 metros de altitude.

Muitas vezes a construção de residências ou realização de benfeitorias e, principalmente a implantação de equipamentos urbanos rompendo barreiras topográficas acabam se somando a ações degradadoras, que realmente o são quando esse fenômeno ocorre de forma desordenada. Observando esse fenômeno em uma bacia hidrográfica pode-se perceber a contribuição do meio físico para vocação econômica desse ambiente. A BHRSP ainda apresenta pouco adensamento populacional e expressões rurais com propriedades que representam sítios ou granjas em meio a mancha urbana.

3.3 ETAPAS PARA A MODELAGEM COM IPH-ECO

Para realização deste trabalho foi escolhido o modelo hidrodinâmico bidimensional na horizontal (2DH), IPH-ECO, uma vez que as dimensões horizontais no reservatório de São Pedro predominam sobre a dimensão vertical e a estratificação em sistemas rasos praticamente não existe. A utilização de um modelo bidimensional, que teoricamente seria menos representativo da realidade, possibilita, a partir dos dados climatológicos e vazões disponíveis, simulações mais simples com menores graus de incerteza dos dados de entrada. É importante também ressaltar o menor esforço computacional para melhor representar a dimensão horizontal do reservatório em detrimento da vertical.

Para a utilização do modelo de forma suficiente e eficiente, ou seja, com uma representação mais próxima possível do real, foram realizados experimentos de campo de Julho de 2010 a Julho de 2011 para monitorar a temperatura da água e assim comparar os dados observados com os dados simulados.

Qualquer dado medido de fato representa apenas uma diminuta fração do todo, e torna-se fundamental dispor-se de ferramentas confiáveis que permitam que tais dados sejam interpolados e extrapolados, tanto no espaço quanto no tempo.

Para avaliar a qualidade de uma água qualquer considera-se a composição de uma amostra, no que se refere às características físicas, químicas e microbiológicas, a depender do objetivo a ser alcançado. A seleção de pontos de amostragens em um corpo hídrico deve ser realizada estrategicamente, vislumbrando a melhor representatividade do ambiente aquático, porém, segundo Bicudo & Bicudo (2004), em função da variação dos fatores físicos e químicos e no tempo de residência em reservatórios, a primeira questão que se apresenta é: onde amostrar?

3.3.1. *Seleção dos locais de amostragem*

A amostragem neste trabalho foi realizada a partir da seleção de seis pontos representativos: um na captação de água para Estação de Tratamento de Água São Pedro (Ponto 1), três ao longo do espelho d'água do reservatório (Pontos 4, 5 e 6) e um em cada tributário - Grota do Pinto e São Pedro (Pontos 2 e 3), conforme mostra a Figura 9.

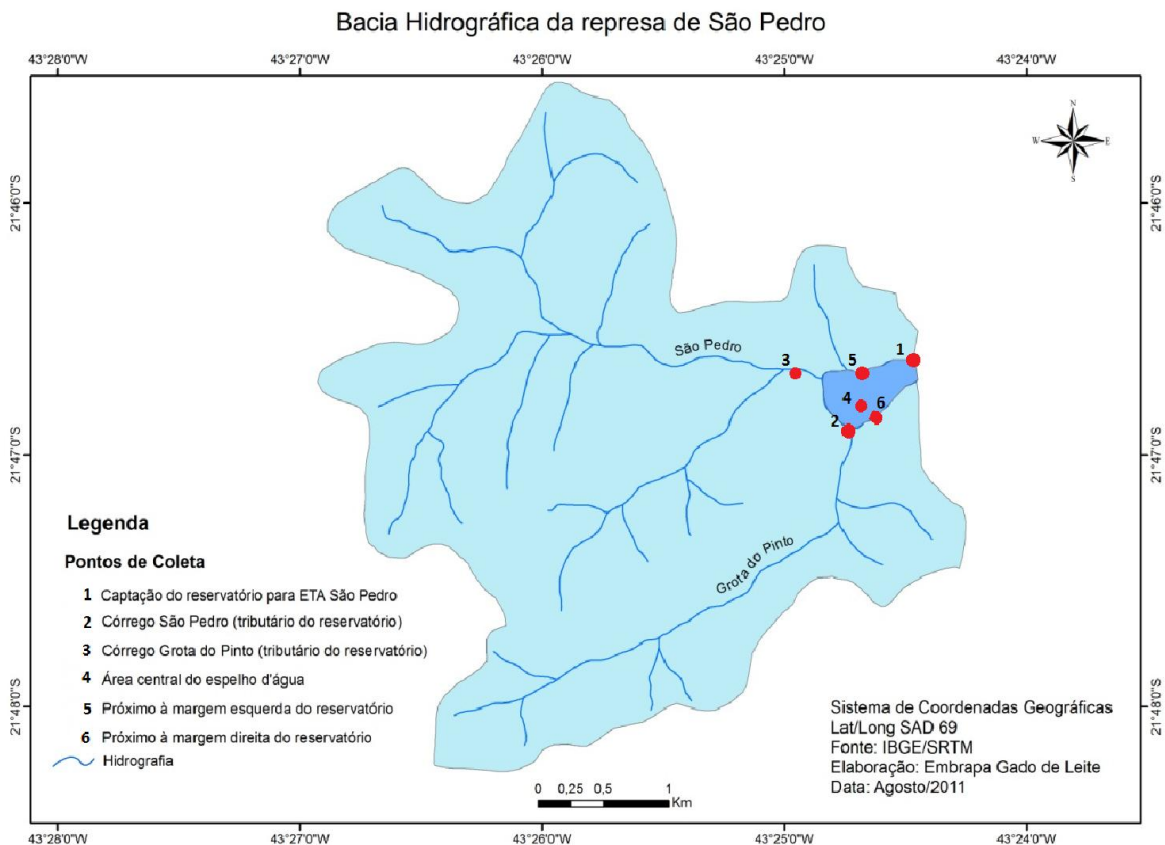


Figura 9: Distribuição dos pontos amostrais

A seleção de pontos para o monitoramento deste manancial foi uma etapa importante para se obter um referencial de qualidade do mesmo. Os experimentos ocorreram com frequência mensal com o apoio do Corpo de Bombeiros de Juiz de Fora que disponibilizou um barco para realização das aferições em superfície ao longo do espelho d'água.

A localização de cada ponto é apresentada na Tabela 3.

Tabela 3: Localização dos pontos de amostragem

	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3	Ponto 4	Ponto 5	Ponto 6
Localização	-21° 46' 34,8'' -43° 24' 27,2''	-21° 47' 03,1'' -43° 24' 46,1''	-21° 46' 35,6'' -43° 25' 47,2''	-21° 46' 46,5'' -43° 24' 39,5''	-21° 46' 38,9'' -43° 24' 39,2''	-21° 46' 49,3'' -43° 24' 36,1''
Altitude	849m	858m	868m	852m	852m	852m

Para realização da simulação, em intervalos de tempo de 10 s um período de 355 dias, da temperatura superficial do reservatório de São Pedro utilizando o modelo IPH-ECO foram utilizados os seguintes dados de entrada do modelo:

- Batimetria atual do reservatório na malha 50mx50m somando 450 células;

- Série dos elementos climáticos (variáveis ambientais): temperatura do ar, radiação solar, evaporação, vento, umidade relativa do ar e precipitação;
- Série de vazões (condições de contorno) que afluem ao reservatório pelos tributários Grota do Pinto e São Pedro;
- Série de vazões (condições de contorno) que efluem ao reservatório através da captação de água para abastecimento público na Estação de Tratamento de Água;
- Dados mensalmente monitorados de temperatura da água no período de Julho de 2010 a Junho de 2011.

Estes dados e as respectivas formas de obtenção dos mesmos serão melhor detalhadas a seguir.

3.3.2. *Dados climatológicos*

Os dados climatológicos, para simulação do modelo IPH-ECO, foram fornecidos pela Estação Climatológica Principal da Universidade Federal de Juiz de Fora, operada e mantida pelo Instituto Nacional de Meteorologia na sede de Belo Horizonte/MG (INMET), sejam eles: temperatura do ar, evaporação, vento, precipitação e umidade. Os dados de radiação solar foram obtidos diretamente pelo INMET/MG, através das informações disponibilizadas no seu site oficial.

Os dados climatológicos, com suas respectivas frequências disponibilizadas são apresentadas na Tabela 4.

Tabela 4: Dados climatológicos de entrada do modelo

Dado	Frequência	Fonte
Temperatura do ar	00:00h/12:00h/18:00h	ECP*/UFJF
Umidade	00:00h/12:00h/18:00h	ECP*/UFJF
Precipitação	00:00h/12:00h/18:00h	ECP*/UFJF
Evaporação	00:00h/12:00h/18:00h	ECP*/UFJF
Radiação solar	1 hora	INMET
Vento	00:00h/12:00h/18:00h	ECP*/UFJF

*ECP: Estação Climatológica Principal

3.3.3. Monitoramento de parâmetros de qualidade da água

Foram realizadas 10 campanhas de campo, nos meses de julho, agosto, setembro, outubro e dezembro de 2010 e janeiro, fevereiro, abril, maio, junho de 2011, com a finalidade de checar em campo os parâmetros: temperatura da água, oxigênio dissolvido (OD) e fósforo total.

A temperatura da água foi monitorada com frequência mensal, em cada um dos seis pontos de amostragem. Para medir a temperatura superficial da água em °C e o OD em mg/L foi utilizada a sonda modelo HQ30d da Hach ® como mostra a Figura 10.



Figura 10: Sonda para medir OD e temperatura da água

Como foi descrito anteriormente, a temperatura da água foi monitorada em superfície considerando o reservatório como uma massa de água homogênea, não estratificada, para comparar com os valores de temperatura simulados pelo IPH-ECO a partir dos dados climatológicos e dados das vazões de entrada e de saída do reservatório, que serão discutidos mais adiante.

Para as análises do fósforo total, as amostras foram coletadas nos pontos de amostragens, a cerca de 15cm de profundidade da lâmina d'água, em frascos de 1L e transportadas em caixa térmica até o laboratório particular Acqualab Monitoramento Ambiental LTD, localizado no município de Juiz de Fora, onde foram realizados os ensaios mensais deste parâmetro.

3.3.4. Levantamento batimétrico

A batimetria do reservatório foi levantada com a utilização de um Ecobatímetro (Modelo Fishfinder 140) da Garmin, aparelho que descreve a topografia do fundo do lago mostrado nas Figuras 11 e 12, e os pontos foram marcados com um GPS para garantir as amostragens nos mesmos pontos ao longo do monitoramento. Este levantamento foi realizado no dia 11 do mês de julho de 2010 no primeiro experimento de campo.



Figura 11: Ecobatímetro (interface)

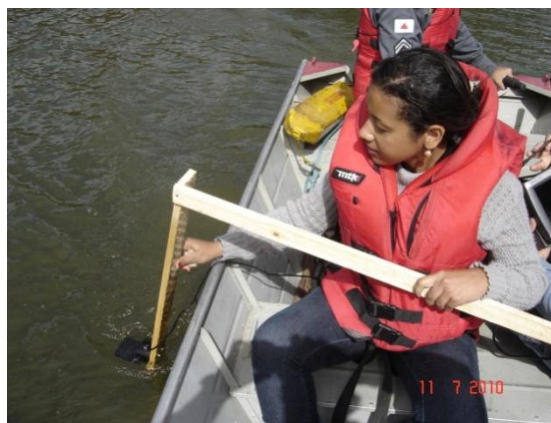


Figura 12: Levantamento batimétrico

A batimetria apresentou valores em média de 2 metros de profundidade caracterizando um reservatório raso, o que justifica não considerar a estratificação térmica e a utilização de um modelo hidrodinâmico e de transporte 2DH. A discretização espacial da malha foi de 50mx50m com 450 células, como mostra a Figura 13.

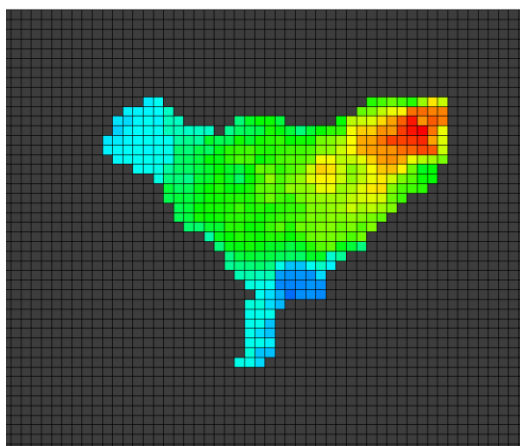


Figura 13: Discretização da malha (as células cinzas não contemplam o reservatório)

A imagem tratada é mostrada na Figura 14.

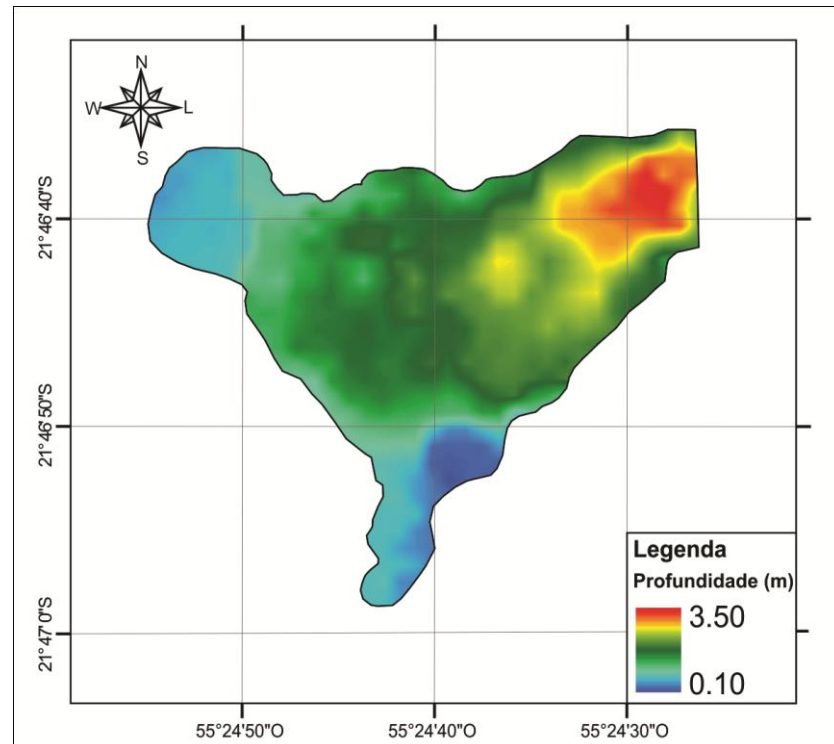


Figura 14: Batimetria do reservatório de São Pedro

3.3.5. Estimativa das vazões

O cálculo da estimativa das vazões de entrada do modelo foi obtido através do Método Racional Modificado (EUCLYDES, 1987) que resume todos os processos hidrológicos da bacia em um único coeficiente, o qual determina a parcela da chuva que se transforma em escoamento superficial. Este cálculo é obtido através da equação 1.

$$Q = 0,278 \cdot C \cdot i \cdot A \cdot \Phi \quad (1)$$

onde:

Q = vazão na seção de interesse (m^3/s).

i = intensidade de chuva (mm/h).

A = área de drenagem na seção de interesse (km^2).

Φ = coeficiente de retardamento (adimensional). Este é um fator de correção em função da área, conforme mostrado na equação (2) a seguir.

C = Coeficiente de escoamento superficial ou coeficiente de *run-off*. Este valor é normalmente estimado em função do mapa de uso e ocupação do solo.

O coeficiente de retardamento é apresentado na equação 2.

$$\phi = 0,278 - 0,00034.A \quad (2)$$

Para tanto faz-se necessário o cálculo das áreas das bacias dos tributários São Pedro e Grota do Pinto e seus respectivos coeficientes de retardamento, mostrado na Tabela 5.

Tabela 5: Área das bacias e respectivos coeficiente de retardamento

	Área da bacia (km ²)	Coef. de retardamento Φ
São Pedro	8.84	0.2749944
Grota do Pinto	3.36	0.2768576

3.3.6. Medição de vazão de entrada e saída do reservatório

As vazões dos tributários São Pedro e Grota do Pinto foram obtidas “in loco” com a utilização de um molinete hidrométrico, aparelho que mede a velocidade da água, como mostrado nas Figuras 15 e 16. A velocidade da água foi obtida pela equação a seguir:

$$V = 0,05837734 + 0,01333414 \times N(\text{rps}) \quad (3)$$

onde:

V = velocidade (m/s).

N(rps) = número de rotações por segundo.



Figura 15: Contador de giros



Figura 16: Molinete hidrométrico

A área da sessão do tributário Grota do Pinto foi medida com o auxílio das hastes graduadas do molinete para aferir a profundidade e a largura foi obtida através de uma tábua graduada com intervalos de 40 cm, como mostram as Figuras 17 (a e b).

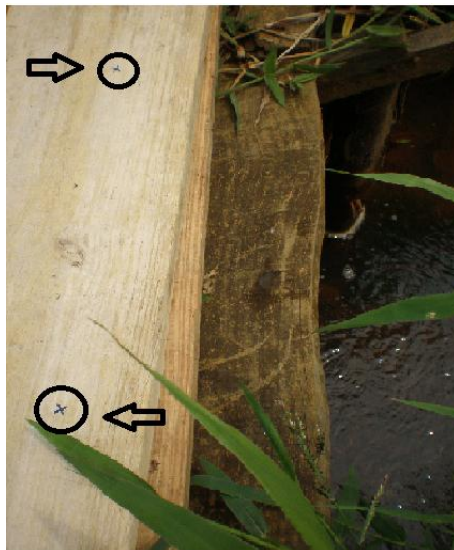


Figura 17.a:

Largura em intervalos de 40 cm

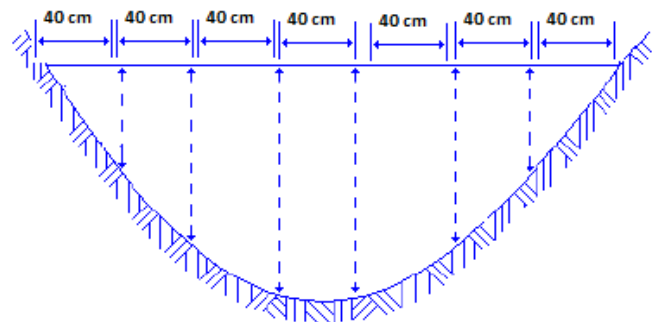


Figura 17.b:

Desenho esquemático da seção transversal

Já a área sessão do tributário São Pedro foi obtida através do cálculo da área molhada de duas manilhas de 1 m de diâmetro por onde passa toda a água deste córrego, como mostra a Figura 18.



Figura 18: Local de medição da vazão no Córrego São Pedro.

O cálculo das vazões foi obtido através da equação:

$$Q = V.A \quad (4)$$

onde:

Q = vazão (m^3/s).

V = velocidade de fluxo (m/s).

A = área molhada da seção transversal (m^2).

As vazões estimadas foram comparadas às vazões medidas com o molinete nos horários coincidentes para testar a eficiência do Método Racional Modificado, descrito anteriormente. Neste trabalho optou-se pelas vazões estimadas por oferecer maior frequência nas informações e por apresentar valores próximos aos medidos em campo em determinados horários, como apresenta a Tabela 6.

Tabela 6: Vazões estimadas e observados nos tributários (m^3/s)

		São Pedro		Grotta do Pinto	
	<i>Hora</i>	<i>Molinete</i>	<i>Método racional modificado</i>	<i>Molinete</i>	<i>Método racional modificado</i>
Ago/10	12:00h	0.0081	0.0000	0.0834	0.0000
Set/10	09:00h	0.0072	0.0000	0.0819	0.0000
Jan/11	12:00h	0.1450	0.2294	0.0861	0.0877
Fev/11	09:00h	0.0427	0.0000	0.0749	0.0000
Abr/11	09:00h	0.0291	0.2828	0.0728	0.0000
Mai/11	08:30h	0.0241	0.0000	0.0772	0.0000

A vazão de saída foi disponibilizada pela CESAMA, através da ETA São Pedro que trata a água do reservatório de São Pedro e faz o controle diário dessa vazão para direcionar as operações dentro da estação.

3.3.7. Locais de simulação do modelo

Para a simulação da temperatura da massa de água do reservatório de São Pedro foram escolhidos como pontos de saída no modelo os três pontos da área central (Pontos 4, 5 e 6) para melhor representá-la, como mostra a Figura 19. Os outros três pontos foram mais importantes para os dados de entrada, no caso as vazões de entrada nos Pontos 2 e 3 e a vazão de saída no Ponto 1.

A seleção dos pontos de saída no modelo devem ser representativos de acordo com os objetivos da modelagem que, neste caso, consiste na simulação da temperatura da água que foi medida em campo nos três pontos escolhidos, ou seja, cada ponto no reservatório tem um correspondente no modelo garantindo a comparação segura entre os dados observados e os dados calculados pelo modelo.

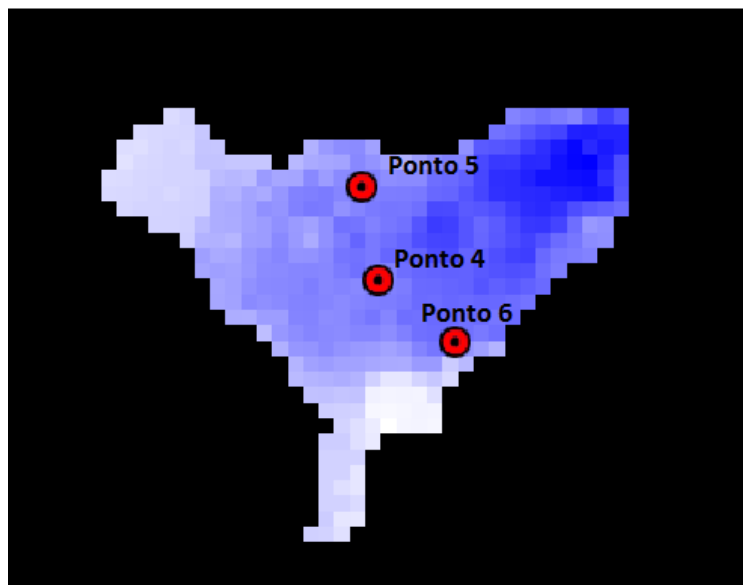


Figura 19: Pontos de saída selecionados no modelo IPH-ECO

3.3.8. Cálculo da Raiz do Erro Quadrático Médio e da Regressão Linear

O erro médio quadrático foi proposto por Gauss, que o definiu como a “raiz quadrada da média dos quadrados dos erros verdadeiros”. É sabido que os erros verdadeiros são desconhecidos e o erro médio quadrático pode ser expresso em função dos resíduos relativos à média. O cálculo da raiz do erro quadrático médio pode ser obtido pela fórmula:

$$\text{REMQ} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [E_i - O_i]^2} \quad (5)$$

onde:

REMQ = raiz do erro médio quadrático.

O_i = valores observados.

E_i = valores estimados.

No entanto, a regressão linear consiste em uma tentativa de estabelecer relação entre duas ou mais variáveis quantitativas (ou qualitativa) descrita em linha reta, como será mostrado nos gráficos posteriormente. Trata-se da equação que descreve este relacionamento entre variáveis em termos matemáticos.

Neste trabalho foram relacionados os valores dos dados, observados com experimentos de campo e estimados através do modelo IPH-ECO, de temperatura da água para correlacionar o grau de relacionamento entre essas variáveis.

É importante destacar que os erros encontrados ao final de uma simulação correspondem ao que o modelo não conseguiu assimilar no processo de modelagem e, este fato pode ser explicado pela qualidade e quantidade de dados de entrada, da adequação do modelo ao objetivo do trabalho, além do conhecimento do modelador.

Segundo Castro (2010) existem duas abordagens gerais para avaliação da qualidade da calibração de um modelo: subjetiva e objetiva. A subjetiva é baseada em uma comparação visual dos valores simulados com os observados. Nesta abordagem os parâmetros devem ser ajustados até que a concordância entre as saídas do modelo e os dados seja aceitável, de acordo com o critério de um pesquisador. Já a objetiva, utilizada nesta pesquisa, é uma tentativa de quantificar a qualidade do ajuste, usualmente na forma de erro relativo. Apesar de essa abordagem quantificar o erro não deve ser considerada superior, pois “a abordagem subjetiva utiliza informações adicionais, advindas da experiência e intuição do modelador sobre o processo” (CASTRO, 2010).

3.4 ÍNDICE DE ESTADO TRÓFICO

Para caracterizar o estágio de eutrofização em que se encontra um corpo d'água, possibilitando a tomada de medidas preventivas e /ou corretivas, é interessante a adoção de um sistema classificatório. Von Sperling (2006) afirma que usualmente, tem-se os seguintes níveis de trofia:

- *oligotrófico* (lagos claros e com baixa produtividade)
- *mesotrófico* (lagos com produtividade intermediária)
- *eutrófico* (lagos com elevada produtividade, comparada ao nível natural básico)

Este autor, ressaltando a dificuldade de se generalizar dados de um corpo d'água para outro, afirma que corpos d'água tropicais apresentam uma maior capacidade de assimilação de fósforo que corpos d'água de climas temperados.

Para verificação do Índice de Estado Trófico (IET) foi adotado o índice introduzido por Carlson (1977) e modificado por Toledo Jr. et al. (1983), que utiliza três variáveis: a transparência (disco de Secchi), clorofila e fósforo total. As classes são consideradas conforme a Tabela 7.

Tabela 7: IET de Carlson (1977)

< 20	Ultra-oligotrófico
21 – 40	Oligotrófico
41 – 50	Mesotrófico
51 – 60	Eutrófico
> 61	Hipereutrófico

Conforme Carlson (1977), as expressões para a estimativa do Índice de Estado Trófico (IET) em função dos diferentes parâmetros (disco de Secchi – DS, clorofila – CHL e fósforo total – PT), são apresentadas a seguir:

$$\text{IET (DS)} = 10(6 - \ln \text{DS}/\ln 2) \quad (6)$$

$$\text{IET (CHL)} = 10 (6 - (2,04 - 0,68 \ln \text{CHL}/\ln 2)) \quad (7)$$

$$\text{IET (PT)} = 10 (6 - \ln 48/\text{PT}/\ln 2) \quad (8)$$

onde:

IET (DS) = índice de estado trófico para o disco de Secchi

IET (CHL) = índice de estado trófico para a clorofila *a*

IET (PT) = índice de estado trófico para o fósforo total

lnDS = logaritmo natural dos valores do disco de Secchi

lnCHL = logaritmo natural dos valores de clorofila *a*

lnPT = logaritmo natural dos valores de fósforo total

A escolha pelo índice modificado por Toledo Jr. et al. (1983), para este trabalho para um reservatório de clima tropical de altitude, se deu pelo fato do IET de Carlson (1977) ter sido desenvolvido para lagos e reservatórios de ambientes temperados, o que certamente apresentaria uma menor capacidade assimilativa de representar ambientes tropicais por diferentes características hidrodinâmicas e principalmente climatológicas. O enquadramento escolhido é apresentado na Tabela 8.

Tabela 8: IET de Toledo et al. (1983)

IET < 44	Oligotrófico
44 < IET ≤ 54	Mesotrófico
IET > 54	Eutrófico

Segundo Toledo Jr. et al. (1983), as expressões para a estimativa do Índice de Estado Trófico (IET) em função dos diferentes parâmetros (disco de Secchi – DS, clorofila – CHL e fósforo total – PT), são apresentadas a seguir:

$$\text{IET (DS)} = 10 (6 - (0,64 + \ln\text{DS})/\ln 2) \quad (9)$$

$$\text{IET (CHL)} = 10 (6 - (2,04 - 0,695 \ln\text{CHL})/\ln 2) \quad (10)$$

$$\text{IET (PT)} = 10 (6 - \ln (80,32/\text{PT})/\ln 2) \quad (11)$$

O cálculo do IET também pode ser obtido por médias aritméticas simples dos valores encontrados para cada uma das três variáveis:

$$\text{IET} = \text{IET (DS)} + \text{IET (CHL)} + \text{IET (PT)}/3 \quad (12)$$

E os dados utilizados para enquadramento nas classes de estado trófico em função do parâmetro fósforo total são apresentados na Tabela 9.

Tabela 9: Resultados das análises de fósforo total (mg/L)

Fósforo Total (mg/L)	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3	Ponto 4	Ponto 5	Ponto 6
Julho/2010	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50
Agosto/2010	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09
Setembro/2010	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03
Outubro/2010	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
Dezembro/2010	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
Janeiro/2011	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
Fevereiro/2011	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
Abril/2011	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
Mai/2011	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
Junho/2011	0.11	0.11	0.10	0.11	0.10	0.11

Na prática, a caracterização do estado trófico é quantificada através de variáveis que se relacionam diretamente com o processo de eutrofização. Daí a importância do fósforo por ser um dos principais nutrientes para fertilização de um ambiente aquático.

3.5 POPULAÇÃO E ENQUADRAMENTO

A BHRSP é caracterizada por um baixo adensamento populacional e apresenta usos rurais como cultivo de hortaliças e criação de porcos. Sob pressão imobiliária sofrida nos últimos anos, esta bacia se encontra em uma etapa de seu crescimento urbano onde suas terras estão cada vez mais valorizadas e o aumento da população representa o aumento da demanda por água, além de contribuir para poluição hídrica com o aumento dos *inputs* de variadas fontes nos corpos hídricos.

Os dados de população aqui considerados são os 941 habitantes (IBGE, 2010) referentes ao bairro Cruzeiro de Santo Antônio representado pelo setor censitário (313670205120001), o qual exerce efetiva influência pela drenagem, escoamento superficial e infiltração das águas que abastecem o reservatório de São Pedro. A delimitação deste setor compreende aproximadamente a área da BHRSP.

Segundo Von Sperling (2005), considerando a carga de esgoto sanitário predominantemente doméstico, cada habitante contribui em média numa faixa de 0,7 a 2,5 g/hab.dia de fósforo total, considerando-se a concentração de 1,0 g/hab.dia um valor típico.

O enquadramento consiste no estabelecimento de uma meta ou objetivo de qualidade da água a ser alcançado ou mantido, considerando seus usos ao longo do tempo (BRASIL, 2011). A Tabela 10 apresenta Classes com valores limites para os parâmetros fósforo total e oxigênio dissolvido tomados neste estudo para o enquadramento das águas da BHRSP.

Tabela 10: Valores máximo permitidos (VMP) para as Classes

Classificação	Fósforo total (ambiente lântico)	Fósforo total (tributários diretos de ambiente lântico)	Oxigênio Dissolvido (OD)
Classe I	0,020 mg/L	0,025 mg/L	Não inferior a 6 mg/L O ₂
Classe II	0,030 mg/L	0,050 mg/L	Não inferior a 5 mg/L O ₂
Classe III	0,05 mg/L	0,15 mg/L	Não inferior a 4 mg/L O ₂

Fonte: Resolução CONAMA N°. 430, de 11 de Maio de 2011.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 MODELAGEM DA TEMPERATURA DA ÁGUA

4.1.1 Simulações da temperatura da água

As simulações que serão apresentadas foram realizadas para melhor entender a dinâmica da temperatura da água do reservatório de São Pedro com base nos dados das condições de contorno e elementos climatológicos. Além disso, foi verificada a importância de considerar as vazões para analisar a temperatura da água deste reservatório.

Os dados observados de temperatura da água, mostrados na Tabela 11, foram utilizados para comparar aos dados gerados pelo modelo, verificando assim a suficiência e eficiência das simulações de qualidade da água e hidrodinâmica.

Tabela 11: Valores de temperatura da água observados “in loco”

Temperatura da água (0C)	Ponto 4	Ponto 5	Ponto 6
Julho/2010	19,08	19,23	19,16
Agosto/2010	19,7	19,6	20,7
Setembro/2010	22,7	23	23,4
Outubro/2010	23,9	24,1	24,1
Dezembro/2010	26,5	28,1	27,2
Janeiro/2011	23,4	23	23,5
Fevereiro/2011	27	27,2	27,2
Abril/2011	22,2	21,9	22,1
Mai/2011	18,8	19,1	18,7
Junho/2011	18,9	18,7	18,9

As saídas das simulações escolhidas no modelo foram coincidas com os pontos de amostragens: Ponto 4, Ponto 5 e Ponto 6. O modelo IPH-ECO gerou para estes pontos dados de temperatura da água em um período total de 355 dias, iniciando às 00:00 horas do dia 01/07/2010 e finalizando às 23:00 horas do dia 01/06/2011. As temperaturas se comportaram de forma satisfatória no processo da modelagem, considerando as vazões dos afluentes São Pedro e Grota do Pinto, e são mostradas nos Gráficos 1, 2 e 3 a seguir.

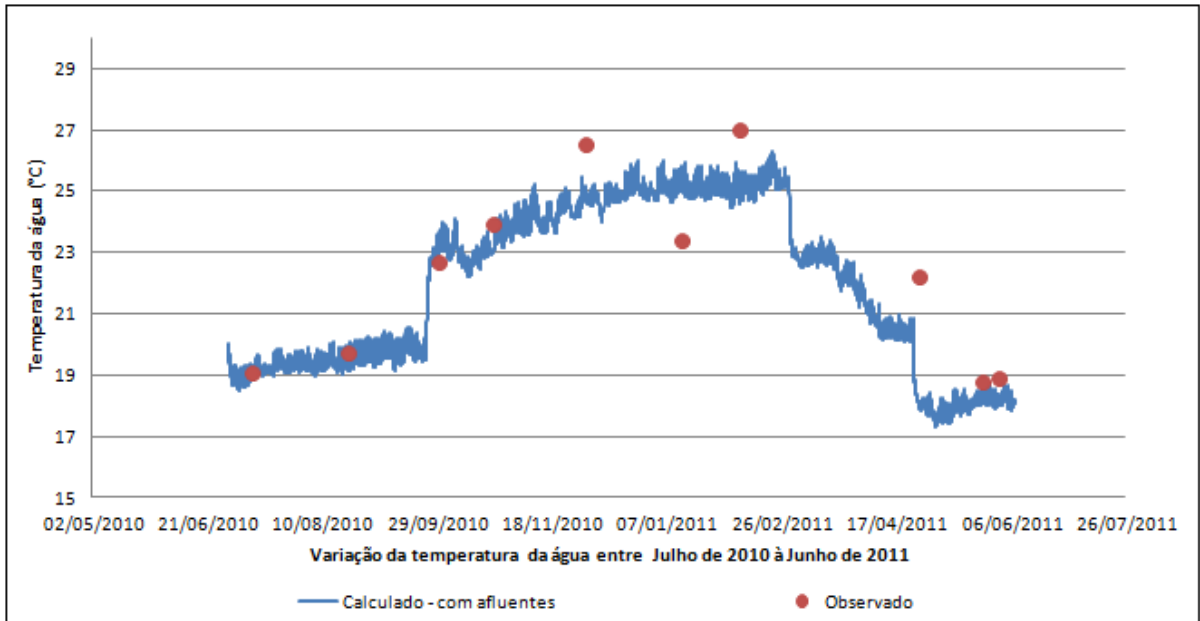


Gráfico 1: Ponto de saída que representa a área central do reservatório (Ponto 4).

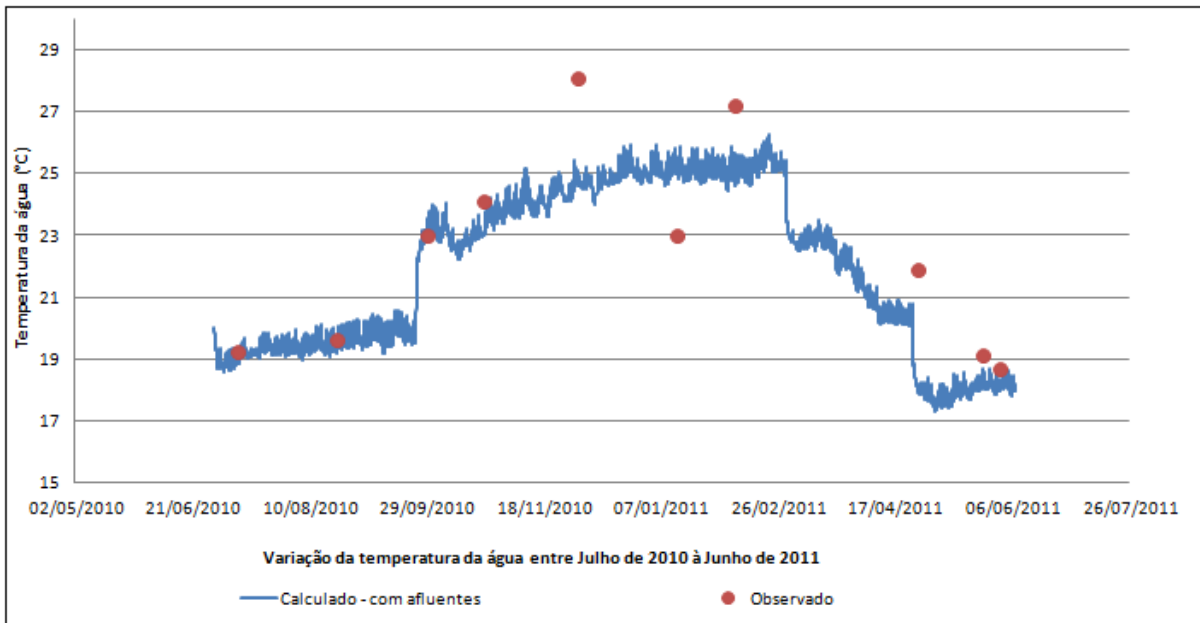


Gráfico 2: Ponto de saída que representa a margem esquerda do reservatório (Ponto 5).

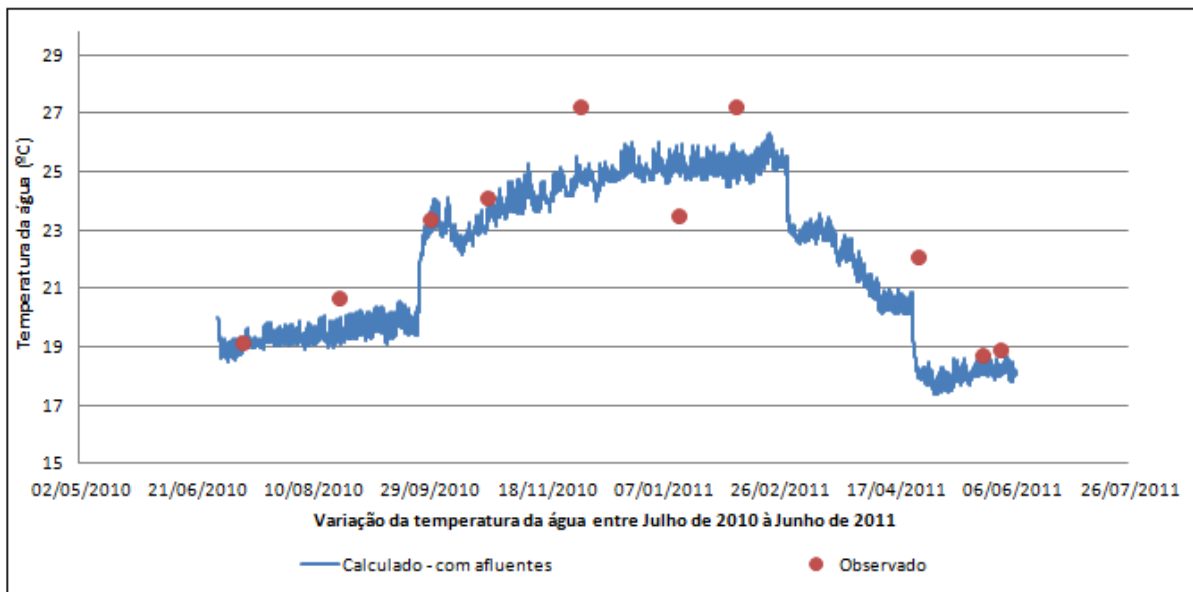


Gráfico 3: Ponto de saída que representa a margem direita do reservatório (Ponto 6).

Ao comparar os gráficos acima, é possível perceber que os níveis simulados e observados demonstram que a correspondência do modelo ao longo do tempo está correta e representa o que de fato ocorreu no período simulado.

Tomando os gráficos acima apresentados, é possível afirmar que a grande proximidade dos resultados de temperatura encontrados nos três pontos amostrais caracteriza o reservatório como um ambiente com águas misturadas, ou seja, não apresenta variabilidade espacial. A modelagem dos dados de temperatura da água superficial representou um ambiente homogêneo dependente do aporte de água de seus afluentes para controle de sua temperatura. Dessa forma pode-se concluir que apesar de ter sido utilizado um modelo bidimensional este reservatório poderia ser bem representado por um modelo do tipo concentrado.

4.1.2 Representatividade considerando os afluentes

As temperaturas da água calculadas pelo modelo apresentaram valores próximos aos experimentos de campo no período observado, onde os maiores valores calculados foram, respectivamente, 26,28 °C, 26,25 °C e 26,33 °C, nos pontos 4, 5 e 6. E os menores valores foram 17,32 °C, 17,31 °C e 17,34 °C. Já os maiores valores observados foram 27 °C, 28,1 °C e 27,2 °C, para os pontos 4, 5 e 6, respectivamente. E os menores valores observados foram 18,8 °C, 18,7 °C e 18,7 °C.

As oscilações das temperaturas calculadas pelo modelo melhor se aproximam das reais condições térmicas, em decorrência das diferentes épocas do ano considerando as vazões dos afluentes, como mostra o Gráfico 4.

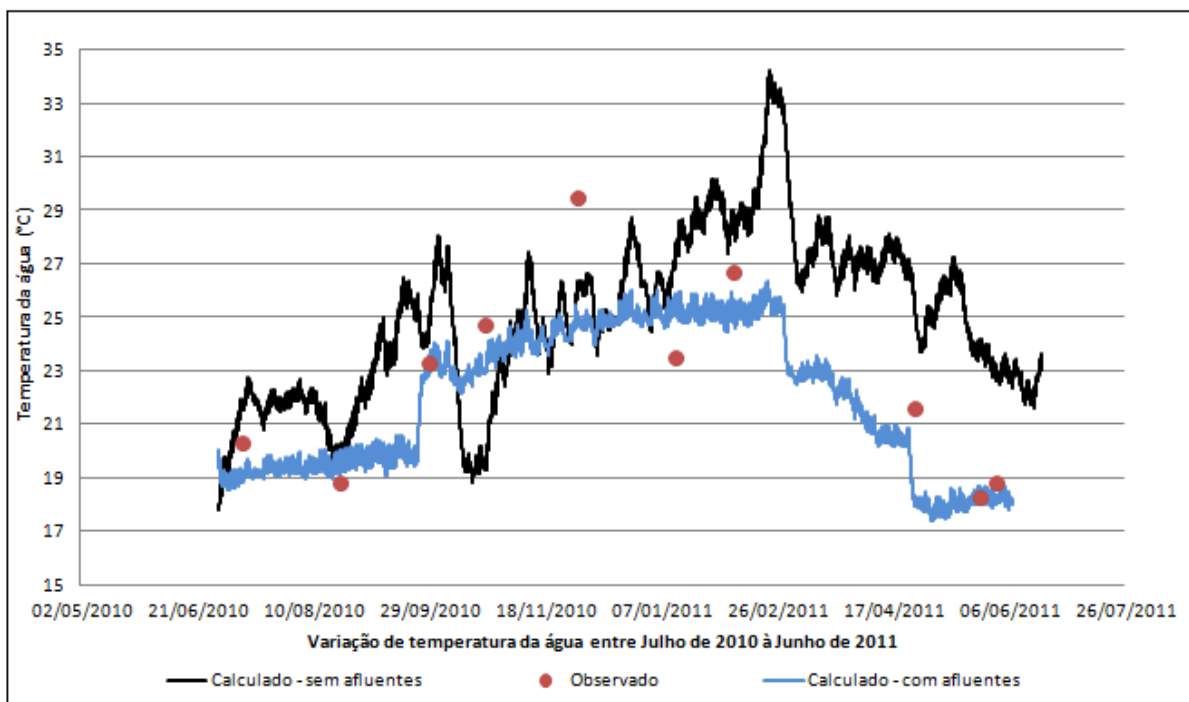


Gráfico 4: Variação da temperatura com e sem os afluentes (Ponto 5).

Desta feita, pode-se perceber a relevância dos afluentes quando da análise dos dados calculados pelo modelo, pois a proximidade dos valores observados com os valores medidos mostrou-se ligada ao fato de se considerar os afluentes, ou seja, os afluentes Grota do Pinto e São Pedro controlam a temperatura do reservatório de São Pedro.

4.1.3 Comparação entre os valores observados e estimados

Para avaliar os resultados estimados pelo modelo (E_i) com base nos valores observados em campo (O_i) foram empregados dois testes comparativos, a saber: o cálculo da raiz do erro médio quadrático e regressão linear.

O cálculo da raiz do erro médio quadrático apresentou boa representatividade, por assim verificar no período monitorado, valores relativamente baixos, como mostra a Tabela 12.

Tabela 12: Cálculo da Raiz do Erro Médio Quadrático.

Data	<i>Temperatura °C</i>						<i>Ponto 4</i>	<i>Ponto 5</i>	<i>Ponto 6</i>
	<i>Oi</i>			<i>Ei</i>					
	<i>Ponto 4</i>	<i>Ponto 5</i>	<i>Ponto 6</i>	<i>Ponto 4</i>	<i>Ponto5</i>	<i>Ponto6</i>			
Julho/2010	19,23	19,08	19,16	20,00	20,00	20,00	0.5928	0.8462	0.7055
Agosto/2010	19,6	19,7	20,7	19,47	19,50	19,44	0.0166	0.0387	1.5817
Setembro/2010	23	22,7	23,4	19,72	19,76	19,67	10.7662	8.6201	13.8823
Outubro/2010	24,1	23,9	24,1	23,44	23,45	23,44	0.4354	0.2049	0.4309
Dezembro/2010	28,1	26,5	27,2	24,67	24,65	24,70	11.7346	3.4109	6.2275
Janeiro/2011	23	23,4	23,5	25,06	25,07	25,06	4.2556	2.7805	2.4358
Fevereiro/2011	27,2	27	27,2	25,33	25,32	25,35	3.4848	2.8099	3.4048
Abril/2011	21,9	22,2	22,1	21,48	21,46	21,50	0.1791	0.5420	0.3616
Mai/2011	19,1	18,8	18,7	17,84	17,82	17,88	1.5806	0.9533	0.6792
Junho/2011	18,7	18,9	18,9	18,13	18,13	18,15	0.3203	0.5968	0.5677
REMQ	-	-	-	-	-	-	1.83	1.44	1.74

A representatividade da temperatura da água do reservatório de São Pedro foi satisfatória, mostrando condições favoráveis a novas simulações somando outros parâmetros de qualidade da água que o modelo IPH-ECO suporta. Este resultado mostra uma boa representatividade do módulo de hidrodinâmica somado ao módulo de qualidade da água, mesmo com o erro considerado para as oscilações de temperatura da água.

As temperaturas simuladas, em média por ponto, ficaram em torno de 21,95 °C e as temperaturas calculadas, também em média por ponto, ficaram em torno de 22, 21 °C. As variações foram bem representadas pelo modelo nos três pontos de saída escolhidos, como mostram os cálculos da regressão linear para os valores de temperatura da água de cada ponto nos Gráficos 5, 6 e 7.

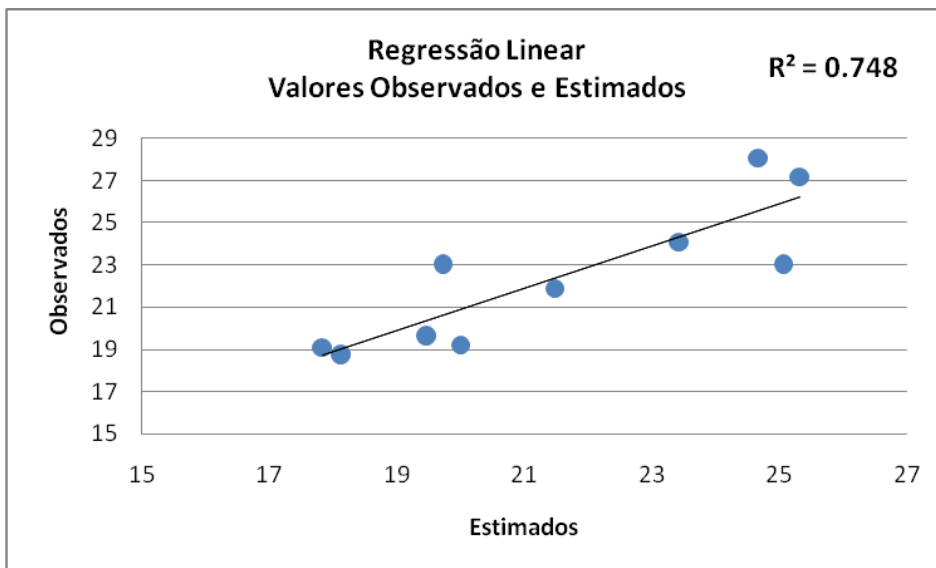


Gráfico 5: Regressão Linear para o Ponto 4

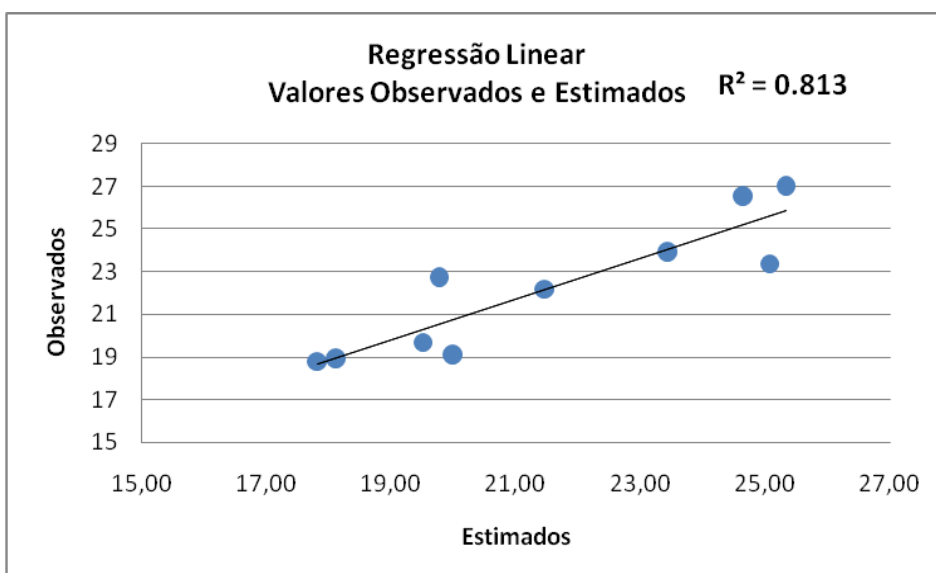


Gráfico 6: Regressão Linear para o Ponto 5

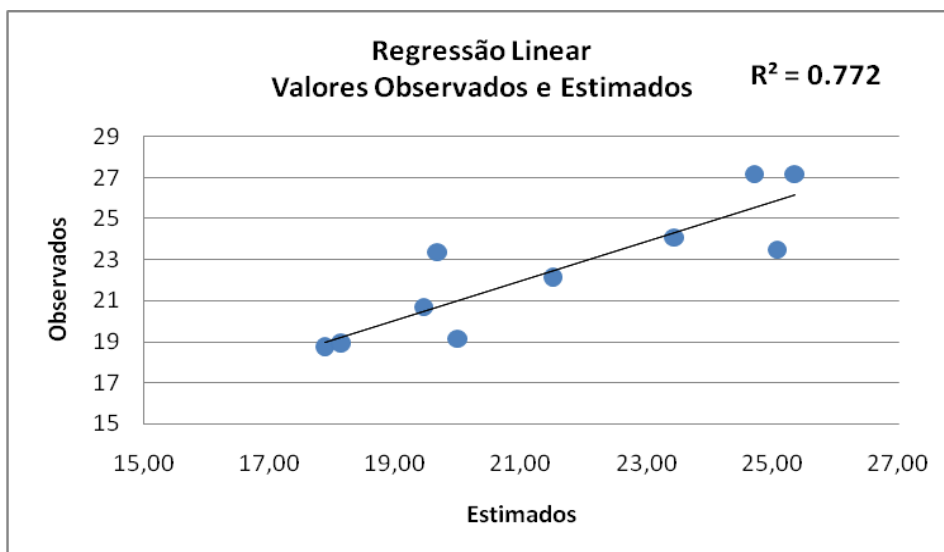


Gráfico 7: Regressão Linear para o Ponto 6

Apesar do erro encontrado para cada ponto, os resultados das simulações se mostraram satisfatórios e respondendo bem ao objetivo de representar através de modelagem a hidrodinâmica e a variável ambiental de temperatura da água. Os gráficos mostraram a tendência em se estabelecer uma coerência entre os dados observados e os dados medidos, justificando a forte relação entre as variáveis mostrada em linha reta.

4.2 NÍVEL TRÓFICO DO RESERVATÓRIO DE SÃO PEDRO

A partir das coletas de água e análises laboratoriais, realizadas de julho de 2010 à junho de 2011, foi analisado e monitorado o parâmetro fósforo total para avaliar a fertilização deste manancial.

As amostras foram coletadas, armazenadas sob baixa temperatura e transportadas para o laboratório, onde as análises foram realizadas conforme metodologia descrita por Clesceri (2000).

Os resultados dessas análises possibilitaram tecer considerações importantes para o reservatório de São Pedro, tomando o grau de trofia como parâmetro para discutir a influência da ocupação humana por conta da acelerada especulação imobiliária que acomete a área de entorno deste manancial.

O IET utilizado permite estimar o estado trófico de um corpo hídrico com uma variável isoladamente, sendo que neste caso, foi adotado o índice a partir dos valores monitorados do fósforo total, no período de Julho de 2010 a Junho de 2011, tomando as

médias de todos os pontos por campanha. Fato importante de destacar é a ocorrência de concentrações de fósforo total praticamente idênticas em todos os pontos por mês, tanto em pontos de cursos lóticos (pontos 2 e 3) e cursos lênticos (pontos 1, 4, 5 e 6). Os resultados da aplicação do índice de estado trófico de Carlson utilizando a variável fósforo total são apresentados na Tabela 13.

Tabela13: Resultados do IET de Carlson

IET de Carlson		
Jul/10	59.89	Eutrófico
Ago/10	59.38	Eutrófico
Set/10	58.00	Eutrófico
Out/10	52.99	Eutrófico
Dez/10	52.99	Eutrófico
Jan/11	54.39	Eutrófico
Fev/11	57.20	Eutrófico
Abr/11	57.20	Eutrófico
Mai/11	59.94	Eutrófico
Jun/11	59.49	Eutrófico

Os valores encontrados para o IET de acordo com Carlson (1977) apresentaram um cenário de ambiente eutrófico ao longo de todos os meses de monitoramento, caracterizando um período de constância no aporte de fósforo total na extensão do reservatório e nos seus tributários. Nos meses de Julho e Agosto de 2010 e nos meses de Maio e Junho de 2011 a classificação do reservatório se aproxima da hipereutrófica (índices próximos de 60). De forma análoga, os resultados encontrados segundo o IET de Carlson modificado por Toledo et al. (1983) apresentam uma dominância do estado oligotrófico caracterizando um ambiente de baixa produtividade, porém com apontamentos para intercalação do estado eutrófico ao longo do ano, quando considerada a repetição desses fenômenos de maneira seqüencial, conforme mostra a Tabela 14.

Tabela 14: Resultados do IET de Carlson modificado por Toledo et. al (1983)

IET de Toledo et al.		
Jul/10	86.50	Eutrófico
Ago/10	61.65	Eutrófico
Set/10	44.73	Mesotrófico
Out/10	26.57	Oligotrófico
Dez/10	26.57	Oligotrófico
Jan/11	29.81	Oligotrófico
Fev/11	39.85	Oligotrófico
Abr/11	39.85	Oligotrófico
Mai/11	96.55	Eutrófico
Jun/11	64.56	Eutrófico

A representação da classificação de Carlson modificada por Toledo et. al (1983), baseada no período monitorado, é a mais adequada a este reservatório não só por estar inserido em meio tropical, mas por enquadrá-lo em um ambiente oligotrófico á luz de análises comprovando as baixas concentrações de fósforo total. E, portanto, a classificação de Carlson (1977) é pouco representativa por não alterar o enquadramento quando da alternância dos valores das concentrações de fósforo total. O Gráfico 8 mostra as diferenciações dos valores dos índices quando do enquadramento das classes segundo os dois índices mencionados.

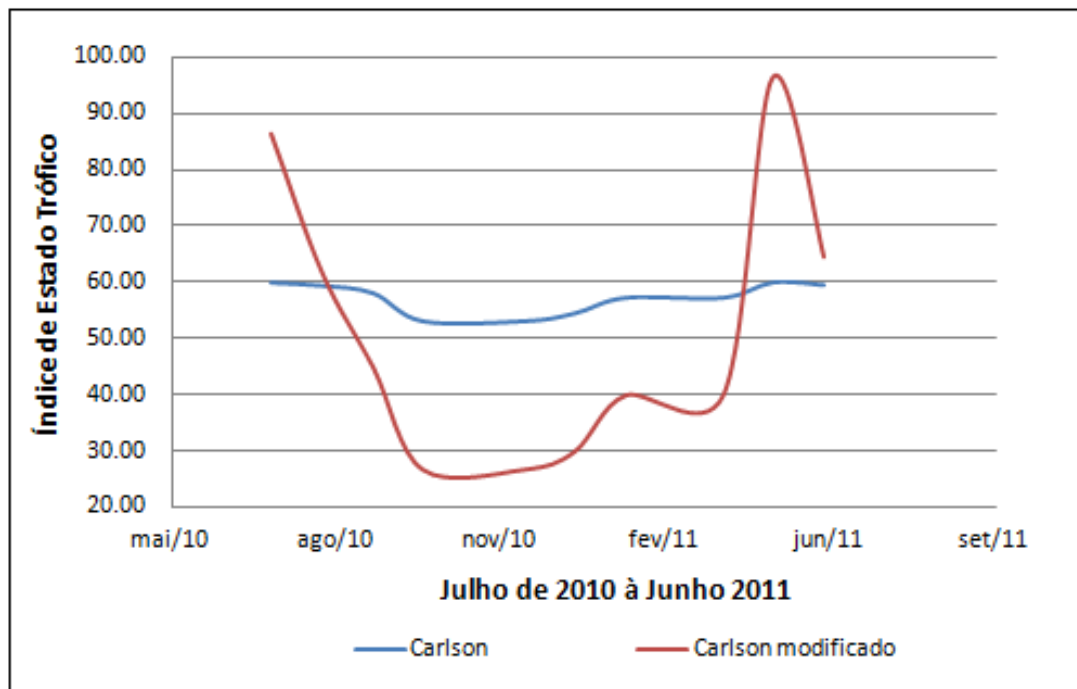


Gráfico 8: Variação dos IETs determinantes das classes

O reservatório de São Pedro é um ecossistema aquático que apresentou um grau de trofia baixo e características mais comumente verificadas em ambiente lótico, como por exemplo, a saturação de oxigênio dissolvido elevada em grande parte do período monitorado. Apresentou situações de renovação constante de água e de oxigênio suficientes mantendo um aspecto qualitativo em ambiente lêntico. Fato também característico de ambiente pouco profundo. O parâmetro oxigênio dissolvido será melhor discutido mais adiante.

Os resultados obtidos, para o período estudado, revelam o reservatório de São Pedro como um ambiente predominantemente pouco produtivo apresentando baixas taxas de fósforo. As análises mostram que, apesar do avanço da ocupação humana por conta da especulação imobiliária no entorno do mesmo, a quantidade do nutriente fósforo na água não apresenta alterações que justifiquem o seu excesso ao longo das análises.

Destarte, o fósforo tem papel relevante na produtividade aquática (eutrofização), o que conseqüentemente pode causar prejuízo a uma água para fins de abastecimento público.

Os ensaios de fósforo total apresentaram mínima amplitude por campanha mensal, o que nos leva a crer que a quantidade de matéria orgânica introduzida (não quantificada) no reservatório não é predominantemente significativa em um dos pontos amostrados em especial para alterar suas concentrações de fósforo total.

De acordo com as classes de cobertura do solo encontradas na BHRSP, já apresentado, juntamente com as idas à campo, foi possível detectar residências próximas aos cursos d'água desta bacia que contribuem para os lançamentos de esgoto doméstico que este reservatório recebe. As concentrações de fósforo total são maiores nos meses de estiagem (entre os meses de maio de agosto) quando o reservatório têm menor volume de água, porém a capacidade de resiliência do mesmo é suficiente para conservar suas condições qualitativas em boa parte do ano.

A ocupação humana próxima a esse corpo hídrico, mesmo com lançamentos de esgotos domésticos *in natura*, não significou necessariamente um constante excesso de nutrientes, que caracterizaria um processo de eutrofização induzida ou provocada pela ação humana.

4.3 APORTE DE FÓSFORO E CLASSES HÍDRICAS

Baseado na concentração de 1,0 g/hab.dia como um valor típico de fósforo total, pode-se afirmar que a contribuição do nutriente fósforo total no reservatório seria de 941 g/dia, considerando que todo o aporte de cada habitante alcance este manancial.

Os ensaios de fósforo total juntamente com as aferições do oxigênio dissolvido na água também permitiram o enquadramento deste corpo hídrico segundo a resolução CONAMA nº 430/2011, que estabelece os seguintes valores para cada um desses parâmetros.

A Tabela 15 apresenta as médias mensais por ponto dos ensaios de fósforo total e o enquadramento das águas a partir desse parâmetro respeitando os pontos de amostragem em ambientes lênticos e lóticos. Considerando a Classe I neste enquadramento pode-se ressaltar a importância de aspectos positivos com relação a qualidade desta água tomando o fósforo total como parâmetro.

Tabela 15: Enquadramento - Fósforo Total (mg/L)

	Grota do Pinto	São Pedro	Classe	Reservatório	Classe
Jul/10	0,5	0,5	acima do VMP	0,5	acima do VMP
Ago/10	0,09	0,09	III	0,09	acima do VMP
Set/10	0,029	0,025	I	0,028	II
Out/10	0,008	0,008	I	0,008	I
Dez/10	0,008	0,008	I	0,008	I
Jan/11	0,01	0,01	I	0,01	I
Fev/11	0,02	0,02	I	0,02	I
Abr/11	0,02	0,02	I	0,02	I
Mai/11	1,0	1,0	acima do VMP	1	acima do VMP
Jul/11	0,11	0,1	I	0,11	I

Porém, ao se trabalhar o enquadramento a partir da concentração de oxigênio dissolvido, que consiste em um parâmetro de suma importância para ocorrência e manutenção da vida aquática, as classes III e IV encontradas nos ambientes lóticos, onde reoxigenação teoricamente ocorreria com maior facilidade, apontam para condições em que a capacidade de resiliência desses corpos hídricos encontra-se muito baixa. As águas do reservatório de São Pedro apresentam elevados valores de oxigênio dissolvido, principalmente por se tratar de um ambiente lêntico onde a reposição desse gás consumido teria maior chance de ser dificultada por diversos fatores explicativos, tais como: tempo de decomposição de matéria orgânica

depositada, revolvimento da massa de água mais lento e presença de macrófitas que pode impedir a incidência da radiação solar de forma significativa.

A Tabela 16 apresenta as oscilações dos valores de oxigênio dissolvido juntamente com a alternância do enquadramento em classes.

Tabela 16: Enquadramento – Oxigênio Dissolvido (mg/L)

	Grota do Pinto	Classe	São Pedro	Classe	Reservatório	Classe
Ago/10	6,09	I	7,12	I	8,7	I
Set/10	3,52	IV	4,18	III	7,56	I
Out/10	2,35	IV	3,16	IV	7,08	I
Dez/10	3,96	IV	2,41	IV	5,58	II
Jan/11	5,15	II	4,23	III	5,75	II
Fev/11	1,26	Baixo	1,28	abaixo	5,14	II
Abr/11	2,66	IV	2,37	IV	6,18	I
Mai/11	3,67	IV	3,35	IV	7,22	I
Jul/11	4,4	III	4,57	III	7,27	I

O enquadramento, segundo a COPAM de 1996, insere o córrego São Pedro na Classe I até as barragens do reservatório de São Pedro, para o período observado, porém apesar do reservatório se manter entre as classes I e II, os córregos nessas condições caracterizam um ambiente muito poluído carecendo de uma atenção para identificar as fontes poluidoras e avaliar as possibilidades de intervenções.

5 CONCLUSÃO

Esta pesquisa conclui que é possível representar a temperatura da água no reservatório de São Pedro a partir de sua modelação com dados climatológicos utilizando o IPH-ECO, pois o clima influencia as condições térmicas de uma água na medida em que, determinado por fatores climáticos, pode ser considerado como “regulador” do ciclo hidrológico.

As temperaturas simuladas, em média pelos três pontos, ficaram em torno de 21,95 °C e as temperaturas observadas, também em média pelos três pontos, ficaram em torno de 22,21 °C. Portanto a representatividade do modelo se mostrou eficiente para o reservatório de São Pedro.

A contribuição dos afluentes se mostrou muito importante para as simulações hidrodinâmicas, pois a variação das vazões limita ou regulariza as temperaturas do reservatório de São Pedro. Por se tratar de um reservatório pequeno, o tempo de residência da água é baixo e, talvez por isso, as temperaturas estejam mais limitadas às vazões dos afluentes caracterizando, assim, uma baixa capacidade deste reservatório de regularização de suas temperaturas. Neste sentido, pode-se concluir que apesar de ter sido utilizado um modelo bidimensional este reservatório poderia ser bem representado por um modelo do tipo concentrado.

As momentâneas diferenças entre os valores observados e simulados se deram devido a impossibilidade de representar fielmente os dados de vazão dos afluentes em curtos intervalos de tempo.

Como as simulações aqui apresentadas não consistem em estabelecer previsões de fenômenos, deve-se registrar que o teste deste modelo no reservatório de São Pedro permitiu a coleta e construção de uma base de dados que poderá ainda ser utilizado no desenvolvimento de pesquisas futuras.

No que tange ao índice de estado trófico, os resultados mostraram uma baixa fertilização do reservatório, com predominância do enquadramento oligotrófico segundo a classificação de Carlson modificada por Toledo. Porém, ao classificar a partir desse índice pode-se perceber a alternância para o estado eutrófico em um dado período do ano e, quando considerado a repetição desses fenômenos, por apresentar características semelhantes as do período de estado oligotrófico, compreende-se equivocadamente como um ambiente inteiramente eutrofizado.

De uma forma geral, a partir dos parâmetros (vazões dos afluentes, oxigênio dissolvido, fósforo total e temperatura superficial da água) considerados em análise neste

trabalho, pode-se dizer que o reservatório de São Pedro possui características de ambiente lótico e representou uma massa homogênea, pois ao longo do período de monitoramento esses parâmetros praticamente não se alteraram ou apresentaram valores mais comuns a águas de rios, ou seja, o acúmulo artificial de água não conseguiu alterar a condição de ambiente lótico para ambiente lêntico.

6. REFLEXÕES FINAIS E RECOMENDAÇÕES

Com os trabalhos de campo pode-se perceber a intensa presença de macrófitas aquáticas cobrindo áreas significativas do reservatório de São Pedro. Essas plantas são importantes componentes estruturais e do metabolismo dos ecossistemas aquáticos tropicais. A partir deste trabalho também pode-se testar, em trabalhos futuros, o efeito da temperatura por conta destas plantas.

A continuidade desse monitoramento servirá de base para fortalecer prognoses ou hipóteses para o planejamento e gestão deste manancial. Além de contribuir para gestão integrada desta bacia, que passa por processos diversificados de ocupação.

A avaliação integrada do comportamento de um ecossistema junto às abordagens geográficas, que analisa a influência do homem sobre a paisagem, constitui em um instrumento poderoso de gestão ambiental. Os dados aqui levantados também se prestarão ao desenvolvimento de inúmeras pesquisas futuras em diferentes fenômenos observados na bacia do reservatório de São Pedro.

Não é pretendido aqui estabelecer um formato ou modelo a ser seguido, mas um exemplo a ser refletido, estudado e aperfeiçoado com perspectivas futuras. Ao se trabalhar com modelagem é importante conhecer a fundo a natureza dos fenômenos, como ocorrem naturalmente. Esta premissa requer o reconhecimento das influências desses fenômenos e como eles se relacionam entre si. Um modelo também deve representar um instrumento de incentivo a reflexões sobre o que ocorre na realidade de um ambiente complexo.

Etapa muito importante para o processo de modelagem em corpos hídricos é a simulação eficiente da hidrodinâmica, o que foi alcançado neste trabalho. A aplicação de um modelo em um ambiente aquático, cuja hidrodinâmica esteja muito bem representada, pode trazer resultados de extrema relevância para as ações de manejo do mesmo. Ou seja, resolvida a hidrodinâmica o modelo teoricamente também estará pronto para simular outros dados de entrada dependendo do objetivo a ser alcançado.

Porém, apesar da realização de muitos trabalhos com modelos que requerem laboratórios, dados monitorados em alta frequência e um arcabouço teórico-metodológico consolidado, os órgãos ambientais competentes, principais planejadores do Brasil, precisam incluir o desafio e a necessidade de conservar seus mananciais para garantir o uso sustentável dos recursos hídricos, desde o planejamento até a operação. Como é o caso de São Pedro, são necessários estudos para gerar informações e, a partir de então, atuar considerando os cenários futuros, principalmente no tocante ao crescimento urbano que, associado a falta de

planejamento, pode ocasionar efeitos ambientais catastróficos, além de agravar as disparidades sociais e perda de qualidade de vida da população.

É sabido que o monitoramento de parâmetros ambientais garante formas de atuação mais precisas quando da ocorrência de eventos espasmódicos, portanto o conhecimento do objeto de estudo em diferentes momentos de maneira organizada é capaz de auxiliar nas perspectivas de novos cenários.

Assim, seguem algumas recomendações:

- Considerar outros parâmetros ambientais como DQO, nitrito, nitrato e amônia, dentre outros, com relação direta aos tipos de uso do solo que influenciam na qualidade da água.
- Inserir simulações de fitoplâncton para conhecer e discutir a sua dinâmica buscando compreender as suas relações com as comunidades aquáticas.
- Inserir simulações dos nutrientes fósforo e nitrogênio para representar através da modelagem o grau de fertilização deste manancial.
- Avaliar as alterações ocorridas com o parâmetro oxigênio dissolvido nos córregos São Pedro e Grota do Pinto, não dependendo de lançamentos de esgoto in natura.
- Identificar riscos em potencial para o abastecimento público, tendo em vista a vulnerabilidade do manancial.
- Análise e interpretação da influência de macrófitas presentes em períodos extensos ao longo do ano no reservatório.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDREOLI, C. V.; DALARMI, O.; LARA, A. I.; ANDREOLI, F. N. “Os Mananciais de Abastecimento do Sistema Integrado da Região Metropolitana de Curitiba – RMC”. **SANARE – Revista Técnica da Sanepar**. Curitiba: V.12, nº12, 1999.

AZEVEDO NETO, J. M. “Novos conceitos sobre eutrofização”. **Revista DAE**, 1988.

BARUQUI, A. M. & FERNANDES, M. R. “Práticas de conservação do solo”. Belo Horizonte. **Informe Agropecuário**. Belo Horizonte: V. 11, nº 128, 1985.

BICUDO, C. E. M. & BICUDO, D. C. **Amostragem em Limnologia**. São Carlos: RiMa, 2004.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **RESOLUÇÃO nº 430 do CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente**. Brasília (DF): MMA, 2011.

BRASIL. Política Nacional dos Recursos Hídricos. **Lei nº 9.433 de 1997**. MMA/SRH, 1997.

CARLSON, R. E. “A trophic state index for lakes”. **Limnology and Oceanography**. V. 22, nº 2, 1977.

CASTRO, M. M. **Modelação matemática de lagos e reservatórios: caso do reservatório Billings**. São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo - Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária, 2010 (Dissertação de Mestrado).

CESAMA. Companhia de Saneamento Municipal de Juiz de Fora. Disponível em: www.cesama.br Acessado em Abril de 2011.

CETESB. Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental. Disponível em: http://www.cetesb.sp.gov.br/mortandade/causas_temperatura.php Acessado em Setembro de 2011.

CHAPRA, S. C. “A Modelling Framework for Simulating River and stream water quality”. Version 2.04: **Documenttation and users manual**. Civil and Environmental Dept., Tufts University. Medford, 2006.

CLESCERI, L. S; GREENBERG, A. E; TRUSSELL, R. R; FRASON, M. A. H. “Standard Methods for the Examination of Water and Wasterwater”. **American Public Health Association**. Washington, 2000.

COPAM. Conselho Estadual de Política Ambiental de Minas Gerais. Disponível em: <http://www.siam.mg.gov.br/sla/download.pdf?idNorma=113> Acessado em Setembro de 2011.

COPPE/UFRJ. Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro. Manual do Usuário do SisBaHia. Disponível em: http://www.sisbahia.coppe.ufrj.br/Arquivos_Gerais/Modelo%20de%20Qualidade%20de%20Agua.htm#_Temperatura: Acessado em Setembro de 2011.

CHRISTOFOLLETI, A. **Geomorfologia**. São Paulo: Blucher, 1980.

CUNHA, L. H. & COELHO, M. C. N. “Política e Gestão Ambiental”. In: CUNHA, S. B. & GUERRA, A. J. T. (org.) **A questão ambiental: diferentes abordagens**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2009.

ESTEVES, F. A. **Fundamentos de Limnologia**. Rio de Janeiro: Interciência, 1998.

EUCLYDES, H. P. **Saneamento Agrícola. Atenuação de Cheias: metodologia e projeto**. Belo Horizonte: RURAL MINAS, 1987.

FERNANDES, M. R. & SILVA, J. C. **Programa Estadual de Manejo de Sub-Bacias Hidrográficas: Fundamentos e estratégias**. Belo Horizonte: EMATER-MG, 1994.

FRAGOSO Jr, C. R. **Modelagem tridimensional da Estrutura Trófica em Ecossistemas Aquáticos Continentais**. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS, 2009. (Tese de Doutorado).

FRAGOSO Jr. C. R.; FERREIRA, T. F. & MARQUES, D. M. **Modelagem Ecológica em Ecossistemas Aquáticos**. São Paulo: Oficina de Textos, 2009.

GUERRA, A. J. T. et. al. **Dicionário Brasileiro de Ciências Ambientais**. Rio de Janeiro: Thex Editora, 1999.

HODGES, B.; DALIMORRE, C. “Estuary, Lake and Coastal Ocean Model: Elcom”. **Centre for Water Research**, Science Manual. V.2.2, 2010.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Disponível em: <http://www.censo2010.ibge.gov.br/sinopseporsetores/default.htm?nivel=st> Acessado em Setembro de 2010.

IETC. Centro Internacional de Tecnologias Ambientais. **Planejamento e Gerenciamento de Lagos e Reservatórios**: uma abordagem integrada ao problema da eutrofização. São Carlos: RiMa, 2001.

LATUF, M. O. “Diagnóstico das águas superficiais do Córrego São Pedro, Juiz de Fora/MG”. In: **Revista Geografia UEL**. Londrina: UEL, V. 13, nº 1, 2004.

LIMA, M. F. **Elcom como ferramenta para análise hidrodinâmica e interpretação de dados ecológicos**. Juiz de Fora: PGECOL/UFJF, 2010 (Dissertação de Mestrado).

MACHADO, P. J. O. “Recursos Hídricos: uso e planejamento”. In: **Revista GEOSUL**. Florianópolis: UFSC, V. 16, nº 31, 2001.

MACHADO, P. J. O. (org.) **Diagnóstico Físico-Ambiental da Bacia Hidrográfica do Córrego São Pedro: Um exercício acadêmico de Gestão dos Recursos Hídricos**. Ubá: Geographica, 2010.

MACHADO, P. J. O.; CARVALHO, A. C. B. & SOUZA, F. F. C. “Utilização do parâmetro oxigênio dissolvido (OD) como indicador da qualidade das águas do córrego São Pedro, em Juiz de Fora/MG”. **IV Fórum Ambiental da Alta Paulista**. Tupã: V. IV, 2008.

MOOIJ, W. M.; TROLLE, D.; JEPPESEN, E.; ARHONDITSIS, G.; BELOLIPETSKY, P. V.; CHITAMWEBWA, D. B. R.; DEGERMENDZHY, A. G.; DE ANGELIS, D. L.; DOMIS, L. N. S.; DOWNING, A. S.; ELLIOTT, J. A.; FRAGOSO JR, C. R.; GAEDKE, U.; GENOVA, S.; GULATI, R. D.; HAKANSON, L.; HAMILTON, D. P.; HIPSEY, M. R.; HOEN, J.; HULSMANN, S.; LOS, F. J.; MAKLER-PICK, V.; PETZOLDT, T.; PROKOPKIN, I. G.; RINKE, K.; SCHEP, S. A.; TOMINAGA, K.; DAM, A. A. E. V.; NES, H. V.; WELLS, S. A.; JANSE, J. H. “Challenges and opportunities for integrating lake ecosystem modelling approaches”. **Aquatic Ecology**. V.44, 2010.

MOTA, S. **Introdução à Engenharia Ambiental**. Rio de Janeiro: ABES, 1997.

NASCIMENTO, F. R. “Conceitos e teorias sobre desertificação em bacias hidrográficas – subsídios para abordagens metodológicas”. **VI Seminário Latino Americano de Geografia Física**. II Seminário Ibero Americano de Geografia Física Universidade de Coimbra. Coimbra, 2010.

ODUM, E. P. & BARRETT, G. W. **Fundamentos de Ecologia**. São Paulo: Cengage Learning, 2007.

PREFEITURA DE JUIZ DE FORA. **Plano Diretor de Desenvolvimento Urbano de Juiz de Fora**. Juiz de Fora: FUNALFA, 1999.

RIBEIRO, W. C. **Geografia Política da Água**. São Paulo: Annablume, 2008.

RIBEIRO, C. B. M. **Sensoriamento remoto aplicado à detecção de mudanças na cobertura do solo de uma bacia hidrográfica**. Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ, 2002 (Dissertação de Mestrado).

ROSMAN, P. C. C.; MASCARENHAS, F. C. B.; MIGUEZ, M. G.; CAMPOS, R. O.; EIGER, S. **Métodos Numéricos em Recursos Hídricos - 5**. Rio de Janeiro: ABRH, 2001.

SETTI, A. A.; LIMA, J. E. F. W.; CHAVES, A. G. M.; PEREIRA, I. C. **Introdução ao Gerenciamento de Recursos Hídricos**. Brasília: Agência Nacional de Energia Elétrica; Agência Nacional de Águas, 2001.

SCHIEL, D.; MASCARENHAS, S.; VALEIRAS, N. & SANTOS, S. A. M. (Orgs.). **O estudo de bacias hidrográficas – uma estratégia para educação ambiental**. São Carlos: RIMA, 2003.

SOUZA, A. F. E. **O Processo de Degradação da sub-bacia do Ribeirão Vidoca e as Transformações Físico-Ambientais relacionadas com os Aspectos de Urbanização**. Campinas: Instituto de Geociências da Universidade Estadual de Campinas/Unicamp, 2000 (Dissertação de Mestrado).

TOLEDO Jr., A. P.; TALARICO, M.; CHINEZ, S. J.; AGUDO, E. G. “A aplicação de modelos simplificados para a avaliação e processo de eutrofização em lagos e reservatórios”. In: **Anais do 12º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária**, 1983.

TUCCI, C. E. M. **Hidrologia: Ciência e Aplicação**. ABRH. Porto Alegre: Ed. Universidade/UFRGS, 2001.

TUNDISI, J. G. (org.). **Limnologia e Manejo de Represas**. Série: Monografias em Limnologia. Volume I / Tomo 1. USP/CRHEA/ACIESP: São Paulo, 1988.

VON SPERLING, M. **Estudos e Modelagem da Qualidade da Água de Rios**. Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental (UFMG): Belo Horizonte, 2007.

_____. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. Belo Horizonte: DESA-UFMG, 2006.