

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRÁULICAS

**MODELO DE QUALIDADE DA ÁGUA INTEGRADO A UM SISTEMA DE  
INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS: APLICAÇÃO NA BACIA DO RIO DOCE**

**REGINA CAMARA LINS**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental.

**Orientador: Carlos André Bulhões Mendes**

**Co-orientador: Carlos Ruberto Fragoso Júnior**

**Banca Examinadora**

Prof. Dr. Marllus Gustavo Ferreira Passos das Neves (CTEC-UFAL)

Prof. Dr. André Luiz Lopes da Silveira (IPH-UFRGS)

Prof. Dr. David M. L. da Motta Marques (IPH-UFRGS)

Porto Alegre, novembro de 2011

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRÁULICAS**

**MODELAGEM DE QUALIDADE DA ÁGUA INTEGRADA A UM SISTEMA  
INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS: APLICAÇÃO NA BACIA DO RIO DOCE**

REGINA CAMARA LINS

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental.

Porto Alegre, novembro de 2011.

Banca Examinadora

---

Professor e orientador Carlos André B. Mendes, Dr.  
Universidade Federal do Rio Grande do Sul

---

Prof. Marllus Gustavo Ferreira Passos das Neves, Dr.  
Universidade Federal de Alagoas

---

Prof. André Luiz Lopes da Silveira, Dr.  
Universidade Federal do Rio Grande do Sul

---

Prof. David M. L. da Motta Marques, Dr.  
Universidade Federal do Rio Grande do Sul

## **Agradecimentos**

Agradeço a meus pais pela educação básica oferecida em bons colégios e pelo incentivo dado a continuação da minha formação acadêmica.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPQ pela bolsa de estudos concedida.

Aos professores do IPH por toda sabedoria e experiência partilhada.

Aos colegas alagoanos que residem ou passaram pelo Sul do País, começando por Teresa e Rodrigo que me aceitaram em sua casa. Aos ex-Ufal e "IPHnianos" que tornaram minha chegada em Porto Alegre mais animada e familiar: Teresa, Nilson, Diogo, Cris e Fernando. Aos que chegaram depois de mim: Thiago, Fábio, Rosane e Paulo. Ao casal de todas as horas Karina e Sidnei, por tudo.

Aos colegas de turma em especial a Lidiane, Angélica e Néia pela convivência mais intensa e parceria. E aos demais colegas de convivência, aqui representados por Dani, Petry, Marcus e Franci, Ane e Róger, Leandro e Jana.

Um último agradecimento, mais que especial, vai para Ruberto por todo apoio, carinho e participação em todos os momentos vividos desde então. A quem dedico esta e futuras conquistas da minha vida.

## Resumo

A crescente produção de carga orgânica e de nutrientes em bacias hidrográficas tem levado, historicamente, rios a significativas mudanças nos padrões de qualidade da água, na diversidade e riqueza biológica e nos usos nobres de suas águas.

Neste trabalho, a qualidade da água na bacia do rio Doce foi avaliada através de um modelo hidrológico integrado a um SIG, denominado SGAG (Sistema Georeferenciado de Apoio ao Gerenciamento). O sistema foi capaz de analisar o efeito de lançamentos múltiplos de efluentes na qualidade da água do rio Doce no período de estiagem. O modelo foi calibrado satisfatoriamente utilizando os dados de monitoramento ao longo do curso do rio Doce. Cenários de planejamento também foram estabelecidos, simulados e avaliados. As simulações mostraram que as medidas propostas para os cenários de planejamento promovem uma significativa redução das concentrações dos poluentes em comparação com o cenário atual, principalmente no cenário de tratamento universal.

O modelo hidrológico em ambiente SIG proposto mostrou ser uma ferramenta promissora e simples para investigação da qualidade da água de bacias hidrográficas sujeitas a lançamentos pontuais de efluentes.

Palavras-chave: Modelagem; rios; SIG.

## **Abstract**

The increase of organic and nutrient loading in watersheds have led to significant changes in water quality patterns in rivers.

In this work we evaluated the water quality of the Basin of River Doce basin through an hydrologic model integrated with GIS, called SGAG (Georeferencing Management Support System). The model was calibrated using water quality monitoring data throughout River Doce extension. Moreover planning scenarios were established, simulated and evaluated. The simulations indicated that the corrective measures in the planning scenarios promoted a significant decrease of the pollutant concentrations in comparison with the current situation.

The hydrological model coupled with GIS environment have shown to be a simple and a promising tool to investigating water quality in basins subject to point sources of pollution.

Keywords: Hydrologic models; river; water quality; GIS

# Sumário

<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	<b>8</b>
<b>LISTA DE TABELAS</b> .....	<b>10</b>
<b>LISTA DE SIGLAS E ABREVIACÕES</b> .....	<b>11</b>
<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>13</b>
<b>2. OBJETIVOS</b> .....	<b>15</b>
2.1 OBJETIVO GERAL.....	15
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	15
<b>3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>16</b>
3.1 ENQUADRAMENTO E CLASSIFICAÇÃO DOS CORPOS D'ÁGUA.....	16
3.3 MODELOS HIDROLÓGICOS PARA AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DA ÁGUA.....	19
3.4 INTEGRAÇÃO DE MODELOS HIDROLÓGICOS COM SIG.....	23
<b>4. MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>26</b>
4.1 ÁREA DE ESTUDO.....	27
4.2 PRÉ-PROCESSAMENTO.....	31
4.3 DISPONIBILIDADE HÍDRICA E QUALIDADE DE ÁGUA.....	36
4.4 INTERFACE DO SGAG.....	41
4.5 PROCESSOS DE PROPAGAÇÃO DE QUALIDADE DA ÁGUA NA REDE ESQUEMÁTICA.....	43
4.6 SAÍDAS DO SISTEMA.....	44
4.7 CALIBRAÇÃO DO MODELO PARA A BACIA DO RIO DOCE.....	45
4.8 DESCRIÇÃO DOS CENÁRIOS DE SIMULAÇÃO.....	47
<b>5. RESULTADOS</b> .....	<b>49</b>
5.1 DISPONIBILIDADE HÍDRICA E QUALIDADE DA ÁGUA.....	49
5.2 CALIBRAÇÃO.....	51
5.3 CENÁRIOS DE SIMULAÇÃO.....	54
<b>6. DISCUSSÃO</b> .....	<b>61</b>
<b>7. RECOMENDAÇÕES</b> .....	<b>65</b>
<b>ANEXOS</b>	
A. DISPONIBILIDADE HÍDRICA.....	66
B. VAZÕES EFLUENTES E CARGAS POLUIDORAS.....	83

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....89

## Lista de Figuras

FIGURA 1 - ELEMENTO COMPUTACIONAL E BALANÇO DE MASSA NO SISTEMA (BROWN E BARNWELL, 1987).....	20
FIGURA 2 – TIPOS DE INTEGRAÇÃO DE MODELOS HIDROLÓGICOS COM SISTEMAS DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS. (FONTE: SUI E MAGGIO, 1999).....	25
FIGURA 3 – FLUXOGRAMA DA METODOLOGIA ADOTADA NO ESTUDO.....	27
FIGURA 4 – LOCALIZAÇÃO DA BACIA DO RIO DOCE. (FONTE: IGAM, 2010). ....	28
FIGURA 5 – UNIDADES DE ANÁLISE DA BACIA DO RIO DOCE. (FONTE: IGAM, 2010). ....	29
FIGURA 6 – POPULAÇÃO URBANA DOS MUNICÍPIOS DA BACIA DO RIO DOCE. (FONTE: IGAM, 2010). ....	30
FIGURA 7 – ALGUMAS ETAPAS PARA GERAÇÃO DA REDE DE DRENAGEM DA BACIA DO RIO DOCE. (A) OBTENÇÃO DO MDE; (B) ELABORAÇÃO DAS DIREÇÕES DE FLUXO; (C) SEGMENTAÇÃO DOS TRECHOS; (D) OBTENÇÃO DAS MINI-BACIAS; (E) OBTENÇÃO DOS POLÍGONOS DAS MINIBACIAS, E (F) ELABORAÇÃO DAS LINHAS DE DRENAGEM.....	35
FIGURA 8 – ESTAÇÕES FLUVIOMÉTRICAS DE REFERÊNCIA NA BACIA DO RIO DOCE. ....	37
FIGURA 9 - ESQUEMA DA ESTRUTURA DO SISTEMA INTEGRADA AO AMBIENTE ARCGIS. AS FERRAMENTAS DE ANÁLISE SÃO PROGRAMADAS EM VBA UTILIZANDO OS COMPONENTES ARCOBJECTS.....	41
FIGURA 10 – INTERFACE DO MODELO: INSERÇÃO DE USUÁRIO (SEDE MUNICIPAL).....	42
FIGURA 11 – CONFIRMAÇÃO DO USUÁRIO (SEDE MUNICIPAL) INSERIDO E CARACTERÍSTICAS IMEDIATAMENTE A JUSANTE DO LANÇAMENTO. ....	43
FIGURA 12 - LOCALIZAÇÃO DOS PONTOS DE MONITORAMENTO AO LONGO DO RIO DOCE UTILIZADOS PARA A CALIBRAÇÃO DO MODELO HIDROLÓGICO DE QUALIDADE DE ÁGUA. ....	46
FIGURA 13 – REPRESENTAÇÃO <i>BOXPLOT</i> UTILIZADA PARA CALIBRAÇÃO DO MODELO DE QUALIDADE DA ÁGUA. FONTE: UNEP (1995). ....	47
FIGURA 14 – LOCALIZAÇÃO DAS SEDES MUNICIPAIS E DAS ETE’S PARA O CENÁRIO ATUAL E FUTURO. ....	48
FIGURA 15 – FLUVIOGRAMA DAS VAZÕES MÉDIAS MENSAIS PARA A SUB-BACIA DO RIO PIRANGA. ....	49
FIGURA 16 – CURVA DE PERMANÊNCIA DE VAZÕES MÉDIAS MENSAIS PARA A SUB-BACIA DO RIO PIRANGA.....	50
FIGURA 17 - COMPARAÇÃO DAS CONCENTRAÇÕES DE COLIFORMES TERMOTOLERANTES ESTIMADAS PELO MODELO COM OS DADOS OBSERVADOS NO PERÍODO DE ESTIAGEM AO LONGO DA CALHA DO RIO DOCE (DE MONTANTE PARA JUSANTE). OS DADOS OBSERVADOS SÃO APRESENTADOS COMO <i>BOXPLOT</i> E FORAM POSICIONADOS NO GRÁFICO DE ACORDO COM A SUA LOCALIZAÇÃO NO RIO DOCE. ....	52
FIGURA 18 - COMPARAÇÃO DAS CONCENTRAÇÕES DE FÓSFORO TOTAL ESTIMADAS PELO MODELO COM OS DADOS OBSERVADOS NO PERÍODO DE ESTIAGEM AO LONGO DA CALHA DO RIO DOCE (DE MONTANTE PARA JUSANTE). OS DADOS OBSERVADOS SÃO APRESENTADOS COMO <i>BOXPLOT</i> E FORAM POSICIONADOS NO GRÁFICO DE ACORDO COM A SUA LOCALIZAÇÃO NO RIO DOCE.....	53
FIGURA 19 - COMPARAÇÃO DAS CONCENTRAÇÕES DE DBO ESTIMADAS PELO MODELO COM OS DADOS OBSERVADOS NO PERÍODO DE ESTIAGEM AO LONGO DA CALHA DO RIO DOCE (DE MONTANTE PARA JUSANTE). OS DADOS OBSERVADOS SÃO APRESENTADOS COMO <i>BOXPLOT</i> E FORAM POSICIONADOS NO GRÁFICO DE ACORDO COM A SUA LOCALIZAÇÃO NO RIO DOCE. ....	53

*Modelo de qualidade da água integrado a um SIG: Aplicação na bacia do rio Doce - 9*

---

FIGURA 20 – CLASSIFICAÇÃO EM TERMOS DE COLIFORMES TERMOTOLERANTES CONSIDERANDO A VAZÃO DE DILUIÇÃO COMO SENDO A $Q_{95}$ E OS CENÁRIOS DE: (A) TRATAMENTO FUTURO; E (B) TRATAMENTO UNIVERSAL. ....	56
FIGURA 21 – CLASSIFICAÇÃO EM TERMOS DE $DBO_5$ CONSIDERANDO A VAZÃO DE DILUIÇÃO COMO SENDO A $Q_{95}$ E OS CENÁRIOS DE: (A) TRATAMENTO FUTURO; E (B) TRATAMENTO UNIVERSAL. ....	57
FIGURA 22 – CLASSIFICAÇÃO EM TERMOS DE FÓSFORO TOTAL CONSIDERANDO A VAZÃO DE DILUIÇÃO COMO SENDO A $Q_{95}$ E OS CENÁRIOS DE: (A) TRATAMENTO FUTURO; E (B) TRATAMENTO UNIVERSAL. ....	58
FIGURA 23 – PERFIL LONGITUDINAL DA CONCENTRAÇÃO DE COLIFORMES TERMOTOLERANTES EM INDIVÍDUOS/100ML AO LONGO DO RIO DOCE (DE MONTANTE PARA JUSANTE), CONSIDERANDO A $Q_{95}$ COMO VAZÃO DE REFERÊNCIA. ....	59
FIGURA 24 – PERFIL LONGITUDINAL DA CONCENTRAÇÃO DE $DBO_5$ EM MG/L AO LONGO DO RIO DOCE (DE MONTANTE PARA JUSANTE), CONSIDERANDO A $Q_{95}$ COMO VAZÃO DE REFERÊNCIA. ....	59
FIGURA 25 – PERFIL LONGITUDINAL DA CONCENTRAÇÃO DE FÓSFORO TOTAL EM MG/L AO LONGO DO RIO DOCE (DE MONTANTE PARA JUSANTE), CONSIDERANDO A $Q_{95}$ COMO VAZÃO DE REFERÊNCIA. ....	60

## Lista de Tabelas

TABELA 1 - PADRÕES DOS CORPOS DE ÁGUA DOCE (BRASIL, 2005). .....	18
TABELA 2 – SUB-BACIAS E ESTAÇÕES FLUVIOMÉTRICAS DE REFERÊNCIA UTILIZADAS NA BACIA DO RIO DOCE. FONTE: IGAM, 2010.....	38
TABELA 3. VALORES DE CARGA <i>PER CAPITA</i> DAS VARIÁVEIS DE QUALIDADE DA ÁGUA (FONTE: VON SPERLING, 1997). .....	39
TABELA 4 – PORCENTAGEM DE ATENDIMENTO E TRATAMENTO DE ESGOTO DAS ETE’S EM FUNCIONAMENTO, CONSIDERANDO O CENÁRIO DE DIAGNÓSTICO, NA BACIA DO RIO DOCE (IGAM, 2010).....	40
TABELA 5. DISPONIBILIDADE HÍDRICA EM CADA SUB-BACIA DA BACIA DO RIO DOCE. ....	51

## **Lista de Siglas e Abreviações**

**ANA** - Agência Nacional de Águas

**ArcGIS** – Programa de Informação Geográfica

**ArcGrid** – Formato de arquivo raster do ArcGis

**ArcHydro** – Conjunto de ferramentas que operam internamente ao ArcGIS para extrair informações uteis a modelagem hidrológica a partir de Modelos Digitais de Elevação

**ArcObjects** – São componentes de programação do ArcGIS que usa linguagem VBA

**ArcStorm** – Pacote de armazenamento e gerenciamento de dados do ArcGIS

**ASCII** – Formato de arquivo texto

**CBH Doce** – Comitê da Bacia Hidrográfica do rio Doce

**CONAMA** - Conselho Nacional de Meio Ambiente

**D8** - *Deterministic Eight Neighbours*

**DBO** - Demanda Bioquímica de Oxigênio

**DO1** - Comitê da Bacia do Rio Piranga

**DO2** - Comitê da Bacia do Rio Piracicaba

**DO3** - Comitê da Bacia do Rio Santo Antônio

**DO4** - Comitê da Bacia do Rio Suaçuí Grande

**DO5** - Comitê da Bacia do Rio Caratinga

**DO6** - Comitê da Bacia do Rio Manhuaçu

**ES** – Espírito Santo

**ETE** - Estação de Tratamento de Esgotos

**EUA** – Estados Unidos da América

**HEC-GeoRAS** – Integração do modelo HEC-RAS com SIG através de um módulo especial desenvolvido em ArGIS

**HEC-RAS** – Modelo computacional para modelagem hidráulica e hidrológica

**Hidroweb** – Sistemas de informações hidrológicas mantido pela ANA

**HydroID** – Número identificador de elementos vetoriais

**IBGE** – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

**IEMA** - Instituto Estadual de Meio Ambiente do Estado do Espírito Santos

**IGAM** - Instituto Mineiro de Gestão das Águas

**IPH** – Instituto de Pesquisas Hidráulicas

**SGAG** – Sistema Georeferenciado de Apoio ao Gerenciamento

**KINEROS** - Modelo Hidrológico de qualidade da água (*KINematic runoff and EROSION model*)

**MDE** – Modelo Digital de Elevação

**MG** – Minas Gerais

**MNT** – Modelo Numérico do Terreno

**ModFlow** – Modelo de água subterrânea

**NextDownID** – Número identificador do trecho a jusante

**PIRH** - Plano Integrado de Recursos Hídricos

**PNRH** - Política Nacional de Recursos Hídricos

**PRH** - Planos de Recursos Hídricos

**Q<sub>MLT</sub>** - Vazão média de longo termo

**Q<sub>95</sub>** - Vazão de referência mínima com 95% de garantia de ocorrência no tempo

**QUAL2E** – Modelo de Qualidade da água em rios

**QUAL2R** – Interface gráfica do modelo Qual2E

**RiverCAD** - Software sofisticado de modelagem em rio com um mecanismo interno de CAD

**RiverTools** – Ferramenta do HEC-RAS para extrair características hidráulicas de rios

**RM1** – Modelo matemático de outorga e cobrança pelo uso da água

**SAD-IPH** – Sistema de apoio à Decisão desenvolvido no IPH

**SIG** - Sistema de Informações Geográficas

**SIMCAT** – Modelo Hidrológico de qualidade da água

**SNIS** – Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento

**SRTM** – *Shuttler Radar Topographic Mission*

**SWAT** - Modelo Hidrológico de qualidade da água

**UFRGS** – Universidade Federal do Rio Grande do Sul

**UNEP** - *United Nations Environmental Programme*

**UPGRHs** - Unidades de Planejamento e Gestão dos Recursos Hídricos

**VBA** - *Visual Basic for Applications*

**WASP** - Modelo Hidrológico de qualidade da água (*Soil Water Assessment Tool*)

# 1. Introdução

Existe uma crescente preocupação relacionada à degradação da qualidade da água em rios promovida pelo aumento gradual da produção de carga orgânica e de nutrientes por atividades antrópicas, as quais geram fontes de poluição pontuais (e.g. lançamentos de esgotos domésticos e industriais) e difusas (e.g. cargas agrícolas) nas bacias hidrográficas (Chapra, 1997). Uma estratégia bem conhecida que visa simplificar as interações e processos em rios para obter entendimento sobre seu comportamento quando sujeito a perturbações é a modelagem matemática (Tucci, 1998). Esta técnica permite avaliar a reação do sistema frente a diferentes forçantes, auxiliando o gestor na tomada de decisões e no gerenciamento.

Modelos hidrológicos unidimensionais são largamente empregados para quantificar o efeito do impacto de efluentes na qualidade da água de rios (e.g. HEC-RAS, QUAL2E, SWAT, KINEROS, WASP e SIMCAT). Uma revisão geral do estado da arte da modelagem de qualidade da água em rios pode ser encontrada em Rauch et al. (1998a). Dentre esta variedade de modelos, destacam-se os desenvolvimentos mais recentes que buscam utilizar um ambiente altamente automatizado e um sistema de informações inteligente, tal como um Sistema de Informação Geográfica (SIG). Esta tecnologia permite reunir informações espacialmente fragmentadas e, principalmente, auxiliar gestores no processo de tomada de decisão, uma vez que ela admite um(a): (a) maior facilidade no compartilhamento de informações; (b) análise mais objetiva e um maior entendimento dos resultados; (c) menor custo para elaboração de saídas gráficas; (d) maior facilidade na identificação de padrões; dentre outros (Lee & White, 1992; Srinivasan & Arnold, 1994; Sui & Maggio, 1999; Halls, 2003; Ruelland et al., 2007; Assaf & Saadeh, 2008).

A avaliação da qualidade da água em rios requer a identificação de todas as fontes de poluição a montante de um determinado trecho. Além disso uma série de procedimentos de geoprocessamento é necessária, o que pode tornar o processo de análise pouco ágil e razoavelmente penoso. Isto significa que diante de um novo lançamento, praticamente é realizado um novo estudo de disponibilidade hídrica e de qualidade da água, o qual pode demandar bastante esforço aos órgãos gestores. Desta forma, identifica-se um alto potencial de sistematização deste processo no

próprio ambiente de SIG, utilizando ferramentas já disponíveis e complementando estas com algumas funções programadas especificamente para os estudos de qualidade da água em bacias hidrográficas (Correia et al. 1998).

O objetivo deste estudo foi analisar a aplicabilidade de um modelo hidrológico integrado a um SIG para avaliação do efeito distribuído de lançamentos pontuais de efluentes urbanos na qualidade da água da bacia do rio Doce, com a finalidade de facilitar as análises técnicas prévias necessárias para tomada de decisões, considerando o enquadramento proposto no Plano Integrado de Recursos Hídricos da bacia do rio Doce (IGAM, 2010).

## **2. Objetivos**

### **2.1 Objetivo Geral**

Este trabalho tem o objetivo de analisar a aplicabilidade de um modelo hidrológico de qualidade de água integrado a um SIG para avaliação do efeito distribuído de lançamentos pontuais de efluentes urbanos na qualidade da água da bacia do rio Doce.

### **2.2 Objetivos Específicos**

1. Calibrar o modelo hidrológico de qualidade da água;
2. Avaliar cenários de tratamento de efluentes urbanos e suas consequências na qualidade da água da bacia do rio Doce.

## 3. Revisão bibliográfica

### 3.1 Enquadramento e classificação dos corpos d'água

A Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH), instituída pela Lei 9.433/97 (BRASIL, 1997), baseia-se nos seguintes fundamentos (Art. 1º):

I - a água é um bem de domínio público;

II - a água é um recurso natural limitado, dotado de valor econômico;

III - em situações de escassez, o uso prioritário dos recursos hídricos é o consumo humano e a dessedentação de animais;

IV - a gestão dos recursos hídricos deve sempre proporcionar o uso múltiplo das águas;

V - a bacia hidrográfica é a unidade territorial para implementação da Política Nacional de Recursos Hídricos e atuação do Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos;

VI - a gestão dos recursos hídricos deve ser descentralizada e contar com a participação do Poder Público, dos usuários e das comunidades.

Para atender aos seus objetivos que são, dentre outros: assegurar à atual e às futuras gerações a necessária disponibilidade de água, em padrões de qualidade adequados aos respectivos usos, a PNRH utiliza-se dos instrumentos de gestão abaixo:

- *Planos de Recursos Hídricos (PRH)* que visam a fundamentar e orientar a implementação da Política Nacional de Recursos Hídricos e o gerenciamento dos recursos hídricos, elaborados por bacia hidrográfica;
- O *enquadramento* dos corpos de água em classes, segundo os usos preponderantes da água;
- O regime de *outorga* de direitos de uso de recursos hídricos que tem como objetivos assegurar o controle quantitativo e qualitativo dos usos da água e o efetivo exercício dos direitos de acesso à água;
- A *cobrança* pelo uso de recursos hídricos, e

- *Sistema de Informações* sobre Recursos Hídricos que é um sistema de coleta, tratamento, armazenamento e recuperação de informações sobre recursos hídricos e fatores intervenientes em sua gestão.

O enquadramento dos corpos de água em classes, segundo os usos preponderantes da água, possibilita a gestão sistemática dos recursos hídricos, sem dissociação dos aspectos de qualidade e quantidade, já que a concentração de poluente está diretamente relacionada à vazão do corpo hídrico. Sendo assim, os objetivos deste instrumento, estabelecidos no Art. 9º, da Lei 9.433 são:

- assegurar às águas qualidade compatível com os usos mais exigentes a que forem destinadas;
- diminuir os custos de combate à poluição das águas, mediante ações preventivas permanentes.

O Art. 10 da Lei 9.433 define que as classes de corpos de água a serem utilizadas para o enquadramento sejam estabelecidas pela legislação ambiental. Esta legislação é representada pela Resolução do Conselho Nacional de Meio Ambiente - CONAMA nº 357, de 17/03/2005, que dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes.

Considerando apenas o uso da água para abastecimento humano a classificação de corpos de água deve atender ao requisitos a seguir (BRASIL, 2005):

- Classe Especial: abastecimento para consumo humano, com desinfecção;
- Classe 1: abastecimento para consumo humano, após tratamento simplificado;
- Classe 2: abastecimento para consumo humano, após tratamento convencional;
- Classe 3: abastecimento para consumo humano, após tratamento convencional ou avançado, e
- Classe 4: não destinadas ao abastecimento para consumo humano.

A cada uma dessas classes corresponde uma determinada qualidade a ser mantida no corpo de água. Essa qualidade é expressa na forma de padrões através

da referida Resolução. A Tabela 1 apresenta os limites legais considerados para as variáveis de qualidade da água, de interesse neste estudo, para corpos de água doce.

**Tabela 1 – Variáveis de interesse e padrões dos corpos de água doce (Fonte: BRASIL, 2005)**

Variável	Unidades	classe 1	classe 2	classe 3	classe 4
DBO5 (máxima)	mg/l O <sub>2</sub>	3	5	10	>10
Fósforo Total (máximo)	mg/l P	0,1	0,15	>0,15	-
Coliformes Termotolerantes (máximo)	ind/100ml	200	1000	4000	>4000

O Art. 2º, da referida Resolução, adota a seguinte definição para enquadramento: “estabelecimento da meta ou objetivo de qualidade da água (classe) a ser, obrigatoriamente, alcançado ou mantido em um segmento do corpo de água, de acordo com os usos preponderantes, ao longo do tempo”.

Observa-se que, tanto na Lei quanto na Resolução, o enquadramento de um corpo hídrico não representa, necessariamente, a qualidade que ele se encontra, mas sim uma possível estratégia de planejamento para atendimento às metas de médio e longo prazos, visando o atendimento progressivo aos usos preponderantes da bacia, atuais ou futuros, estabelecidas nos Planos de Recursos Hídricos.

A Resolução considera, assim como o art. 9º, da Lei 9.433, que o enquadramento deve assegurar às águas qualidade compatível com os usos mais exigentes a que foram destinadas. A Resolução também considera a necessidade de se criar instrumentos para avaliar a evolução da qualidade das águas, em relação às classes estabelecidas no enquadramento, de forma a facilitar a fixação e controle de metas, visando atingir gradativamente os objetivos propostos.

O controle da qualidade das águas, associado ao enquadramento e as metas estabelecidas nos Planos de Recursos Hídricos, vai de encontro a proposta deste trabalho, que oferece uma ferramenta, SGAG (Sistema Georreferenciado de Apoio ao Gerenciamento), que insere, de forma inovadora, aspectos de modelagem da qualidade de água em ambiente SIG (Sistema de Informações Geográficas) para auxiliar os processos de tomadas de decisões, visando a articulação de instrumentos da Política Nacional de Recursos Hídricos.

### **3.3 Modelos hidrológicos para avaliação da qualidade da água**

Modelos de simulação de qualidade de água são utilizados como ferramentas para auxiliar as tomadas de decisões relativas à gestão dos recursos hídricos, uma vez que contribuem para o diagnóstico do corpo hídrico e permitem a simulação de cenários futuros pré-definidos.

Os modelos abordam de maneira simplificada e prática os processos (hidrológicos, físicos, químicos e biológicos) complexos e, ainda, não perfeitamente equacionados (Gastaldini e Teixeira, 2003).

Modelos hidrológicos unidimensionais são largamente empregados para quantificar o efeito do impacto de cargas poluidoras na qualidade da água de rios (e.g. HEC-RAS, QUAL2E, SWAT, KINEROS, WASP, SALMANQ e SIMCAT). Uma revisão geral do estado da arte da modelagem de qualidade da água em rios pode ser encontrada em Rauch *et al.* (1998a). Nesta seção são apresentados de forma resumida dois modelos de qualidade da água em rios, os quais foram tomados como base para elaboração do modelo de qualidade desenvolvido neste trabalho.

#### **a) Modelo QUAL2E**

O programa de computador mais conhecido e utilizado para a modelagem da qualidade da água de rios é o modelo QUAL2E desenvolvido pela Agência de Proteção Ambiental dos EUA (Brown e Barnwell, 1987). O modelo QUAL2E simula oxigênio dissolvido e variáveis associadas à qualidade da água em rios e córregos, em condições de vazão e descarga de poluentes constantes. Este modelo possui algumas limitações tais como: (a) fluxo de eventos de chuva e outras situações instáveis, (b) limitações computacionais, onde uma rede fluvial mais complexa não pode ser modelada; (c) a sua formulação deriva diretamente da legislação ambiental dos EUA para o qual foi desenvolvido e adaptado (Rauch *et al.*, 1998a).

Estas limitações do modelo são agravadas em muitas aplicações, por inexperiência ou desconhecimento do modelo por parte do usuário. O manual do QUAL2E (Brown e Barnwell, 1987) é basicamente uma descrição da formulação do modelo e formatos de entrada, porém, em alguns casos, o usuário simplesmente não tem a profundidade de compreensão necessária para avaliar a aplicabilidade

dele para o problema em mãos. Com isso, a ampla divulgação e disponibilidade imediata do QUAL2E incentiva o uso que às vezes, fica aquém da expectativa de entendimento do modelo (Rauch *et al.*,1998b).

Quanto à formulação do modelo, para cada elemento computacional é realizado um balanço hidrológico apresentado em termos de vazão, concentração e temperatura. Assumem-se como mecanismos principais de transporte a advecção e a dispersão na direção longitudinal, sendo o mesmo capaz de calcular vazões incrementais em cada segmento de trecho. Os incrementos de vazão, que podem ou não caracterizar a poluição difusa, são considerados constantes em cada trecho (Figura 1).

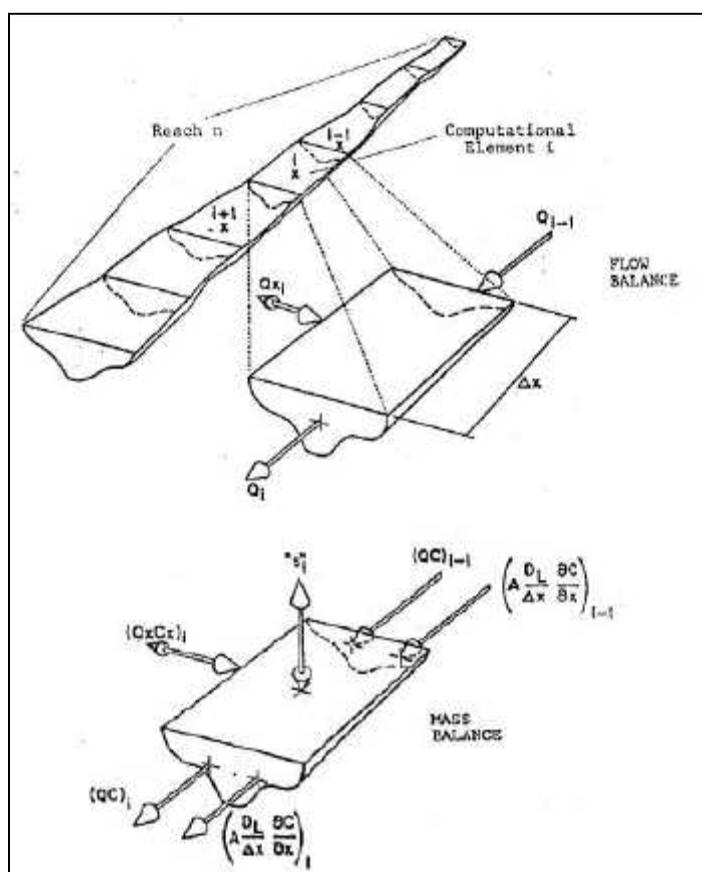


Figura 1 - Elemento computacional e balanço de massa no sistema (Brown e Barnwell, 1987).

A equação básica utilizada pelo modelo é a equação unidimensional do transporte de massa através da advecção-dispersão (Equação 1) que é integrada

numericamente através do espaço e do tempo para um determinado constituinte C, dada por:

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \frac{\partial \left( Ax D_L \frac{\partial C}{\partial x} \right)}{\partial x} dx - \frac{\partial (Ax.u.C)}{\partial x} dx + \frac{dC}{dt} + s \quad (1)$$

onde:

M = massa (M)

x = distância (L)

t = tempo (T)

C = concentração (M.L<sup>-3</sup>)

Ax = Área da Seção Transversal (L<sup>2</sup>)

D<sub>L</sub> = Coeficiente de Dispersão (L<sup>2</sup>T<sup>-1</sup>)

u = Velocidade Média (LT<sup>-1</sup>)

s = Fonte Externa ou Retirada (MT<sup>-1</sup>)

Os termos do lado direito representam respectivamente, a dispersão, a advecção, as variações individuais das variáveis simuladas, as fontes/sumidouros externos e a diluição.

No Brasil, uma interface gráfica QUAL2R (Rodrigues e Porto, 2003) foi criada para auxiliar o usuário do modelo QUAL2E na inserção dos dados de entrada e na interpretação mais eficiente dos dados de saída, a medida em que os dispõe de forma gráfica e flexível para ser transportada para outros aplicativos tais como editores de texto e planilhas eletrônicas (e.g. MS-Word e MS-Excel). Outra vantagem ao se trabalhar com a interface QUAL2R deve-se à possibilidade de simulação simultânea de até 20 cenários diferentes com os dados de entrada no modelo, fato este que auxilia no processo de calibração do sistema. O modelo QUAL2E trabalha apenas um cenário de cada vez.

## **b) RM1**

O Modelo matemático RM1 é um instrumento desenvolvido para calcular a vazão necessária utilizada em um corpo de água para diluição de lançamento de

poluentes degradáveis ou conservativos em rios quando a estes submetidos (Rodrigues, 2000).

O modelo RM1 considera as características físicas do corpo receptor, sua capacidade de autodepuração, a capacidade de sedimentação do poluente no sistema, a classe de uso do corpo receptor, seu regime de vazão, a vazão de lançamento do efluente e a respectiva concentração do poluente, a concentração do poluente no sistema de acordo com o regime de vazão em que o mesmo é submetido, e a retirada de massa do poluente do sistema através de pontos de captação.

Considerando a demanda hídrica devido ao lançamento de efluentes, a metodologia de cálculo e propagação da vazão de diluição considera a variação longitudinal da vazão de diluição e da carga do poluente.

A vazão de diluição de um poluente lançado em um corpo receptor é calculada pela seguinte expressão:

$$Q_D = C_e \cdot \frac{Q_e}{C_p^*} \quad (2)$$

onde:

$Q_D$  = vazão de diluição do poluente no ponto de lançamento do efluente em m<sup>3</sup>/s;

$Q_e$  = vazão de lançamento do efluente no corpo receptor em m<sup>3</sup>/s;

$C_e$  = concentração do poluente no efluente em mg/L; e

$C_p^*$  = concentração máxima permissível do poluente no corpo receptor, que poderá resultar do enquadramento do corpo hídrico em classe de uso ou de um plano de recuperação da bacia em mg/L.

São calculadas  $n$  vazões de diluição (uma para cada variável analisada), sendo a maior delas considerada como a vazão da qual o usuário se apropria, uma vez que, por não se tratar de uso consuntivo, a mesma água que dilui uma variável pode diluir outra variável qualquer, de forma que não faz sentido somar as vazões de diluição.

A variação longitudinal da vazão de diluição da massa de poluente lançada no sistema, referente apenas ao lançamento do usuário-poluidor considerado, é dada por:

$$Q_D(x) = \frac{I}{C_p^*} [(C_{pd} - C_{pa}) \cdot (Q_r(x) + Q_e)]$$

onde:

$Q_D(x)$  = vazão de diluição do poluente, referente apenas ao lançamento do usuário-poluidor considerado em m<sup>3</sup>/s;

$C_{pd}(x)$  = concentração do poluente no corpo receptor após o lançamento do efluente em mg/L;

$C_{pa}(x)$  = concentração do poluente no corpo receptor antes do lançamento do efluente, diluída na vazão do efluente, em mg/L; e

$Q_r(x)$  = vazão do corpo receptor em m<sup>3</sup>/s.

$[(C_{pd} - C_{pa}) \cdot (Q_r(x) + Q_e)]$  = variação longitudinal da carga do poluente, referente apenas ao lançamento do usuário-poluidor considerado.

### **3.4 Integração de modelos hidrológicos com SIG**

Dentre a variedade de modelos existentes, destacam-se os desenvolvimentos mais recentes que buscam utilizar um ambiente altamente automatizado e um sistema de informações inteligente, tal como um Sistema de Informação Geográfica (SIG). A interação de modelos hidrológicos com SIG começou a ser desenvolvida no final da década de 80 a partir da necessidade dos usuários de SIG melhorarem a compatibilidade analítica de seus sistemas (Fotheringham & Rogerson, 1994; Goodchild, Haining, & Wise, 1992), e dos usuários dos modelos hidrológicos melhor extraírem as informações dos modelos digitais do terreno (Sui & Maggio, 1999; Pessoa, 2010).

Esta interação permite reunir informações espacialmente fragmentadas e, principalmente, auxiliar gestores no processo de tomada de decisão, uma vez que ela admite um(a): (a) maior facilidade no compartilhamento de informações; (b) análise mais objetiva e um maior entendimento dos resultados; (c) menor custo para elaboração de saídas gráficas; (d) maior facilidade na identificação de padrões; dentre outros (Lee & White, 1992; Srinivasan & Arnold, 1994; Sui & Maggio, 1999).

De acordo com Sui & Maggio (1999), As práticas de integração dos SIG com modelos hidrológicos podem ser apresentadas sob quatro enfoques diferentes (Figura 2):

1. SIG embutidos em Modelos Hidrológicos – onde o SIG é um pacote do modelo hidrológico que serve para captação de dados porém, não se aproveitam a funcionalidades do SIG para as saídas e visualização dos resultados da modelagem. O desenvolvimento de últimas versões de RiverCAD, HEC-RAS 2.0, RiverTools e MODFLOW tem este enfoque (Sui e Maggio, 1999);
2. Modelos Hidrológicos embutidos em SIG – onde certas funções de modelagem hidrológica são acopladas a pacotes de software SIG como ArcStorm e, ArcGrid Integraph de InRoads. Limita-se em função da simplicidade da modelagem e da dificuldade de calibração do modelo (quando possível);
3. Acoplamento Solto – onde a integração é feita a partir do intercâmbio de dados em formato ASCII ou binário sem uma interface comum. Neste caso, evita-se programação redundante, porém a conversão de arquivos de dados pode levar a erros. Um exemplo bem conhecido é o módulo HECgeo-RAS, do programa HEC-RAS, que é integrado ao SIG através do software ArcGIS, e
4. Acoplamento Fechado - inclui alguns modelos hidrológicos dentro de pacotes de SIG comerciais através de macros de SIG ou programação convencional. Este modo de acoplamento inclui também a solução de incorporar rotinas escritas por usuários dentro do SIG. Este enfoque requer uma interface bem definida para as estruturas de dados no SIG. Um exemplo de este tipo de integração é o Basins v4.0 que é um sistema de análise ambiental multipropósito desenvolvido pela Agencia de Proteção Ambiental dos Estados Unidos EPA, que integra um sistema de informação geográfica o MapWindow, ferramentas de modelagem, dados nacionais de bacias e de avaliação ambiental num pacote conveniente único (EPA, 2008).

Outro exemplo é o modelo MGB-IPH (Collischonn, 2001) que na nova versão utiliza o ambiente MapWindow para elaboração dos dados de entrada e visualização de resultados (e.g. Paiva *et al.*, 2011).

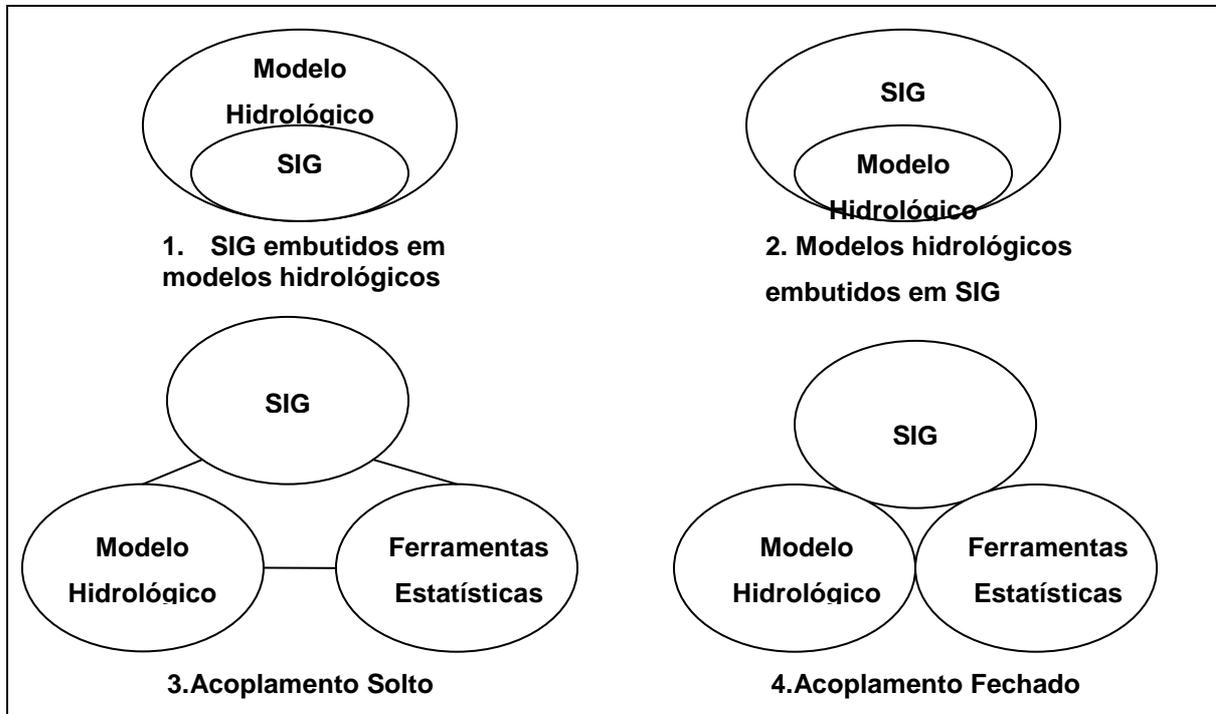


Figura 2 – Tipos de Integração de Modelos Hidrológicos com Sistemas de Informações Geográficas. (Fonte: Sui e Maggio, 1999).

## 4. Materiais e Métodos

Propõe-se avaliar o efeito distribuído de lançamentos de efluentes urbanos na qualidade da água da bacia do rio Doce utilizando um modelo hidrológico integrado a um SIG, onde, através desta integração por acoplamento fechado, seja possível facilitar as análises técnicas prévias necessárias para tomada de decisões, com ênfase na avaliação de qualidade da água. O resultado desta integração entre modelo hidrológico e SIG gerou um Sistema Georreferenciado de Apoio ao Gerenciamento, denominado SGAG.

A função do SIG foi, primeiramente, realizar as etapas de pré-processamento na bacia, utilizando as ferramentas do ArcHydro, que permitem a divisão da bacia em pequenas sub-bacias. Através de técnicas de regionalização de vazões foi definida a vazão de referência por trecho de rio a partir do cálculo das disponibilidades de água utilizando a série de vazões observadas de postos fluviométricos localizados ao longo da bacia do rio Doce (IGAM, 2010).

O lançamento de efluentes urbanos foram representados pelas concentrações de 3 variáveis de qualidade de água escolhidas de acordo com os valores críticos de monitoramento na bacia. Estas concentrações foram estimadas por sede municipal considerando apenas os efluentes do uso de abastecimento urbano de água.

O modelo hidrológico de qualidade de água foi utilizado no processo de propagação da qualidade da água na rede esquemática gerada através do SIG. As equações utilizadas no processo de propagação da qualidade de água foram baseadas no modelo QUAL2E.

A Interface do SGAG permitiu a inserção dos dados de entrada, visualização dos resultados por meio de mapas e gráficos, calibração do modelo e simulação de diferentes cenários de interesse para possível apoio ao gerenciamento de recursos hídricos.

A Figura 3 apresenta um fluxograma da metodologia melhor detalhada a seguir.

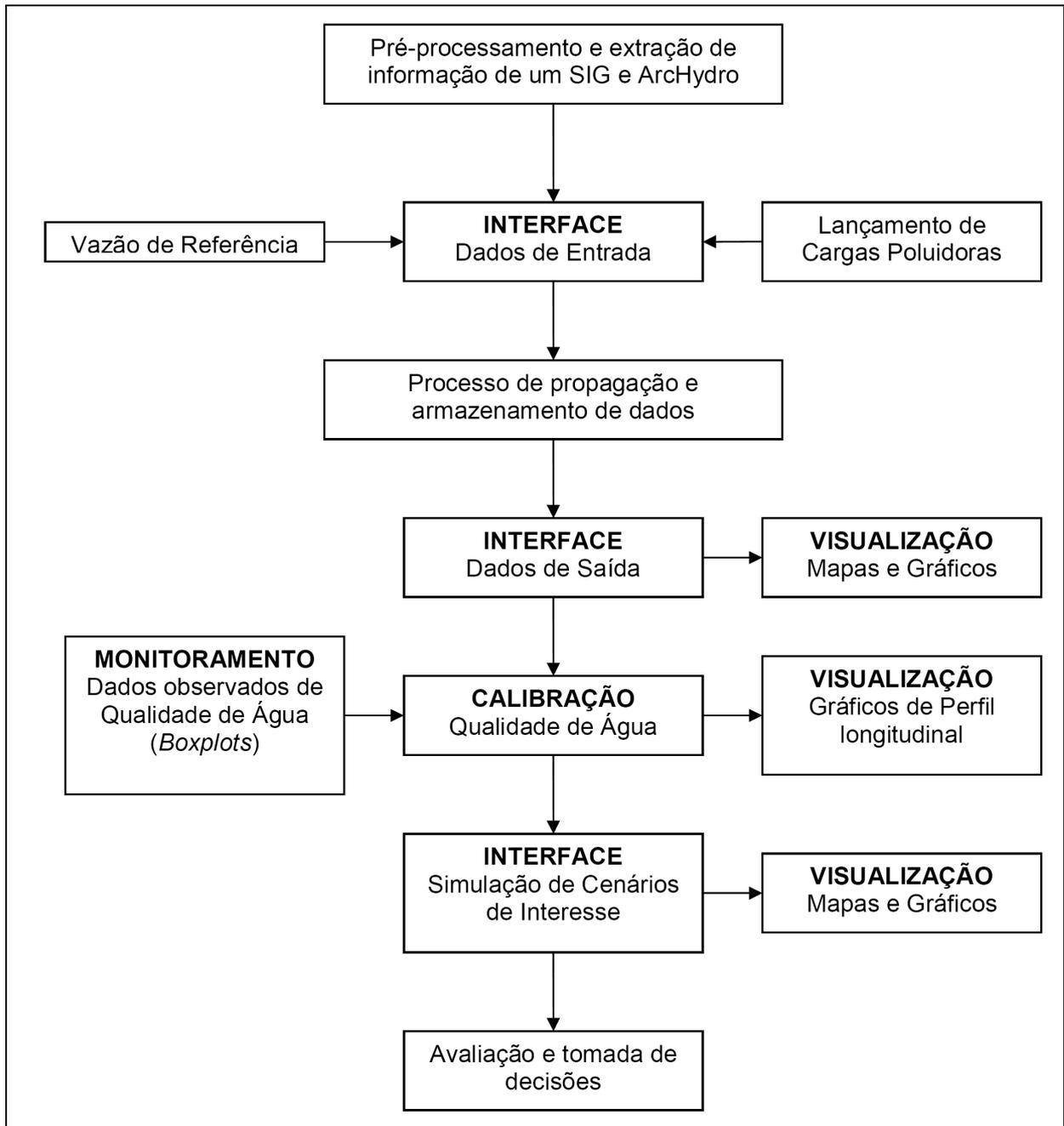


Figura 3 – Fluxograma da metodologia adotada no estudo.

#### 4.1 Área de estudo

As informações sobre a área de estudo foram obtidas do Plano Integrado de Recursos Hídricos da Bacia do Rio Doce – PIRH/Doce (IGAM, 2010). A Bacia do Rio Doce, localizada entre os paralelos 17° 45' e 21° 15' de latitude ao sul do Equador e 39° 30' e 43° 45' de longitude a oeste do meridiano de Greenwich, possui área de drenagem de 86.715 km<sup>2</sup> compreendidos entre os Estados de Minas Gerais

(aproximadamente 65%) e Espírito Santo abrangendo um total de 229 municípios (Figura 4).



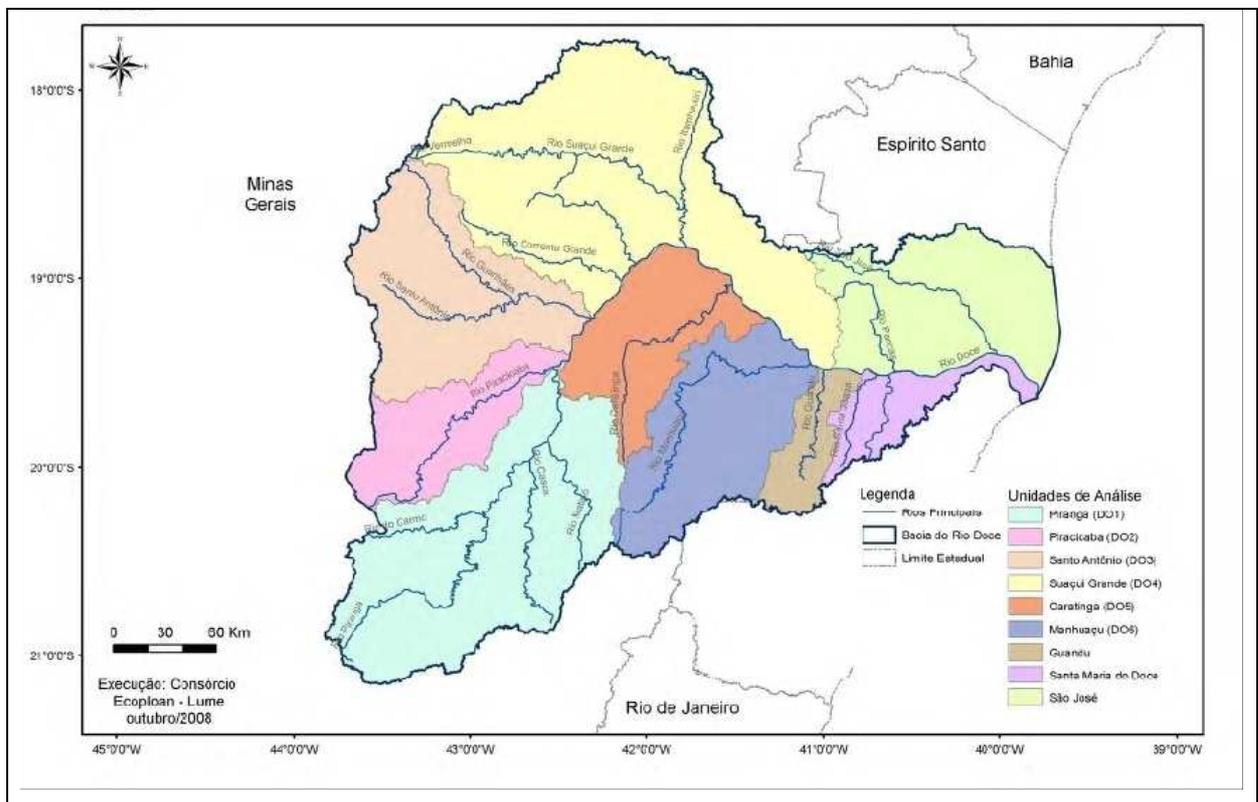
**Figura 4 – Localização da bacia do rio Doce. (Fonte: IGAM, 2010).**

As Nascentes do rio Doce situam-se nas serras da Mantiqueira e Espinhaço (MG), percorrendo o mesmo uma distância de 850 km até o deságue no oceano Atlântico, junto ao povoado de Regência (ES).

Segundo a classificação de Köppen, identificam-se basicamente três tipos climáticos na bacia: tropical de altitude com chuvas de verão e verões frescos, presente nas vertentes das serras da Mantiqueira e do Espinhaço e nas nascentes do rio Doce; tropical de altitude com chuvas de verão e verões quentes, presente nas nascentes de seus afluentes; e clima quente com chuvas de verão presente nos trechos médio e baixo do rio Doce e de seus afluentes. As temperaturas médias anuais na bacia variam de 18°C em Barbacena, a 24,6°C em Aimorés. O período

mais quente compreende os meses de janeiro e fevereiro, enquanto as temperaturas mínimas ocorrem em junho e julho.

No Estado de Minas Gerais, a bacia do rio Doce é subdividida em seis Unidades de Planejamento e Gestão dos Recursos Hídricos (UPGRHs), as quais correspondem a Bacia do Rio Piranga (DO1); Bacia do Rio Piracicaba (DO2); a Bacia do Rio Santo Antônio (DO3); Bacia do Rio Suaçuí Grande (DO4); Bacia do Rio Caratinga (DO5); e a Bacia do Rio Manhuaçu (DO6). Já na parte da bacia situada no Espírito Santo, não existem subdivisões administrativas, entretanto têm-se os Comitês da Bacia do Rio Guandu, do Rio Santa Maria do Doce e do Rio São José (Figura 5).



**Figura 5 – Unidades de análise da bacia do rio Doce. (Fonte: IGAM, 2010).**

A bacia tem uma população superior a 3,5 milhões de habitantes. O Vale do Aço tem o maior adensamento populacional da bacia e constata-se a existência de um fluxo migratório que se direciona, sobretudo, para as maiores cidades, como Ipatinga e Governador Valadares (Figura 6). Em decorrência, há uma tendência de diminuição populacional nos municípios com população de até 20.000 habitantes, que representam mais de 85% dos municípios da bacia do rio Doce.

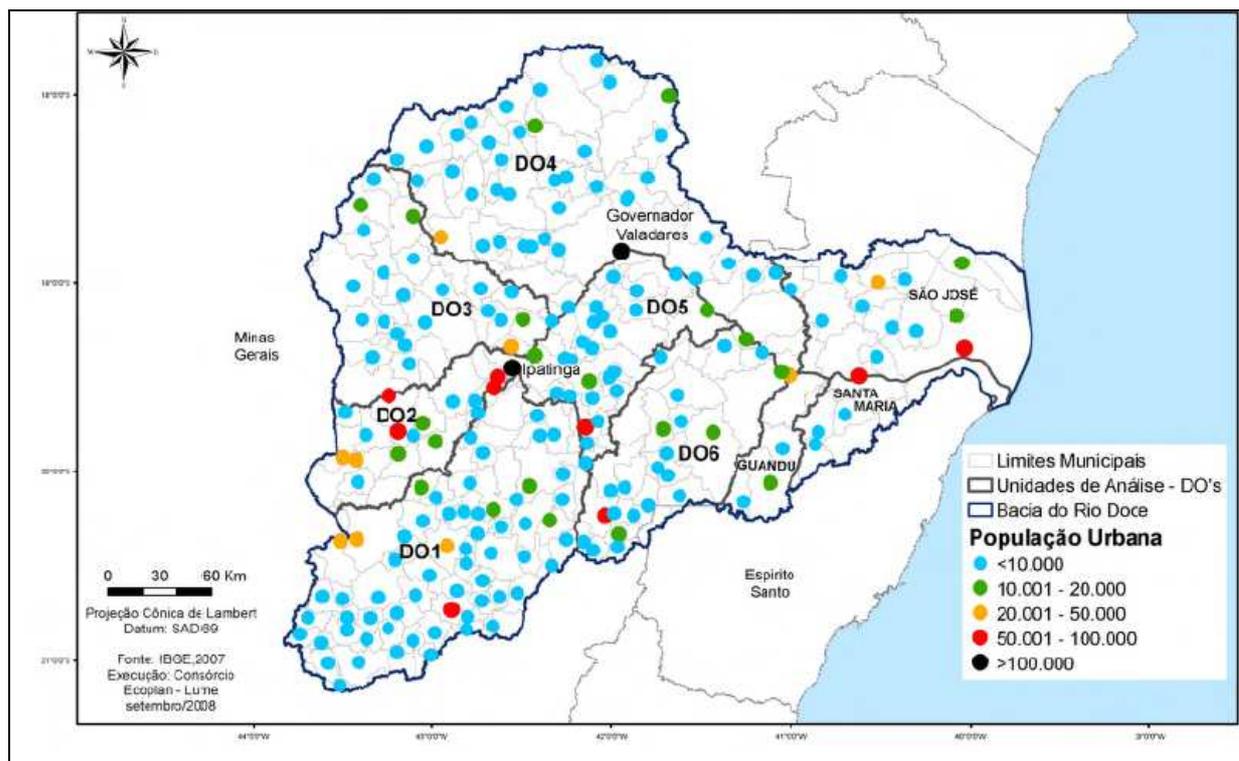


Figura 6 – População urbana dos municípios da bacia do rio Doce. (Fonte: IGAM, 2010).

A população urbana representa mais de 70% da população total. Entretanto, os mesmos dados mostram que mais de 100 municípios possui população rural maior que a urbana, evidenciando que a população rural ainda é significativa, absorvidos pela exploração agropecuária. No Médio Doce, essas atividades constituem o principal gerador de renda, emprego e ocupação de mão-de-obra em municípios de menor porte, principalmente onde a população rural predomina.

Com relação aos problemas relacionados aos recursos hídricos da bacia, destacam-se erosão e assoreamento dos rios oriundos de desmatamentos generalizados e mau uso dos solos. A urbanização da bacia também contribui significativamente para os impactos nos cursos d'água, principalmente pelo quase inexistente sistema de tratamento de esgotos.

## **4.2 Pré-Processamento**

A extração de informação útil para a modelagem hidrológica a partir de informações contidas em um SIG pode ser uma etapa bastante trabalhosa no processo de desenvolvimento de um modelo. Entre estas atividades incluem-se tarefas como delimitação da bacia, determinação da área de contribuição em pontos de interesse, identificação dos principais cursos d'água e obtenção de características como comprimento, declividade e perfil longitudinal dos rios (Paz e Collischonn, 2008). Estas informações eram preparadas manualmente a partir de mapas topográficos impressos. Atualmente, ferramentas de geoprocessamento e Sistemas de Informação Geográfica (SIG) têm sido empregados para obter as mesmas informações a partir do processamento automático de dados de elevação do terreno (Burrough e McDonnel, 1998; Mendes e Cirilo, 2001).

O desenvolvimento e aprimoramento de SIGs e algoritmos de processamento automático, em combinação com o aumento da capacidade computacional e com a disponibilidade de dados obtidos via sensoriamento remoto, têm permitido preparar diversos planos de informação para estudos hidrológicos de grandes áreas a baixo custo e com incrível rapidez.

Os dados topográficos são usualmente trabalhados sob a forma de um Modelo Numérico do Terreno (MNT), ou Modelo Digital de Elevação (MDE), cuja representação mais tradicional é através de uma imagem raster, ou grade, onde cada elemento, ou pixel, tem como atributo o valor de elevação do terreno em relação a um determinado referencial (Burrough e McDonnel, 1998). Atualmente, a principal fonte de dados de elevação do terreno em escala global é a base de dados obtida pelo projeto *Shuttle Radar Topographic Mission* (SRTM) e disponibilizada gratuitamente na Internet.

Neste trabalho é apresentada a utilização da estrutura de dados e do conjunto de ferramentas denominado ArcHydro desenvolvidas em parceria pela Universidade do Texas com empresa ESRI, que operam internamente ao programa ArcGIS (Maidment, 2002), para extrair informações úteis para a modelagem hidrológica de qualidade da água em um protótipo de Sistema Georreferenciado de Apoio ao Gerenciamento (SGAG), a partir do MDE do SRTM.

O ArcHydro pode ser entendido tanto como um conjunto de ferramentas quanto uma estrutura de dados projetada para armazenar e relacionar entre si conjuntos de dados geográficos utilizados na área de recursos hídricos. A estrutura de dados ArcHydro é definida utilizando classes de objetos, em que os objetos de uma dada classe possuem propriedades ou atributos em comum, e objetos de classes diferentes podem ser relacionados através de atributos em comum (Whiteaker et al., 2006). Esta estrutura de dados é utilizada para automatizar os processos de extração de informação e preparação de dados para modelagem em diversos modelos hidrológicos, como os modelos desenvolvidos pelo Corpo de engenheiros do exército dos Estados Unidos (HEC, 2001) e pelo modelo SWAT.

A utilização das ferramentas ArcHydro se inicia com um MDE, a partir do qual são obtidas informações como direções de escoamento; área de drenagem; rede de drenagem; definição de trechos de rios; e definição de bacias hidrográficas. Para a elaboração do sistema apresentado neste estudo foram utilizadas apenas algumas das ferramentas disponíveis no ArcHydro, nas etapas descritas nos itens abaixo (Figura 7).

#### **a) Determinação de direções de fluxo**

As direções de fluxo constituem o plano de informações básico derivado de um MNT em formato raster para suporte a estudos hidrológicos. O procedimento mais comum consiste em considerar uma única direção de fluxo para cada pixel do MNT, sendo essa direção atribuída para um de seus 8 vizinhos (tomando uma janela 3x3). A determinação de qual direção de fluxo atribuir é feita escolhendo a direção que proporcione a maior declividade, calculada como sendo a diferença de elevação entre o pixel vizinho e o pixel central dividida pela distância entre eles (Paz e Collischonn, 2008). O algoritmo de definição de direções de fluxo mais comumente empregado é conhecido como D8 ou Deterministic Eight Neighbours (Jenson e Domingue, 1988).

Aplicando a regra da maior declividade para cada pixel do MNT, obtém-se a correspondente direção de fluxo e, ao final do processo, gera-se uma imagem raster onde a cada pixel é atribuído um valor ou código que denota para qual dos vizinhos ele drena.

### **b) Determinação de área de drenagem acumulada**

Com base exclusivamente nas direções de fluxo, pode-se determinar um plano de informações que representa as áreas de drenagem acumuladas. Gera-se uma nova imagem raster onde cada pixel tem como atributo o valor correspondente ao somatório das áreas superficiais de todos os pixels cujo escoamento contribui para o pixel em questão (Jenson e Domingue, 1988). Quando se trabalha com grandes áreas e sistema de coordenadas geográficas (latitude-longitude), os pixels podem ter áreas superficiais individuais distintas e isso deve ser levado em conta.

### **c) Definição da rede de drenagem**

Supondo que existe um limite mínimo de área de drenagem,  $A_{\min}$ , que caracteriza o início da formação de cursos d'água, é possível gerar automaticamente um plano de informações referente à rede de drenagem a partir do raster de áreas acumuladas. Pode-se fazer uma reclassificação da imagem de áreas acumuladas, considerando que todos os pixels cuja área de drenagem,  $A_i$ , seja inferior a  $A_{\min}$  recebem valor 0 e aqueles com área superior a esse limite mínimo ficam com valor 1. Ou seja, nesta operação se obtém um raster cujos pixels pertencentes à rede de drenagem têm atributo 1 e os demais têm atributo 0. No *ArcHydro* esta etapa é denominada "*Stream Definition*" e o arquivo de saída gerado é do tipo raster, ou grade.

### **d) Identificação de trechos individuais da rede de drenagem**

A rede de drenagem, gerada na etapa anterior, pode apresentar locais em que dois ou mais rios se unem, e pontos em que a rede de drenagem se inicia. Um trecho individual é definido como um trecho da drenagem que une duas confluências ou um trecho que parte do início da drenagem e chega até a primeira confluência subsequente. O produto desta etapa, denominada "*Stream Segmentation*" no *ArcHydro*, é um arquivo raster em que todas as células pertencentes a um mesmo trecho tem o mesmo valor do atributo, e trechos diferentes tem valores diferentes.

### **e) Definição das sub-bacias incrementais**

A partir dos trechos individualizados são identificadas todas as células que drenam para um mesmo trecho, e a estas células é atribuído o mesmo valor dos trechos. Esta etapa é chamada "*Catchment Grid Delineation*", onde o produto é um

arquivo raster com células identificadas pelo atributo do segmento individual para o qual drenam. Em outras palavras é um arquivo raster de sub-bacias incrementais.

#### **f) Definição das sub-bacias incrementais em formato vetorial**

Na etapa seguinte, as sub-bacias inicialmente definidas em um arquivo raster são utilizadas para gerar um arquivo vetorial, com o contorno de cada sub-bacia individualizado como um polígono (*Catchment Polygon*). Cada polígono automaticamente recebe um número identificador (*HydroID*) e tem definidos atributos adicionais, como área e perímetro.

#### **g) Definição dos trechos de rio em formato vetorial**

Após a definição das sub-bacias em formato vetorial são definidos os trechos de rio em formato vetorial (*Drainage Line*), utilizando como informação de entrada o arquivo com trechos de rios individualizados em formato raster. Neste passo é gerada uma linha de drenagem para cada sub-bacia. Automaticamente o procedimento também define números identificadores (*HydroID*) e os valores de atributos de cada uma destas linhas, como o comprimento.

Para os objetivos do desenvolvimento de um modelo hidrológico, ou de um sistema de suporte à decisão, o atributo mais importante de um trecho de drenagem é o número identificador do trecho seguinte, pois assim é definida a topologia do sistema. Esta informação também é gerada automaticamente na definição dos trechos em formato vetorial no campo denominado *NextDownID*.

#### **h) Definição das bacias associadas a cada sub-bacia incremental**

A última etapa necessária para gerar os dados utilizados no protótipo de sistema de suporte à decisão é a definição das bacias associadas a cada sub-bacia incremental. No contexto do *ArcHydro* estas bacias são denominadas *Adjoint Catchments*. O atributo mais importante das bacias associadas, ou *Adjoint Catchments*, é a área total de drenagem à montante do trecho.

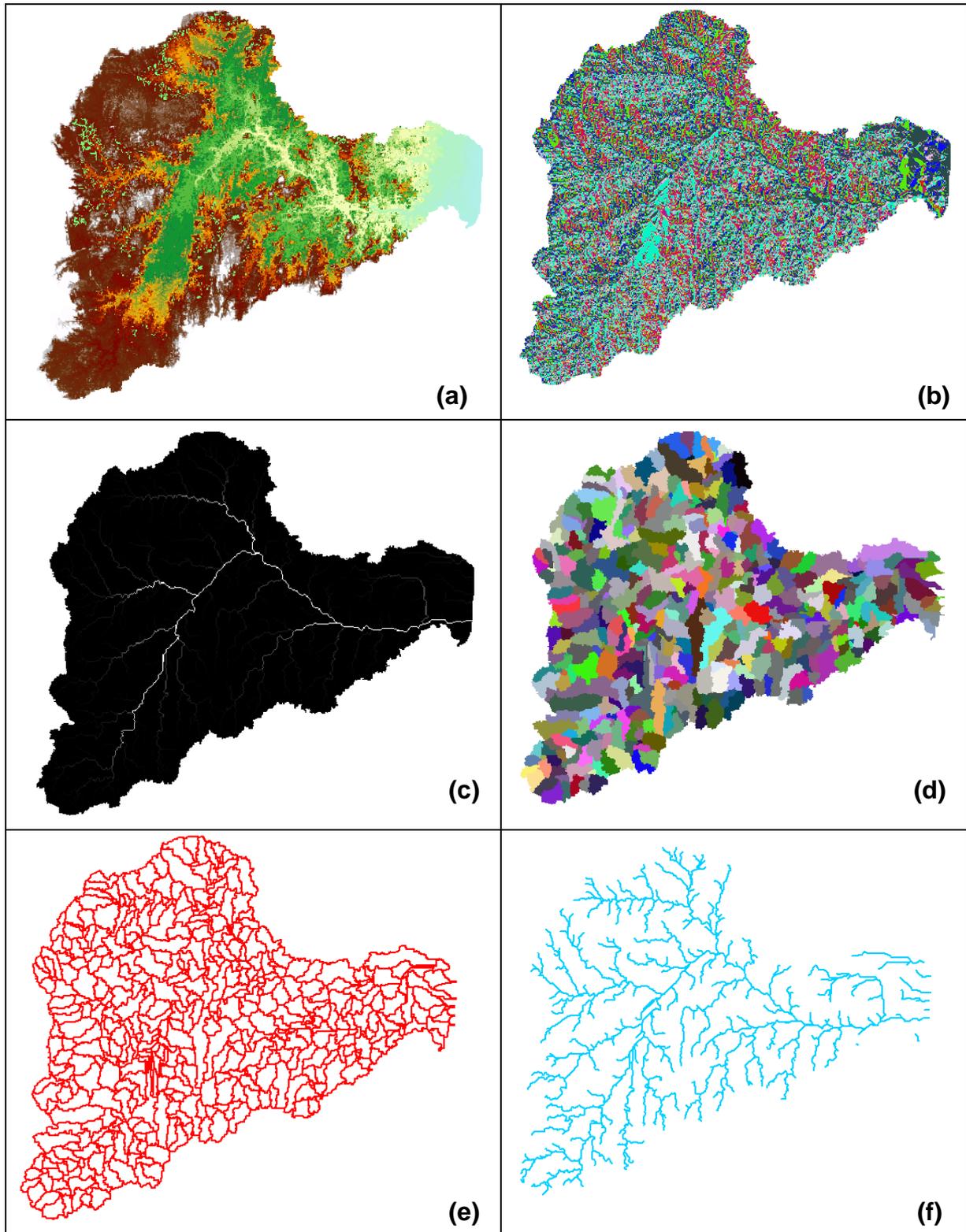


Figura 7 – Algumas etapas para geração da rede de drenagem da bacia do rio Doce. (a) obtenção do MDE; (b) Elaboração das direções de fluxo; (c) Segmentação dos trechos; (d) Obtenção das mini-bacias; (e) Obtenção dos polígonos das minibacias, e (f) Elaboração das linhas de drenagem.

## 4.3 Disponibilidade hídrica e Qualidade de água

### a) Disponibilidade Hídrica

As disponibilidades hídricas representam as parcelas dos recursos de água que podem ser aplicadas nas diversas utilizações das atividades de consumo, geralmente associadas aos indicadores de valores mínimos. De fato, considerando a variabilidade da quantidade de água na natureza, às vezes em excesso, outras vezes em regimes de escassez, o confronto com as demandas deve ser feito para as condições de eventos extremos mínimos, como forma de assegurar um atendimento pleno no restante do tempo.

As disponibilidades hídricas superficiais foram associadas às seguintes vazões ou variáveis características do regime dos cursos de água:

- *Vazão média de longo termo* ( $Q_{MLT}$ ), representando a média das vazões anuais para a série de dados;

- *Curva de permanência de vazões médias mensais*, indicando a distribuição da frequência amostral das vazões registradas em uma dada seção fluvial, servindo para indicar o percentual de tempo em que o regime do curso de água sustenta vazões maiores ou iguais a um valor de referência;

- *Vazão mínima com 95% de permanência no tempo* ( $Q_{95\%}$ ), uma referência do regime de estiagem, indicando o valor que é excedido na curva de permanência em 95% do tempo;

A Figura 8 apresenta a distribuição espacial das estações fluviométricas utilizadas. A Tabela 2 apresenta as sub-bacias e as estações fluviométricas de referência utilizadas para a estimativa de disponibilidade hídrica superficial.

Os estudos hidrológicos para caracterização da disponibilidade hídrica superficial na bacia hidrográfica do rio Doce, incluindo ainda a bacia hidrográfica do rio Barra Seca, seguiram as seguintes etapas metodológicas (IGAM, 2010):



**Tabela 2 – Sub-bacias e Estações fluviométricas de referência utilizadas na bacia do rio Doce.**  
**Fonte: IGAM, 2010**

Sub-bacia	Área de Drenagem	Área	Estação Fluviométrica de Referência	
	(km <sup>2</sup> )		(%)	Código
rio Piranga	6.607	7,62	56.110.005	Ponte Nova Jusante
rio do Carmo	2.278	2,63	56.335.001	Acaiaca - Jusante
rio Casca	2.511	2,90	56.415.000	Rio Casca
rio Matipó	2.55	2,94	56.510.000	Instituto Florestal Raul Soares
Incremental D01	3.626	4,18		Cachoeira dos Óculos
rio Piracicaba	5.465	6,30	56.696.000	Mário de Carvalho
Incremental D02	216	0,25		Cenibra
rio Santo Antônio	10.429	12,03	56.825.000	Naque Velho
Incremental D03	327	0,38		Cenibra
rio Corrente Grande	2.478	2,86	56.846.000	Porto Santa Rita
rio Suaçuí Pequeno	1.719	1,98	56.846.900	Fazenda Bretz - Montante
rio Suaçuí Grande	12.413	14,32	56.891.900	Vila Matias - Montante
Incremental D04	4.945	5,70		Gov Valadares, Tumiritinga e Resplendor
rio Caratinga	3.229	3,72	56.940.002	Barra do Cuité - Jusante
Incremental D05	3.449	3,98		Gov Valadares, Tumiritinga e Resplendor
rio Manhuaçu	8.826	10,18	56.990.000	São Sebastião da Encruzilhada
Incremental D06	363	0,42		Resplendor
rio Guandu	2.145	2,47	56.992.000	Baixo Guandu
Incremental Guandu	327	0,38		Colatina
rio Santa Joana	891	1,03	56.993.551	Jusante Córrego da Piaba
rio Santa Maria do Doce	935	1,08		-
Increm. S. Maria do Doce	1237	1,43		Colatina
rio Pancas	1.181	1,36	56.995.500	Ponte do Pancas
rio São José	2.407	2,78	56.997.000	Barra de São Gabriel
Increm. São José (inclusive Barra Seca)	6.157	7,10		(regionalização)
<b>Bacia do rio Doce</b>	<b>86.711</b>	<b>100</b>	<b>56.994.500</b>	<b>Colatina</b>

#### *Vazões características médias e Curva de Permanência e Q<sub>95%</sub>*

O estudo de vazões características médias para a bacia hidrográfica do rio Doce foi feito pelo estudo das séries de vazão média mensal em período homogêneo entre 1972 e 2006. Para cada ponto de controle estudado foi gerada uma série de vazões naturais, apresentada por meio de vazões médias mensais e vazões médias anuais (IGAM, 2010).

Para a curva de permanência foram adotadas as séries de vazões médias mensais, devido à possibilidade de preenchimento e homogeneização das séries por correlação entre as vazões em diferentes estações.

#### *Vazões de referência por trechos de rio*

Para modelagem, foram definidas as vazões de referência por trecho de rio. Para cada trecho de rio, a disponibilidade hídrica foi calculada considerando a área de drenagem da bacia a montante do trecho e a vazão específica de cada sub-bacia. Admitiu-se a vazão de referência  $Q_{95\%}$  (mais conservadora que a  $Q_{90\%}$  e menos restritiva que a  $Q_{7,10}$ ) como sendo o volume disponível para diluição dos efluentes representativo do período de estiagem.

#### **b) Estimativa de cargas poluidoras (lançamentos)**

Para estimar a carga de poluição proveniente de lançamentos urbanos, foram considerados os indicadores mais críticos de contaminação por esgoto humano na bacia do rio Doce (baseando-se nos dados de monitoramento), ou seja, a Demanda Bioquímica de Oxigênio ( $DBO_{5,20}$ ), o Fósforo Total e os Coliformes Termotolerantes. A carga de poluição *per capita* (vazão efluente x concentração) foi determinada em função da população de cada município. A vazão efluente adotada por município foi considerada 80% da vazão de abastecimento (quantidade de água que se transforma em esgoto), sendo considerada uma vazão *per capita* de abastecimento de  $150 \text{ L dia}^{-1} \text{ hab}^{-1}$ , um valor de referência obtido a partir dos dados da companhia de abastecimento dos municípios da bacia. As concentrações de cada poluente por município foram baseadas nos valores de carga *per capita* encontrados na literatura (von SPERLING, 1997). As cargas *per capita* são apresentadas na Tabela 3. Observa-se que existe uma faixa de variação dos valores de carga *per capita* para cada variável, indicando que pode existir uma significativa incerteza no cálculo das cargas por município.

**Tabela 3. Valores de carga *per capita* das variáveis de qualidade da água (Fonte: von SPERLING, 1997).**

Variável de Qualidade	Unidade	Faixa	Típico	Adotado
$DBO_5$	$\text{g.hab}^{-1}\text{d}^{-1}$	40-60	50	54
Fósforo Total	$\text{g.hab}^{-1}\text{d}^{-1}$	1,0-4,5	2,5	3
Coliformes Termotolerantes	$\text{org.hab}^{-1}\text{d}^{-1}$	$10^8$ - $10^{11}$	$10^9$	$10^{10}$

Para determinação das cargas por município, multiplicou-se o número de habitantes pela contribuição média *per capita* de cada variável analisada e a determinação da concentração foi calculada dividindo-se a carga pela vazão efluente no ponto de lançamento.

**Tabela 4 – Porcentagem de atendimento e tratamento de esgoto das ETE'S em funcionamento, considerando o cenário de diagnóstico, na bacia do rio Doce (IGAM, 2010)**

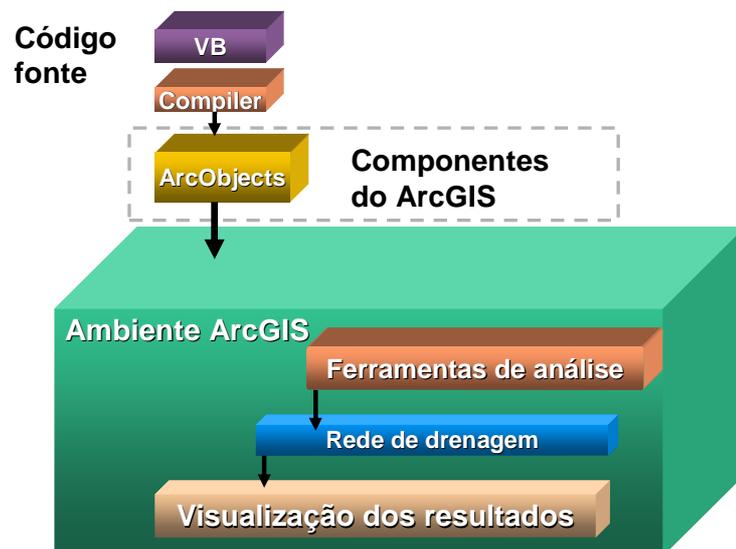
MUNICÍPIO	População SNIS 2006	Índice de atendimento de esgoto	Índice de tratamento de esgoto
		%	%
Rio Doce/MG	1.371	100,00	100,00
São José do Goiabal/MG	3.449	50,00	100,00
Viçosa/MG	59.896	95,45	2,28
Ipatinga/MG	210.777	85,70	100,00
Itabira/MG	89.357	92,41	100,00
São Domingos do Prata/MG	9.099	95,00	30,00
Catas Altas/MG	2.969	100,00	100,00
Conceição do Mato Dentro/MG	10.590	68,37	100,00
Periquito/MG	5.439	60,00	20,00
Virginópolis/MG	5.634	70,00	40,00
Aimorés/MG	18.744	79,29	14,88
Itaguaçu/ES	7.033	20,00	20,00
Baixo Guandu/ES	19.642	83,70	3,78
Laranja da Terra/ES	2.853	75,00	62,46
Colatina/ES	91.234	85,00	7,99
Linhares/ES	92.923	69,00	23,00
Pancas/ES	8.833	88,84	61,08
Rio Bananal/ES	4.307	80,00	100,00
São Domingos do Norte/ES	2.734	77,15	4,07
São Gabriel da Palha/ES	18.360	46,58	100,00
Sooretama/Es	11.416	21,84	15,57

Ainda com relação ao lançamento de poluentes, foram considerados os índices de atendimento e tratamento de esgoto nas Estações de Tratamento de

Esgotos (ETE'S) em funcionamento na bacia (Tabela 4). Para todas as ETE's considerou-se um sistema de tratamento secundário que corresponde a uma eficiência média de remoção de 80% para DBO, 30% para Fósforo Total e 99% para concentração de Coliformes Termotolerantes. Observa-se que apenas 21 municípios, de um total de 211 com sede na bacia, possuem Estação de Tratamento de Esgoto.

#### 4.4 Interface do SGAG

Um esquema geral da estrutura do modelo está resumidamente apresentado na Figura 9. Todas as ferramentas de análise foram programadas utilizando os componentes do ArcObjects que usa a linguagem Visual Basic for Applications (VBA) dentro do próprio ambiente ArcGIS. Os componentes ArcObjects são os pilares do software ArcGIS, de maneira a otimizar e automatizar trabalhos e tarefas organizacionais de modo personalizado. A programação em ArcObjects pode ser utilizada para expandir e criar novas funcionalidades e aplicações no ArcGIS.



**Figura 9 - Esquema da estrutura do sistema integrada ao ambiente ArcGIS. As ferramentas de análise são programadas em VBA utilizando os componentes ArcObjects**

Cada usuário (sede municipal) é cadastrado especificando-se o nome da sede, a vazão efluente, a temperatura da água efluente (considerada 20 °C) e as concentrações de lançamento dos poluentes analisados (DBO, Fósforo total e Coliformes termotolerantes). O trecho de rio ao qual o usuário está ligado é definido com uma seleção direta utilizando o mouse (Figura 10 e Figura 11).

A programação no VBA também é responsável pelas operações de propagação, diluição e atualização das concentrações nas colunas correspondentes situadas na tabela de atributos. Além disso, a interface disponibiliza os resultados em forma de mapas de concentrações (classificados de acordo com a Resolução CONAMA n° 357) e gráficos (perfis longitudinais de concentrações) para visualização e melhor interpretação destes resultados por parte do usuário.

**Inserir Lançamento**

Propriedades do trecho

Número do elemento:	22532	Classe de enquadramento:	classe 2
Temperatura (°C):	18.81	DBO (mg/L):	387.11
Coliformes (org/100mL):	7166897.7	Fósforo (mg/L):	21.5
Vazão de referência (m³/s) :	213	Vazão indisponível (m³/s) :	8869366.03

Lançamento

Nome do usuário =  Nº do processo =

Localização - UTM (m)

Coord. X =   
 Coord. Y =

Dados do efluente

Vazão (m³/h)	Temperatura (°C)	DBO5,20 (mg/L)	Coliformes (org/100mL)	P total (mg/L)
887.48	20	86.38	79980	16.80

Confirma

Inserir dados

Figura 10 – Interface do Modelo: Inserção de usuário (sede municipal)

**Inserir Lançamento**

Propriedades do trecho

Número do elemento:	22532	Classe de enquadramento:	classe 2
Temperatura (°C):	18.81	DBO (mg/L):	387.11
Coliformes (org/100mL):	7166897.7	Fósforo (mg/L):	21.5
Vazão de referência (m³/s):	213	Vazão indisponível (m³/s):	8869366.03

Lançamento

Nome do usuário =  Nº do processo =

Localização - UTM (m)

Coord. X =   
Coord. Y =

Dados do efluente

Vazão (m³/h)	Temperatura (°C)	DBO5,20 (mg/L)	Coliformes (org/100mL)	P total (mg/L)
<input type="text" value="887.48"/>	<input type="text" value="20"/>	<input type="text" value="86.38"/>	<input type="text" value="79980"/>	<input type="text" value="16.80"/>

Vazão de diluição (m³/h)

Temperatura	DBO5,20	Coliformes	P total	Parâmetro crítico
<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="-189.01"/>	<input type="text" value="-9.78"/>	<input type="text" value="-692.57"/>	<input type="text" value="Temperatur"/>

Q indisp usuário (m³/h):  Comp. usuário (%):  Q indisp trecho (m³/h):  Comp. trecho (%):

Valores dos parâmetros no ponto imediatamente à jusante do lançamento

Temperatura	DBO5,20	Coliformes	P total
<input type="text" value="19.77"/>	<input type="text" value="144.58"/>	<input type="text" value="1451449.78"/>	<input type="text" value="17.71"/>
T / T lim (%)	DBO / DBO lim (%)	Col / Col lim (%)	P / P lim (%)
<input type="text" value="59"/>	<input type="text" value="4752.67"/>	<input type="text" value="145159.48"/>	<input type="text" value="58800"/>

Figura 11 – Confirmação do usuário (sede municipal) inserido e características imediatamente a jusante do lançamento

## 4.5 Processos de propagação de qualidade da água na rede esquemática

O módulo de qualidade da água foi baseado no modelo QUAL2E (Brown & Barnwell, 1987), o qual estabelece que a variação da concentração do poluente remanescente ( $P$ ) em um infinitésimo de tempo ( $dt$ ) é igual a concentração do poluente multiplicada por uma constante de decaimento ( $K$ ), podendo ser escrita como:

$$\frac{dP}{dt} = -K \cdot P \quad (3)$$

A equação diferencial tem solução analítica, considerando a variação da concentração do espaço e regime permanente, dada por:

$$P_{i+1} = P_i \cdot \exp\left(\frac{-K \cdot L_i}{U_i}\right) \quad (4)$$

onde  $P_i$  e  $P_{i+1}$  são as concentrações do poluente nos trechos  $i$  (montante) e  $i+1$  (jusante), respectivamente;  $L_i$  é o comprimento em metros do trecho de rio  $i$  e  $U_i$  é a velocidade média, em  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ , no trecho  $i$ . A velocidade média foi estimada pela seguinte relação:

$$U_{i+1} = \frac{Q_i}{A_i} \quad (5)$$

onde  $Q_i$  é a vazão em  $\text{m}^3\text{s}^{-1}$  e  $A_i$  é a área da seção transversal em  $\text{m}^2$ . A área da seção transversal em cada trecho foi estimada através de uma relação potencial com a área de drenagem. Esta relação foi construída a partir dos dados de área da seção transversal encontrados nas estações fluviométricas.

A diluição das concentrações também é considerada no processo de propagação e depende da vazão do trecho. A concentração do poluente ao final do processo de diluição no trecho de rio é dada por:

$$C_{i+1}^{t+1} = \frac{C_i^t Q_i + C_{i+1}^t Q_{i+1}}{Q_i + Q_{i+1}} \quad (6)$$

## 4.6 Saídas do Sistema

Uma vez inseridos todos os usuários (sedes municipais), com a suas respectivas vazões efluentes e concentrações de poluentes, e depois do cálculo das concentrações trecho a trecho, considerando os respectivos lançamentos totais a montante de cada trecho analisado, o sistema disponibiliza saídas gráficas e numéricas que ajudam a representar a situação da bacia em termos de classe de uso de acordo com a classificação da resolução CONAMA nº 357. Estas

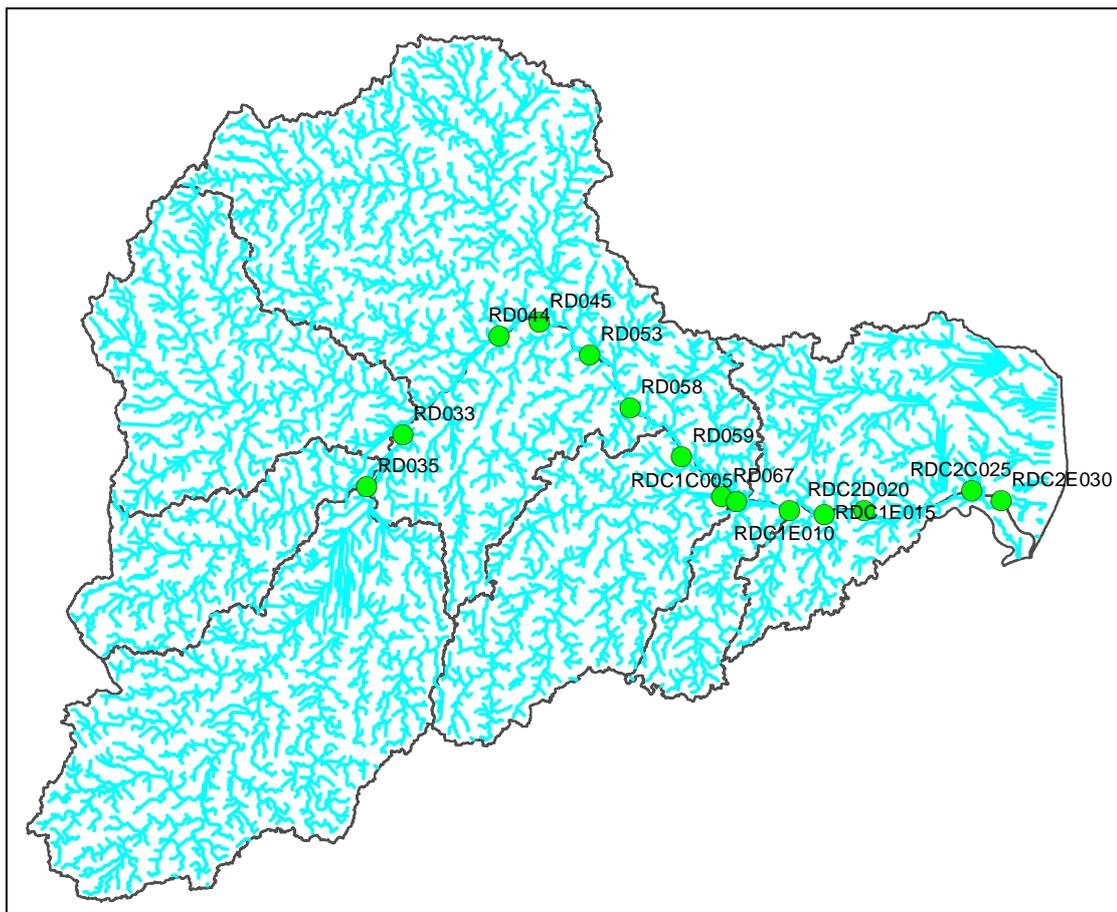
ferramentas se constituem em apoio às decisões relacionadas à gestão de recursos hídricos.

#### **4.7 Calibração do modelo para a bacia do rio Doce**

Existem duas fontes de monitoramento da qualidade da água na bacia do rio Doce: (a) o Instituto Mineiro de Gestão das Águas (IGAM/MG), que monitora regularmente (em média quatro levantamentos por ano, desde 1997) diversas variáveis de qualidade da água em vários pontos do lado Mineiro da bacia do rio Doce; e (b) o Instituto Estadual de Meio Ambiente do Estado do Espírito Santo (IEMA/ES), o qual monitorou entre 2006 e 2007 (em três levantamentos por ano) algumas variáveis de qualidade da água para alguns pontos do lado Capixaba da bacia do rio Doce.

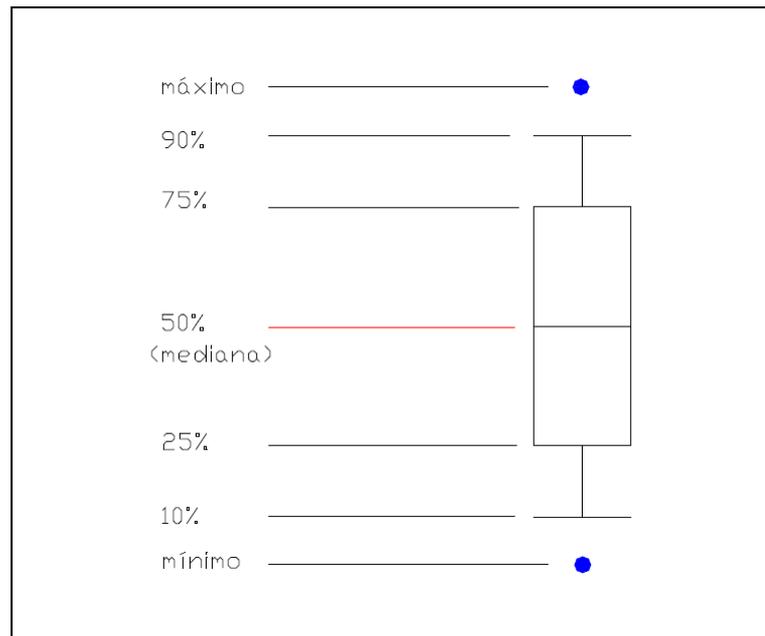
Para a calibração do modelo, foram selecionados 12 pontos de monitoramento ao longo do rio Doce (7 pontos do IGAM e 5 pontos do IEMA). A localização dos pontos selecionados pode ser observada na Figura 12.

Para a comparação com a saída do modelo, apenas os dados observados no período de estiagem foram selecionados, uma vez que o modelo simula a qualidade da água para uma vazão mínima de referência,  $Q_{95\%}$ , e em uma condição de regime permanente. Os valores observados são apresentados como *boxplot* e foram posicionados no gráfico de acordo com a sua localização no rio Doce. O *boxplot* é um gráfico que possibilita representar a distribuição de um conjunto de dados com base em alguns de seus parâmetros descritivos, quais sejam: a mediana, o quartil inferior, o quartil superior e do intervalo interquartil (Figura 13).



**Figura 12 - Localização dos pontos de monitoramento ao longo do rio Doce utilizados para a calibração do modelo hidrológico de qualidade de água**

A linha central do *boxplot* marca a mediana do conjunto de dados. A parte inferior da caixa é delimitada pelo quartil inferior ( $q_1$ ) e a parte superior pelo quartil superior ( $q_3$ ). As hastes inferiores e superiores se estendem, respectivamente, do quartil inferior até o menor valor não inferior a  $q_1 - 1,5 \cdot (q_3 - q_1)$  e do quartil superior até o maior valor não superior a  $q_3 + 1,5 \cdot (q_3 - q_1)$ . Os valores inferiores a  $q_1 - 1,5 \cdot (q_3 - q_1)$  e superiores a  $q_3 + 1,5 \cdot (q_3 - q_1)$  são representados individualmente no gráfico sendo estes valores caracterizados como *outliers*. O *boxplot* permite avaliar a simetria dos dados, sua dispersão e a existência ou não de *outliers* nos mesmos, sendo especialmente adequado para a comparação de dois ou mais conjuntos de dados correspondentes às categorias de uma variável qualitativa.



**Figura 13 – Representação *boxplot* utilizada para calibração do modelo de qualidade da água. Fonte: UNEP (1995)**

Para a calibração do modelo, utilizou-se o seguinte procedimento: primeiramente os valores dos parâmetros do modelo (coeficientes de decaimento) foram predefinidos de acordo a faixa de variação estabelecida na literatura (Tucci, 1998); subsequentemente, os parâmetros do modelo foram manualmente e gradativamente alterados até que se atingisse uma melhor correspondência entre a saída do modelo e os *boxplots*.

#### **4.8 Descrição dos cenários de simulação**

Foram simulados 02 (dois) cenários de qualidade de água visando atender os padrões de qualidade de água exigidos para rios de Classe 2 (destinada ao uso para abastecimento humano, com tratamento convencional). Esta avaliação focou três variáveis de qualidade da água (DBO5, Fósforo Total e Coliformes Termotolerantes), os quais foram observados como sendo os mais críticos em amostras levantadas da qualidade da água. Foram simulados os seguintes cenários:

- cenário de tratamento futuro, considerando o funcionamento das ETE's do cenário atual e a implementação das ETE's previstas e indicadas pela proposta de enquadramento da bacia do rio Doce (IGAM 2010), acrescidas da implantação de ETE's nas grandes cidades, considerando um nível de 100% de atendimento e tratamento de esgoto;

- cenário de tratamento universal, considerando o funcionamento das ETE's em um nível de atendimento e tratamento de 100% para todas as sedes municipais da bacia do rio Doce.

A localização das ETE's atualmente em funcionamento e as ETE's com implantação prevista e indicada no enquadramento podem ser observadas na Figura 14.

As simulações dos cenários levaram em conta ainda: (a) a vazão de referência como sendo a  $Q_{95}$ , para avaliar o efeito da diluição nos efluentes em uma condição desfavorável em termos de vazões; e (b) uma eficiência de remoção das concentrações dos poluentes que corresponde a um sistema de tratamento secundário (eficiência média de remoção de 80% para DBO, 30% para Fósforo Total e 99% para a concentração de Coliformes Termotolerantes).

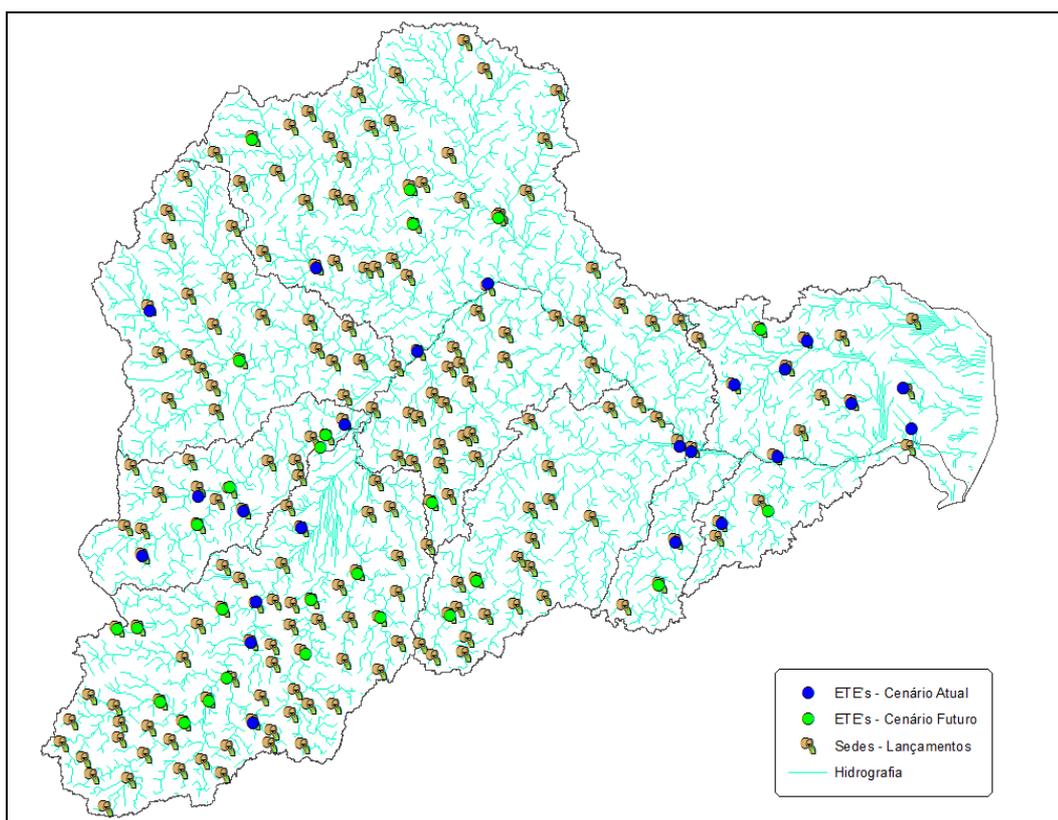


Figura 14 – Localização das sedes municipais e das ETE's para o cenário atual e futuro

## 5. Resultados

### 5.1 Disponibilidade Hídrica e Qualidade da água

#### a) Disponibilidade Hídrica

##### *Vazões características médias e Curva de Permanência*

Os fluviogramas de vazões médias e curvas de permanências geradas para todas as sub-bacias hidrográficas estudadas, conforme exemplificado na Figura 15 e Figura 16, são apresentados no Anexo A.

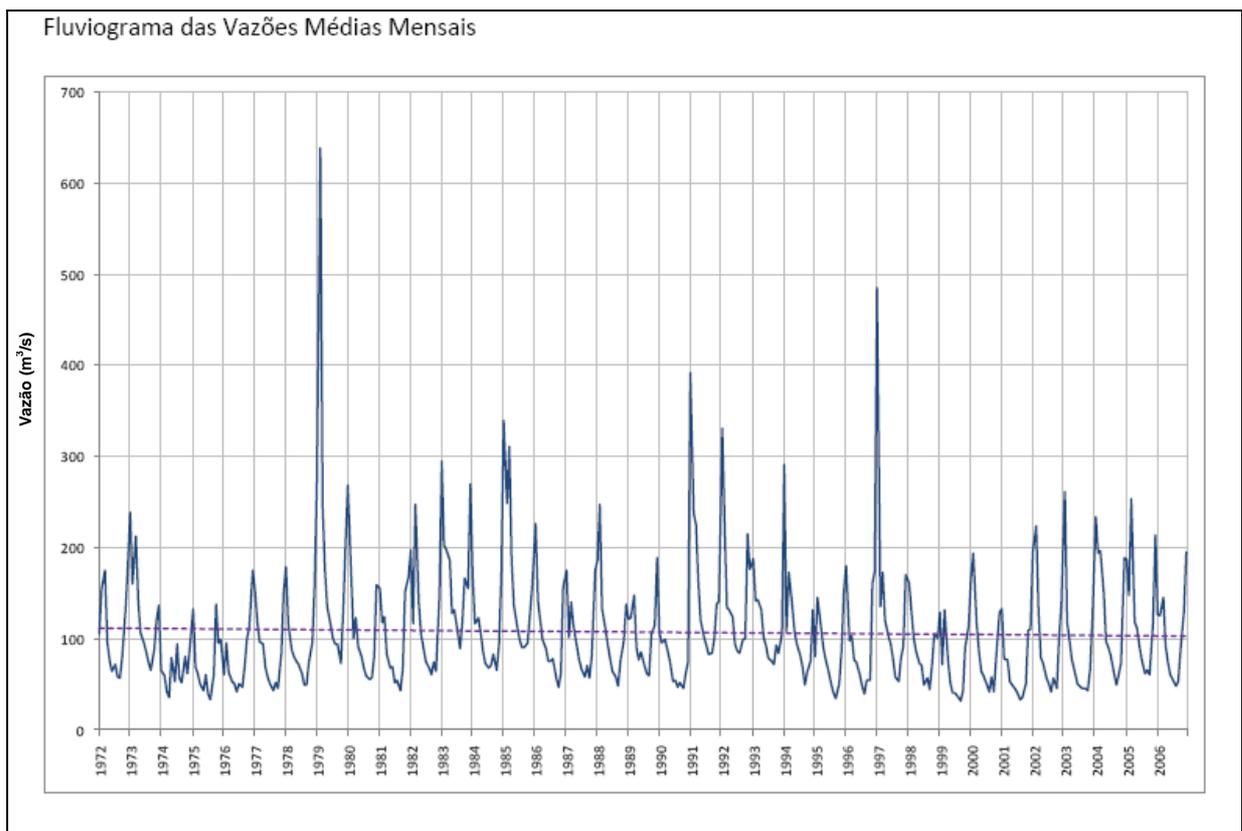


Figura 15 – Fluviograma das vazões médias mensais para a sub-bacia do rio Piranga

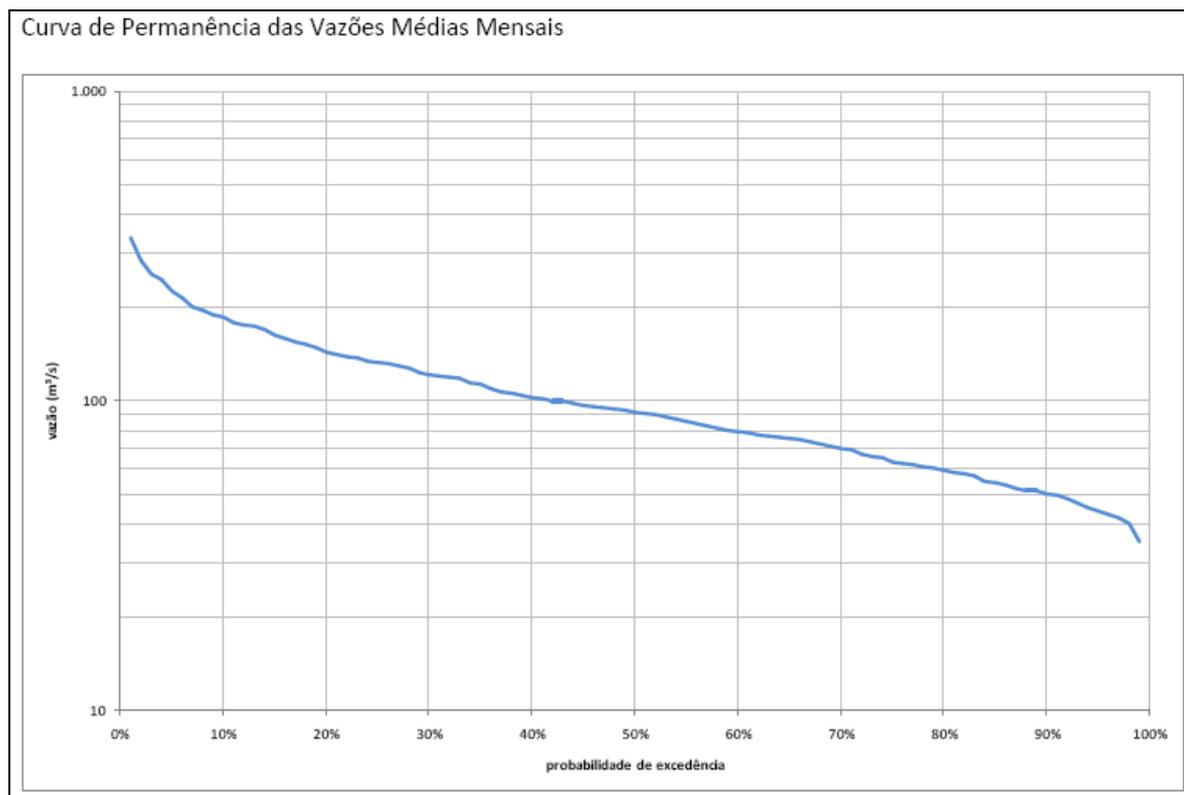


Figura 16 – Curva de permanência de vazões médias mensais para a sub-bacia do rio Piranga

#### Vazões de Referência $Q_{95\%}$

A Tabela 5 apresenta as vazões  $Q_{95\%}$  e  $Q_{MLT}$  para cada sub-bacia da bacia do rio Doce.

#### b) Estimativa das cargas poluidoras por município

As estimativas das vazões efluentes e das concentrações geradas por município da bacia do rio Doce são apresentadas no Anexo B.

Tabela 5. Disponibilidade hídrica em cada sub-bacia da bacia do rio Doce

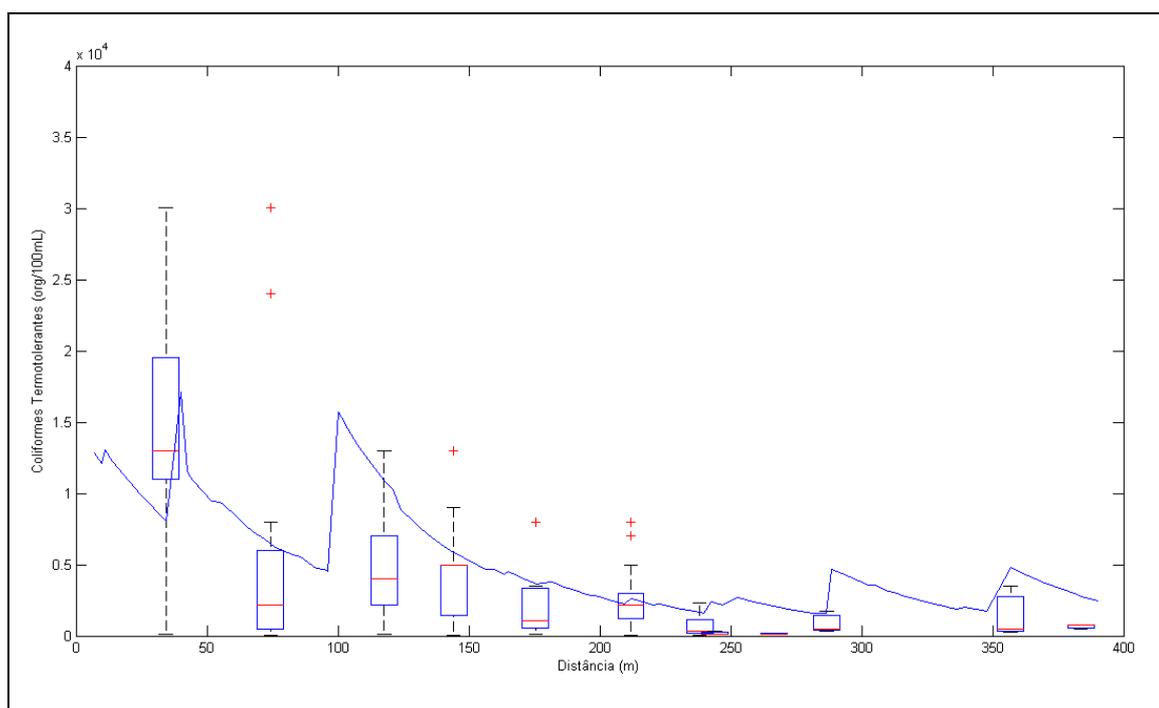
Sub-bacia	Área de drenagem	Área	vazão específica		vazão	
			(L/s/km <sup>2</sup> )		(m <sup>3</sup> /s)	
	(km <sup>2</sup> )	(%)	q <sub>MLT</sub>	q <sub>95%</sub>	Q <sub>MLT</sub>	Q <sub>95%</sub>
rio Piranga	6616	0,08	16,3	6,61	108	43,7
rio do Carmo	2265	0,027	22,2	11,2	50,3	25,4
rio Casca	2511	0,03	13,1	5,01	32,8	12,6
rio Matipó	2581	0,031	14,2	4,57	36,8	11,8
rio Piracicaba	5444	0,066	18	6,84	97,9	37,3
rio Santo Antônio	10442	0,126	16,9	6,26	176,3	65,4
rio Corrente Grande	2480	0,03	13,8	5,07	34,1	12,6
rio Suaçuí Pequeno	1721	0,021	10	4,1	17,2	7,05
rio Suaçuí Grande	12432	0,15	8,32	2,34	103,4	29,1
rio Caratinga	3227	0,039	9,81	2,62	31,7	8,47
rio Manhuaçu	8826	0,107	11,2	3,68	98,7	32,5
rio Guandu	2125	0,026	10,4	3,38	22	7,18
rio Santa Joana	906	0,011	8,74	1,58	7,91	1,43
rio Pancas	1180	0,014	12	1,56	14,1	1,84
rio São José	2366	0,029	14,2	2,47	33,7	5,84
Bacia incremental*	17633	0,213	13,3	5,2	581,2	218,6
BACIA do RIO DOCE	82755	1	11,5	3,76	950,4	311,3
rio Barra Seca	3960	-	11,48	3,76	45,5	14,9
Bacia incremental - 1	1863	0,023	14	6,44	222,5	102
Bacia incremental - 2	2924	0,035	14,6	5,96	352,7	144,2
Bacia incremental - 3	981	0,012	14,7	5,8	583,7	231,2
Bacia incremental - 4	3165	0,038	13,2	5,23	728,9	290,1
Bacia incremental - 5	2748	0,033	11,9	4,22	728,7	259,1
Bacia incremental - 6	2543	0,031	11,5	3,76	870,5	285,1

\* A bacia incremental foi subdividida em 6 frações: (1) Cachoeira dos óculos – montante; (2) Cenibra; (3) Governador Valadares; (4) Tumiritinga; (5) Resplendor – jusante; (6) Colatina.

## 5.2 Calibração

Os resultados da calibração do modelo são apresentados a seguir para as variáveis Coliformes termotolerantes (Figura 17), Fósforo Total (Figura 18) e DBO (Figura 19), respectivamente.

Observa-se uma boa aproximação, em termos médios, dos valores estimados pelo modelo e os *boxplots*. Claramente o modelo representou o decaimento das concentrações das variáveis de qualidade da água ao longo da calha do rio Doce devido ao efeito de diluição (esse decaimento é mais acentuado para a variável Coliformes termotolerantes). O modelo também conseguiu representar bem os picos de concentração, observados no perfil a montante, referentes ao lançamento de efluentes de grandes centros urbanos ao longo do rio Doce tais como Ipatinga, Timóteo e Governador Valadares. A elevação das concentrações na parte final do trecho devido ao lançamento de efluentes em Colatina e Linhares (Espírito Santo) também foi traçada pelo modelo, onde ocorreu uma superestimativa dos valores em termos médios. Os valores dos coeficientes de decaimento (K) calibrados para cálculo de Coliformes termotolerantes, Fósforo Total, e DBO<sub>5</sub> foram: 0,90 dia<sup>-1</sup>; 0,12 dia<sup>-1</sup>; 0,23 dia<sup>-1</sup> respectivamente.



**Figura 17 - Comparação das concentrações de Coliformes termotolerantes estimadas pelo modelo com os dados observados no período de estiagem ao longo da calha do rio Doce (de montante para jusante). Os dados observados são apresentados como *boxplot* e foram posicionados no gráfico de acordo com a sua localização no rio Doce**

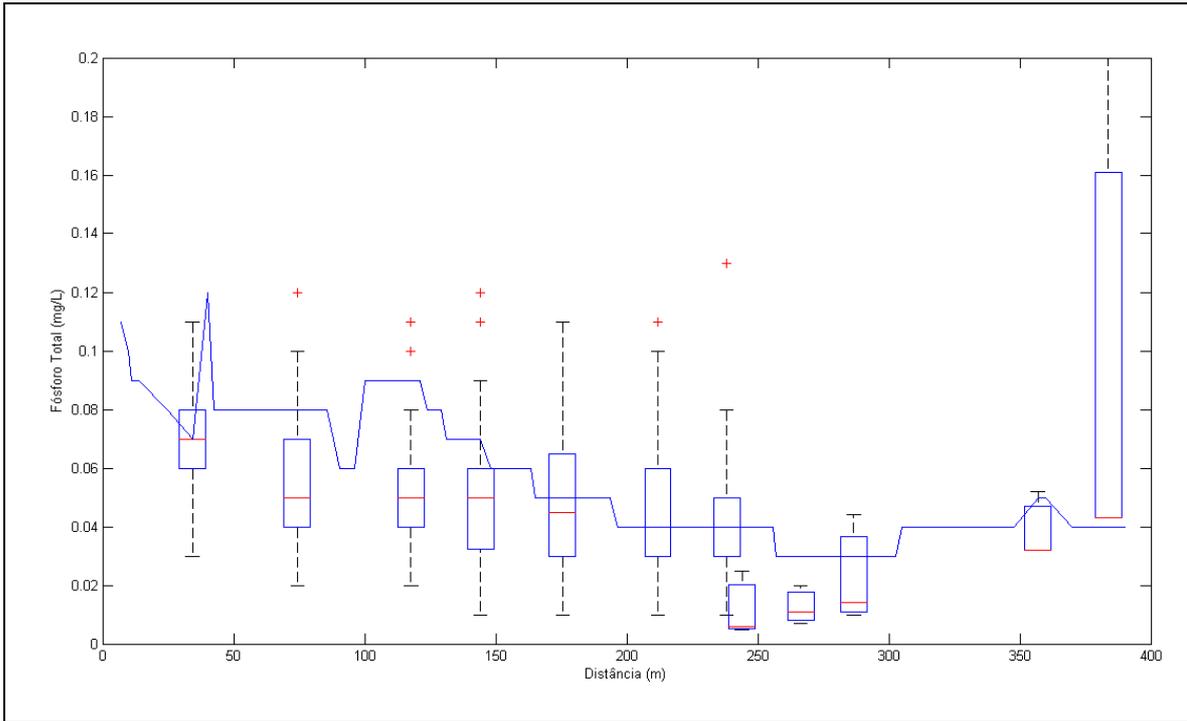


Figura 18 - Comparação das concentrações de Fósforo Total estimadas pelo modelo com os dados observados no período de estiagem ao longo da calha do rio Doce (de montante para jusante). Os dados observados são apresentados como *boxplot* e foram posicionados no gráfico de acordo com a sua localização no rio Doce

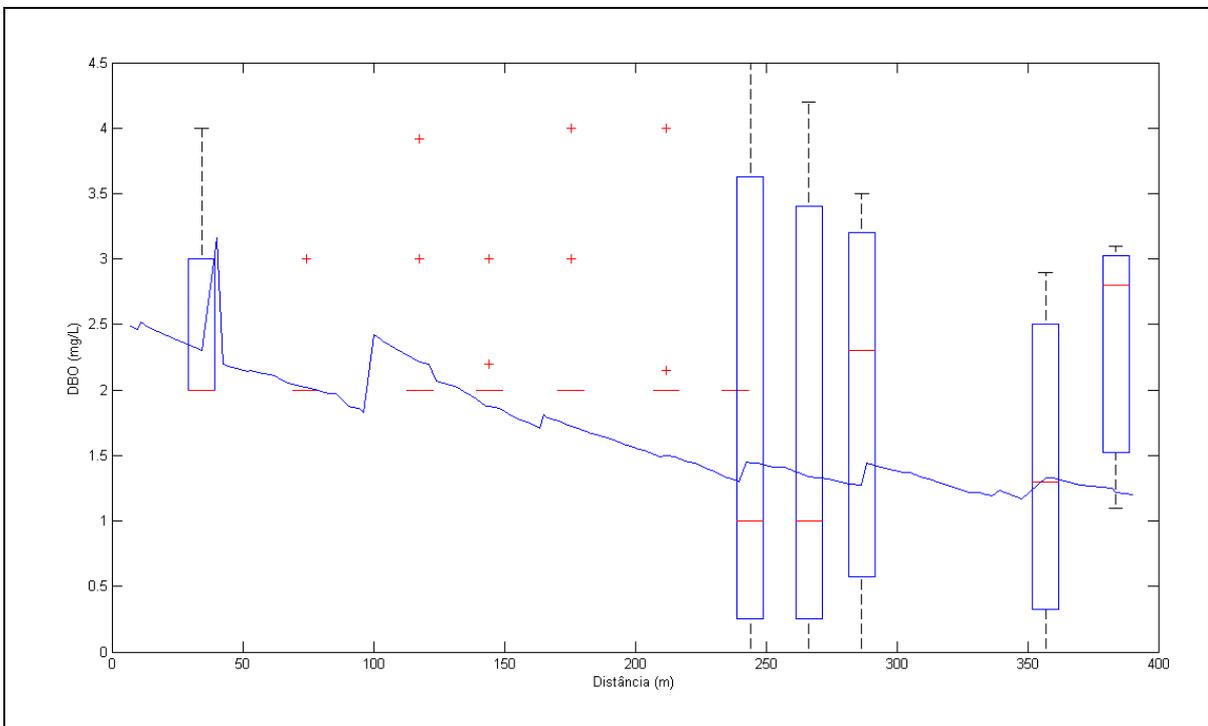


Figura 19 - Comparação das concentrações de DBO estimadas pelo modelo com os dados observados no período de estiagem ao longo da calha do rio Doce (de montante para jusante). Os dados observados são apresentados como *boxplot* e foram posicionados no gráfico de acordo com a sua localização no rio Doce

### 5.3 Cenários de simulação

Com a definição de todos os lançamentos na Bacia do rio Doce, foi analisada a qualidade da água para cada trecho da rede de drenagem, considerando o escoamento em regime permanente, sendo a  $Q_{95}$  como a vazão de referência para os cenários de tratamento futuro e universal.

Para cada cenário de tratamento, cada trecho foi classificado, considerando as variáveis Coliformes Termotolerantes (Figura 20), DBO (Figura 21) e Fósforo Total (Figura 22), de acordo com a Resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) nº 357, de 2005.

No cenário futuro, considerando as ETE's previstas e indicadas no âmbito do enquadramento do PIRH da Bacia do rio Doce, acrescidas da previsão de tratamento das cargas orgânicas das grandes cidades, foi observado que estas medidas promovem uma significativa redução das concentrações das variáveis de qualidade da água. No entanto, estas reduções não são suficientes para mudar a classificação de uso das águas do rio Doce para classe 1 completamente, considerando a variável Coliformes Termotolerantes.

Em termos de Coliformes Termotolerantes, o trecho total do rio Doce pode ser classificado como Classe 3 (concentrações variando na faixa entre Classe 1, 2 e 3).

Em termos de  $DBO_5$ , a situação é mais confortável. Todo o trecho do rio Doce pode ser considerado como Classe 1. Considerando a variável Fósforo Total, a situação também é satisfatória em todos os trechos do rio Doce, nos quais as concentrações ficam abaixo do limite estabelecido para Classe 1 (0,15 mg P/L).

Observa-se que ações de tratamento de esgoto nas principais sedes na bacia do Doce podem promover melhorias em termos de qualidade da água (neste caso, boa parte do rio Doce seria Classe 1 para DBO e Fósforo Total).

Observa-se, também, que existe um efeito da diluição ao longo do rio Doce que atenua as concentrações das variáveis de qualidade da água (Figura 23 a Figura 25).

Alguns afluentes do rio Doce contribuem positivamente para a qualidade da água como, por exemplo, rio Santo Antônio e rio Suaçuí Grande, reduzindo as concentrações das variáveis de qualidade da água imediatamente a jusante destas confluências.

A simulação considerando o tratamento universal em todas as sedes municipais da bacia do rio Doce mostra que o rio Doce poderia ser classificado como Classe 1 para as variáveis analisadas. O efeito do tratamento universal é mais significativo para Coliformes Termotolerantes, onde se observa uma grande redução das concentrações em comparação com o cenário futuro. As concentrações das demais variáveis de qualidade de água também são reduzidas, no entanto não foi observado uma grande redução em relação ao cenário futuro.

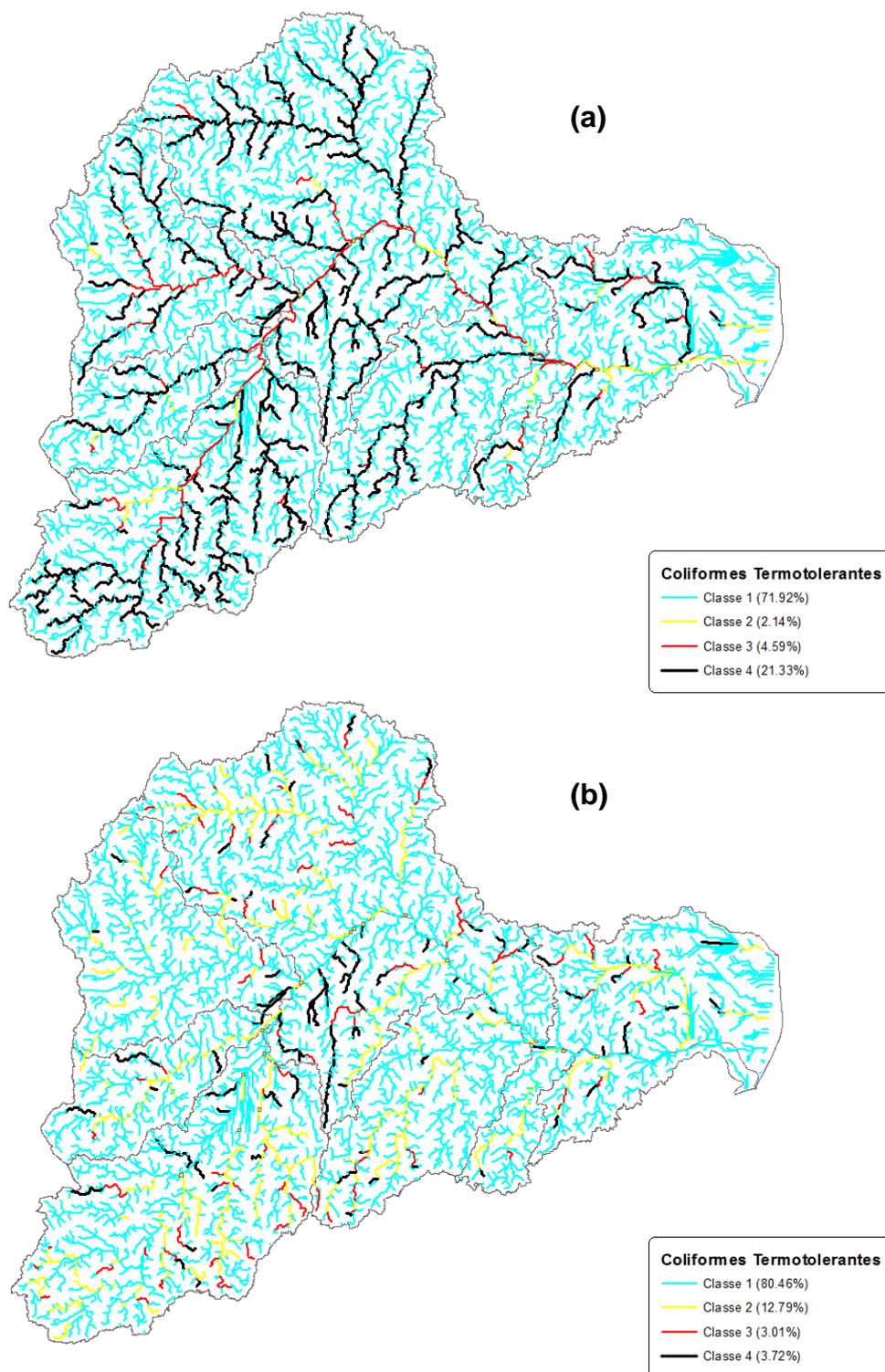


Figura 20 – Classificação em termos de Coliformes Termotolerantes considerando a vazão de referência como sendo a  $Q_{95\%}$  e os cenários de: (a) tratamento futuro; e (b) tratamento universal

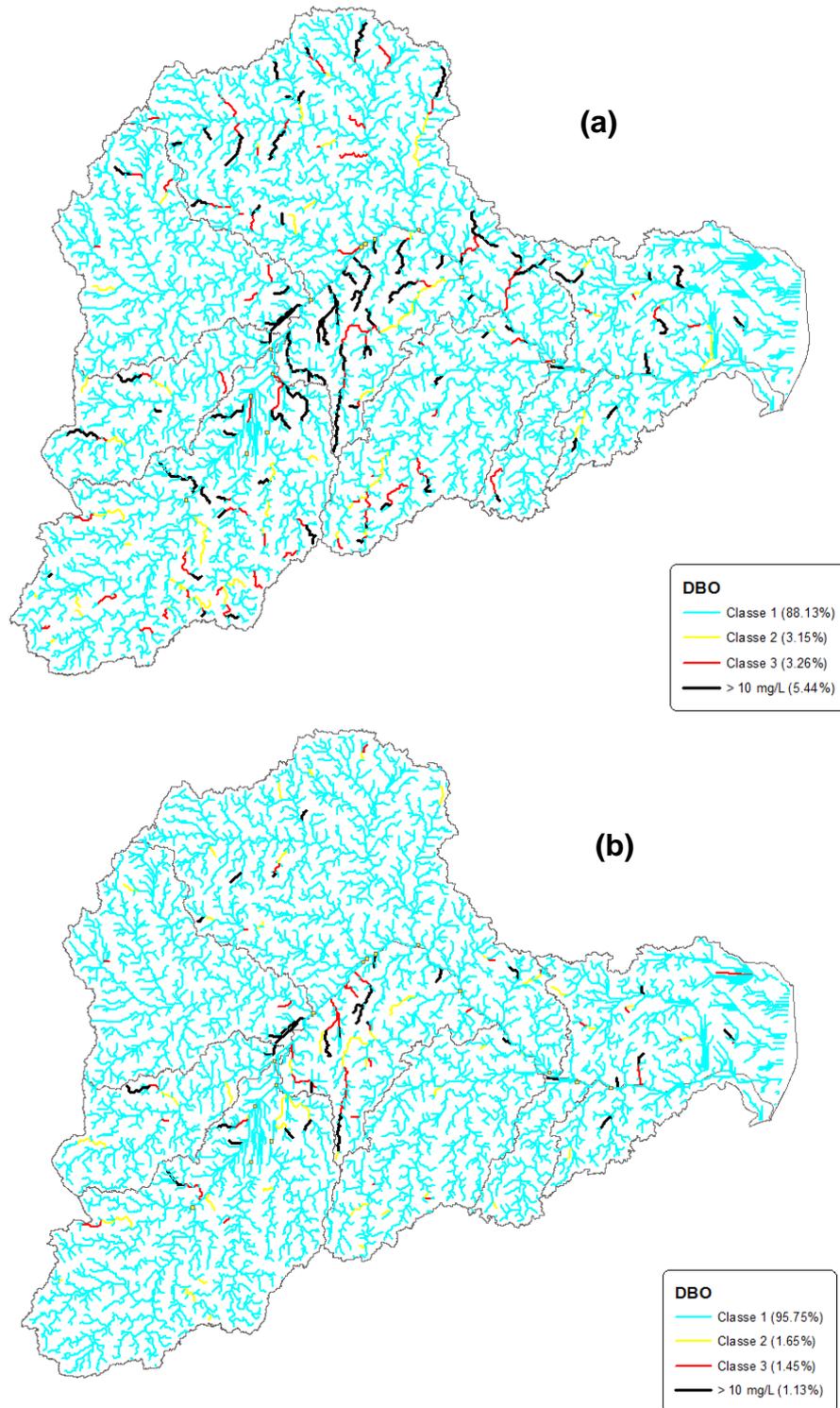


Figura 21 – Classificação em termos de DBO<sub>5</sub> considerando a vazão de referência como sendo a Q<sub>95%</sub> e os cenários de: (a) tratamento futuro; e (b) tratamento universal

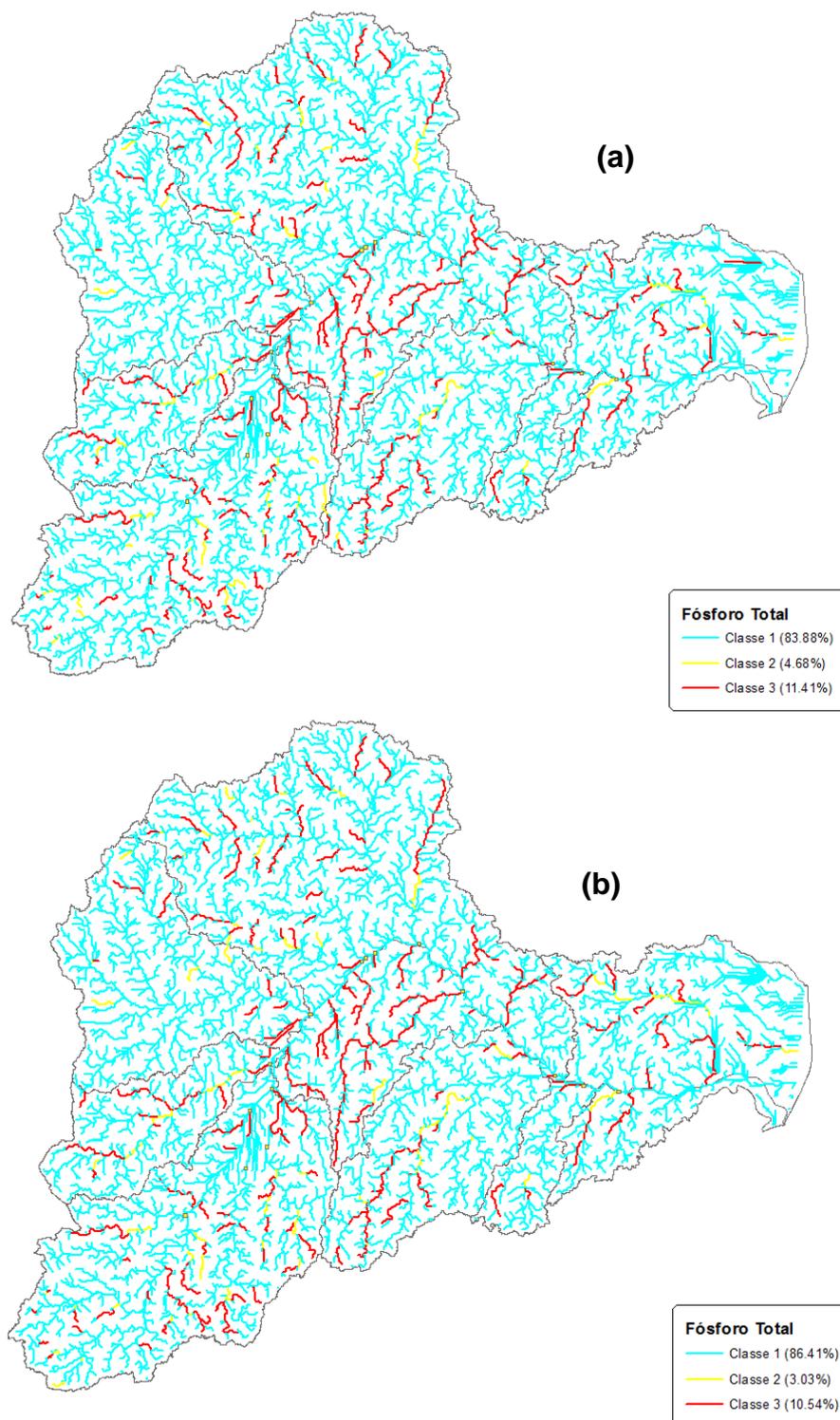


Figura 22 – Classificação em termos de Fósforo Total considerando a vazão de referência como sendo a  $Q_{95\%}$  e os cenários de: (a) tratamento futuro; e (b) tratamento universal

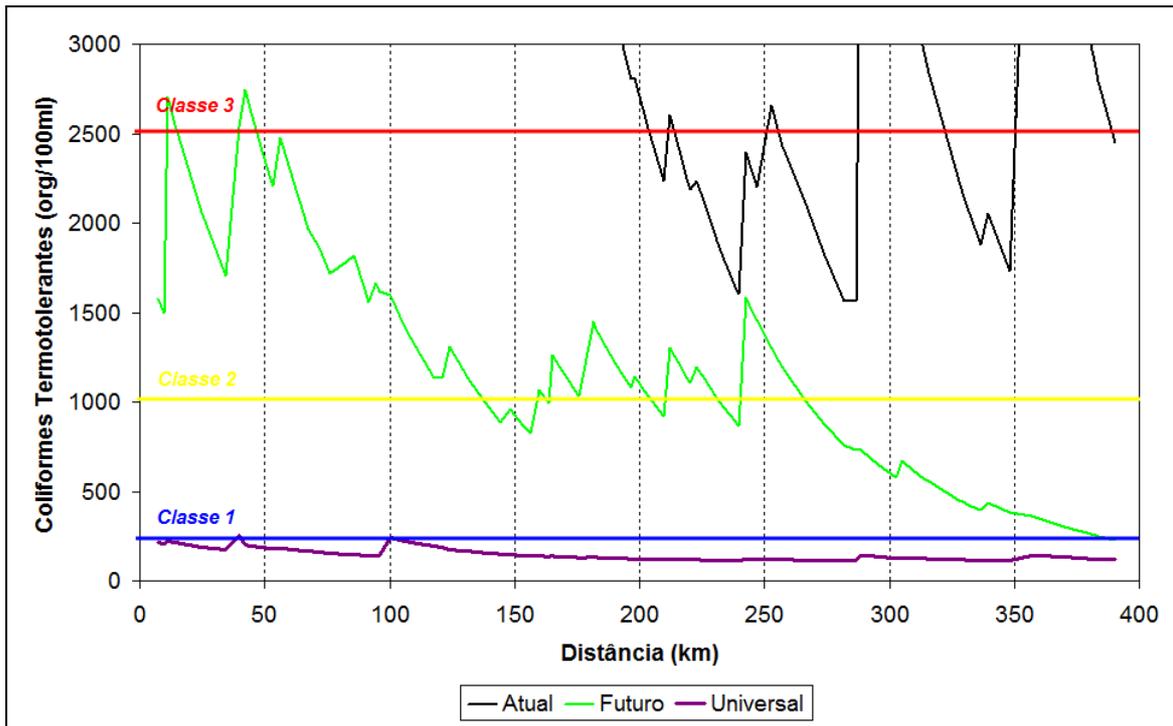


Figura 23 – Perfil longitudinal da concentração de Coliformes Termotolerantes em organismos/100ml ao longo do rio Doce (de montante para jusante), considerando a  $Q_{95\%}$  como vazão de referência

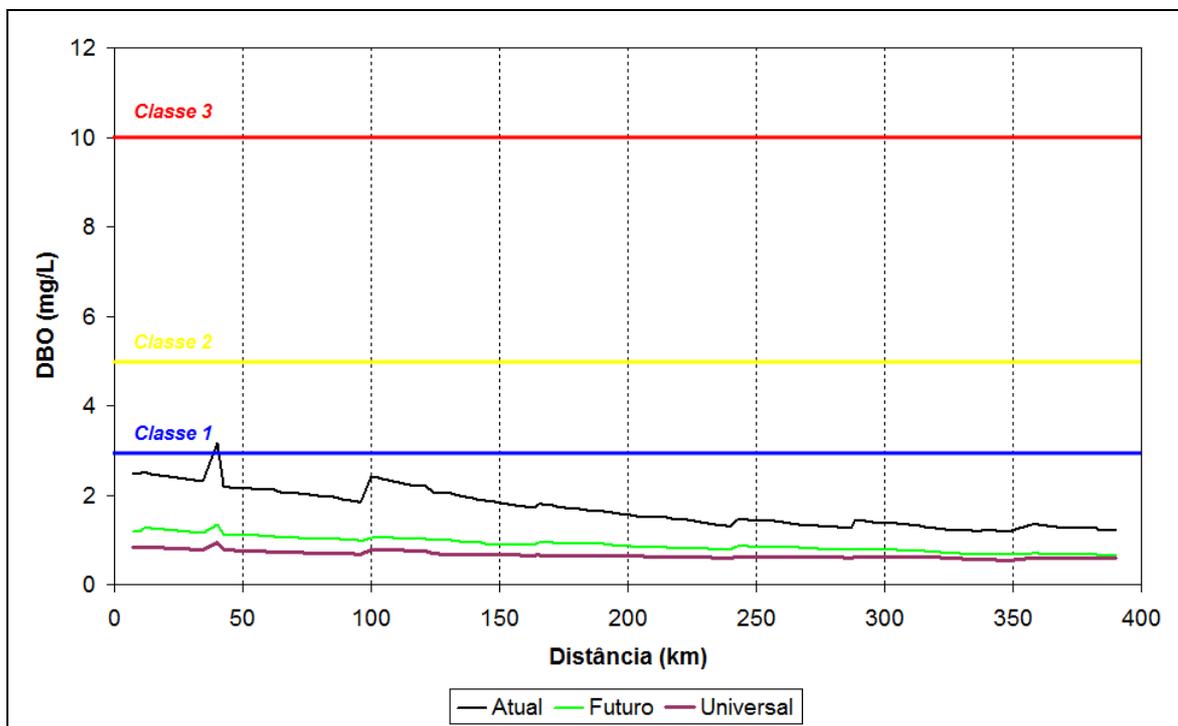


Figura 24 – Perfil longitudinal da concentração de  $DBO_5$  em mg/L ao longo do rio Doce (de montante para jusante), considerando a  $Q_{95\%}$  como vazão de referência

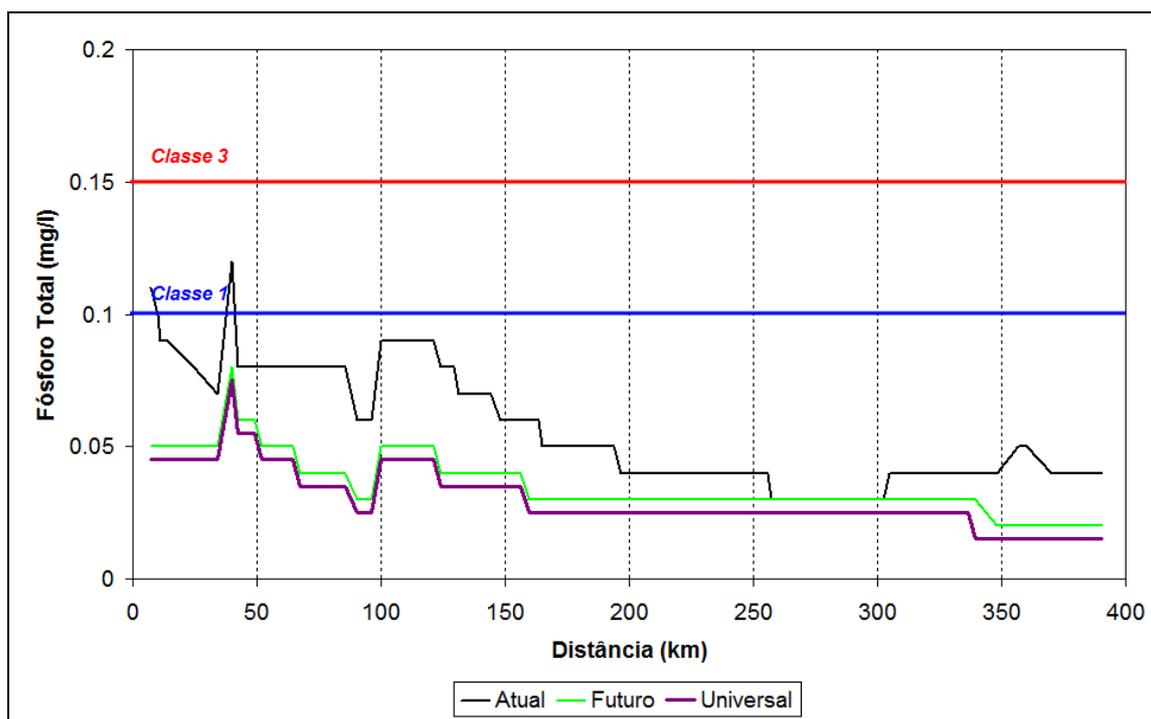


Figura 25 – Perfil longitudinal da concentração de Fósforo Total em mg/L ao longo do rio Doce (de montante para jusante), considerando a  $Q_{95\%}$  como vazão de referência

A modelagem para o Cenário Futuro indicou que na foz de algumas bacias não serão alcançados os limites, por exemplo, para classe 2, considerando as variáveis de qualidade da água analisadas. Ou seja, as ações propostas melhoram a qualidade da água destas bacias em relação ao cenário atual, mas não o suficiente para que se alcance os padrões adequados ao abastecimento humano com tratamento convencional (Classe 2).

## **6. Discussão**

O modelo hidrológico integrado a um SIG foi útil para avaliar as consequências de múltiplos fatores (e.g. baixa disponibilidade da água para diluição, fontes pontuais de poluição e reações cinéticas) na qualidade da água da bacia do rio Doce.

Apesar da grande quantidade disponível de modelos de qualidade da água aplicados a rios, a capacidade de aplicação e interpretação dos resultados da maioria destes modelos é limitada devido a dificuldade de uso e manuseio por grande parte dos usuários (Rauch *et al.* 1998a). A estratégia de integração de modelos hidrológicos em ambiente SIG permite oferecer um ambiente interativo para o usuário, facilitando o processo de tomada de decisão para planejamento da qualidade da água em rios (Srinivasan & Arnold, 1994). Esta abordagem integrada também pode ser replicada e facilmente empregada em outras bacias hidrográficas. Ela também tem um grande potencial de aplicação em Planos Integrados de Recursos Hídricos (PIRH's).

No entanto, a integração de modelos hidrológicos em ambiente SIG também requer uma reflexão sobre suas limitação e desafios futuros (Lee & White, 1992). Estas limitações estão relacionadas ao nível ideal de discretização espacial, dificuldade de parametrização dos modelos, calibração do modelo em um contexto espacial, seleção de uma escala apropriada aos propósitos do estudo, migração de erros dos dados de entrada, treinamento de novos usuários, falta de uma conexão entre processos físicos, químicos e biológicos para avaliação da qualidade da água em rios (Novotny & Chesters, 1989; Rose *et al.*, 1990). Futuros trabalhos precisam atentar mais para estas deficiências e desenvolver ferramentas úteis para o planejamento dos usos de recursos hídricos.

A estrutura do modelo consiste de uma simples abordagem matemática para representação do escoamento e simulação de variáveis de qualidade da água no período de estiagem. Esta estrutura resultou em apenas um parâmetro por poluente (taxa de decaimento), o que reduziu a complexidade e facilitou no processo de calibração. Apesar das limitações na estrutura do modelo hidrológico, a calibração indicou uma capacidade satisfatória de representação das concentrações dos poluentes ao longo da extensão do rio Doce, sugerindo que a estrutura utilizada foi adequada aos propósitos do estudo. É importante destacar também que além das

incertezas envolvendo a estrutura do modelo para representar a qualidade da água ao longo do rio Doce, podem existir também incertezas agregadas (a) aos valores dos parâmetros do modelo; (b) aos dados observados de qualidade da água para o período correspondente as vazões de estiagem; e (c) aos valores das cargas *per capita* atribuída por poluente em cada município.

As taxas de decaimento dos poluentes podem variar ao longo do curso do rio (de montante para jusante). Trechos de cabeceira geralmente apresentam maiores declividade e conseqüentemente uma maior turbulência (Streeter *et al.* 1936), promovendo maior oxigenação da coluna d'água e mineralização da matéria orgânica. Por uma questão de simplificação, neste estudo, a heterogeneidade espacial dos parâmetros não foi explorada. Aparte dos parâmetros do modelo, verificou-se uma baixa quantidade de análises das variáveis de qualidade da água nos pontos de monitoramento localizados no trecho Capixaba do rio Doce. Como o tamanho da amostra pode influenciar significativamente o cálculo das estatísticas nos *boxplot* (Haan, 1977), a estimativa do modelo, neste trecho, deve ser interpretada com cautela. Outra limitação se refere aos dados medidos de DBO no trecho mineiro do rio Doce. Observou-se uma uniformidade dos valores em torno de  $2 \text{ mg.L}^{-1}$ , que pode ser uma limitação das análises em laboratório e/ou campo, mas que dificilmente aconteceria na prática. Outra fonte de incerteza pode estar associada às estimativas das cargas por município, de modo que para cada poluente o valor da carga pode variar de acordo com uma faixa recomendada. Foi adotado um valor uni-forme para todas as sedes municipais neste estudo que pode não representar bem a realidade local de algum município.

A variabilidade real dos poluentes analisados em rios ainda é bem mais complexa do que a considerada neste estudo. Por exemplo, o oxigênio consumido no processo de mineralização da matéria orgânica (Demanda Bioquímica de Oxigênio) depende não só da quantidade de matéria orgânica disponível para degradação, mas também da concentração de bactérias presentes na água. A mineralização também pode ser limitada pela concentração de oxigênio disponível e pela temperatura (quanto menor for a concentração de oxigênio e quanto menor for a temperatura menor será a mineralização (Fragoso Jr. *et al.*, 2009). Além da

demanda de oxigênio na coluna d'água pode ocorrer também uma significativa demanda de oxigênio por microorganismos bentônicos (Allan & Castillo, 2007). Outros organismos aquáticos tais como fitoplâncton, micro e macro zooplâncton e a ictiofauna também não foram considerados neste estudo, limitando a representação dos ciclos biogeoquímicos e do *loop* microbiano os quais influenciam diretamente as concentrações dos poluentes analisados.

A simulação dos cenários de planejamento mostrou que a implantação de Estações de Tratamento de Esgoto nas principais sedes municipais da bacia do rio Doce promove uma significativa melhoria na qualidade da água, principalmente no cenário de tratamento universal.

Considerando o cenário futuro, medidas de mitigação adicionais precisariam ser implantadas em diversas sub-bacias principalmente nas Unidades de Planejamento DO1 (rios Casca e Matipó) e DO4 (rio Corrente Grande) onde todas as variáveis excederam a condição desejável para o enquadramento (condição de entrega dos rios afluentes ao rio Doce em Classe 2). Uma destas medidas poderia ser, por exemplo, o aumento da eficiência de remoção dos poluentes no processo de tratamento e a implantação de novas ETE's na proposta de enquadramento, principalmente em outras grandes sedes municipais nas bacias do rio Piranga, Casca, Matipó, Piracicaba, Santo Antônio, Corrente Grande, Suaçuí Pequeno, Suaçuí Grande, Caratinga, Manhuaçu, Santa Joana e São José. Estas bacias passam a exigir mais atenção dos órgãos outorgantes para que sejam alcançados os padrões propostos no enquadramento, sobretudo sem que os aportes dos tributários causem restrições ao alcance das metas para o rio Doce.

Considerando o tratamento universal, a condição de entrega na foz, para todas as Unidades de Planejamento, é Classe 1, indicando que o tratamento universal pode ser uma medida eficiente para alcançar os limites para rios de Classe 2. No entanto, seria necessário um investimento de grande porte para implementação desta medida.

O modelo hidrológico em ambiente SIG proposto mostrou ser uma ferramenta promissora para investigação da qualidade da água de bacias hidrográficas para avaliação do cenário atual e de cenários de planejamento. Independente das condições estabelecidas, para um eficiente sistema de controle é importante conhecer o universo das fontes de poluição na bacia hidrográfica, com base em cadastros precisos e atualizados, considerando também a sazonalidade

das cargas poluidoras. Além disso, é importante dispor de um sistema de apoio ao gerenciamento flexível, conforme apresentado neste estudo, considerando aspectos quali-quantitativos, para avaliar o efeitos de novas medidas sem que seja necessário realizar um novo estudo hidrológico. Os resultados demonstraram que este tipo de modelagem poderia preencher importantes lacunas no conhecimento e subsidiar o processo decisório no planejamento de recursos hídricos.

## **7. Recomendações**

Como não se esgotam, com o modelo proposto, nem as questões relativas à tomada de decisão, nem mesmo questões relativas ao próprio modelo, ainda resta uma boa quantidade de perguntas a responder. Dentre elas, sugerimos como prosseguimento da pesquisa, as seguintes direções:

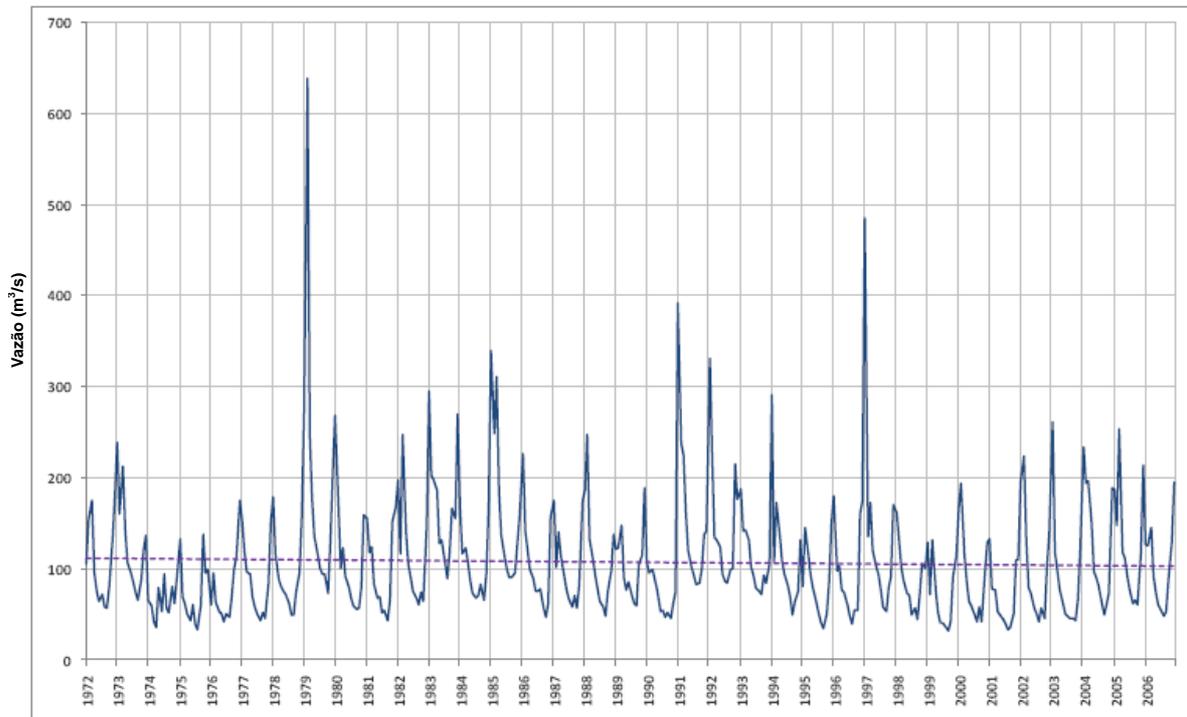
- Automatizar o processo de inclusão dos dados de entrada no modelo;
- Considerar o lançamento de fontes difusas de poluição como dado de entrada;
- Automatizar o processo de calibração do modelo (procura automática dos valores dos parâmetros por trecho);
- Desenvolver análise de incerteza dos parâmetros e dos dados de entrada no modelo;
- Incorporação de modelos dinâmicos chuva-vazão para análise da qualidade da água considerando eventos e séries históricas;
- Utilizar o pacote de qualidade de água apresentado neste estudo para avaliação de pedidos de outorga (análise quali-quantitativa).

## **ANEXO A. Disponibilidade Hídrica**

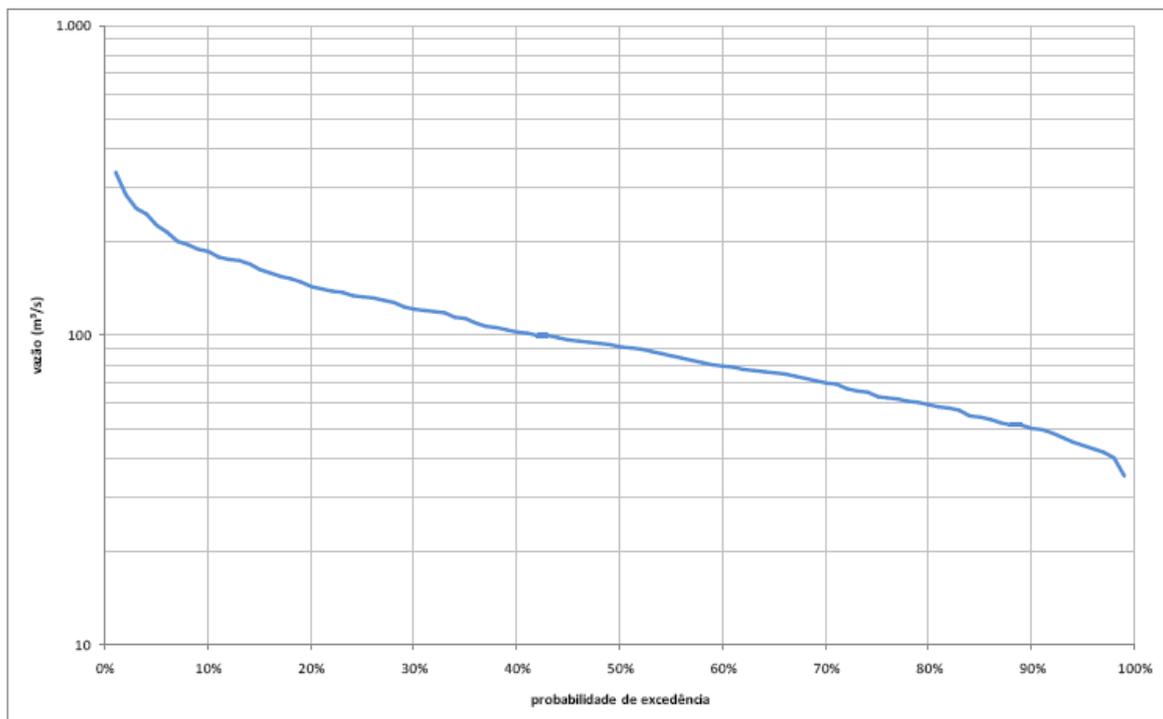
## 1. Bacia Hidrográfica do rio Piranga

Área de drenagem: 6.616 km<sup>2</sup>

Fluviograma das Vazões Médias Mensais



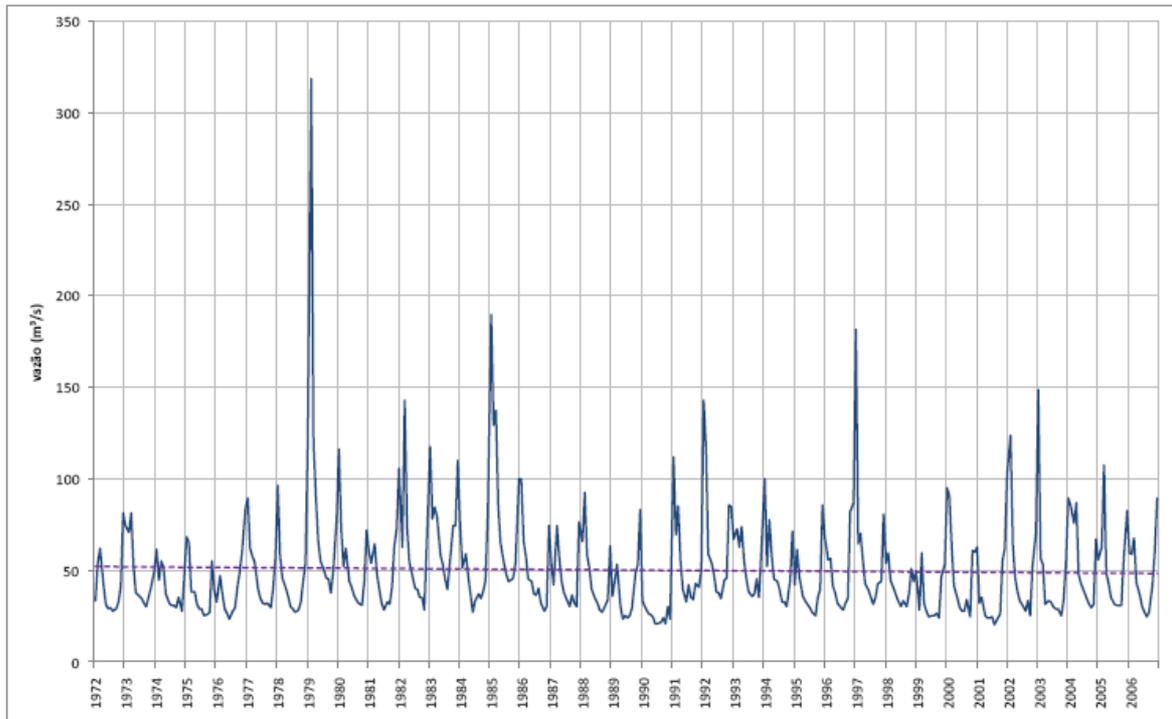
Curva de Permanência das Vazões Médias Mensais



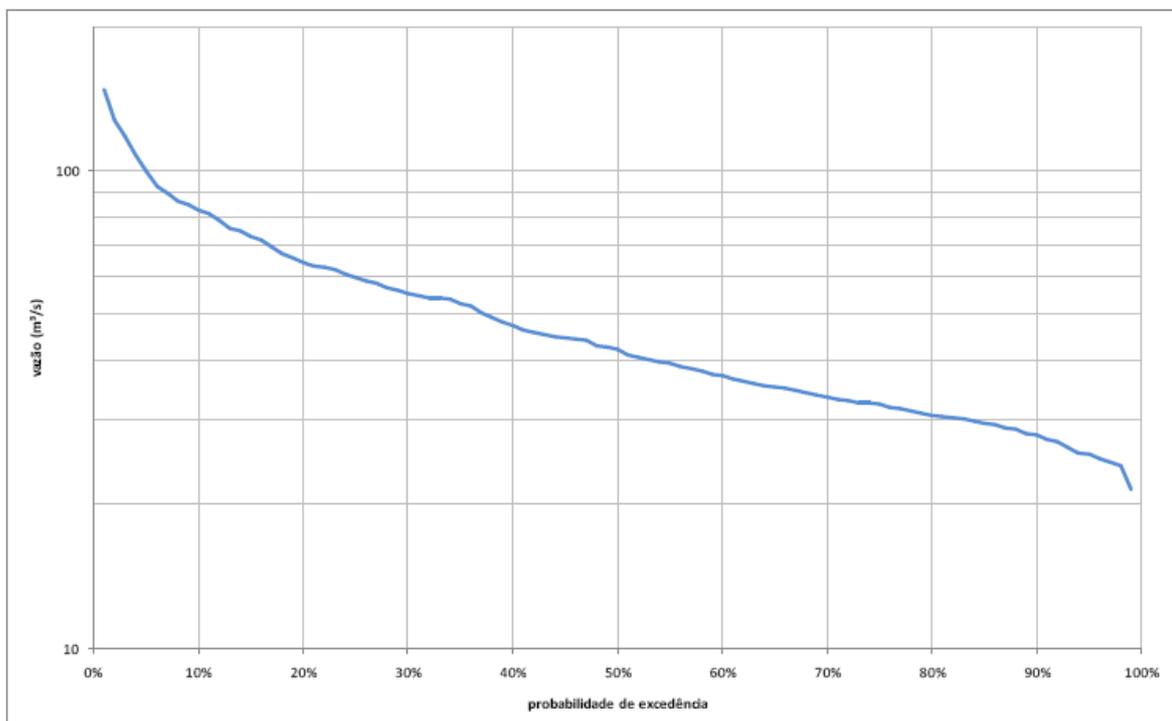
## 2. Bacia Hidrográfica do rio do Carmo

**Área de drenagem: 2.265 km<sup>2</sup>**

Fluviograma das Vazões Médias Mensais



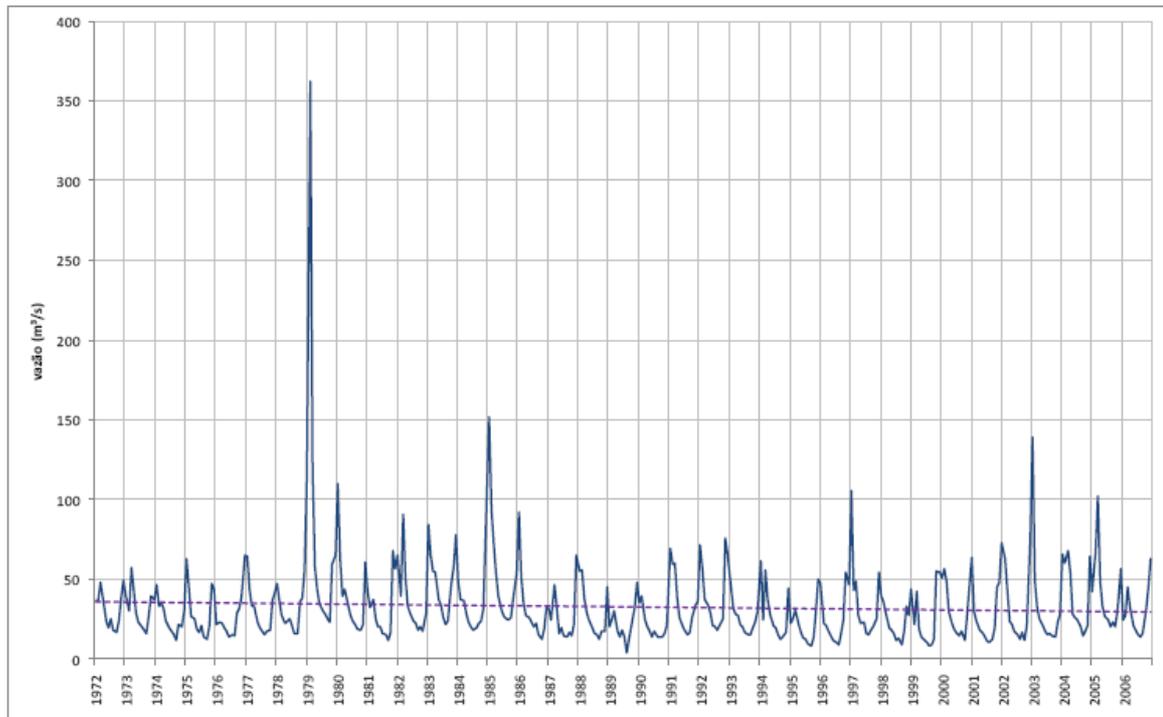
Curva de Permanência das Vazões Médias Mensais



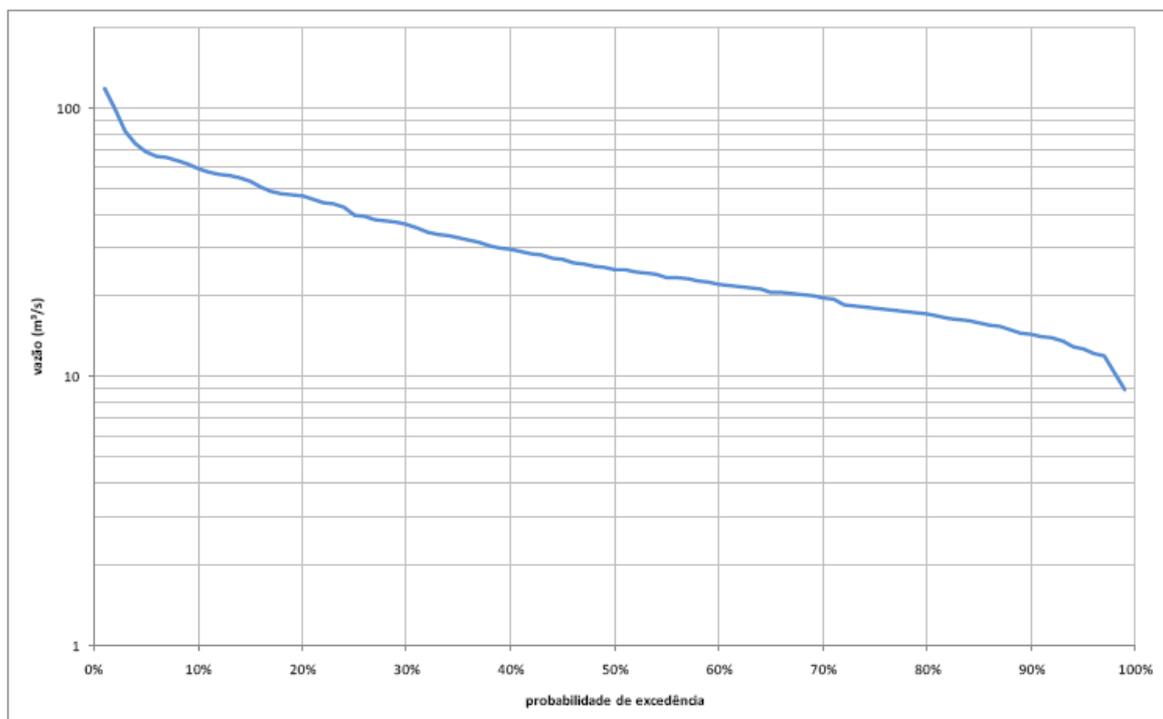
### 3. Bacia Hidrográfica do rio Casca

Área de drenagem: 2.511 km<sup>2</sup>

Fluviograma das Vazões Médias Mensais



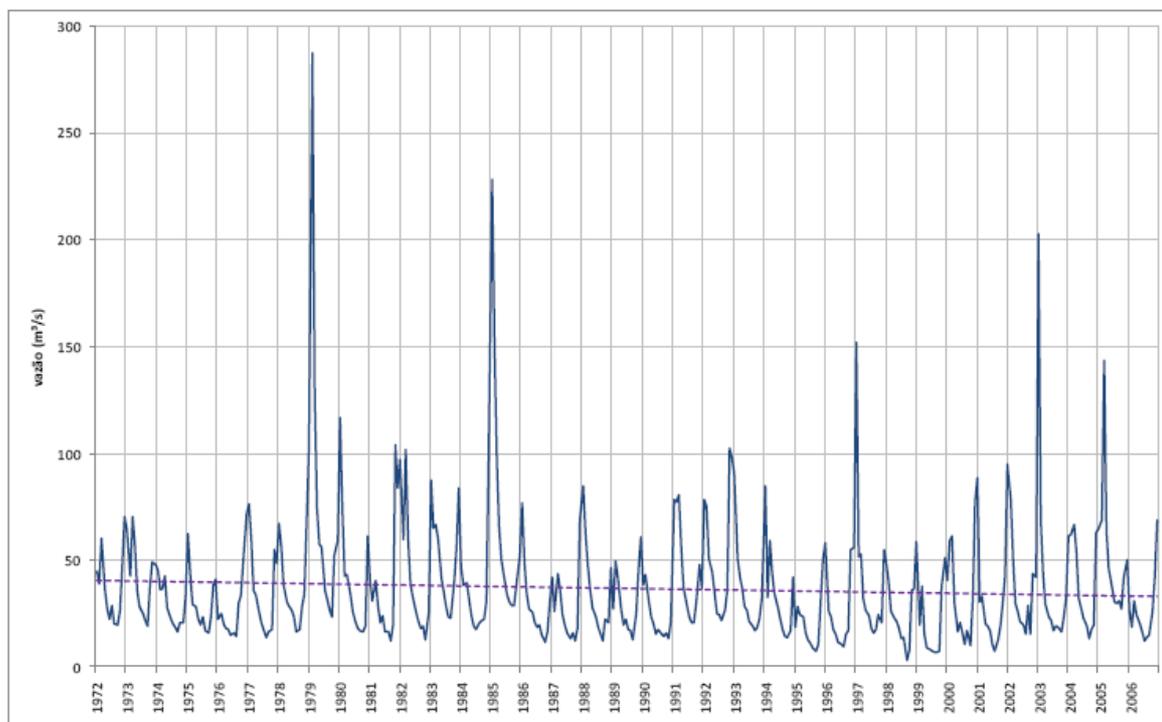
Curva de Permanência das Vazões Médias Mensais



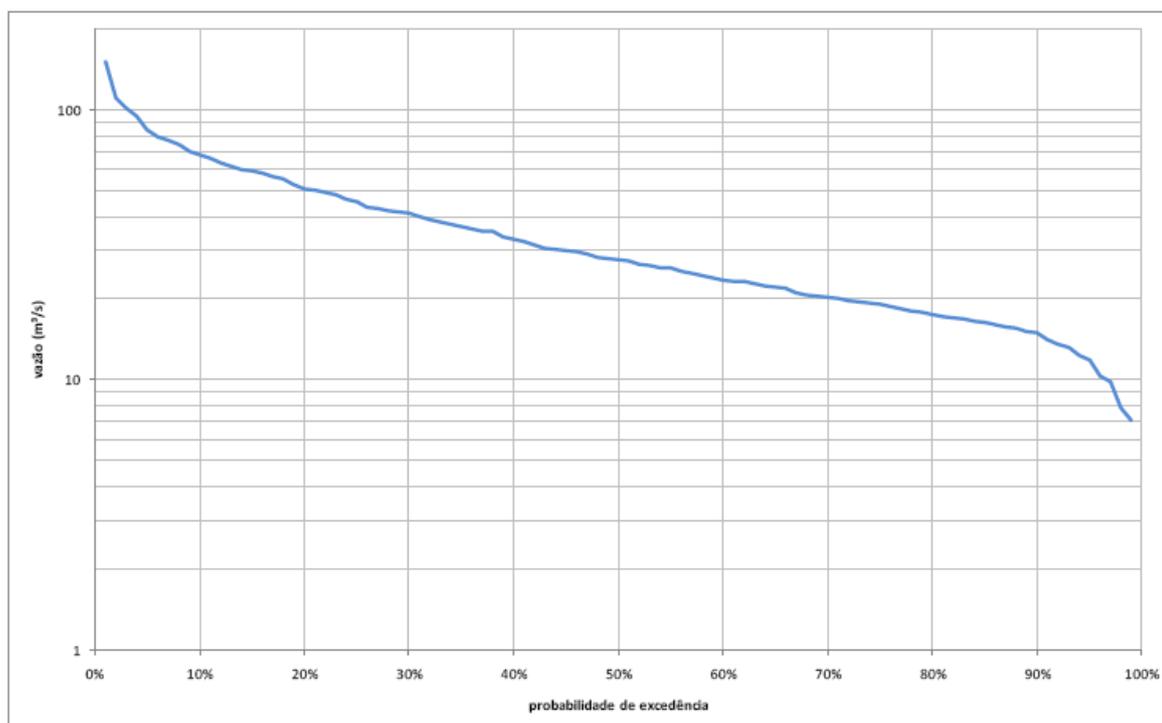
#### 4. Bacia Hidrográfica do rio Matipó

**Área de drenagem: 2.581 km<sup>2</sup>**

Fluviograma das Vazões Médias Mensais



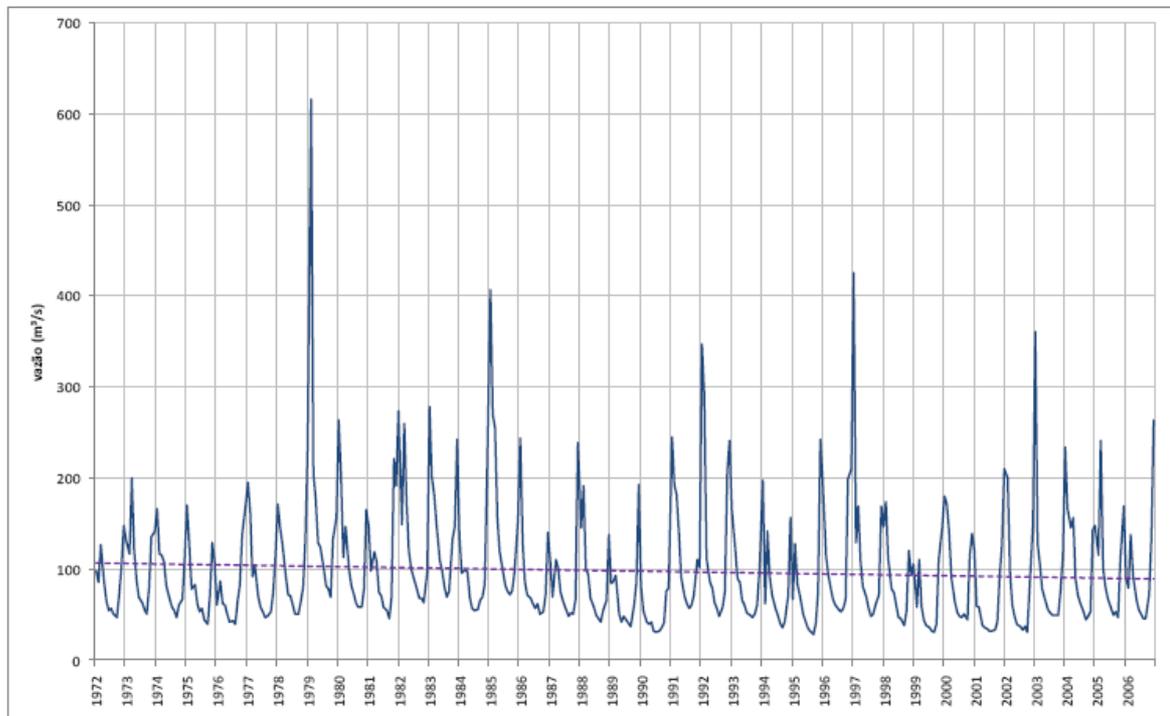
Curva de Permanência das Vazões Médias Mensais



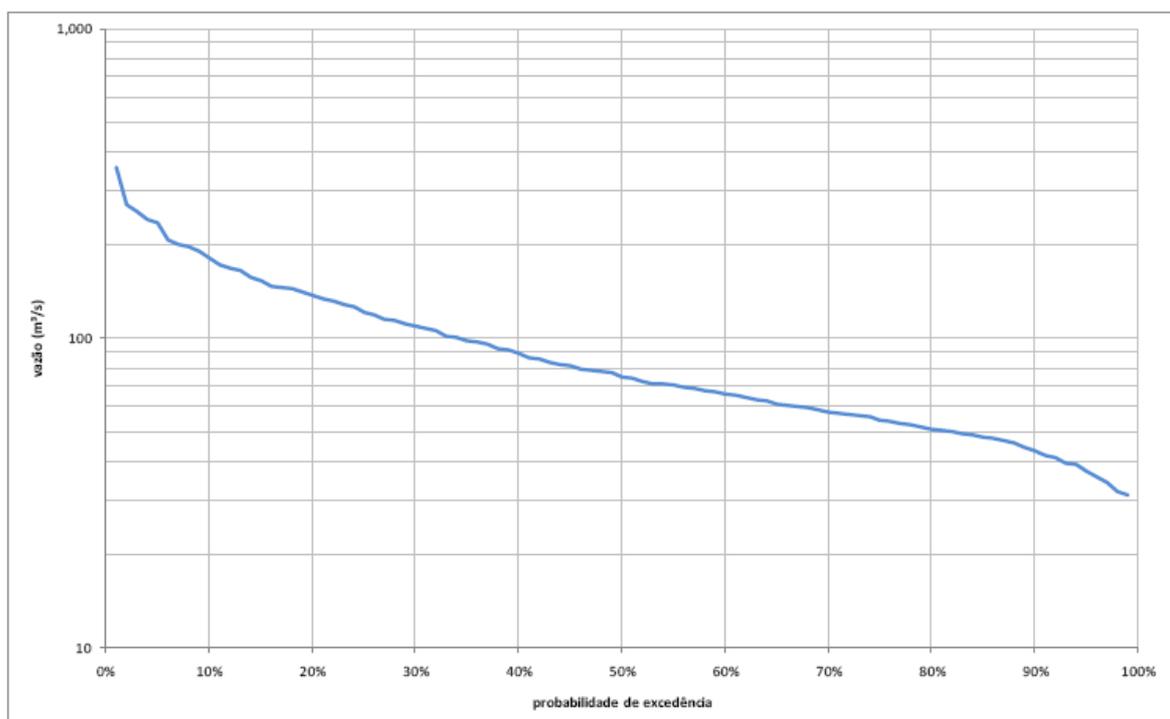
## 5. Bacia Hidrográfica do rio Piracicaba

Área de drenagem: 5.444 km<sup>2</sup>

Fluviograma das Vazões Médias Mensais



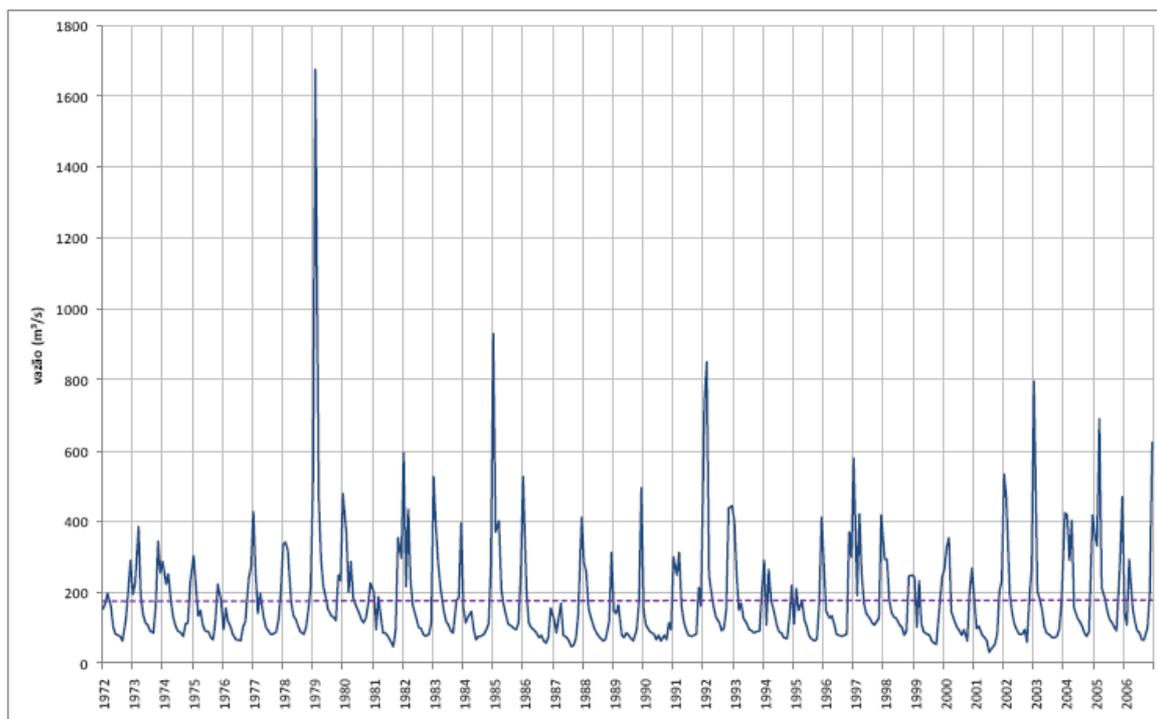
Curva de Permanência das Vazões Médias Mensais



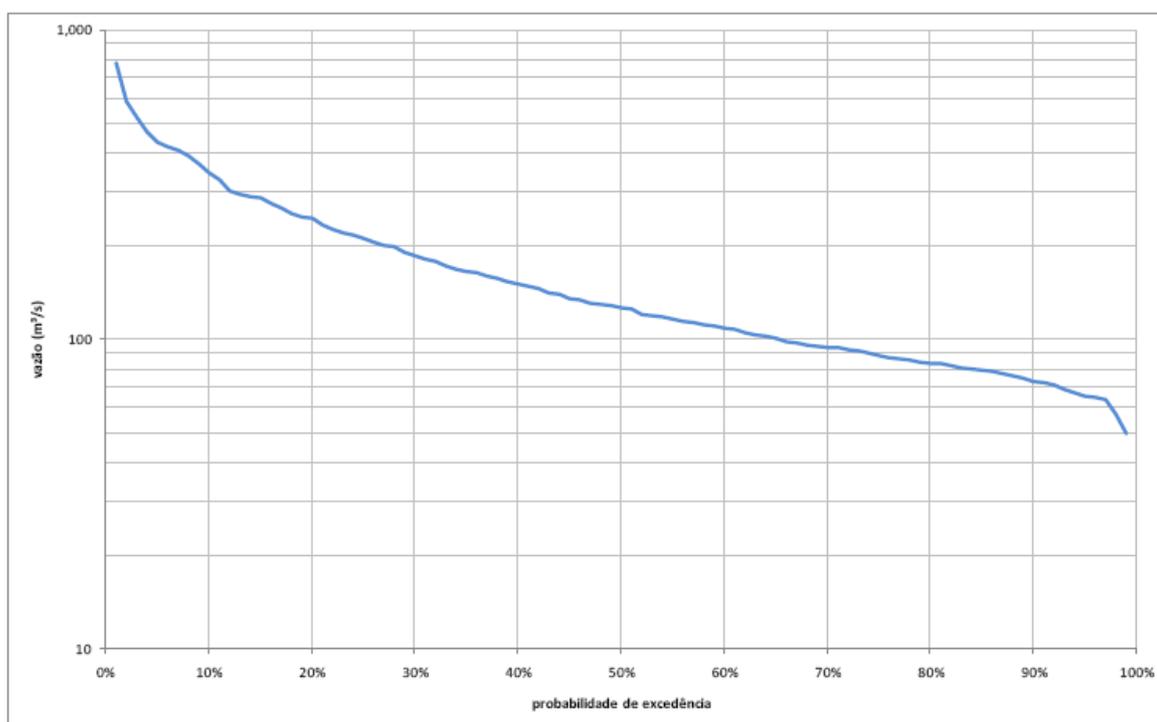
## 6. Bacia Hidrográfica do rio Santo Antônio

**Área de drenagem: 10.442 km<sup>2</sup>**

Fluviograma das Vazões Médias Mensais



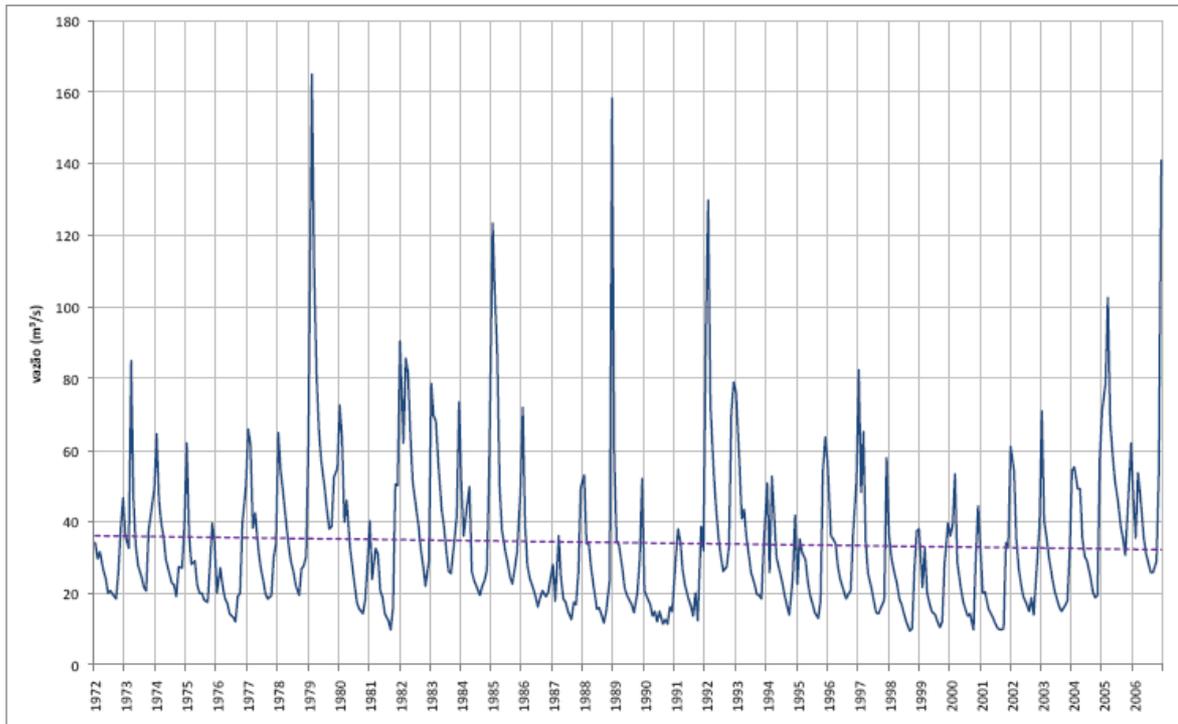
Curva de Permanência das Vazões Médias Mensais



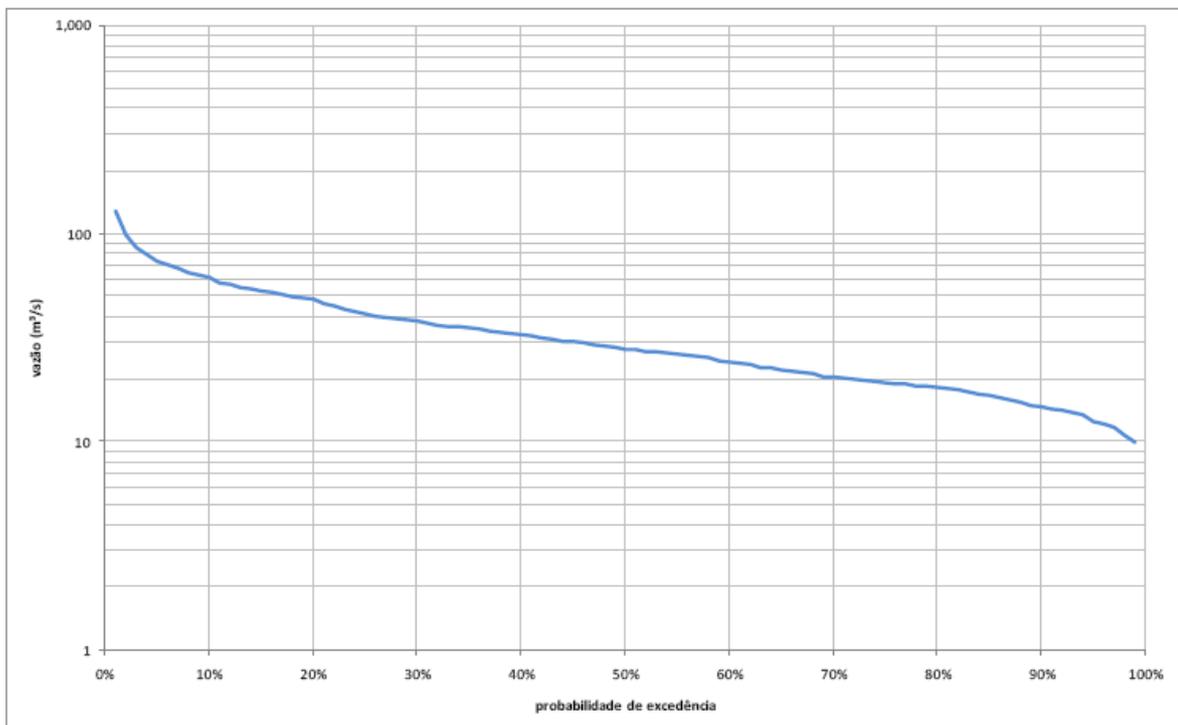
## 7. Bacia Hidrográfica do rio Corrente Grande

Área de drenagem: 2.480 km<sup>2</sup>

Fluviograma das Vazões Médias Mensais



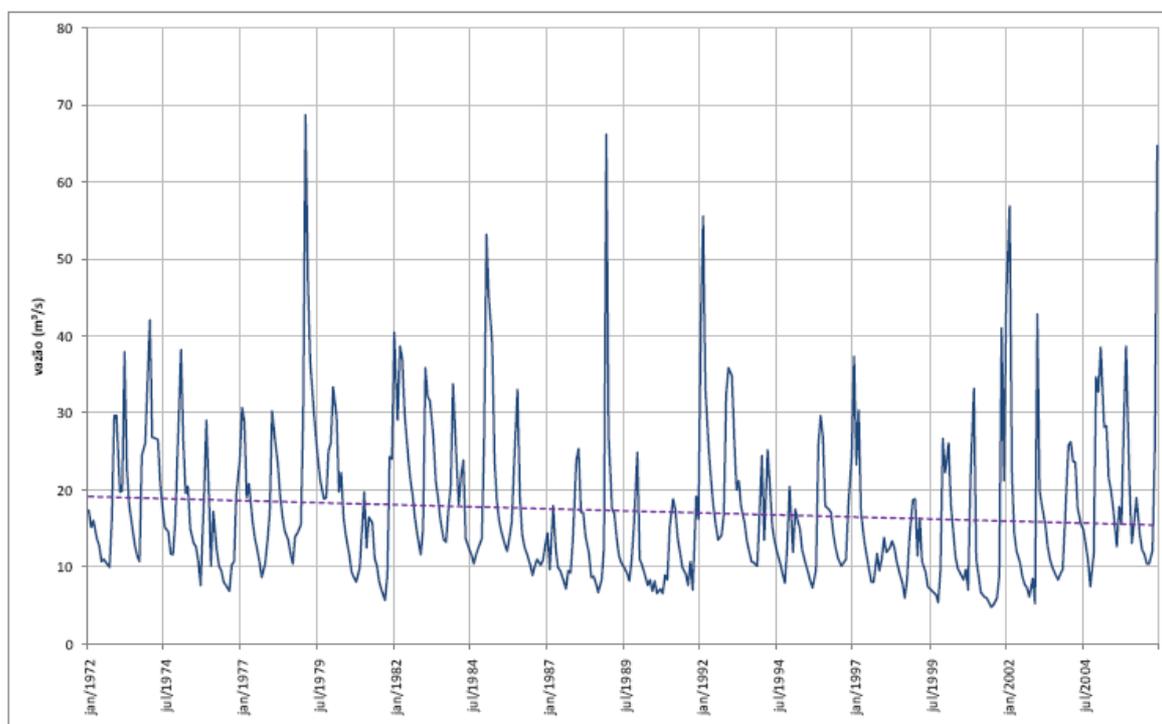
Curva de Permanência das Vazões Médias Mensais



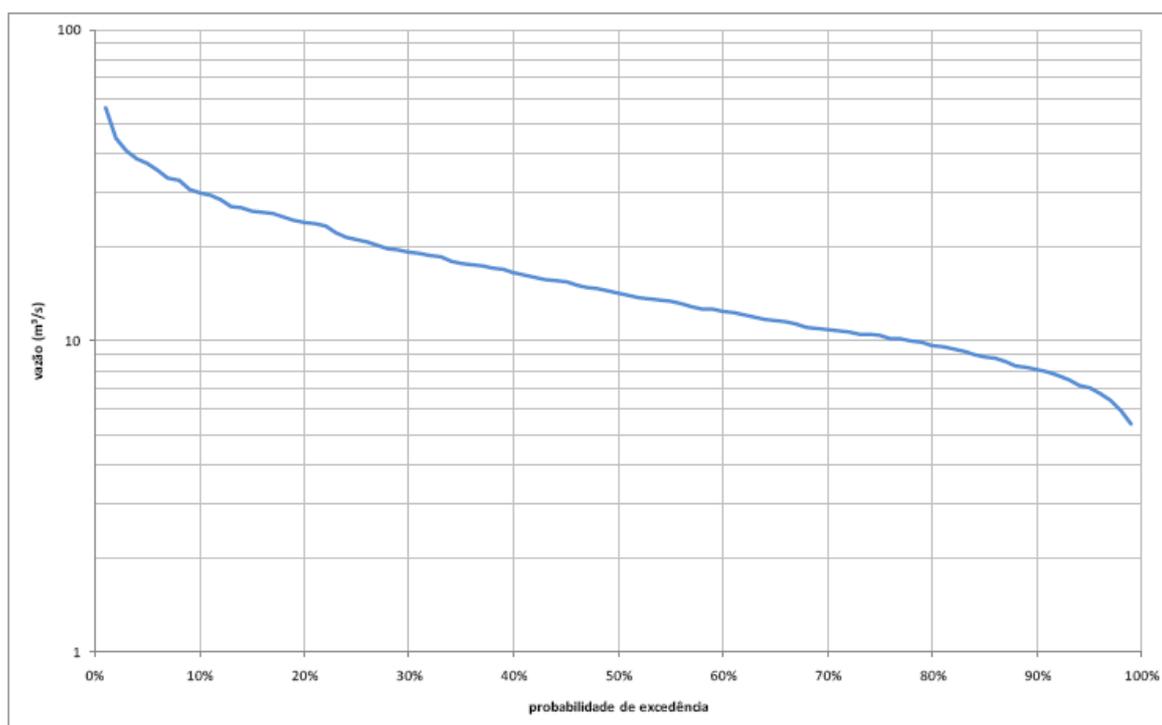
## 8. Bacia Hidrográfica do rio Suaçuí Pequeno

**Área de drenagem: 1.721 km<sup>2</sup>**

Fluviograma das Vazões Médias Mensais



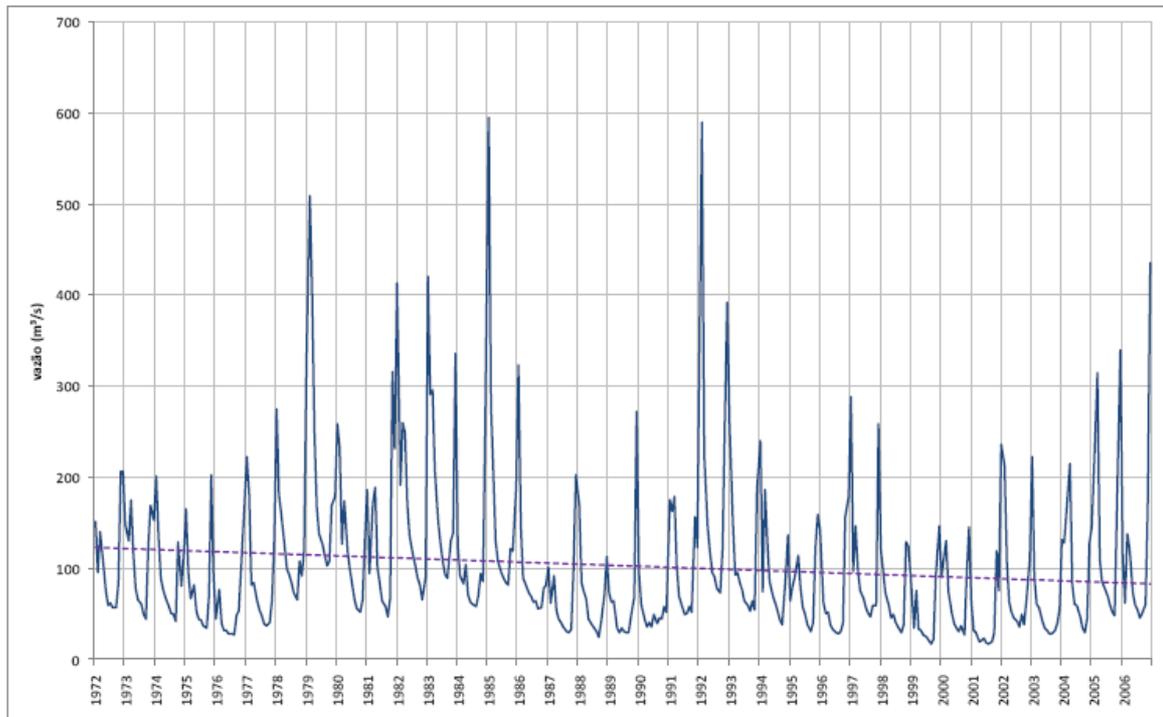
Curva de Permanência das Vazões Médias Mensais



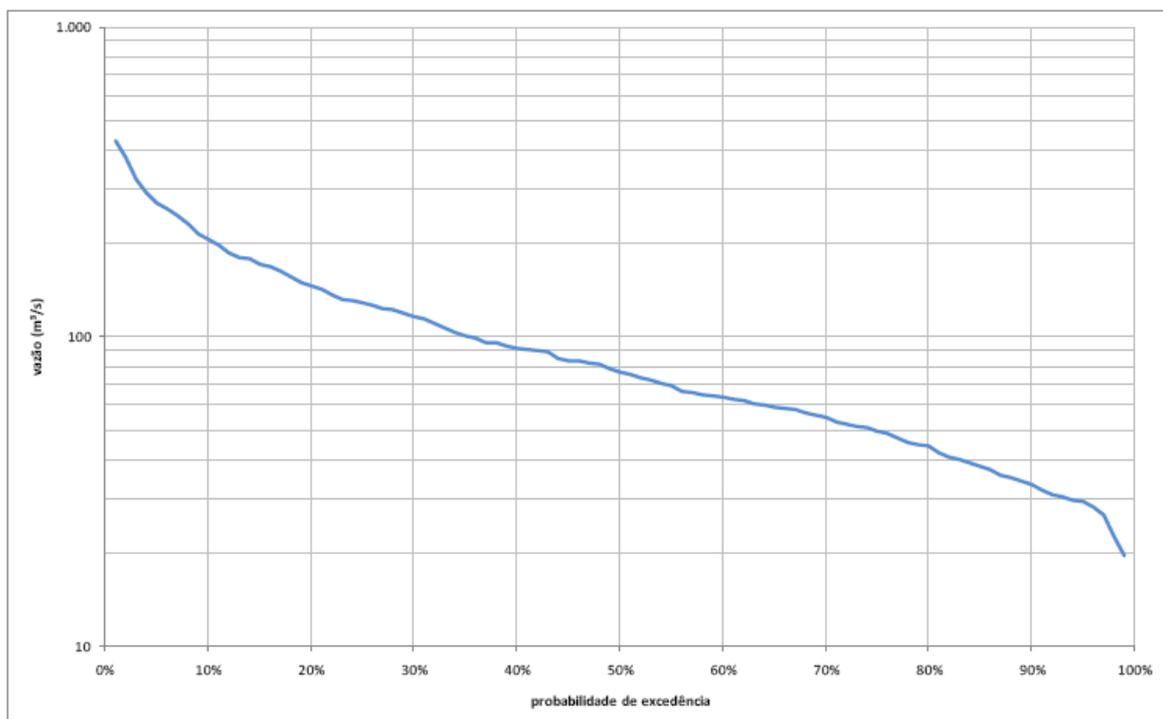
## 9. Bacia Hidrográfica do rio Suaçuí Grande

Área de drenagem: 12.432 km<sup>2</sup>

Fluviograma das Vazões Médias Mensais



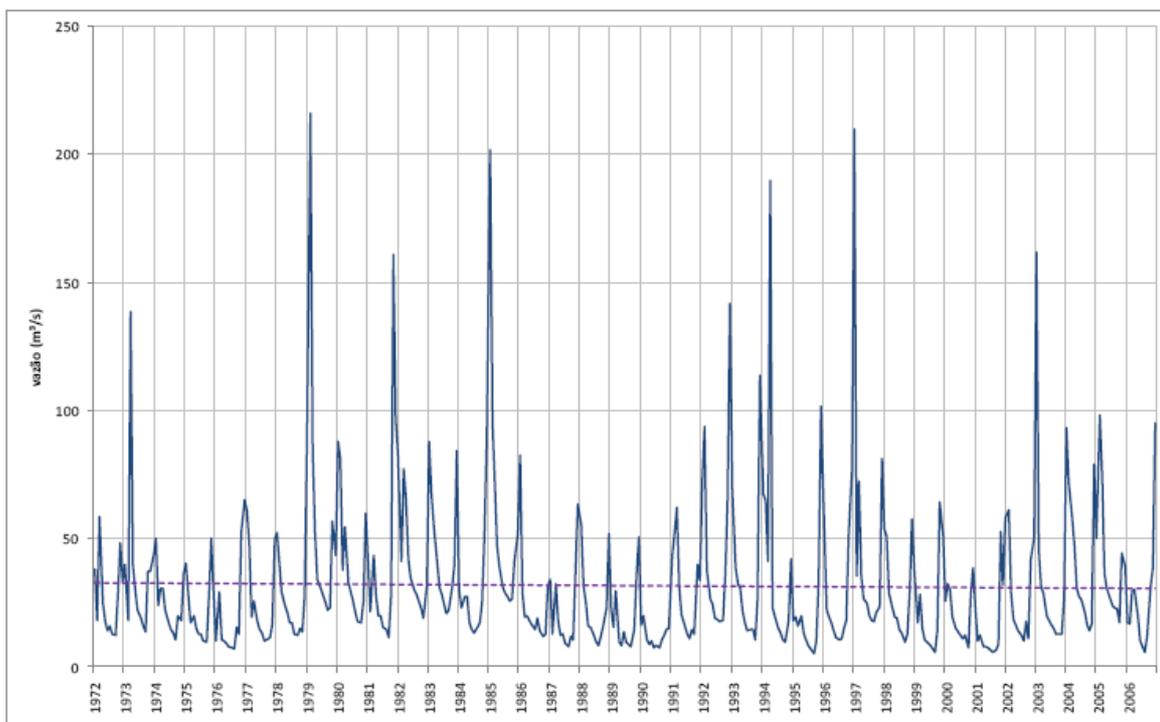
Curva de Permanência das Vazões Médias Mensais



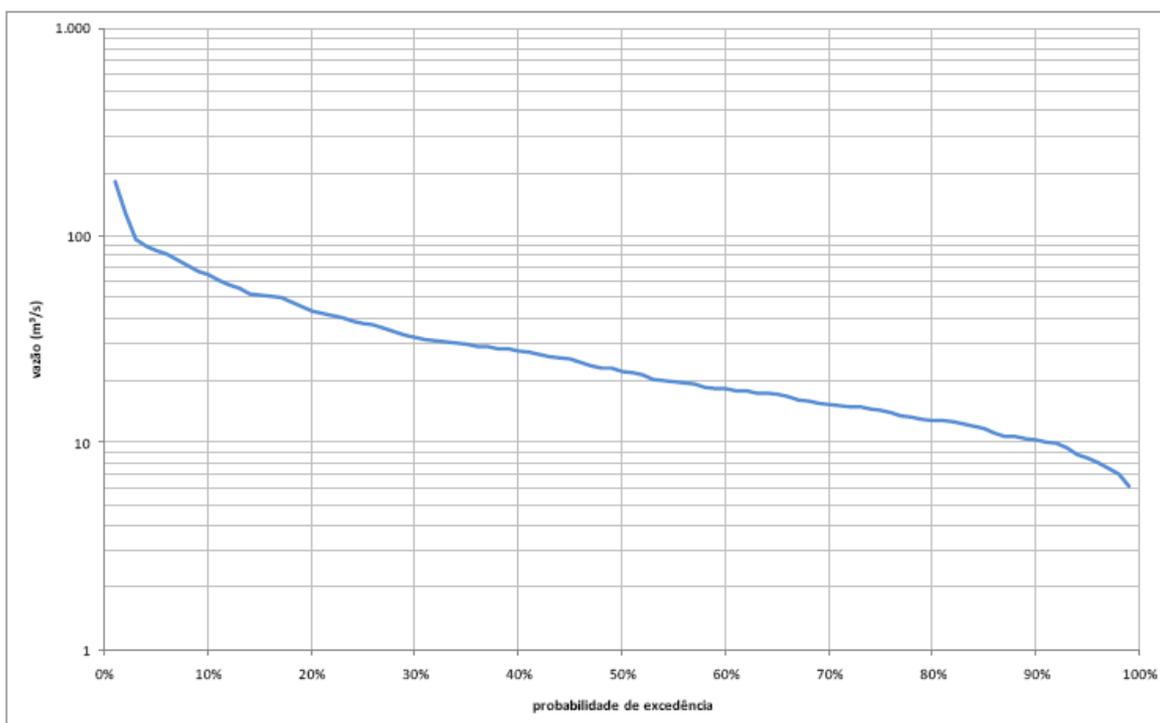
## 10. Bacia Hidrográfica do rio Caratinga

**Área de drenagem: 3.227 km<sup>2</sup>**

Fluviograma das Vazões Médias Mensais



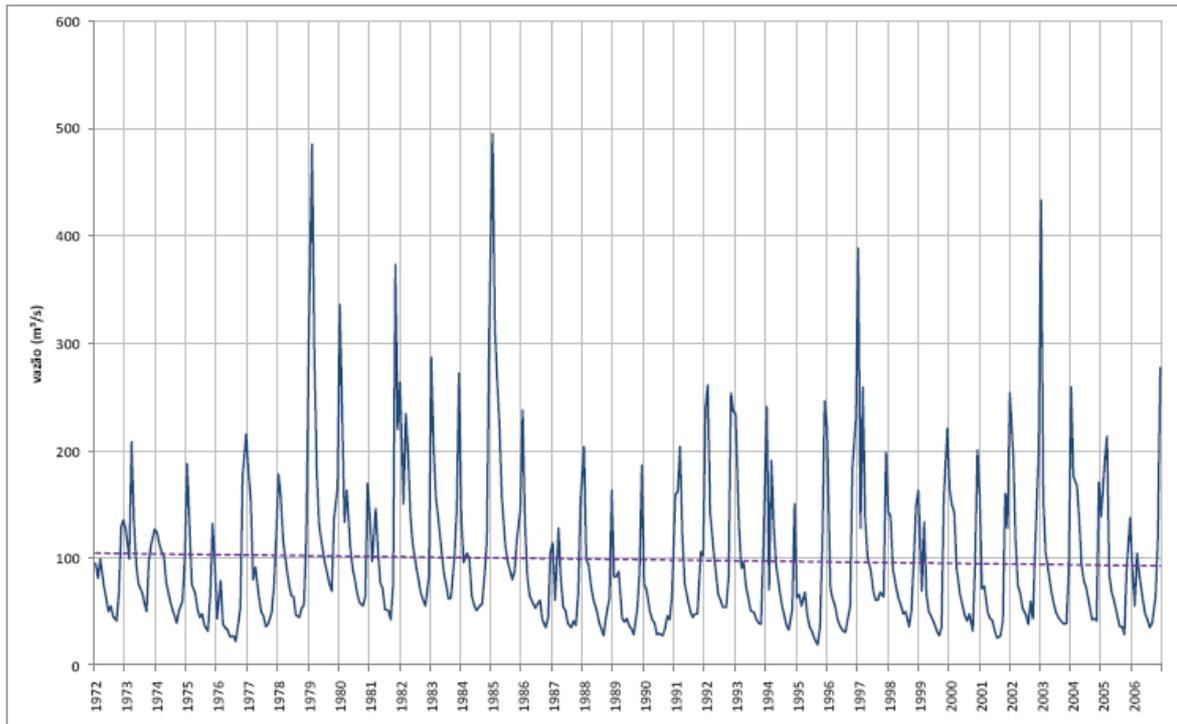
Curva de Permanência das Vazões Médias Mensais



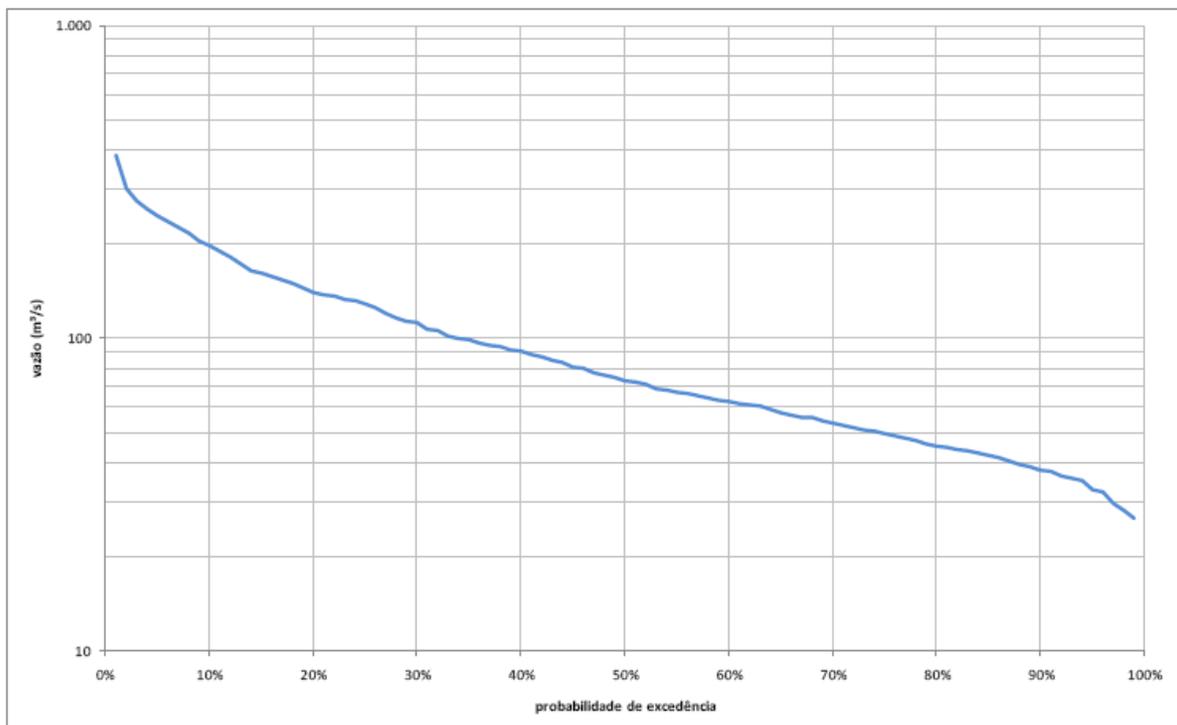
## 11. Bacia Hidrográfica do rio Manhuaçu

Área de drenagem: 8.826 km<sup>2</sup>

Fluviograma das Vazões Médias Mensais



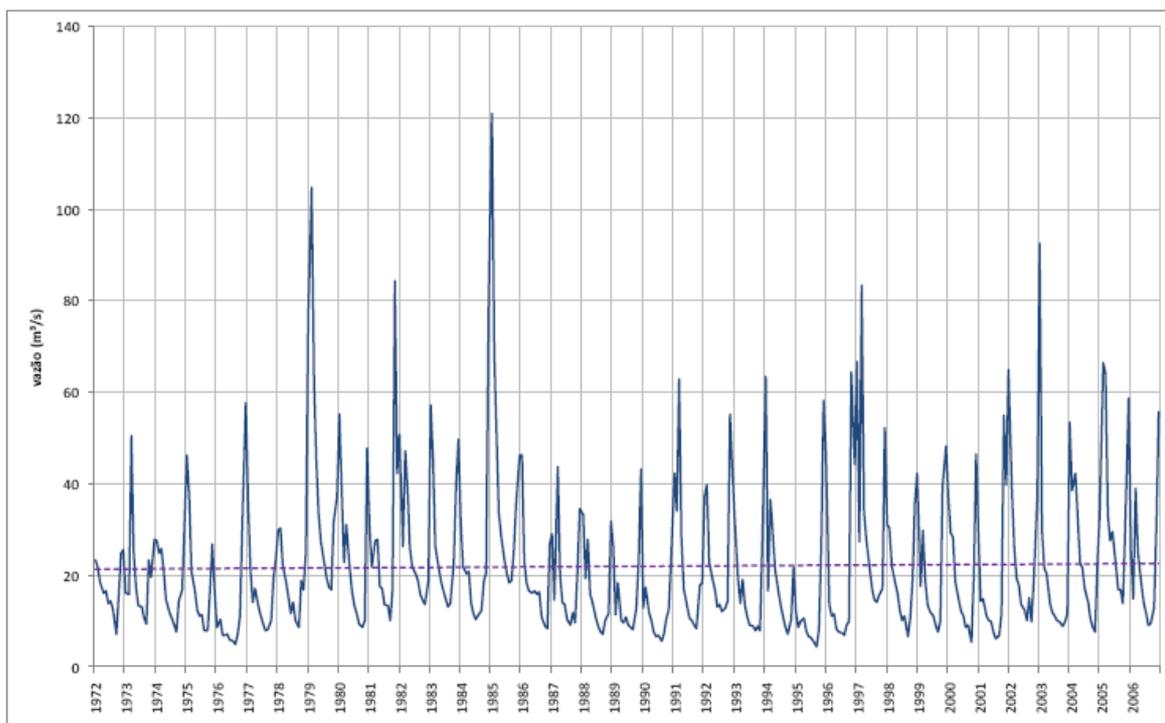
Curva de Permanência das Vazões Médias Mensais



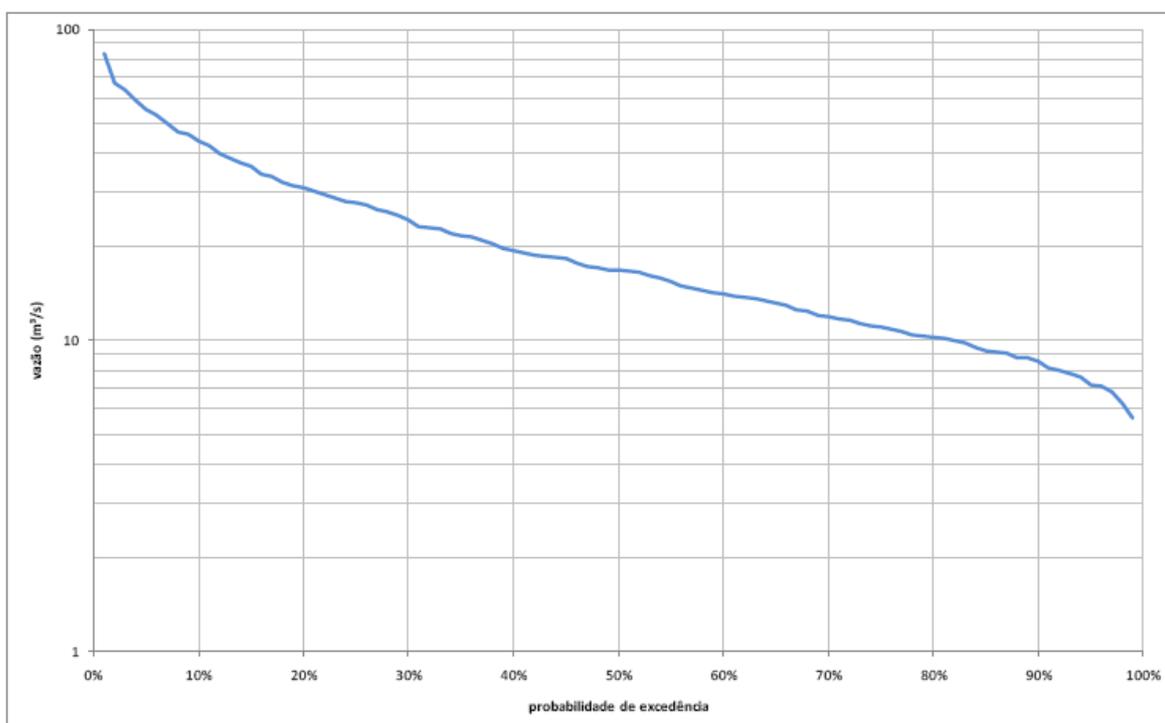
## 12. Bacia Hidrográfica do rio Guandu

Área de drenagem: 2.125 km<sup>2</sup>

Fluviograma das Vazões Médias Mensais



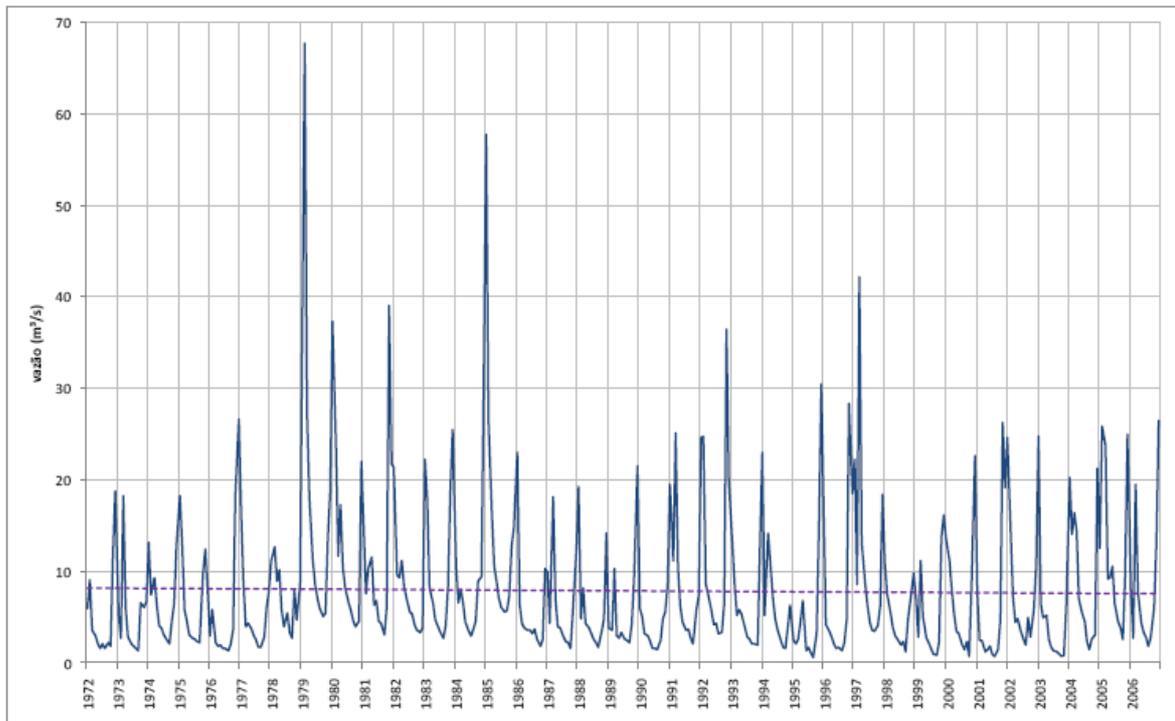
Curva de Permanência das Vazões Médias Mensais



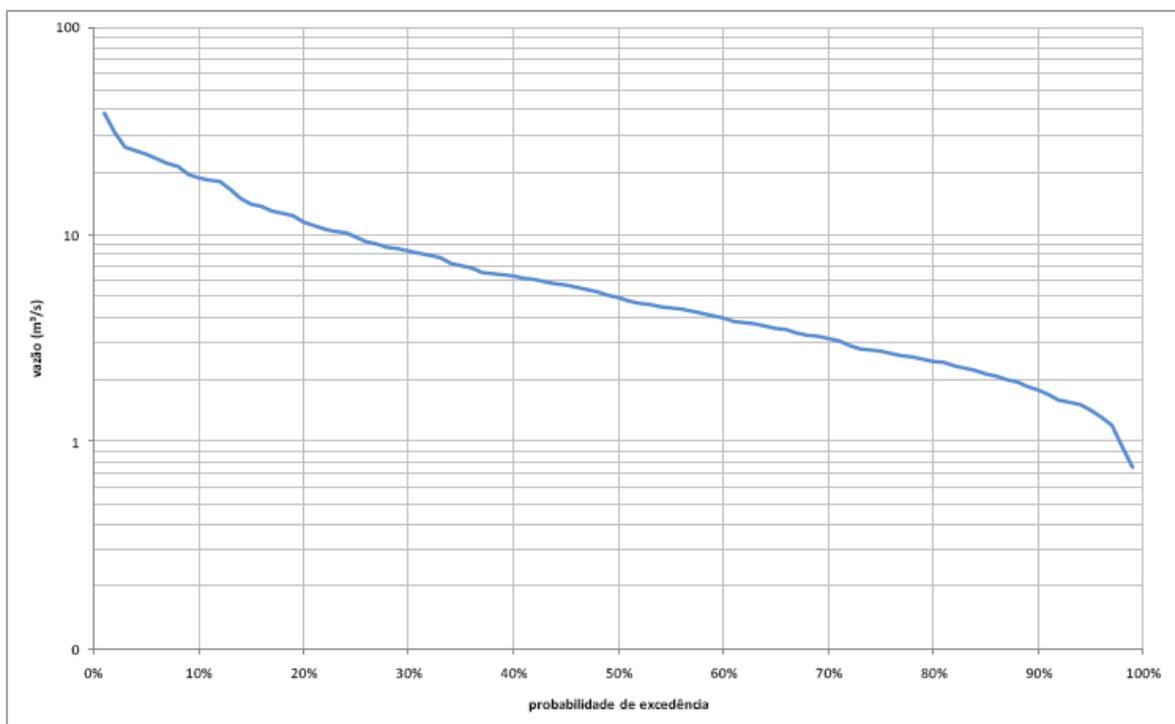
### 13. Bacia Hidrográfica do rio Santa Joana

Área de drenagem: 906 km<sup>2</sup>

Fluviograma das Vazões Médias Mensais



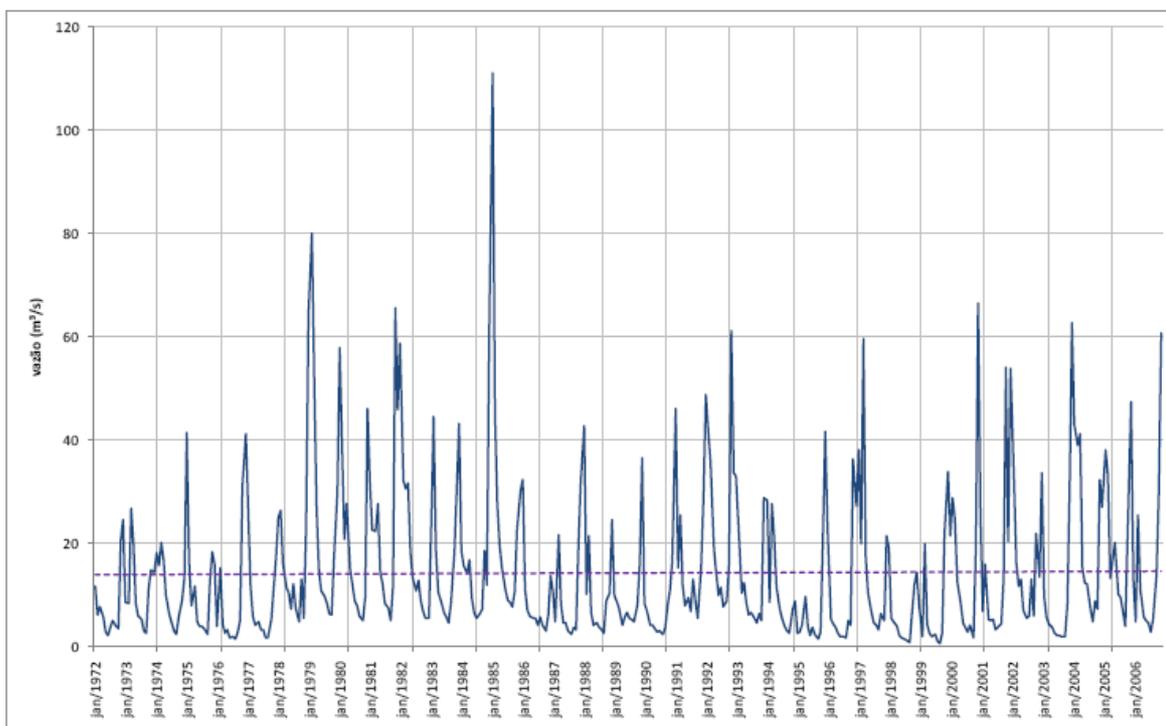
Curva de Permanência das Vazões Médias Mensais



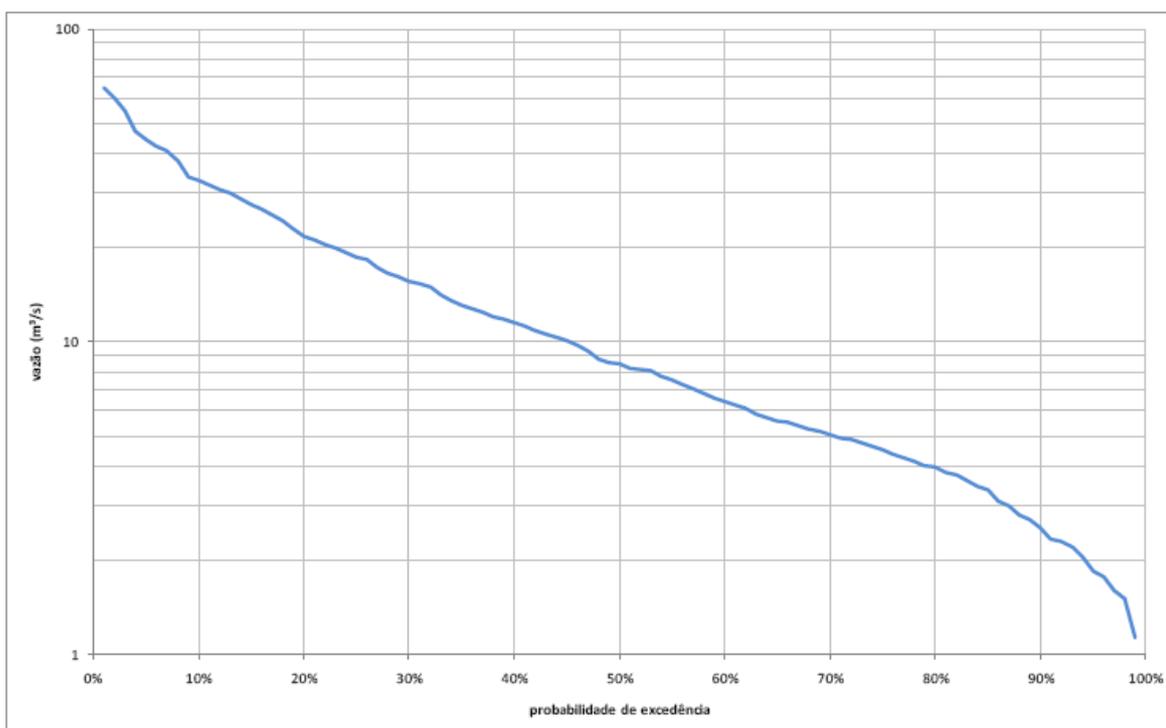
## 14. Bacia Hidrográfica do rio Pancas

**Área de drenagem: 1.180 km<sup>2</sup>**

Fluviograma das Vazões Médias Mensais



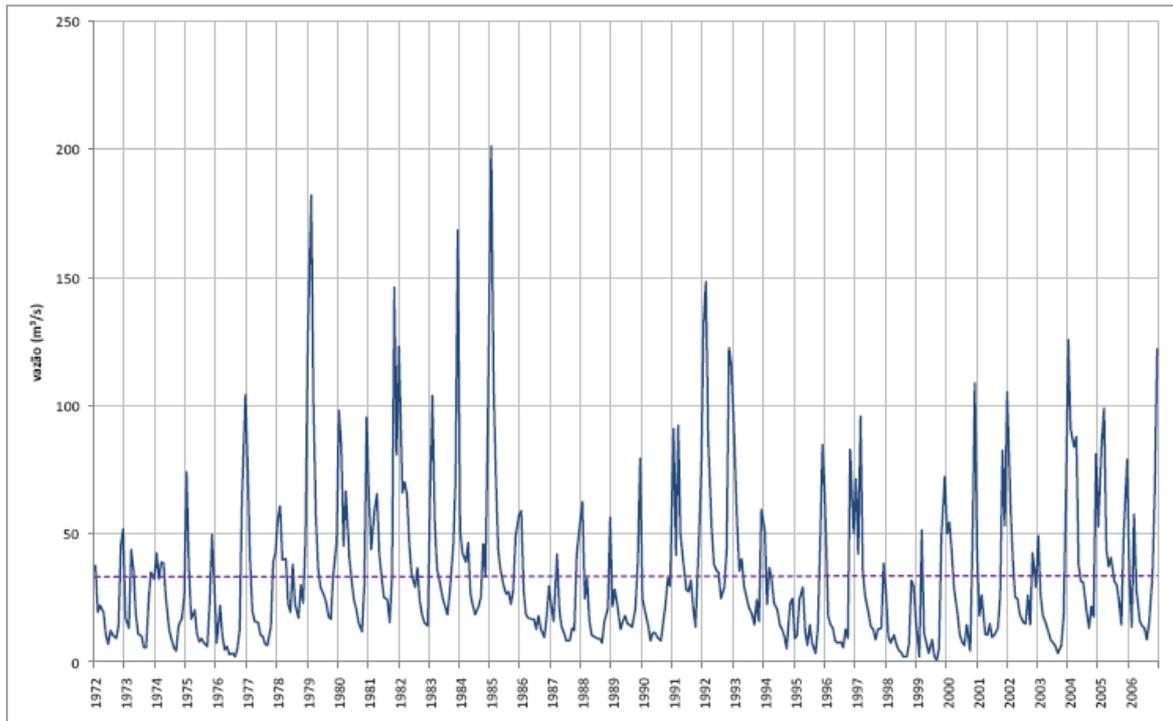
Curva de Permanência das Vazões Médias Mensais



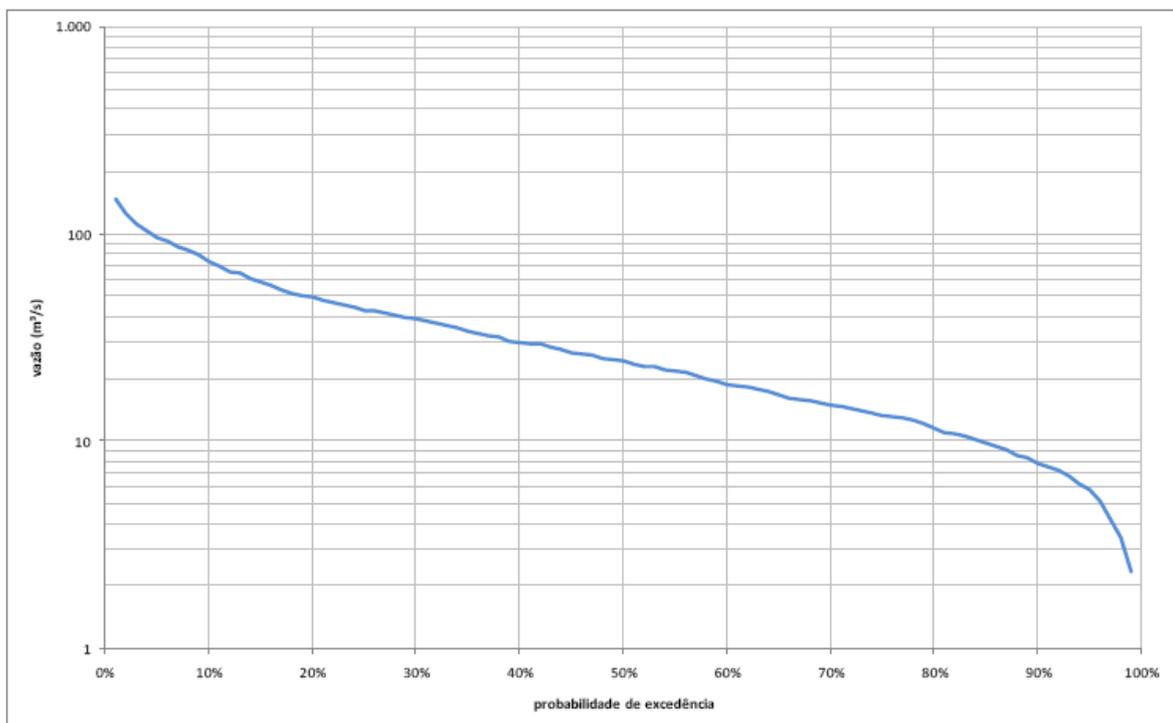
## 15. Bacia Hidrográfica do rio São José

Área de drenagem: 2.366 km<sup>2</sup>

Fluviograma das Vazões Médias Mensais



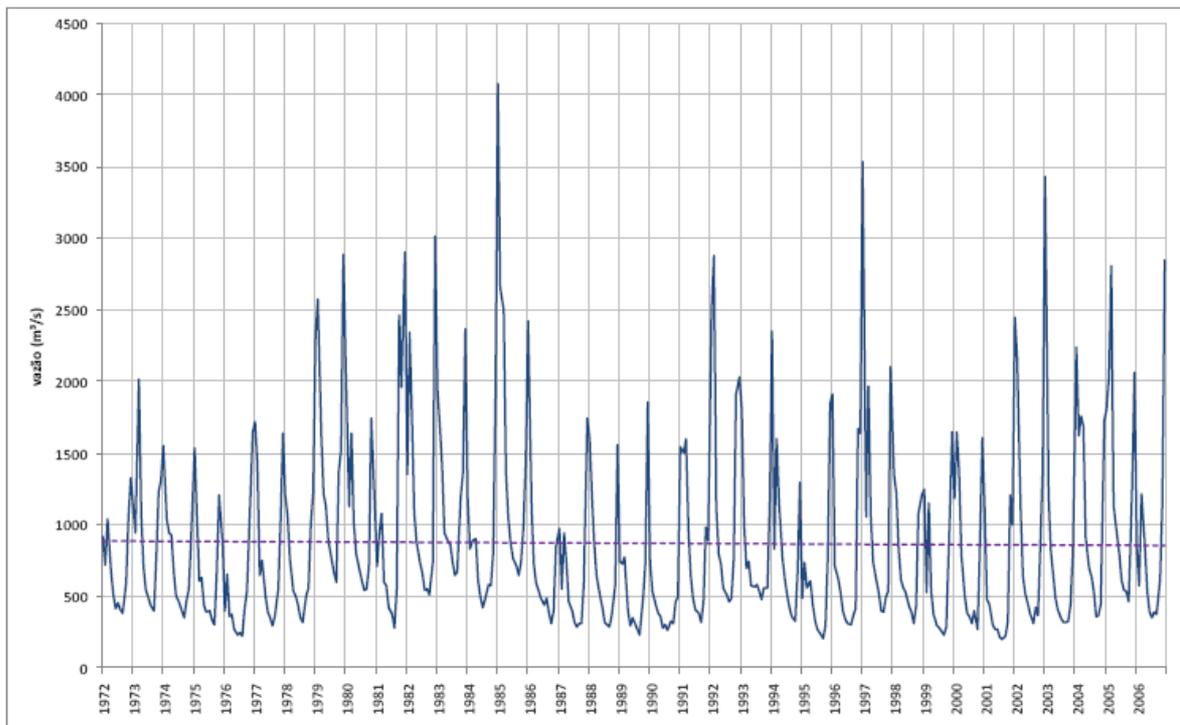
Curva de Permanência das Vazões Médias Mensais



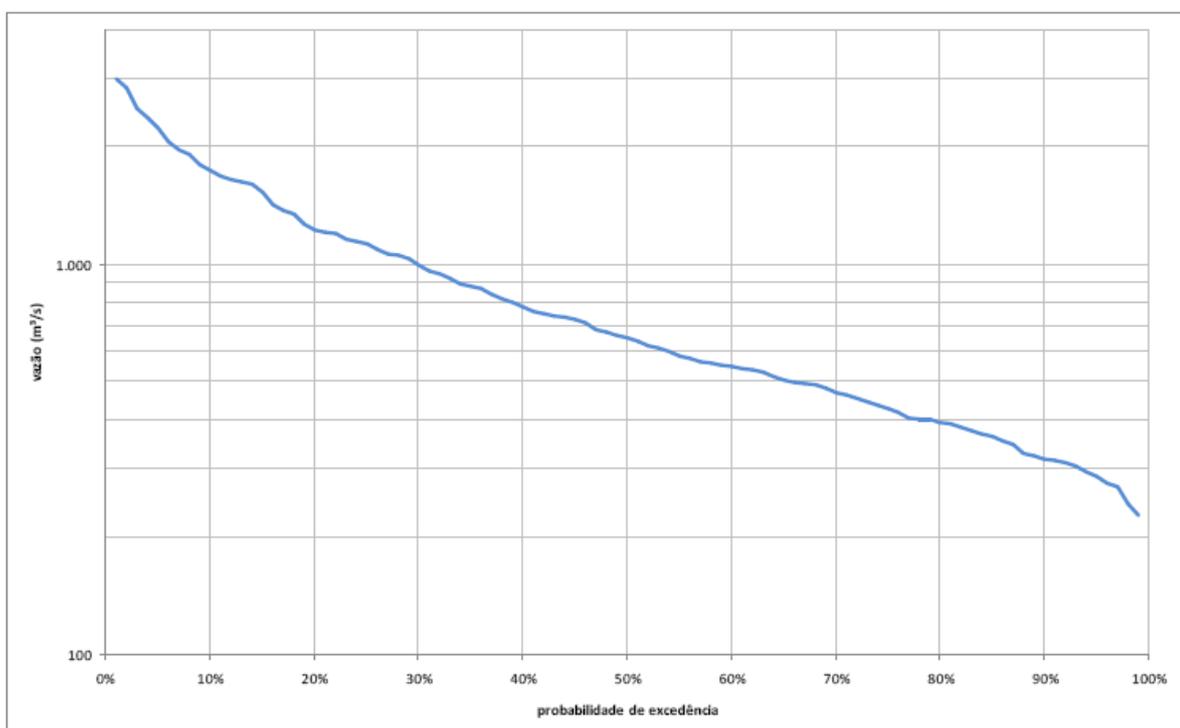
## 16. Rio Doce em Colatina (56994500)

**Área de drenagem: 75.800 km<sup>2</sup>**

Fluviograma das Vazões Médias Mensais



Curva de Permanência das Vazões Médias Mensais



**ANEXO B – VAZÕES EFLUENTES E CARGAS POLUIDORAS**

Município	População (hab)	Volume anual (m³)	Vazão Eflu. (m³/h)	DBO (mg/L)	P (mg/L)	Col. Term. (org/100ml)
Desterro do Melo	1054	50286,32	4,59	413,12	22,95	7650391
Senhora dos Remédios	3458	144206,29	13,17	472,64	26,26	8752531
Alto Rio Doce	4825	198574,77	18,13	478,92	26,61	8868826
Divinésia	1029	62091,43	5,67	326,64	18,15	6048902
Dores do Turvo	1951	65213,29	5,96	589,67	32,76	10919783
Capela Nova	2057	68513,99	6,26	591,75	32,88	10958419
Senador Firmino	4578	158119,71	14,44	570,66	31,70	10567753
Cipotânea	2892	66058,27	6,03	862,89	47,94	15979528
Caranaúba	1215	49793,30	4,55	480,94	26,72	8906319
Paula Cândido	4758	159096,34	14,53	589,46	32,75	10915839
Rio Espera	2365	79675,67	7,28	585,05	32,50	10834236
Coimbra	4824	157214,40	14,36	604,79	33,60	11199737
Brás Pires	2065	417,78	0,04	97422,45	5412,36	1804119393
Ervália	7692	369273,95	33,72	410,56	22,81	7602973
Senhora de Oliveira	3092	126729,72	11,57	480,89	26,72	8905409
Lamim	1474	53712,16	4,91	540,89	30,05	10016540
Santana dos Montes	2259	890606,49	81,33	49,99	2,78	925813
Cajuri	2256	64117,76	5,86	693,50	38,53	12842620
Presidente Bernardes*	1568	64778,59	5,92	477,09	26,51	8835018
Viçosa*	65042	3036150,80	277,27	422,24	23,46	7819220
São Miguel do Anta	3726	139738,97	12,76	525,55	29,20	9732360
Catas Altas da Noruega	1306	49072,02	4,48	524,56	29,14	9714090
Piranga*	5730	229657,61	20,97	491,77	27,32	9106818
Canaã	1751	60883,83	5,56	566,85	31,49	10497286
Itaverava	2376	163888,76	14,97	285,75	15,87	5291638
Porto Firme*	4888	180231,80	16,46	534,55	29,70	9899030
Araponga	2784	104595,28	9,55	524,62	29,15	9715161
Teixeiras	7558	723301,44	66,05	205,96	11,44	3813998
Pedra do Anta	2245	8472035,00	773,70	5,22	0,29	96721
Guaraciaba	3200	113739,84	10,39	554,53	30,81	10269049
Pedra Bonita	1632	65495,86	5,98	491,13	27,28	9094926
Amparo da Serra	2591	91606,39	8,37	557,48	30,97	10323679
Diogo de Vasconcelos	1033	42728,10	3,90	476,51	26,47	8824287
Sericita	3081	120889,96	11,04	502,33	27,91	9302385
Jequeri*	6937	256238,42	23,40	533,60	29,64	9881442
Luisburgo	1645	53958,66	4,93	600,89	33,38	11127500
Oratórios	2880	116690,29	10,66	486,46	27,03	9008462
Alto Jequitibá	4176	178848,83	16,33	460,22	25,57	8522505
Ponte Nova*	49845	2417542,31	220,78	406,38	22,58	7525587
São João do Manhuaçu	4352	138617,98	12,66	618,81	34,38	11459408
Ouro Preto*	46357	6265984,92	572,24	145,82	8,10	2700342
Santa Margarida	6805	278738,07	25,46	481,19	26,73	8910964
Mariana*	44744	3245417,71	296,39	271,74	15,10	5032190
Acaiaca	2508	104673,18	9,56	472,26	26,24	8745507
Manhumirim	16675	698107,21	63,75	470,79	26,16	8718396

<b>Município</b>	<b>População (hab)</b>	<b>Volume anual (m³)</b>	<b>Vazão Eflu, (m³/h)</b>	<b>DBO (mg/L)</b>	<b>P (mg/L)</b>	<b>Col, Term, (org/100ml)</b>
Urucânia	7557	262590,64	23,98	567,23	31,51	10504202
Santo Antônio do Grama	3376	121227,77	11,07	548,89	30,49	10164668
Abre-Campo	6645	269377,43	24,60	486,21	27,01	9003817
Barra Longa*	2391	89331,11	8,16	527,55	29,31	9769441
Matipó*	12536	500117,45	45,67	494,05	27,45	9149131
Manhuaçu*	59908	3303390,33	301,68	357,45	19,86	6619387
Martins Soares	2513	74725,11	6,82	662,85	36,82	12274923
Piedade de Ponte Nova	3130	122333,55	11,17	504,30	28,02	9338812
Rio Doce*	1661	69357,80	6,33	472,02	26,22	8741122
Reduto	3306	130753,42	11,94	498,35	27,69	9228745
Santa Cruz do Escalvado	1662	69405,13	6,34	471,98	26,22	8740420
Rio Casca*	11406	462363,88	42,23	486,22	27,01	9004142
Durandé	3287	71088,46	6,49	911,35	50,63	16876931
Brejetuba	2785	62003,45	5,66	885,31	49,18	16394652
Caputira	3716	137066,84	12,52	534,36	29,69	9895464
São Pedro dos Ferros	7256	305788,88	27,93	467,69	25,98	8661008
Dom Silvério	4003	150781,64	13,77	523,27	29,07	9690139
Lajinha	8863	390670,36	35,68	447,15	24,84	8280626
Simonésia	6839	244758,57	22,35	550,73	30,60	10198764
Alvinópolis	11063	256474,68	23,42	850,19	47,23	15744225
Santana do Manhuaçu*	4090	143149,76	13,07	563,14	31,29	10428589
Raul Soares*	15153	560882,99	51,22	532,49	29,58	9860960
Sem-Peixe	1241	51955,09	4,74	470,79	26,16	8718395
Afonso Cláudio*	14786	700873,12	64,01	415,81	23,10	7700238
Catas Altas*	3952	756854,83	69,12	102,92	5,72	1905887
Chalé	2643	105394,62	9,63	494,27	27,46	9153171
Vermelho Novo	1724	68949,85	6,30	492,82	27,38	9126343
São José do Mantimento	1454	619555,09	56,58	46,26	2,57	856599
Santa Bárbara do Leste	3907	123738,79	11,30	622,33	34,57	11524721
Santa Bárbara	23478	680242,25	62,12	680,27	37,79	12597674
Barão de Cocais	23992	1094592,09	99,96	432,02	24,00	8000314
Rio Piracicaba*	11401	369403,62	33,74	608,31	33,80	11265090
Conceição de Ipanema	1425	59389,87	5,42	472,92	26,27	8757807
São José do Goiabal*	3538	155597,17	14,21	448,17	24,90	8299444
Laranja da Terra*	3018	88682,62	8,10	670,76	37,26	12421487
Itarana	3799	188995,93	17,26	396,19	22,01	7336851
Santa Rita de Minas	4146	141659,08	12,94	576,86	32,05	10682619
São Domingos do Prata*	10176	492350,10	44,96	407,37	22,63	7543900
Dionísio	7783	305459,77	27,90	502,20	27,90	9300063
Bela Vista de Minas	9334	353166,65	32,25	520,92	28,94	9646749
Córrego Novo	2061	79421,28	7,25	511,48	28,42	9471832
São Gonçalo do Rio Abaixo	4279	170973,58	15,61	493,29	27,40	9134949
Bom Jesus do Galho	9652	400519,32	36,58	474,99	26,39	8796030
Mutum	13256	55032,80	5,03	4747,64	263,76	87919205

<b>Município</b>	<b>População (hab)</b>	<b>Volume anual (m³)</b>	<b>Vazão Eflu, (m³/h)</b>	<b>DBO (mg/L)</b>	<b>P (mg/L)</b>	<b>Col, Term, (org/100ml)</b>
Itaguaçu*	7476	368260,69	33,63	400,13	22,23	7409805
João Monlevade*	71295	4682259,91	427,60	300,12	16,67	5557717
Ipanema	13201	925745,46	84,54	281,06	15,61	5204849
Caratinga*	67934	3192310,37	291,54	419,44	23,30	7767387
Nova Era*	15475	629857,87	57,52	484,26	26,90	8967698
Taparuba	1498	59403,19	5,42	497,04	27,61	9204388
Piedade de Caratinga	4139	128330,77	11,72	635,70	35,32	11772196
Pingo-d'água	3663	124808,48	11,40	578,47	32,14	10712373
São Roque do Canaã*	5073	249305,48	22,77	401,07	22,28	7427213
Marliéria	2631	106788,61	9,75	485,60	26,98	8992673
Bom Jesus do Amparo	2555	121340,50	11,08	415,02	23,06	7685604
Antônio Dias	4308	125172,35	11,43	678,35	37,69	12562039
Jaguaraçu	2070	59278,56	5,41	688,27	38,24	12745755
Ubaporanga	6103	192866,74	17,61	623,70	34,65	11549918
Entre-Folhas	3719	140358,78	12,82	522,24	29,01	9671180
Itabira*	97564	5103392,35	466,06	376,81	20,93	6977880
Pocrane	4826	184343,94	16,84	515,99	28,67	9555454
Vargem Alegre	4818	184491,58	16,85	514,73	28,60	9531980
Imbé de Minas	2041	40283,46	3,68	998,63	55,48	18493074
Timóteo*	75994	3792663,60	346,36	394,93	21,94	7313543
Inhapim	13981	607415,18	55,47	453,67	25,20	8401280
São Domingos das Dores	2543	53595,94	4,89	935,19	51,96	17318383
Coronel Fabriciano*	99425	3663208,68	334,54	534,96	29,72	9906650
Colatina*	90932	167913,57	15,33	10673,76	592,99	197662285
Baixo Guandú*	21565	1064722,82	97,23	399,21	22,18	7392746
São Sebastião do Anta	3318	106689,73	9,74	612,97	34,05	11351327
Aimorés*	19051	773253,46	70,62	485,60	26,98	8992672
Ipatinga	236601	9717895,34	887,48	479,88	26,66	8886633
Santa Maria de Itabira	6069	725569,01	66,26	164,86	9,16	3053031
Iapu	7372	294452,06	26,89	493,47	27,41	9138262
Bugre	1331	40613,36	3,71	645,95	35,89	11961950
Itambé do Mato Dentro	1002	38173,80	3,49	517,36	28,74	9580655
Alvarenga	2240	87327,45	7,98	505,57	28,09	9362463
Marilândia	4827	235701,88	21,53	403,65	22,42	7474930
Ipaba	13605	505657,42	46,18	530,31	29,46	9820532
Itueta	3051	171407,62	15,65	350,83	19,49	6496882
Dom Cavati	4905	182849,65	16,70	528,73	29,37	9791241
Linhares*	95143	4703253,89	429,52	398,72	22,15	7383653
Santana do Paraíso	21453	48342,76	4,41	8746,68	485,93	161975547
Santa Rita do Itueto	2332	82466,08	7,53	557,37	30,96	10321577
Passabém	965	38380,20	3,51	495,57	27,53	9177258
São João do Oriente	6277	237546,19	21,69	520,82	28,93	9644882
Resplendor	13123	693145,71	63,30	373,16	20,73	6910372
São Sebastião do Rio Preto	823	32270,84	2,95	502,66	27,93	9308558
Tarumirim	7778	376115,55	34,35	407,60	22,64	7548132

Município	População (hab)	Volume anual (m³)	Vazão Eflu, (m³/h)	DBO (mg/L)	P (mg/L)	Col, Term, (org/100ml)
Rio Bananal*	5528	136586,47	12,47	797,71	44,32	14772473
Governador Lindenberg	3423	153052,29	13,98	440,81	24,49	8163191
Ferros*	5048	191114,10	17,45	520,61	28,92	9640942
Sobralia	4154	169224,20	15,45	483,83	26,88	8959771
Santo Antônio do Rio Abaixo	860	33322,01	3,04	508,69	28,26	9420200
Naque	5474	209311,53	19,12	515,46	28,64	9545628
Pancas*	9273	346334,48	31,63	527,73	29,32	9772764
Mesquita	3797	174970,51	15,98	427,72	23,76	7920792
Morro do Pilar	2636	109187,67	9,97	475,84	26,44	8811801
Belo Oriente	17892	935229,66	85,41	377,07	20,95	6982862
Sooretama*	14869	675743,71	61,71	433,70	24,09	8031425
Engenheiro Caldas	8498	287823,14	26,29	581,94	32,33	10776653
Joanésia	1983	37242,45	3,40	1049,47	58,30	19434677
Conselheiro Pena	17175	719039,96	65,67	470,79	26,16	8718396
Itanhomi	8217	389206,83	35,54	416,12	23,12	7705941
Periquito*	5414	216482,85	19,77	492,93	27,38	9128252
Fernandes Tourinho	1870	70152,49	6,41	525,39	29,19	9729519
São Domingos do Norte*	3142	148249,29	13,54	417,73	23,21	7735821
Carmésia	1276	48024,92	4,39	523,69	29,09	9697882
Açucena	4515	20042,91	1,83	4440,01	246,67	82222342
Capitão Andrade	3404	138320,36	12,63	485,05	26,95	8982481
Dores de Guanhães	1742	56768,48	5,18	604,82	33,60	11200406
Alto Rio Novo	4825	174150,77	15,90	546,08	30,34	10112645
Braúnas	1484	59216,87	5,41	493,94	27,44	9147056
Conceição do Mato Dentro*	9728	480102,17	43,84	399,37	22,19	7395759
São Gabriel da Palha*	21502	1040518,33	95,02	407,30	22,63	7542616
Vila Valério	4857	203295,09	18,57	470,90	26,16	8720353
Galiléia	5465	224836,80	20,53	479,08	26,62	8871880
Alpercata	5331	193742,97	17,69	542,34	30,13	10043281
Águia Branca*	2791	156634,46	14,30	351,20	19,51	6503773
Goiabeira	2497	98799,01	9,02	498,14	27,67	9224839
Tumiritinga	4009	173896,79	15,88	454,39	25,24	8414675
Cuparaque	3561	35997,67	3,29	1949,77	108,32	36106920
Dom Joaquim	2851	107286,37	9,80	523,77	29,10	9699415
Jaguaré	13418	599957,81	54,79	440,81	24,49	8163191
São Geraldo do Baixo	2191	90112,91	8,23	479,23	26,62	8874589
Senhora do Porto	1494	56761,45	5,18	518,78	28,82	9607048
Governador Valadares	248771	12778472,49	1166,98	383,71	21,32	7105811
São Geraldo da Piedade*	1107	45682,37	4,17	477,62	26,53	8844878
Santa Efigênia de Minas	2817	102363,80	9,35	542,41	30,13	10044615
Virginópolis*	6198	271714,01	24,81	449,60	24,98	8325923
Gonzaga	2897	107021,31	9,77	533,54	29,64	9880322
Divinolândia de Minas	5442	189533,48	17,31	565,93	31,44	10480101
Sardoá	1745	69373,87	6,34	495,78	27,54	9181050
Divino das Laranjeiras	4060	191360,86	17,48	418,18	23,23	7744008

<b>Município</b>	<b>População (hab)</b>	<b>Volume anual (m³)</b>	<b>Vazão Eflu, (m³/h)</b>	<b>DBO (mg/L)</b>	<b>P (mg/L)</b>	<b>Col, Term, (org/100ml)</b>
Guanhães	23199	1360818,25	124,28	336,01	18,67	6222458
Alvorada de Minas	1269	40987,31	3,74	610,24	33,90	11300693
Sabinópolis	10084	406889,09	37,16	488,48	27,14	9045856
Coroaci*	5172	192220,56	17,55	530,33	29,46	9820906
Serro	10023	424950,39	38,81	464,89	25,83	8608993
Matias Lobato*	3131	110235,93	10,07	559,82	31,10	10366992
Frei Inocêncio	6685	280139,27	25,58	470,34	26,13	8710043
Peçanha	8472	312138,45	28,51	534,96	29,72	9906758
São João Evangelista*	9901	400353,00	36,56	487,44	27,08	9026696
Cantagalo	2252	31772,73	2,90	1397,01	77,61	25870613
Marilac	3431	124768,14	11,39	542,01	30,11	10037138
Materlândia*	2017	77485,58	7,08	513,06	28,50	9501187
Virgolândia*	3234	128464,02	11,73	496,19	27,57	9188643
Santo Antônio do Itambé	1215	49844,16	4,55	480,45	26,69	8897231
Jampruca	3317	131896,70	12,05	495,68	27,54	9179191
Nacip Raydan	1847	62817,76	5,74	579,52	32,20	10731917
Paulistas*	2275	75655,47	6,91	592,69	32,93	10975743
São Pedro do Suaçuí	2310	92749,62	8,47	490,89	27,27	9090603
Serra Azul de Minas*	1731	58948,34	5,38	578,78	32,15	10718114
São José da Safira	2742	80516,77	7,35	671,22	37,29	12430081
Rio Vermelho*	5721	191150,62	17,46	589,91	32,77	10924186
São José do Jacuri	2080	78196,23	7,14	524,28	29,13	9708908
Campanário	2723	103198,30	9,42	520,07	28,89	9630924
Coluna*	3671	124583,45	11,38	580,78	32,27	10755160
José Raydan	1127	41917,07	3,83	529,93	29,44	9813544
Santa Maria do Suaçuí	10385	378483,92	34,56	540,81	30,05	10015023
Frei Lagonegro	496	12924,32	1,18	756,42	42,02	14007700
São Sebastião do Maranhão	3403	125160,82	11,43	535,90	29,77	9923992
Itambacuri	14617	611948,01	55,89	470,79	26,16	8718396
Água Boa	6988	246780,20	22,54	558,12	31,01	10335594
Franciscópolis	2213	90369,20	8,25	482,67	26,81	8938278
Malacacheta	9512	3378999,77	308,58	55,48	3,08	1027487

\* Municípios com ETEs em funcionamento ou previstas,

## Referências

- ALLAN, J,D,; CASTILLO, M,M, (2007), **Stream Ecology: Structure and function of running waters**, 2nd Ed, Kluwer Academic Publishers, Boston, pp, 436,
- ASSAF, H., SAADEH, M. (2008). Assessing water quality management options in the Upper Litani Basin, Lebanon, using an integrated GIS-based decision support. **Environmental Modelling & Software**, 23(10–11), 1327-1337,
- BRASIL, (1997), **Lei Federal n, 9,433 de 08 de janeiro de 1997**, Institui a Política e Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos,
- BRASIL, (2005), CONAMA, Conselho Nacional do Meio Ambiente, **Resolução n° 357, de 17 de março de 2005**,
- BROWN, L,C, ; BARNWELL Jr., T,O, (1987) **Computer program documentation for the enhanced stream water quality model QUAL2E, and QUAL2E-UNCAS**, Report EPA/600/3-87/007, US Environmental Protection Agency, Athens, Georgia, USA,
- BURROUGH P,A, MCDONNELL R,A, (1998), **Principals of Geographical Information Systems**, Oxford University Press,
- CHAPRA, S,C, (1997), **Surface water-quality modeling**, McGraw-Hill Series in Water Resources and Environmental Engineering, 844 pp,
- CORREIA, F, N,, REGO, F, C,; SARAIVA, M, G,; RAMOS, I, (1998), Coupling GIS with hydrologic and hydraulic flood modelling, **Water Resources Management**, 12: 229–249,
- E, P, A, (2008), **BASINS 4,0 Description**, U, S, Environmental Protection Agency, Disponível em: <http://www.epa.gov/waterscience/ftp/basins/system/BASINS4>, Acesso em: maio 2010,
- FOTHERINGHAM, A, S,, & ROGERSON, P, A, (Eds,), (1994), **Spatial analysis and GIS**, London: Taylor & Francis,
- FRAGOSO JR, C,R,; FERREIRA, T,F,; MOTTA MARQUES, D, (2009), **Modelagem Ecológica em Ecossistemas Aquáticos**, Oficina de Textos, 304p,
- GASTALDINI, C,C,M,; TEIXEIRA, C, E, 2003, Avaliação da Qualidade da Água, In: PAIVA,D, B, J, & PAIVA, D,C,M,E, (eds) **Hidrologia Aplicada à Gestão de Pequenas Bacias Hidrográficas**,

- GOODCHILD, M, F., HAINING, R., & WISE, S, (1992), Integrating GIS and spatial data analysis: Problems and possibilities, **International Journal of Geographical Information Systems**, 6, 407-423,
- HAAN, C,T, (1977), **Statistical Methods in Hydrology**, Iowa State University Press, Ames, Iowa, 378 p,
- HALLS, J.N. (2003). River run: an interactive GIS and dynamic graphing website for decision support and exploratory data analysis of water quality parameters of the lower Cape Fear river. **Environmental Modelling & Software**, 18(6), 513-520,
- HEC - Hydrological Modeling System, (2001), **User's Manual**, US Army Corps of Engineers, 188p,
- IGAM, (2010), **Plano Integrado de Recursos Hídricos da Bacia do rio Doce**, Acessado em janeiro/2011: <http://www.pirhdoce.com.br/downloads>,
- JENSON, S,K,, DOMINGUE, J,O, (1988), **Extracting topographic structure from digital elevation data for geographic information system analysis**, Photogramm, Eng, Remote Sens,, 54(11), 1593-1600,
- LEE, M,T,; WHITE, D,C, (1992), **Applications of gis databases and water quality modeling for agricultural nonpoint source pollution control**, Water Resources Center, University of Illinois, Research Report No, 214,
- MAIDMENT D, R, (2002), **Arc Hydro: GIS for Water Resources**, Redlands, CA, ESRI Press,
- MENDES, C,A,B; CIRILO, J,A, **Geoprocessamento em Recursos Hídricos: princípios, integração e aplicação**, Porto Alegre, ABRH, 2001, 533p,
- NOVOTNY, V,; CHESTERS, G, (1989), Delivery of Sediment and Pollutants from Nonpoint Sources: A Water Quality Perspective, **Journal of Soil and Water Conservation** 44(6):568-576,
- PAIVA, R.C.D. ; COLLISCHONN, W. ; TUCCI, C.E.M. (2011). Large scale hydrologic and hydrodynamic modeling using limited data and a GIS based approach. **Journal of Hydrology (Amsterdam)**, v. 406, p. 170-181
- PAZ, A,R,; COLLISCHONN, W, 2008, Derivação de rede de drenagem a partir de dados do SRTM, **Revista Geográfica Acadêmica**, v,2 n,2 (viii,2008) 84-95,
- PESSOA, M,M,E,P, (2010), **Integração de Modelos Hidrológicos e Sistemas de Informação Geográfica na análise de processos de Outorga Quantitativa**

- de uso da água: Aplicação na Bacia do Rio dos Sinos - RS**, Dissertação de Mestrado, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, UFRGS, Porto Alegre, 90p,
- RAUCH, W., HENZE, M., KONCSOS, L, REICHERT, P., SHANAHAN, P., SOMLYODY, L.; VANROLLEGHEM, P, (1998a), **River water quality modelling: I, State of the art**, IAWQ Biennial Int, Conf, Vancouver-Canada, 21-26,
- RAUCH, W., HENZE, M., KONCSOS, L, REICHERT, P., SHANAHAN, P., SOMLYODY, L.; VANROLLEGHEM, P, (1998b), **River water quality modelling: II, Problems of the art**, IAWQ Biennial Int, Conf, Vancouver-Canada, 21-26,
- RODRIGUES, R, B, (2000), **Metodologia de apoio à concessão de outorga para lançamento de efluentes e cobrança pelo uso da água – O modelo RM1**, Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária, São Paulo, 140p,
- RODRIGUES, R, B, ; PORTO, M, (2003), **Interface proposta para o modelo QUAL2E visando a gestão integrada de recursos hídricos**, In: XV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Paraná-Curitiba, 23 a 27, dez/2003, Anais, Tema: Desafios à Gestão da Água no Limiar do Século XXI, São Paulo: ABRH,
- ROSE, C,W,; DICKINSON, W,T,; GHADIRI, H,; JØRGENSEN, S,E, (1990), **Agricultural Nonpoint Source Runoff and Sediment Yield Water Quality (NPSWQ) Models - User's Perspective**, In Proceedings of International Symposium on Water Modeling of Agricultural Nonpoint Sources, USDA, Agricultural Research Service ARS-81, pp, 145-169,
- RUELLAND, D.; BILLEN, G.; BRUNSTEIN, D.; GARNIER, J. (2007). SENEQUE: A multi-scaling GIS interface to the Riverstrahler model of the biogeochemical functioning of river systems. **Science of The Total Environment**, 375(1–3), 257-273,
- SRINIVASAN, R,; ARNOLD, J,G, (1994), Integration of the basin-scale water quality model with GIS, **Water Resources Bulletin**, v, 30 (3): 453-462,
- STREETER, H,W,; WRIGHT, C,T,; KEHR, R,W, (1936), Measures of natural oxidation in polluted streams, III, An experimental study of atmospheric reaeration under stream-flow conditions, **Sewage Works Journal**, Vol, 8, No, 2 (Mar., 1936), pp, 282-316,

- SUI, D.; MAGGIO, R, (1999) Integrating GIS with hydrological modeling: practices, problems and prospects, **Computers, Environment and Urban Systems**, v, 23, 33-51,
- SWAT - Soil and Water Assessment Tool, (2000), **User's Manual**, S,L, NEITSCH; J,G, ARNOLD; J,R, KINIRY; J,R, WILLIAMS, Acesso em janeiro/2011: <http://www,brc,tamus,edu/swat/doc/html>,
- TUCCI, C, E, M, (1998), **Modelos Hidrológicos**, Porto Alegre: Ed, Universidade/UFRGS/ ABRH,
- UNEP, United Nations Environmental Programme, (1995), Water **Quality of World River Basins**, UNEP Environment Library, n, 14, Nairobi, Kenya, 39 p,
- VON SPERLING, M, (1997), **Princípios do tratamento Biológico de Águas Residuárias, Lodos ativados**, Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental; Universidade Federal de Minas Gerais, Vol,4: P, 253-268,
- WHITEAKER, T, L,; MAIDMENT, D, R,; GOODALL J, L,; TAKAMATSU M, (2006), **Integrating Arc Hydro Features with a Schematic Network**, Transactions in GIS 10(2): 219–237,