

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRÁULICAS

**TOMADA DE DECISÃO E OTIMIZAÇÃO DE ALTERNATIVAS NO  
PLANEJAMENTO COM MÚLTIPLOS OBJETIVOS EM UNIDADES DE  
GERENCIAMENTO – BACIA DO RIO DOS SINOS (RIO GRANDE DO SUL)**

ELISA MARQUES BARBOSA CHAVES

*Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como requisito parcial para obtenção do título de Doutor em Engenharia.*

**Orientador:** Antonio Eduardo Leão Lanna

**Coorientador:** Carlos Eduardo Morelli Tucci

**Banca Examinadora**

Prof. Dr. Antonio Domingues Benetti      IPH/UFRGS

Dra. Luiza Chomenko                              FEPAM/RS

Profa. Dra. Jussara Cabral Cruz              Depto. Hidráulica e Saneam/UFSM

**Porto Alegre, 22 de dezembro de 2004**

Dedico esta tese a todas as pessoas que  
lutam pela vida e por um mundo melhor

## APRESENTAÇÃO

Este trabalho foi desenvolvido no Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental do Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, sob a orientação do prof. Antonio Eduardo Leão Lanna e coorientação do prof. Carlos Eduardo Morelli Tucci da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

A autora agradece a todos aqueles que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho, em especial:

- ao prof. Antonio Eduardo Leão Lanna, pela orientação, estímulo e compreensão;
- ao prof. Carlos Eduardo Morelli Tucci, pela coorientação, ajuda e valiosos conselhos;
- aos membros das minhas bancas de qualificação e plano de tese: prof. Antonio Eduardo Leão Lanna, prof. Carlos Eduardo Morelli Tucci, prof. Joel Avruch Goldenfum e prof. Juvir Mattuella;
- ao Renato Letizia Garcia, e prof. Carlos Eduardo Morelli Tucci pela ajuda com o modelo hidrodinâmico de simulação da qualidade da água
- ao Comitê de Bacia Hidrográfica do Rio dos Sinos, em especial ao seu então presidente o eng<sup>o</sup> Paulo Renato Paim;
- aos profs. Antonio D. Benetti, Paulo Kroeff, Carlos André B. Mendes, Joel A. Goldenfum e Beatriz Camano pelas dicas importantes;
- demais professores e colegas do IPH, pelo apoio, incentivo e auxílio prestados ao longo do trabalho. Destaco aqui alguns nomes: Jaido, Adolfo, Cleuda, André;
- ao Corpo Administrativo e funcionários do IPH pela atenção e deferência na solução de problemas em relação ao trabalho. Um agradecimento especial a Dona Ligia Campos;
- ao IPH pela cessão de suas instalações, infra-estrutura e ambiente;

- ao Marne Rodrigues de Rodrigues e Fábio Pinto pela revisão do português, ao Paulo Denis Descovi Bortoluzzi pela ajuda na digitação dos resultados simulados pelos modelos. Ao Gentil pela ajuda com o inglês e ao Marne pela ajuda com o francês;
- ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq pelo aporte financeiro nos três primeiros anos deste trabalho;
- ao Departamento Municipal de Habitação da Prefeitura de Porto Alegre – DEMHAB do qual sou funcionária. Gostaria de agradecer em especial aos meus chefes Paulo José de Moraes, Luiz Arthur Machado de Faria e Luiz Homero O. Cabistani;
- aos meus pais que me possibilitaram chegar até aqui e minha família pelo apoio;
- aos meus amigos que estiveram comigo em todos os momentos;
- não poderia aqui deixar de citar alguns nomes que foram importantes para que eu tivesse condições de executar este trabalho: Luis Fernando Sosinski, Geraldo Megre Resende, Marco Aurélio Psicatelli, Eduardo Abreu, Marcelo Bremm, Carmen Suzana Bassôa Reinstein, Guilherme Starosta, Alexandre Antunes, Cristina Newmann, Bernardo Ulrich Bercht, Ana Luiza Schneider Moreira;
- por último gostaria de agradecer ao meu companheiro Claudio José Bortoluzzi que foi decisivo para que eu tivesse forças para terminar o trabalho. Agradeço a Deus todos os dias por você ter entrado em minha vida.

## RESUMO

A tomada de decisões é um procedimento complexo e que envolve muitas variáveis. A análise multiobjetivo estabelece relações para que, em projetos e planejamento de unidades de gerenciamento, sejam analisados os diversos condicionantes envolvidos. Como nos recursos hídricos a tomada de decisão envolve cada vez mais a resolução de conflitos e um aumento da diversidade de objetivos, a análise multiobjetivo vem sendo cada vez mais utilizada.

O objetivo deste trabalho é desenvolver ferramentas e metodologias que busquem formas de quantificar, avaliar e analisar múltiplos objetivos envolvidos na tomada de decisão em projetos, planejamento e gerenciamento de bacias hidrográficas.

Para a elaboração dos estudos foi escolhida a bacia do rio dos Sinos. A bacia do rio dos Sinos abrange parte da Região Metropolitana de Porto Alegre, e é importante pólo econômico do estado do Rio Grande do Sul.

Foram identificados condicionantes para a bacia, quais sejam: eficiência econômica, melhoria da qualidade da água, comprometimento social e minimização do impacto ambiental. Cada condicionante foi modelado por metodologias já consagradas para tal. A novidade é o casamento delas o que tornou o problema mais complexo de ser resolvido. Foi elaborada função de compromisso para a bacia do rio dos Sinos.

Por fim, baseado em preferências estabelecidas pelo Comitê da Bacia Hidrográfica, foram elaborados tabela e gráficos que auxiliam na tomada de decisão para intervenções no rio. Definindo assim o que deve ser feito primeiro com os recursos disponíveis em um plano de despoluição para a bacia.

## ABSTRACT

Decision making is complex procedure and involves several variables. The multiobjective analysis establishes relations so that can be used to analyse the various elements, in projects and planning of management units. As in the water resources decision making involving more and more the resolution of conflicts and an increase in diversity of objectives, the multiobjective analysis is being more and more used.

The aim of this research is to develop tools and methodologies that provide ways to quantify, evaluate and analyze multiple objectives involved in decision making in projects, planning and management of river basins.

The Sinos river basin was chosen for the development of the research. The Sinos river basin comprises part of the Metropolitan Area of Porto Alegre, and is an important economic center in the state of Rio Grande do Sul.

The following objectives have been identified for the basin, which are: economic efficiency, improvement in water quality, social commitment and minimization of environmental impact. Each objective was modeled by methodologies consecrated already for such. The innovation is their joint analysis that turned the problem more complicated of being solved. A compromise function was created for Sinos river basin.

Finally, based on preferences set by the Sinos River Basin Committee, table and graphs were created to aid in decision making for interventions in the river. Defining what should be done first with the available resources in a wastewater treatment planning for the basin.

## RÉSUMÉ

La prise de décisions est une procédure complexe et qu'il implique beaucoup variés. Le multiobjectif de l'analyse établit des rapports pour que, dans les projets et organiser d'unités d'administration, soit analysé leurs plusieurs objectifs compliqués. Comme dans les ressources de l'eau la fabrication de décision implique de plus en plus la résolution de conflits et une augmentation de la diversité d'objectifs, le multiobjectif de l'analyse a été utilisé de plus en plus.

L'objectif de ce travail est développer des outils et méthodologies qui cherchent des formes de mesurer, évaluer et analyser des multiples objectifs impliqués dans la prise de décision dans projets, organisation et administration des cuvettes de rivières.

Pour l'élaboration des études il a été choisi la cuvette de la rivière du Sinos. La cuvette de la rivière du Sinos inclut partie de la Région Métropolitaine de Porto Alegre, et c'est perche économe importante de l'état de Rio Grande do Sul.

On a été identifié des objectifs pour la cuvette qu'ils sont: efficacité économe, amélioration de la qualité de l'eau, compromettre social et minimisation de l'impact de l'environnement. Chaque objectif a été modelé par méthodologies consacrées déjà pour tel. L'innovation est leur analyse commune qui a tourné le problème plus compliqué d'existence résolu. La fonction de l'engagement a été élaborée pour la rivière du Sinos.

Finalement, basé sur des préférences établies pour le Comité de la Cuvette de Rivières de la rivière du Sinos, on a été élaboré de la table et de graphiques qui aident dans la prise de décision pour les interventions dans la rivière. Définir comme ceci ce qui devrait être fait en premier avec les ressources disponibles dans un traitement de l'eau de rebut qui prévoit la cuvette.

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>Introdução</b> .....	<b>1</b>
1.1	Caracterização do Problema .....	2
1.2	Objetivos da Pesquisa .....	8
1.3	Justificativa .....	9
1.4	Organização do Texto .....	10
<b>2</b>	<b>A Bacia do Rio dos Sinos</b> .....	<b>12</b>
2.1	Caracterização da Bacia .....	12
2.2	Diagnóstico dos Problemas da Bacia do Rio dos Sinos .....	16
2.3	Critérios para o Estabelecimento de Prioridades .....	22
<b>3</b>	<b>Análise Multiobjetivo</b> .....	<b>33</b>
3.1	Planejamento Multiobjetivo.....	35
3.2	Identificação de Objetivos.....	36
3.2.1	Quantificação de Objetivos.....	37
3.3	A Tomada de Decisão Múltipla.....	62
3.4	Programação Multiobjetivo.....	63
3.4.1	Definições.....	67
3.4.2	Técnicas de Geração.....	74
3.4.3	Técnicas que Requerem uma Articulação à Priori de Preferências.....	75
3.4.4	Técnicas que Requerem uma Articulação Progressiva de Preferências.....	91
3.5	Escolha da Função Objetivo e Algoritmo de Solução.....	94
3.6	Exemplos de Aplicação da Análise Multiobjetivo.....	98



<b>4</b>	<b>Metodologia</b> .....	101
4.1	Identificação e/ou Definição de Condicionantes para a Bacia do Rio dos Sinos .....	102
4.1.1	Levantamentos de Critérios para o Estabelecimento de Prioridades.....	102
4.1.2	Definição de Objetivos a Serem Atingidos para a Bacia .....	104
4.1.3	Critérios de Avaliação dos Objetivos e Definição de Restrições .....	108
4.2	Função de Compromisso .....	108
4.2.1	Identificação das Características do Problema de Modelagem da Função de Compromisso.....	108
4.2.2	Definição do Método de Escolha da Técnica de Programação Multiobjetivo a ser Utilizada para a Formulação do Problema da Bacia do Rio dos Sinos.. .....	109
4.2.3	Escolha da Técnica de Programação Multiobjetivo a ser Utilizada para a Formulação do Problema da Bacia do Rio dos Sinos.....	110
4.2.4	Formulação do Problema da Bacia do Rio dos Sinos.....	110
4.2.5	Elaboração da Função de Compromisso .....	111
4.2.6	Elaboração de Relações para Trabalhabilidade da Função de Compromisso ...	112
4.2.7	Variação das Prioridades Estabelecidas para Objetivos da Bacia e Elaboração de Alternativas de Investimento .....	112
4.2.8	Definição de Preferências.....	113
<b>5</b>	<b>Aplicação a Bacia do Rio dos Sinos</b> .....	114
5.1	Identificação e/ou Definição de Condicionantes para a Bacia do Rio dos Sinos .....	114
5.1.1	Definição de Objetivos a Serem Atingidos para a Bacia .....	114
5.1.2	Critérios de Avaliação dos Objetivos e Definição de Restrições .....	131
5.2	Função de Compromisso .....	132

5.2.1	Identificação das Características do Problema de Modelagem da Função de Compromisso.....	132
5.2.2	Escolha da Técnica de Programação Multiobjetivo a ser Utilizada para a Formulação do Problema da Bacia do Rio dos Sinos.....	134
5.2.3	Formulação do Problema da Bacia do Rio dos Sinos.....	138
5.2.4	Elaboração da Função de Compromisso .....	139
5.2.5	Elaboração de Relações para Trabalhabilidade da Função de Compromisso ...	140
5.2.6	Variação das Prioridades Estabelecidas para Objetivos da Bacia e Elaboração de Alternativas de Investimento .....	148
5.2.7	Definição de Preferências.....	150
<b>6</b>	<b>Resultados e Conclusões.....</b>	<b>152</b>
6.1	Critérios Adotados e Definição de Trechos Prioritários.....	153
6.2	Análise dos Resultados.....	160
6.2.1	Parâmetro Coliformes.....	161
6.2.2	Parâmetro DBO .....	161
6.2.3	Parâmetro OD.....	162
6.2.4	Outras Análises.....	162
6.3	Conclusões e Recomendações.....	163
<b>7</b>	<b>Bibliografia.....</b>	<b>166</b>

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2-1 – Custos anuais em US\$ por fontes de poluição .....	18
Tabela 2.2 – Resumo das cargas poluidoras totais anuais.....	19
Tabela 2.3 - Tratamentos recomendados de acordo com o tipo de fonte de poluição em Rio Grande do Sul, 1996.....	20
Tabela 2.4- Relação entre as fontes poluidoras e parâmetros de qualidade da água para a bacia do rio dos Sinos. Fonte: Rio Grande do Sul (1996).....	25
Tabela 3.1 – Efeito do aumento do acesso aos serviços de saneamento de 1%, para a população do Brasil de 1989. Fonte: Motta et alli (1999).....	59
Tabela 5.1 – Contribuições laterais e valores adotados.....	120
Tabela 5.2 – Comparação entre as simulações de regime permanente e não permanente.....	123
Tabela 5.3 – Definição de valores para cálculo da distância composta da programação por composição.....	136
Tabela 5.4 – Porcentagem de ocorrência de DBO por fontes de poluição.....	141
Tabela 5.5 – Custos em US\$ dos tratamentos por fontes de poluição e trechos do rio.....	142
Tabela 5.6 – Valores assumidos pelos objetivos social e ambiental.....	147
Tabela 5.7 – Alguns exemplos de possíveis alternativas considerando a otimização do objetivo qualidade da água.....	150
Tabela 6.1 – Ordenamento dos trechos prioritários e objetivos relacionados.....	156

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - A bacia do rio dos Sinos. Fonte Haase, 2004 .....	13
Figura 2.2 - Esquema geral de uso dos solos na bacia ( e dos recursos hídricos) . Fonte: Rio Grande do Sul 1995. ....	14
Figura 2.3 – Subdivisão de bacias adotadas. Fonte Rio Grande do Sul (1996).....	20
Figura 3.1 – Função benefício versus investimento.....	38
Figura 3.2 - Curvas de indiferença para valores diferentes de investimento onde A e B são possíveis formas de investimento.....	39
Figura 3.3 - Contexto de tomada de decisões, Fonte: Cohon (1978).....	64
Figura 3.4 - Algumas das formas comuns da função de subcomponente (característica): linear, triangular, trapezoidal .....	72
Figura 5.1 - Curvas custo unitário anual (US\$) versus vazão (m <sup>3</sup> /dia).....	117
Figura 5.2 - Curvas custo unitário anual (US\$) versus DBO <sub>5</sub> (ton/ano).....	118
Figura 5.3 – Localização das seções transversais do modelo. Fonte: Garcia (1997).....	121
Figura 5.4 – Comparação entre níveis regime permanente e não permanente.....	124
Figura 5.5 – Comparação entre vazões para regime permanente e não permanente.....	124
Figura 5.6 – Comparação entre DBO (mg/l) entre regime permanente e não permanente.....	125
Figura 5.7 – Comparação entre coliformes (NMP/100ml) para regime permanente e não permanente.....	125
Figura 5.8 – Comparação entre oxigênio dissolvido (mg/l) entre regime permanente e não permanente.....	126
Figura 5.9 – Estabelecimento das classes fuzzy de distribuição da população em relação à densidade demográfica nos trechos do rio dos Sinos. A fonte da densidade demográfica é a Fundação Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE (apud Rio Grande do Sul,	

1995) em Sinopse Preliminar do Censo Demográfico do Rio Grande do Sul	
1991.....	128
Figura 5.10 – Simulação de tratamentos por trechos de rio para DBO.....	144
Figura 5.11 – Simulação de tratamentos por trechos para coliformes.....	144
Figura 5.12 – Simulação de tratamentos por trechos de rio para OD.....	145
Figura 5.13 – Simulação de tratamentos por fontes de poluição para DBO.....	145
Figura 5.14 – Simulação de tratamentos por fontes de poluição para coliformes.....	146
Figura 5.15 – Simulação de tratamentos por fontes de poluição para OD.....	146
Figura 6.1 - Objetivo qualidade da água para trechos prioritários, parâmetro coliformes.....	157
Figura 6.2 - Objetivo qualidade da água para trechos prioritários, parâmetro DBO.....	158
Figura 6.3 - Objetivo qualidade da água para trechos prioritários, parâmetro OD.....	159

# 1 INTRODUÇÃO

A sociedade está em constante evolução, mudam-se os conceitos e critérios, mudam-se os valores. Surgem preocupações cada vez maiores com o meio ambiente e com os problemas sociais. Como reflexo disto, os projetos, que antes visavam apenas fatores econômicos, agora buscam, além disso, menores impactos ambientais e maior comprometimento social, além de uma maior eficiência ao fim a que se propõem.

Nos projetos que envolvem os recursos hídricos isto não é diferente. Sua elaboração envolve, cada vez mais, a resolução de conflitos, devendo ser considerados vários objetivos para a busca da solução ótima. A tomada de decisões quanto a que solução adotar é, portanto, cada vez mais complexa.

Por esse motivo, os técnicos envolvidos na elaboração de projetos e os tomadores de decisão, cada vez mais deparam-se com uma infinidade de possibilidades e objetivos a serem atingidos, sendo esta uma grande dificuldade encontrada durante tal elaboração.

No intuito de buscar uma melhor forma de compreensão, modelagem dos problemas e objetivos, e criar ferramentas para apoio na tomada de decisão, este trabalho teve como propósito, sem a pretensão de ser exaustivo, ajudar os analistas de projetos, apresentando uma metodologia de implementação do planejamento multiobjetivo. Com isso, criaram-se ferramentas como auxílio à tomada de decisões, em problemas que envolvem múltiplos objetivos, adaptando, assim, uma nova forma de pensamento aos conhecidos métodos de planejamento.

O planejamento multiobjetivo visa atender os anseios da sociedade como um todo. Para se buscar a satisfação de tantos interesses conflitantes, o analista se defronta com a dificuldade, a necessidade de entender e buscar a interface de várias áreas do conhecimento.

Para a elaboração dos estudos que foram desenvolvidos ao longo do trabalho proposto, foi escolhida a bacia do rio dos Sinos, que abrange parte da Região Metropolitana de Porto

Alegre, e é importante pólo econômico do estado do Rio Grande do Sul. Existem vários trabalhos sobre a bacia e os estudos encontram-se bastante avançados. O principal problema apontado por eles, no que diz respeito aos recursos hídricos, é o problema qualitativo. O problema, porém, é complexo e para sua solução deveriam ser considerados vários objetivos a serem atingidos. Desta forma, a bacia foi considerada adequada como base para o desenvolvimento dos trabalhos e como modelo para a aplicação do desenvolvimento da metodologia proposta.

## **1.1 CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA**

Nos últimos anos, têm se acentuado os conflitos pelos usos da água, conflitos esses que têm surgido em muitos locais em função de questões quantitativas e qualitativas. Nos aglomerados urbanos, estes problemas são realçados pela excessiva impermeabilização de superfícies, a ocupação desordenada de mananciais, condições inadequadas de saneamento, etc. Esses fatores ocasionam principalmente a poluição dos rios pela não coleta e tratamento dos esgotos, o que traz como consequência a inadequação das águas para diversos usos e encarecimento do seu tratamento para consumo humano.

## **PLANOS DE DESPOLUIÇÃO**

Em muitos locais tem-se elaborado planos de despoluição para os rios, prevendo a coleta de esgotos e implantação de Estações de Tratamento de Esgotos-ETE. Isso é uma tendência mundial, na medida em que se tem notado uma maior preocupação com o desenvolvimento sustentável das cidades e a preservação de manancias para as gerações futuras. Um exemplo dessa preocupação é o Plano de Despoluição do rio Tâmis, que levou vários anos para ser implementado e gastou milhões de libras (ProjetoÁgua, 2004). Outro

exemplo é o trabalho de Macedo et alli (2003) para a bacia do Alto Rio Iguaçu, no qual eles afirmam que os lançamentos causam efeitos perversos sobre o meio ambiente e parcela das populações urbanas, resultando em elevados prejuízos econômicos e disseminação de doenças de veiculação hídrica. Eles obtêm como resultado das simulações que com as medidas propostas pelo Plano de Despoluição reduzem sobremaneira as concentrações de cargas poluidoras, obtendo-se um nível de poluição bastante inferior ao resultado do cenário em que nada seria feito. O Plano tenta adequar os investimentos aos possíveis recursos que poderiam ser captados. O trabalho é similar ao apresentado por Rio Grande do Sul (1996) para a bacia do Rio dos Sinos.

Uma análise dos resultados obtidos pelo trabalho de Macedo et alli (2003) é feita por Marin e Ramos (2003) no qual eles chegam à conclusão que os resultados da avaliação de benefícios demonstram que o instrumento de tomada de decisões em despoluição hídrica possibilitou não apenas a quantificação econômica dos benefícios dos cenários de despoluição hídrica e da meta a ser alcançada, mas também forneceu parâmetros suficientes para levantar inúmeros questionamentos fundamentais quanto a viabilidade do Plano de Despoluição Hídrica e sua sustentabilidade pelos usuários dos recursos hídricos. Entre as principais questões levantadas pelos técnicos envolvidos no Plano de Despoluição Hídrica destacam-se:

a) É realmente possível atingir a meta estabelecida pela sociedade no prazo de 20 anos, considerando-se as restrições físicas e orçamentárias? Caso não seja possível, qual será o horizonte de projeto mais adequado? b) A sociedade está disposta a pagar por usufruir o benefício proporcionado pelo padrão de qualidade da água constante no enquadramento do rio? Caso a sociedade não esteja disposta a pagar por usufruir estes benefícios, qual o padrão de qualidade da água, cujos custos são sustentáveis pela sociedade, para atender todas as suas necessidades básicas e interesses? Qual é a solução que técnica e economicamente é a mais viável para atender a meta estabelecida pela sociedade? Para algumas destas perguntas Pessoa et alli (2003) respondem afirmando que cabe ao Comitê de Bacias indicar à Agencia



Nacional de Águas – ANA a priorização das ações de saneamento da bacia hidrográfica, ou seja, deverá apontar quais localidades deverão receber primeiro os benefícios de tais ações e quais não receberão caso os recursos financeiros não sejam suficientes para todos. Para a bacia do rio dos Sinos estas definições poderiam ser tomadas à partir de uma negociação feita no Comitê de Bacia Hidrográfica do Rio dos Sinos – Comitesinos.

Quanto a arrecadação de recursos deve sempre ser considerada a possível disposição de pagamento da sociedade por um benefício; um exemplo é o trabalho realizado por Kramer e Eisen-Hecht (2002) onde é feita uma pesquisa de disposição de pagamento por um Plano de Despoluição designado a proteger a qualidade da água e seu nível o tempo todo para as praias do rio da bacia Catawba. Na pesquisa, chegou-se a uma média de pagamento de US\$ 139 o que daria um montante, para o benefício econômico anual, de mais de US\$ 75 milhões. Duas hipóteses-chave, no entanto são inerentes na medida da disposição de pagamento. A primeira hipótese é que indivíduos procuram maximizar sua utilidade e eles têm claramente definidas preferências que podem ser reveladas através das escolhas que eles fazem. A segunda hipótese-chave é saber que o consumidor é soberano e que indivíduos são os melhores juízes de suas próprias utilidades (Lindsey, 1992 apud Kramer e Eisen-Hecht, 2002).

No Brasil, no entanto, a realidade econômica é outra e provavelmente a disposição de pagamento seria menor e a carga de tributos é considerada bastante alta, conforme Amaral e Olenike (2003), Amaral et alli (2004) e Oswald (2003). Seria, talvez, um ônus muito pesado arcar com mais pagamentos. A solução então é procurar viabilizar uma otimização dos recursos disponíveis. World Bank Group (1998a) dá as seguintes orientações: para o controle de efluentes industriais, quando os custos do tratamento do efluente são altos, programas de minimização de esgoto são muito convenientes; uma vez que se tenha as informações básicas em qualidade da água, carga e tendência para efluentes municipal e industrial e a estimativa dos custos de controle são avaliáveis, é possível se ter a otimização de um programa de gerenciamento de esgoto; e , um processo de planejamento interativo é, entretanto, requerido

para examinar um número de opções para escalas e taxas de melhora do tratamento de esgoto, balanceando o custo do programa contra a necessidade atual para realizar os objetivos de qualidade da água.

Os planos de despoluição têm procurado adequar as possíveis etapas de despoluição aos recursos disponíveis para tal, mas com frequência os recursos são insuficientes para a despoluição completa do rio. Os planos então são elaborados prevendo longos prazos para sua implementação, mas surge a pergunta: o que fazer primeiro que traria maiores benefícios com os recursos disponíveis? Essa pergunta muitas vezes esbarra nas dificuldades de compreensão do problema, pois vários são os objetivos a serem atendidos e a complexidade de modelagem de cada objetivo, muitas vezes, implica em simplificações que podem levar a distorções do resultado. Surge então a necessidade de uma modelagem complexa o suficiente para diminuir as distorções e simples o suficiente para ser entendida por possíveis tomadores de decisão que precisem definir suas prioridades.

## **TÉCNICAS DE ANÁLISE DE PROJETOS OU PROGRAMAS**

A tomada de decisões é um procedimento complexo, que envolve muitas variáveis. Nos recursos hídricos, esse processo tem se desenvolvido cada vez mais para a resolução de conflitos. Isso tem ocorrido devido ao aumento das demandas e da diversidade de usos. Várias são as incertezas que ocorrem no processo de tomada de decisão. Essas incertezas existem no processo de elaboração, formulação e modelação da tomada de decisão e irão influenciar os resultados obtidos. Por isso, as técnicas e ferramentas têm-se desenvolvido cada vez mais para minorar essas incertezas no processo de tomada de decisão, melhorar o planejamento de unidades de gerenciamento e melhor representar o problema real.

As técnicas de análise de projetos ou programas têm o objetivo de prover informações para o tomador de decisões e melhorar a eficiência das decisões. Entre elas, a análise

benefício-custo é um dos métodos mais antigos de avaliação da viabilidade de projetos ou programas. Existem, no entanto, algumas formas de análise que representam uma evolução à técnica de benefício-custo, no sentido de considerarem escalas mais adequadas aos condicionantes envolvidos. São elas: análise benefício-custo ampliada ou ambiental, análise custo-efetividade e a análise multiobjetivo.

A análise benefício-custo estabelece uma relação entre os benefícios e custos em termos monetários, na qual todos os condicionantes são avaliados nesses termos. Ela compara os impactos (benefícios ou vantagens; custos ou desvantagens) de um programa (que usualmente diz respeito a recursos públicos) com o custo monetário do programa (Gsellmann, 1977 apud Golden et al 1979).

A análise benefício-custo ampliada, ou ambiental, busca minimizar as limitações da análise benefício-custo no campo ambiental. Para tal, propõe que os impactos ambientais sejam valorados monetariamente, por técnicas específicas para este fim.

A metodologia análise custo-efetividade é designada para avaliar programas nos quais nem todos os benefícios podem ser convenientemente ou efetivamente medidos em termos monetários. Lanna (1996a) explica que não é necessária a valoração monetária dos custos ambientais já que na negociação social eles podem ser considerados nas suas próprias unidades de medida. Busca-se estabelecer a solução de menor custo (econômico, social, ou ambiental) para alcançar os objetivos ou cumprir missões socialmente negociadas.

Existem dois métodos distintos que estão sendo abordados neste texto:

- técnicas de avaliação de projeto, em face à dificuldade de estimar alguns custos e benefícios em termos monetários, especialmente os do tipo ambiental: nesse caso, existe a tentativa de valorar monetariamente custos e benefícios (análise custo-benefício ampliada), ou a consideração de benefícios como metas socialmente negociadas, que devem ser alcançadas com mínimo custo social (análise custo-efetividade);

- técnicas que, sem necessariamente tentar valorar monetariamente custos e benefícios não monetários ou estabelecer missões a serem alcançadas, propõem-se lidar com os objetivos em seus próprios termos (ou unidades de medida): as técnicas multiobjetivo.

A análise multiobjetivo procura modelar cada um dos objetivos em suas reais escalas de medição e deve ser usada como subsídio para a modelagem de problemas complexos que envolvem muitos objetivos. Quanto à aplicação em projetos de recursos hídricos, Zuffo et alli (2002) afirmam que, no Brasil, não se tem ainda o planejamento multiobjetivo formalizado, apesar de alguns esforços nessa área. Jardim (2003) e Pilar (2003) reforçam a afirmação quando falam da necessidade do aprofundamento de pesquisas que envolvam a sua aplicação. A análise multiobjetivo aplicada a projetos de recursos hídricos precisa ser melhor estudada para se verificar a adequação de suas técnicas à solução destes problemas.

## **CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA NA BACIA DO RIO DOS SINOS**

Na bacia do rio dos Sinos, é bastante evidente o mesmo quadro que é encontrado para o cenário geral, com relação a planos de despoluição. A bacia apresenta um dos maiores Produto Interno Bruto – PIB do estado do Rio Grande do Sul, mas a sua rápida expansão trouxe como conseqüência que o vale apresenta uma densidade populacional dez vezes maior que a média do estado. Isso fez com que houvesse a favelização de várias áreas (Comitesinos, 1998). Sobre a bacia, em Rio Grande do Sul (1996) encontra-se um estudo detalhado de diagnóstico dos problemas em relação aos recursos hídricos para a bacia. O estudo identifica que o principal problema para a bacia é o de qualidade da água e indica alternativas de solução que passam pela implementação de várias estações de tratamento de esgoto-ETEs espalhadas pela bacia toda. Ele, porém, não detalha em que local seriam instaladas as ETEs e também não faz um detalhamento de cada alternativa. Fica a pergunta: o que fazer primeiro

que traga o maior benefício com os recursos disponíveis e diante dos vários objetivos a serem atendidos? É essa pergunta que pretendemos responder.

## **1.2 OBJETIVOS DA PESQUISA**

O objetivo desta pesquisa foi desenvolver ferramentas e metodologias que buscassem formas de quantificar, avaliar e analisar múltiplos objetivos envolvidos na tomada de decisão em projetos, planejamento e gerenciamento de bacias hidrográficas.

Buscou-se identificar uma forma de aplicação da análise multiobjetivo a projetos que envolvam recursos hídricos, usando antigos conceitos da análise multiobjetivo como eram em sua origem, definindo passo a passo como aplicar a análise multiobjetivo na solução deste tipo de problema. Buscou-se, também, a adequação da modelagem de cada um dos objetivos a serem avaliados em suas reais escalas de medição através de metodologias já conhecidas para a sua avaliação, sem precisar restringi-los a escalas comuns de avaliação. Foi fornecida, com isso, uma ferramenta de apoio a decisão para a avaliação de projetos que seja o bastante flexível para permitir reavaliações de decisões anteriores e mudança de planos, permitindo assim que tomadores de decisão, à partir de suas prioridades, definam qual a melhor alternativa a ser adotada diante da realidade da bacia hidrográfica.

Este objetivo geral foi alcançado mediante:

- a) a identificação e/ou definição dos condicionantes envolvidos;
- b) o desenvolvimento de metodologia para a elaboração da função de compromisso como ferramenta de apoio a tomada de decisão;
- c) o uso da função de compromisso para subsidiar a tomada de decisão.

Como objetivos específicos aplicados à bacia do rio dos Sinos foi considerado o que se segue:

Na bacia do rio dos Sinos, verificou-se a solução de um problema que envolve os recursos hídricos buscando-se adequar a aplicação da análise multiobjetivo a planos de despoluição. Baseado na solução proposta por Rio Grande do Sul (1996), procurou-se definir as etapas de implementação do tratamento de esgotos para a bacia, de acordo com as restrições do problema, a fim de responder a pergunta: o que deve ser feito primeiro que traga maiores benefícios diante das restrições da realidade da bacia? Para tal foi necessário:

- a) identificar o maior número possível de condicionantes envolvidos no problema, principalmente o de qualidade de água e custos para o tratamento de efluentes;
- b) quantificar cada objetivo definido em suas reais escalas de valores de acordo com metodologias já conhecidas para sua formulação;
- c) proceder a interrelação dos objetivos pela análise multiobjetivo: dentre as diversas técnicas existentes de abordagens múltiplos objetivos, escolher a que melhor se adequa à aplicação na bacia e ao ambiente de tomada de decisões, elaborando ferramentas para facilitar o manejo da função de compromisso;

### **1.3 JUSTIFICATIVA**

A elaboração de ferramentas e/ou metodologias e procedimentos que busquem formas de quantificar, avaliar e analisar os múltiplos objetivos envolvidos para bacias poderá orientar as aplicações em ambientes de tomada de decisão e gerenciamento de bacias hidrográficas, trazendo assim uma metodologia para a aplicação da análise multiobjetivo a projetos que envolvam recursos hídricos. A partir daí serão criadas ferramentas para auxiliar tomadores de decisão a definir melhores alternativas a serem implementadas, à partir de suas prioridades.

Quanto à aplicação específica à bacia do rio dos Sinos temos o que se segue:

Estudos indicam que a bacia do rio dos Sinos apresenta problemas principalmente no que diz respeito à qualidade da água. Em Rio Grande do Sul (1996), pela **análise custo-efetividade**, encontram-se duas principais alternativas para o problema existente na bacia do rio dos Sinos: a solução de não se fazer nada e desta forma a sociedade teria que se dispor a aceitar uma piora na qualidade da água; e a implementação de várias estações de tratamento distribuídas na bacia, para as várias fontes de poluição existentes, sendo que essa segunda alternativa apresenta-se inviável quanto aos custos envolvidos. Há também uma terceira alternativa que é apresentar a possibilidade de excluírem-se os tratamentos de menor eficiência (na relação custo-benefício) e dessa forma tornar a ação mais viável em termos de custos. É sugerida ainda, a possibilidade da utilização da abordagem **custo-fixo** e, dessa forma, com a definição prévia de um valor a ser investido, buscar-se-ia a maior eficiência para o investimento. Diante do quadro que se apresenta e da evolução dos estudos existentes para bacia do rio dos Sinos, verifica-se que a aplicação da abordagem **multiobjetivo**, por meio da elaboração de soluções não inferiores de benefícios-custos permitiriam uma maior flexibilidade para a definição dos custos a serem investidos em relação à eficiência desejada.

#### **1.4 ORGANIZAÇÃO DO TEXTO**

O trabalho divide-se em cinco partes que serão descritas a seguir, deve-se considerar que os conceitos apresentados em uma parte do trabalho são utilizados em outras partes, sem maiores explicações.

Na primeira parte, é feita uma caracterização da bacia do rio dos Sinos e uma análise do problema existente, bem como a definição dos critérios para o estabelecimento de prioridades.

A segunda parte é a revisão bibliográfica, que funciona como embasamento teórico aos estudos, já visando a metodologia que será adotada. Os conceitos apresentados nesta parte

são fundamentais para o entendimento das próximas etapas do trabalho. A revisão discorre sobre a análise multiobjetivo e descreve os passos de um planejamento multiobjetivo que, a seguir, são detalhados da seguinte forma: esclarecem como identificar e quantificar objetivos; explicam como é a tomada de decisão múltipla; apresentam a programação multiobjetivo e algumas de suas técnicas; explicam como escolher a função objetivo e o algoritmo de solução. Por fim, são apresentados alguns exemplos de aplicação da análise multiobjetivo.

Na terceira parte, é apresentada a metodologia de trabalho. Essa metodologia segue os passos de um planejamento multiobjetivo e se divide em duas etapas: a identificação e/ou definição de objetivos para a bacia do rio dos Sinos e a modelagem da função de compromisso.

Na quarta parte, há a aplicação da metodologia de planejamento multiobjetivo à bacia do rio dos Sinos, na qual são estabelecidos e modelados os objetivos. A seguir, é feita a escolha da técnica de programação multiobjetivo a ser utilizada. É elaborada a função de compromisso e estabelecidas relações para a sua trabalhabilidade e é ensaiada a forma de trabalhar com a função de compromisso. Então é consultado um tomador de decisões, no caso o Comitesinos, para o estabelecimento de preferências de alternativas a serem simuladas.

Na quinta e última parte, é feita uma análise dos resultados obtidos, com a simulação das alternativas preferidas pelo Comitesinos e descritas as conclusões, recomendações e sugestões de próximas pesquisas que podem ser feitas à partir deste trabalho.



## **2 A BACIA DO RIO DOS SINOS**

A bacia do rio dos Sinos foi escolhida por apresentar alto grau de desenvolvimento e, devido aos problemas de qualidade de água que apresenta, pelos diversos objetivos que podem ser considerados em um programa de despoluição. A bacia possui ainda, grande disponibilidade de dados. As informações a seguir apresentadas nos itens 2.1 e 2.2 foram extraídas de Rio Grande do Sul (1995).

### **2.1 CARACTERIZAÇÃO DA BACIA**

A bacia do rio dos Sinos está situada na porção nordeste do estado do Rio Grande do Sul (figura 2.1 ) em um quadrilátero formado pelas seguintes coordenadas geográficas: - ao sul : entre os paralelos 29°20' e 30°10'; - a leste: entre os meridianos 50°15' e 51°20'. Na figura 2.2 vemos um esquema dos usos dos solos na bacia.

Integrando a bacia do Lago Guaíba, um dos principais lagos do sul do Brasil, a bacia do rio dos Sinos está delimitada ao norte e a oeste pela bacia do rio Caí; ao sul, parcialmente, pela bacia do rio Gravataí e, parcialmente, pelas encostas da Serra Geral, que servem de divisor de águas para as bacias inseridas na planície costeira. A leste, a delimitação também é definida pelas encostas da Serra Geral. A área da bacia é de 3798,14 km<sup>2</sup>.

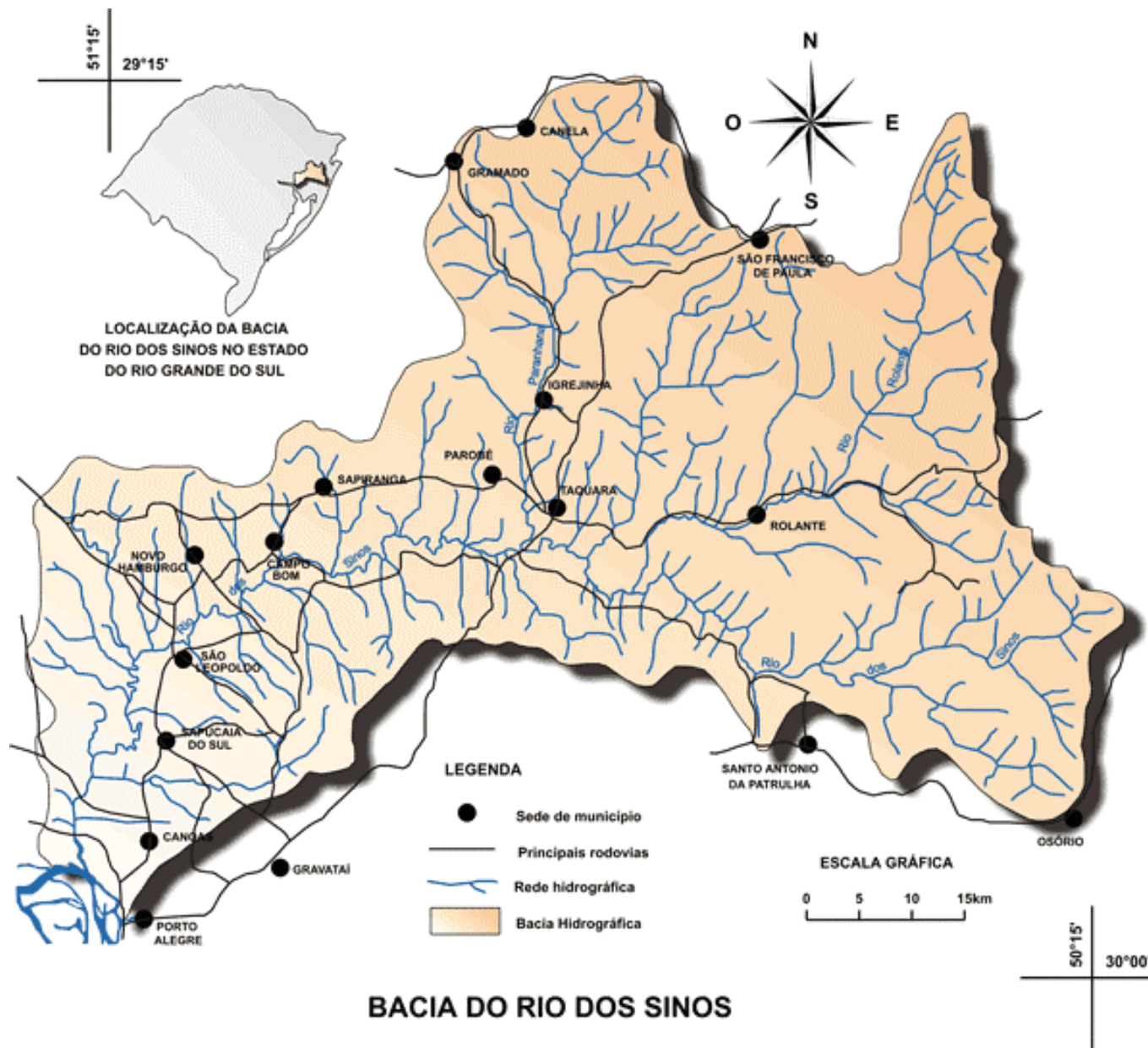


Figura 2.1 A bacia do rio dos Sinos. Fonte Haase, 2004



Figura 2.2- Esquema geral de uso dos solos na bacia (e dos recursos hídricos) . Fonte: Rio Grande do Sul, 1995

As nascentes do rio dos Sinos situam-se no município de Caraá, a cerca de 900 m de altitude, tendo a sua foz no delta do Jacuí, em altitude da ordem de 10 m, em meio a áreas alagadiças e depósitos fluviais. Seus afluentes principais são os rios da Ilha, Rolante e Paranhana, sendo que este último recebe, desde 1956, águas derivadas da bacia do rio Caí, da ordem de 5 a 9 m<sup>3</sup>/s, provenientes das barragens do Salto e da Divisa, para geração de energia nas Usinas Hidrelétricas de Bugres e da Canastra, da Companhia Estadual de Energia Elétrica-CEEE.

Afora esses formadores principais, existem diversos arroios afluentes de menor porte, muitos dos quais drenam áreas urbanas, distritos industriais e depósitos de lixo, os quais também têm importância, tanto no regime hidráulico, quanto na qualidade das águas do rio dos Sinos. Os arroios formadores muitas vezes são utilizados como canais de transporte de esgoto doméstico, lixívia, drenagem pluvial de áreas urbanas e de efluentes industriais, tratados ou não. Assim, uma série de arroios na parte mais baixa da bacia do rio dos Sinos

possui condições anaeróbicas, principalmente os arroios Luiz Rau, José Joaquim, João Correia, do Portão, e outros.

O rio dos Sinos, desde a sua cabeceira até sua desembocadura no delta do rio Jacuí, tem um gradiente de cerca de 200 km. Para efeitos de caracterização hidrológica e hidráulica Silveira (1980 apud Rio Grande do Sul, 1995) considerou-o segundo três subtrechos distintos:

- trecho superior, com cerca de 25 km, desenvolvendo-se entre a cota de 600 e a cota de 60, com declividades da ordem de 0,02 m/m;
- trecho médio, com declividade média de 0,0005 m/m e extensão aproximada de 125 km, recebendo três afluentes importantes: o rio Paranhana, drenando uma área de 580 km<sup>2</sup>, o rio Rolante, drenado cerca de 500 km<sup>2</sup>, e o rio da Ilha , cuja bacia conta com 330 km<sup>2</sup>.

O trecho médio drena grande parte de região montanhosa da bacia, caracterizada pelo alto índice pluviométrico, o que faz dos afluentes referidos importantes definidores do regime do rio dos Sinos. Adicionalmente, o rio Paranhana recebe, desde 1956, as águas oriundas do rio Caí, mais precisamente dos reservatórios do Salto e da Divisa, que alimentam as centrais hidroelétricas da CEEE de Bugres e da Canastra. Após turbinadas, estas águas, cuja vazão varia, na maior parte do tempo, entre 5 e 9 m<sup>3</sup>/s, são lançadas na bacia do rio dos Sinos;

- trecho inferior do rio dos Sinos, compreendendo os últimos 50 km, caracterizado por declividades muito suaves, sub-trechos com contra-declives, fenômeno característico de rios de planície, com formação de meandros e zonas de sedimentação.

De acordo com a classificação climática de Wladimir Köppen, a bacia do rio dos Sinos está sujeita a dois tipos climáticos distintos:

- tipo climático Cfa - clima mesotérmico ( temperatura média do mês mais frio abaixo de 18°C), subtropical úmido sem estação seca e verão quente, sendo a temperatura média do mês mais quente superior a 22°C;
- tipo climático Cfb - clima mesotérmico, temperado úmido sem estação seca e verão quente, sendo a temperatura média do mês mais quente inferior a 22° C.

## **2.2 DIAGNÓSTICO DOS PROBLEMAS DA BACIA DO RIO DOS SINOS**

As disponibilidades quantitativas de água na bacia são superiores às demandas atuais e projetadas. Diante disso, não há necessidade de se tratar da parte quantitativa no processo de planejamento simulado no estudo; apenas as questões relacionadas à qualidade das águas devem ser enfocadas (Rio Grande do Sul, 1996).

Mesmo quando apenas as questões qualitativas são consideradas, podem ser promovidas suas mitigações, por intervenções no regime quantitativo das vazões. Seria o caso da construção de um reservatório de regularização, por exemplo, ou da transposição de vazões. Em ambos os casos, o objetivo é aumentar as vazões e, com isso, a diluição dos poluentes. Verificou-se, porém, que estas duas alternativas não poderiam ser adotadas na bacia, no caso de reservatórios, pela ausência de locais adequados para sua construção. No caso de transposição de vazões, dois aspectos devem ser considerados: já existe uma transposição da bacia, situada ao norte do rio Caí, que provavelmente não poderá ser incrementada além dos valores atuais sem causar problemas nessa bacia. A bacia situada ao sul, a do rio Gravataí, apresenta carências conhecidas de água que afetam as atividades nela localizadas, impedindo em definitivo a transposição de suas águas para a bacia do Sinos.

Com o objetivo de identificar soluções técnicas adequadas para manutenção da qualidade ambiental na bacia do rio dos Sinos, foram estudadas diversas medidas que possibilitam a redução, a relocação ou o tratamento de emissões das diversas fontes de

contaminação dos recursos hídricos. Foram considerados os efluentes das seguintes fontes de contaminação: efluentes industriais, drenagem pluvial urbana, população urbana, fontes difusas rurais, população rural, resíduos sólidos domésticos, dessedentação animal ( que se refere a criação de animais em Rio Grande do Sul, 1995) e irrigação.

Esse estudo, realizado de forma geral e abrangente, serviu como ponto de partida para o detalhamento de medidas especificadas e localizadas espacialmente conforme as possíveis fontes de poluição identificadas na bacia.

Na avaliação de alternativas de redução de lançamentos de contaminantes nos corpos d'água, medidas preventivas e corretivas foram propostas. Como medidas preventivas podem ser citadas, entre outras:

- a relocação de lixões de zonas críticas ambientais;
- as campanhas educacionais de uso e proteção das águas (educação ambiental);
- a redução da infiltração nas redes separadoras;
- o reuso de efluentes tratados para atividades industriais menos nobres;
- a reciclagem de subprodutos sólidos industriais ou domésticos, por exemplo: coleta seletiva de lixo;
- o reaproveitamento de efluentes ricos em nutrientes, por exemplo: efluentes de pocilgas ricos em Nitrogênio, usados para fertilização de milho;
- o reaproveitamento de lodos industriais na alimentação animal;
- o reaproveitamento de lodos de estações de tratamento de esgotos na compostagem de resíduos sólidos ou como condicionantes de solo;
- a utilização de efluentes domésticos para irrigação de parques e jardins;
- a restrição à localização de atividades efetivas ou potencialmente poluidoras;
- o manejo do solo agrícola (Programa de Microbacias);
- o uso e a proteção de banhados naturais.

Para atender às alternativas estruturais de reduzir a carga de poluentes, com o objetivo de alcançar os cenários estipulados e determinar os investimentos necessários, foram avaliados os custos das seguintes obras consideradas nos estudos:

- Estações de Tratamento de Esgoto;
- Redes Coletoras de Esgoto;
- Estações de Bombeamento de Esgoto;
- Obras para Tratamento de Lixívias de Resíduos Sólidos (Lixo);
- Obras de Barramento.

Elaboraram-se funções de custo, adotadas para efeitos de avaliação dos investimentos necessários nas intervenções na bacia. As equações matemáticas que definiram as referidas funções foram calibradas a partir dos dados de custos reais, considerados aqueles mais representativos a partir de comparativo de custos entre as fontes de consulta. Na tabela 2.1, são encontrados os custos para tratamento das fontes de poluição. O custo total anual inclui os custos de investimento amortizado para 20 anos, a uma taxa de 12% e custos de manutenção e operação.

Tabela 2.1 Custos anuais em US\$ por fontes de poluição

Fontes de poluição	Custo de Investimento		Custo de O&M anual		Custo anual total	
	Total	%	Total	%	Total	%
D. P. Urb.	110.411.871	42,65	4.287.097	8,77	19.068.904	22,82
Efl. Ind.	89.783.290	34,68	43.390.285	88,77	55.410.362	66,32
Pop. Urb.	40.073.435	15,48	1.187.782	2,43	6.552.765	7,84
F. D. Rur.	14.722.596	5,69	0	0,00	1.971.043	2,36
Pop. Rur.	2.372.817	0,92	0	0,00	317.670	0,38
Res. Sl. Dom.	944.203	0,36	13.338	0,03	139.747	0,17
Desd. Anim.	599.359	0,23	3.451	0,01	83.693	0,10
Total	258.907.571	100,00	48.881.954	100,00	83.544.183	100,00

Onde: D. P. Urb é drenagem pluvial urbana; Efl. Ind. é efluentes industriais; Pop. Urb. é população urbana; F. D. Rur. é fontes difusas rurais; Pop. Rur. é população rural; Res. Sl. Dom. é resíduos sólidos domésticos e Desd. Anim. é dessedentação animal.

Com o objetivo de identificar as soluções mais adequadas à recuperação da qualidade ambiental da bacia do rio dos Sinos, em face dos usos identificados dos recursos hídricos e da estimativa de cargas poluentes geradas na situação atual, e para o horizonte de planejamento - ano 2007 (ver tabela 2.2) , foram propostas uma série de medidas a serem implantadas em cada sub-bacia em que a área de estudo foi subdividida. Na figura 2.3, é apresentada a divisão de bacias adotadas para a estimativa da carga poluidora. Na tabela 2.3, são apresentados os tratamentos recomendados de acordo com o tipo de fonte de poluição. A eficiência dos tratamentos propostos é suposta e simplificada e idêntica para cada fonte e igual a:

- parâmetro DBO, eficiência de 75% a 90%;
- parâmetro Coliformes, eficiência de 90% a 95%.

Tabela 2.2- Resumo das cargas poluidoras totais anuais

Fontes de Poluição	Coli-Fecais NPM/ano	%	DBO t/ano	%	Nitrogênio Total t/ano	%	Fósforo Total t/ano	%	Sólidos Totais t/ano	%
Efluentes Industriais	2.46E+17	11,18	785,32	6,04	525,68	6,33	139,09	5,05	235.214	34,88
Dren. Pluvial Urbana	5.21E+12	0,00	588,04	4,52	380,35	4,58	53,95	1,96	14.444	2,14
População Urbana	1.80E+18	81,79	2912,98	22,41	1961,31	23,63	632,77	22,95		
Fontes Difusas Rurais	1.50E+15	0,07	266,61	2,05	800,40	9,64	335,74	12,18	424.717	62,98
População Rural	4.71E+16	2,14	67,37	0,52	42,42	0,51	14,70	0,53		
Resid. Sólid. Domésticos	1.78E+14	0,01	3431,97	26,41	1387,36	16,71	595,26	21,59		
Dessedentação Animal	1.06E+17	4,81	4943,53	38,04	3134,07	37,76	963,32	34,94		
Irrigação					68,64	0,83	2,95	0,80		
Total	2.20E+18	100,00	12995,83	100,00	8300,23	100,00	2756,78	100,00	674.376	100,00

Nota: As cargas estão referidas à situação futura (2007)





Figura 2.3 – Subdivisão de bacias adotadas em Rio Grande do Sul (1996)

Tabela 2.3 – Tratamentos recomendados de acordo com o tipo de fonte de poluição em Rio Grande do Sul, 1996

Fonte de Poluição	Tratamento Recomendado
Resíduo sólido doméstico	Biorremediação “in loco”
População urbana	Lagoas de estabilização em série
Drenagem pluvial urbana	Disposição no solo
Dessedentação de animais	Lagoas anaeróbias e Banhados Naturais
População rural	Fossa/Sumidouro
Efluentes industriais tratados	Físico-químico
Fontes difusas rurais	Sistemas de retenção de sedimentos

A solução proposta, com os custos estimados, apresentados anteriormente, foi considerada inviável. Isto porque a solução melhora a qualidade mas é inefetiva, porque não consegue atender aos limites de qualidade de água propostos pelos cenários estudados, e porque os custos foram considerados altos, como a seguir será analisado.

O Produto Interno Bruto dos municípios da bacia dos Sinos, em 1992, foi de US\$7.949.204.000,00. Os investimentos previstos seriam de US\$ 258.907.571,00, igual a 3,25% do PIB. Se amortizados em 20 anos, incluindo juros de 12% ao ano mais custos de operação e manutenção, daria o total de US\$ 83.544.183,00 por ano, o que equivaleria a 1% do PIB (do ano de 1992) por ano. Considerando que a população dos municípios localizados na bacia era de 1.600.000 habitantes, resultaria em um valor de US\$ 52 per capita, se o valor for rateado linearmente.

Cabe aqui a comparação com o sistema francês, que arrecada 0,3% do PIB ao ano com a cobrança pelo uso (e poluição) da água. Como o PIB per capita francês é cerca de 3 vezes maior que o PIB per capita da bacia, supostamente, a capacidade de arrecadação da bacia seria de cerca de 1/3 da arrecadação realizada na França, ou seja, 0,1% do PIB per capita, o que daria um limite de arrecadação de US\$ 8 a 9 milhões ao ano. Este valor passou a ser o referencial de investimentos possíveis para a bacia.

Um sistema de tratamento pode ser, também, implementado por partes, seja pela instalação gradual de estações de tratamento, seja pelo aumento gradual das dimensões das estações de tratamento já existentes. O trabalho de despoluição pode ser implementado por trechos, atuando primeiro naqueles de maior efetividade quanto ao controle da poluição ou, ainda, nas fontes de poluição que mais influem em um determinado parâmetro (por exemplo, coliformes, DBO ou oxigênio dissolvido).

Um projeto de despoluição envolve não só a qualidade da água em determinado trecho fluvial, mas em toda bacia, e seus conseqüentes impactos ambientais e sociais. Por isto, surge

a necessidade de adoção de técnicas multiobjetivo para se estabelecer uma estratégia de implementação das estações de tratamento.

Passou-se, a seguir, a discutir os critérios para o estabelecimento de prioridades quanto às alternativas para a implementação de estações de tratamento para as fontes poluidoras da bacia do rio dos Sinos.

### **2.3 CRITÉRIOS PARA O ESTABELECIMENTO DE PRIORIDADES**

Buscou-se, daqui por diante, estabelecer quais são as prioridades a serem consideradas, a partir das quais serão definidos os objetivos a serem considerados. Porém, a definição destas prioridades deve obedecer a determinados critérios, que são as características e restrições do problema.

Neste momento, discutiram-se as variáveis que implicam em objetivos a serem atingidos. Essas variáveis influenciam na definição da solução a ser implantada para a bacia do rio dos Sinos. A prioridade atribuída a uma determinada variável trará como consequência um determinado tipo de impacto, positivo ou negativo, que será sentido na bacia.

A definição dos valores a serem investidos na bacia poderia ser orientada pelo retorno em termos de benefícios. O valor dos benefícios varia de acordo com o estabelecimento de prioridades que podem ser relativas a parâmetros de qualidade da água, à localização, às características de uso à jusante do ponto de lançamento, da capacidade de auto-depuração e da diluição do corpo d'água, eficiência dos tratamentos.

## PARÂMETROS INDICADORES DA QUALIDADE DA ÁGUA

As diferentes fontes de poluição têm, é claro, características distintas, conforme visto anteriormente. Elas variam tanto quanto os elementos de sua composição e quanto à forma que se encontram na bacia (concentradas ou distribuídas). A forma com que se encontram na bacia será analisada mais adiante. As suas composições são definidas por alguns parâmetros que vão nortear a sua caracterização. A escolha destes parâmetros está relacionada ao uso a que se destina a água à jusante do ponto de lançamento do efluente. A identificação dos parâmetros de relevância não implica, obrigatoriamente, em definir o maior número possível, mas, sim, selecionar aqueles que vão ser suficientes para caracterizar a qualidade desejada da água, de acordo com a finalidade a que se destina. A resolução nº 20/86 do Conselho Nacional de Meio Ambiente – CONAMA, fixa limites para vários parâmetros, de acordo com o uso a que se destina o corpo d'água.

Para a bacia do rio dos Sinos, existem vários trabalhos, nos quais são considerados diferentes parâmetros de acordo com diferentes critérios:

- a) Para uma caracterização mais ampla da qualidade da água, Rio Grande do Sul (1996) utilizou nove parâmetros: oxigênio dissolvido (OD), coliformes fecais, potencial de hidrogênio (PH), demanda bioquímica de oxigênio (DBO), nitrogênio total (Nt), fósforo total (Pt), turbidez, sólidos totais e algas. O estudo, porém, não explicita os critérios adotados para a escolha dos mesmos, sendo que para análise da efetividade da solução técnica preconizada para a bacia foram analisados quatro parâmetros quais sejam: coliformes fecais, fósforo total, demanda bioquímica de oxigênio (cinco dias) e nitrogênio total. De acordo com o procedimento adotado pelo estudo, baseado na resolução nº 20/86 do CONAMA, os dois parâmetros mais críticos para a bacia seriam os coliformes fecais e o fósforo. No entanto, a metodologia aplicada à bacia, para a fixação dos cenários, é

- criticada em Pereira e Lanna (1998). Em Haase et alli (1997) encontra-se críticas aos limites estabelecidos pela citada resolução para o parâmetro fósforo;
- b) Já em Leite et alli (1998) os seguintes critérios são utilizados para a seleção dos parâmetros a serem considerados em um processo de classificação de águas: importância ecológica e de saúde pública; criticidade em relação aos padrões ambientais do CONAMA; tipo de fonte poluidora característica da bacia hidrográfica. Baseados nos critérios citados, foram selecionados três parâmetros a serem utilizados para a bacia do rio dos Sinos: oxigênio dissolvido, parâmetro fundamental para a vida aquática e responsável direto pela capacidade de autodepuração de um corpo hídrico; DBO, indicativo da presença de matéria orgânica, seja de origem natural, cloacal ou industrial; coliformes fecais, indicador da presença de esgotos cloacais, importante parâmetro de saúde pública, definindo a balneabilidade de corpos hídricos;
- c) Em Garcia (1997), foram utilizados os parâmetros: oxigênio dissolvido, DBO, nitrogênio total e fósforo total e,
- d) Em Moretti (1980b) foram utilizados apenas o oxigênio dissolvido e a DBO.

Esses dois últimos trabalhos também não explicitam o motivo da escolha dos parâmetros adotados.

Outra relação que se faz necessária é o estabelecimento dos parâmetros prioritários a serem tratados. A definição da prioridade a ser dada a um determinado parâmetro implicará no tratamento da fonte de poluição que mais contribui para a concentração daquele parâmetro. Da mesma forma, a definição de prioridade a ser dada a uma determinada fonte de poluição implicará na redução da concentração dos parâmetros para os quais aquela fonte contribui. Estabelecendo, por exemplo, a prioridade aos parâmetros mais críticos apontados em Rio Grande do Sul (1996), que são os coliformes fecais e o fósforo. Acrescentando a DBO a estes parâmetros, por ser um parâmetro que foi considerado em todos os trabalhos citados.

Considerando que o estudo de Rio Grande do Sul (1996) estabelece a relação entre os parâmetros e as fontes poluidoras (ver tabela 2.4) tem-se, então, que as fontes poluidoras que teriam prioridade de tratamento seriam:

- devido aos coliformes fecais: a população urbana;
- devido ao fósforo: dessedentação animal, população urbana e resíduos sólidos domésticos;
- devido à DBO: dessedentação animal, resíduos sólidos domésticos, população urbana.

Tabela 2.4 Relação entre as fontes poluidoras e parâmetros de qualidade da água para a bacia do rio dos Sinos. Fonte: Rio Grande do Sul (1996)

Fontes de Poluição	Coli-fecais %	DBO %	Nitrogênio Total %	Fósforo Total %	Sólidos Totais %
Efluentes Industriais	11,18	6,04	6,33	5,05	34,88
Dren. Pluvial Urbana	0,00	4,52	4,58	1,96	2,14
População Urbana	81,79	22,41	23,63	22,95	
Fontes Difusas Rurais	0,07	2,05	9,64	12,18	62,98
População Rural	2,14	0,52	0,51	0,53	
Resid. Sólid. Domésticos	0,01	26,41	16,71	21,59	
Dessedentação Animal	4,81	38,04	37,76	34,94	
Irrigação			0,83	0,80	
Total	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00

Devido aos problemas apontados com relação aos limites estabelecidos para o fósforo e de acordo com os parâmetros utilizados nos diversos trabalhos realizados na bacia, vemos que para a caracterização da qualidade da água no rio dos Sinos, os parâmetros oxigênio dissolvido, DBO, e coliformes fecais, seriam suficientes em um trabalho que não tenha a pretensão de detalhar a qualidade da água na bacia do rio dos Sinos.

## LOCALIZAÇÃO

Quanto à localização, as principais fontes de poluição variam espacialmente dentro da bacia. Conforme visto anteriormente, cada uma delas tem uma característica diferente de ocorrência. Algumas se encontram concentradas em determinados pontos e outras encontram-se distribuídas pela bacia. As fontes mais concentradas permitem uma melhor otimização das estações de tratamento pela economia em escala, que será discutida mais adiante. As fontes difusas (distribuídas) são de mais difícil coleta para tratamento em estações de tratamento maiores. Porém, por necessitarem de estações menores disseminadas pela bacia, mais facilmente podem ser tratadas por particulares. Tem-se ainda que, por lógica, as fontes não-pontuais, ou distribuídas, alteram gradualmente a qualidade da água dos cursos d'água e as pontuais, ou concentradas, as alteram bruscamente na seção onde ocorre o despejo. É importante ter-se estas noções, uma vez que se pretende definir prioridades. A definição pela prioridade de tratamento dada a uma determinada fonte de poluição, implicará na forma como se dará esse tratamento, devido às suas características de distribuição dentro da bacia, e implicará na localização onde será implantado.

Outro ponto a ser considerado é apresentado por Von Sperling (1996). Ele comenta a importância da “etapalização” na implementação de estações de tratamento de esgoto através da expansão física e da evolução gradual da qualidade do efluente tratado. A expansão física pode ser tanto mediante a construção, por etapas, de uma estação de tratamento, quanto pela construção, em seqüência, de várias estações de tratamento. Isso será variável de acordo com a forma de ocorrência da fonte poluidora na bacia. A evolução gradual da qualidade do efluente tratado diz respeito ao aprimoramento do tratamento. Por exemplo, implementa-se gradualmente tratamento primário, secundário, terciário e quaternário, ou seja, é melhorada a eficiência do tratamento. A etapalização seria bastante útil na bacia do rio dos Sinos, devido às características de distribuição das fontes poluidoras na bacia.

Um trabalho que apresenta a variação espacial da ocorrência das fontes de poluição é apresentado em Rio Grande do Sul (1996). A bacia do rio dos Sinos foi dividida em 59 sub-bacias e, para cada uma, foram definidas as principais fontes poluidoras. O trabalho nos dá uma boa definição das localizações das fontes poluidoras.

Deve-se lembrar que o tratamento de uma fonte de poluição em um determinado local trará como consequência uma menor poluição para todo o trecho de jusante do ponto de lançamento. Um trabalho técnico pode indicar quais seriam as melhores opções para a localização. Porém, deve-se lembrar que obras trazem retornos de bem estar social e que uma região politicamente mais forte pode fazer com que a alternativa de solução seja implementada em sua região. Este é um outro fator que deve ser considerado.

## **USOS**

A definição da localização também passa pelas características de uso a jusante do ponto de lançamento. O tipo de uso ao longo do rio pode influenciar na definição da localização de alternativas de tratamento tais como parques de recreação, tomadas d'água, áreas de lazer, etc. A seguir, são apresentados alguns usos que influenciarão na definição por fontes poluidoras prioritárias:

- a) Existem cinco pontos de retirada d'água do rio. Desses, há dois pontos onde o rio recebe transposição, junto às cabeceiras. Esses pontos influenciam por alterarem a quantidade de água disponível para a diluição dos efluentes. Por ser a retirada d'água feita com fins de abastecimento doméstico, trata-se de um uso mais exigente quanto à qualidade da água;
- b) As indústrias se localizam mais à jusante na bacia, coincidindo, aproximadamente, com a maior concentração de área urbana. A localização das indústrias e da área



urbana influencia diretamente a emissão de efluentes industriais e efluentes da população urbana, sendo, portanto, fontes pontuais que possibilitam tratamento concentrado; são usos menos exigentes quanto a qualidade da água;

- c) Um trabalho sobre os banhados do rio dos Sinos é apresentado por Aveline et alli (1995), citando o banhado da Avenida, em São Leopoldo e Novo Hamburgo. Colocam também que, de Campo Bom até Canoas, há muitas outras áreas de banhados, e todas elas são valiosas para a qualidade das águas do rio dos Sinos por serem depuradores naturais das águas;
- d) Quanto aos balneários, Aveline et alli (1995) comentam a existência de praias localizadas, saindo de São Leopoldo na direção montante, que eram muito freqüentadas no verão: a Praia da Infância, que se localizava próxima à Ponte de Ferro, pouco à jusante desta; depois, a chamada Quarta-Volta (a mais famosa e freqüentada), que se situava entre a atual desembocadura do Arroio Kruse e as bombas da hidráulica de São Leopoldo; e, mais a montante, mas ainda próxima à cidade de São Leopoldo, a praia do Fincão (ou Furadinho). Aqueles que contavam com embarcação, tinham acesso à Praia do Olho-do-Boi, também muito freqüentada. Os balneários são usos mais exigentes quanto à qualidade da água, por serem usos de contato primário;
- e) Para a pesca esportiva, existiam pontos muito piscosos próximo a São Leopoldo (de jusante a montante): nas proximidades da Ponte de Ferro; na Volta-do-Carvão (junto às bombas); na desembocadura primitiva do Arroio Kruse; pouco acima, no Fincão (ou Furadinho); e, em pontos mais distantes, no Olho-do-Boi e no Lagoão (sangradouro do Banhado dos Wasum). Estes dois últimos situam-se na margem direita do rio (Aveline et alli, 1995). A pesca é um uso mais exigente quanto a qualidade da água pela necessidade de preservação do ecossistema.

f) Na margem direita, existe um dique para controle de cheias e, na margem esquerda, uma avenida marginal chamada Av. Imperatriz Leopoldina, próxima a São Leopoldo. Estas duas obras, o dique e a avenida, são importantes por protegerem a várzea de inundação do rio dos Sinos e por proporcionarem uma maior vazão pelo leito principal do rio no período de cheias. A proteção, ou redução, da várzea de inundação, e o aumento do escoamento no período de cheias faz com que o rio retorne aos níveis normais mais rapidamente, e reduz a percolação, fazendo com que os seus níveis no período de recessão sejam menores. Dessa forma, a quantidade de água disponível para a diluição dos efluentes será menor.

Os tipos de usos são a principal informação utilizada pela resolução nº 20/86 do CONAMA para o enquadramento de cursos d'água. Baseado neles, são definidas as qualidades que se espera que os cursos d'água tenham para atender às necessidades de cada uso. A identificação dos usos e as suas localizações são importantes para a definição de prioridades e para que se possa buscar atender as exigências de cada um, em termos de qualidade da água. Assim, pode-se buscar tratar as fontes que mais contribuam com a poluição, buscando atender aos usos de jusante do seu ponto de lançamento para atendimento das exigências de qualidade da água. Um exemplo que pode ser citado é o caso do trecho do rio, de Campo Bom até a foz, onde se concentra a maior parte dos efluentes industriais e da população urbana, e onde existem alguns balneários e captação d'água. Para melhorar a qualidade da água neste trecho, pode-se priorizar o tratamento das fontes que contribuem diretamente para o trecho ou das fontes que contribuem mais à montante do trecho.

## CAPACIDADE DE AUTODEPURAÇÃO

A capacidade de autodepuração e de diluição do corpo d'água são diretamente proporcionais à vazão do rio, ou seja, quanto maior for a vazão, maior será a capacidade de autodepuração e de diluição do corpo d'água.

A relação entre a vazão do efluente e a do rio define qual a porcentagem de tratamento necessária para que o efluente, lançado no corpo d'água, se adeque a exigências de qualidade no trecho de jusante do ponto de lançamento do efluente. Portanto, é necessário o estabelecimento da relação entre o rio, sua vazão e sua capacidade de autodepuração.

Outro fator importante é a hidrodinâmica do rio, que é importante por influenciar na sua capacidade de escoamento. Em Moretti (1979), Moretti (1980a), Moretti (1980b), Rio Grande do Sul (1996), Prates e De Luca (1997), encontra-se a simulação da qualidade da água do rio dos Sinos para o regime permanente. Esses trabalhos nos dão uma boa relação entre o escoamento do rio, sua vazão e hidrodinâmica em relação aos efluentes das fontes poluidoras lançadas. Eles, porém, simplificam a forma do escoamento no trecho sujeito ao remanso do rio Jacuí, podendo, dessa forma, subestimar a capacidade de autodepuração e/ou diluição do rio.

Para uma melhor representação do escoamento do rio, encontra-se em Rosauero (1979) uma simulação do rio dos Sinos em regime não-permanente. O trabalho consegue melhor representar o regime de escoamento do rio, porém, não simula a qualidade da água. Já em Garcia (1997), encontra-se uma simulação do trecho do rio dos Sinos sujeita ao remanso do rio Jacuí, em regime não-permanente para a qualidade da água. A dificuldade encontrada é a carência de dados para o ajuste do modelo. O trabalho de Garcia (1997) consegue um melhor ajuste da dinâmica do escoamento e depuração do rio naquele trecho.

A prioridade pelo tratamento das fontes poluidoras pode também ser estabelecida para os pontos onde a capacidade de autodepuração do rio é superada. A capacidade do curso

d'água pode ser definida pela quantidade mínima requerida de oxigênio dissolvido no rio para a manutenção de seu ecossistema. No rio dos Sinos, a qualidade da água vai piorando à medida que se aproxima da foz, sendo que a piora é mais acentuada quando o rio passa nas áreas mais densamente urbanizadas.

## **CUSTOS**

Os custos envolvidos são um fator decisivo para a definição de prioridades. Busca-se, desse modo, minimizar os custos envolvidos e maximizar o benefício gerado. Ou seja, o benefício gerado deverá justificar o incremento necessário no custo a ser investido.

Os custos unitários são inversamente proporcionais à vazão a ser tratada. Jordão e Pessoa (1975), colocam que é sempre mais interessante o mínimo de tratamento, em termos de nível de tratamento, e que a economia de escala ocorre proporcionalmente ao tamanho da estação de tratamento a ser implementada. Em Porto Alegre (1992), é estabelecido que as unidades de tratamento deverão concentrar o maior volume possível de afluentes, considerando as peculiaridades de cada sub-bacia. As pequenas unidades serão substituídas sempre que houver disponibilidade por uma unidade central, otimizando a aplicação de recursos na área operacional. Afirma-se também que, quando for impraticável a ligação da sub-bacia ao sistema central, serão utilizados sistemas de tratamento de operação simplificada, como fossa séptica, filtro anaeróbico, biodigestor anaeróbico ou lagoas de estabilização. Sendo assim, para a bacia do rio dos Sinos, as prioridades seriam para o tratamento de fontes poluidoras mais concentradas, tais como o efluente da população urbana.

É importante lembrar que a eficiência também influenciará na escolha pela implementação de opções de tratamento, sendo dada preferência por opções mais eficientes. Para a bacia do rio dos Sinos, em Rio Grande do Sul (1996), vê-se que, se forem

implementadas todas as estações de tratamento propostas, o custo anual será de US\$ 83,5 milhões. Porém, retirado-se o tratamento da drenagem urbana e efluentes industriais, que são tratamentos mais caros, o custo anual será de US\$ 9 milhões.

A concentração do efluente é importante na medida em que, quanto mais concentrado, menor será a estação requerida e melhor será a eficiência do tratamento. Isto se faz necessário na medida em que, por exemplo, o esgoto doméstico é mais concentrado do que o esgoto pluvial.

Outra forma de redução de custos é a proposição do tratamento conjunto de duas ou mais fontes de poluição. Para a bacia do rio dos Sinos, De Luca et alli (1987) e Milano (1988) trabalham sobre a possibilidade do tratamento conjunto de efluentes industriais e domésticos. De Luca et alli (1987) citam que uma restrição econômica à possibilidade de tratamento conjunto é o acréscimo no custo da rede de esgotos devido ao aumento da distância percorrida e maior vazão transportada, inclusive infiltração. Os custos da rede de distribuição são difíceis de avaliar, já que são afetados pela forma e estrutura das áreas servidas. Economias de escala podem ser superadas por deseconomias de dispersão, aglomeração ou arranjo espacial, características de cada região. Entretanto, para fins estimativos, a equação geral  $C = aQ^b$  ( $b < 1,0$ ) (custo como função da vazão) é utilizada. Assim, a análise do tamanho e localização da estação deve ser realizada de modo que as economias obtidas com a implantação da estação central não sejam superadas pelo acréscimo no custo de transmissão. O tratamento conjunto poderá tomar a forma de regionalização. Nesse caso, dada uma bacia hidrográfica, ou parte dela, com várias fontes poluidoras pontuais, pode-se determinar o número, tamanho, local e eficiência das estações de tratamento, de maneira a minimizar determinados objetivos, que podem ser custos, impacto na qualidade da água ou uso do solo pela disposição do lodo.

### 3 ANÁLISE MULTIOBJETIVO

A análise multiobjetivo, como o próprio nome indica, estabelece relações para que, em projetos ou programas, sejam analisados os diversos condicionantes envolvidos, em suas respectivas escalas de medição. O tema é bastante extenso e pode ser abordado de várias formas, como comprovam a vasta bibliografia e as publicações a respeito.

Em projetos, principalmente naqueles que envolvem os recursos hídricos, existem vários condicionantes: aspectos de compatibilização entre os diversos usos, aspectos de implementação dos projetos e, ainda, aspectos relacionados ao âmbito administrativo de abrangência dos mesmos, à área de implantação, órgãos financiadores, outros projetos conflitantes, etc. Haines et alli (1975) citam três principais características desses projetos: Primeiro, há um grande número de tomadores de decisão e/ou instituições quase-independentes, cada qual podendo tomar decisões ou influenciar decisões de acordo com sua necessidade, ou seja, a sua própria versão do objetivo desejado. Segundo, mesmo para um tomador de decisão, há um grande número de objetivos não comensuráveis a serem otimizados. Terceiro, há um grande elemento de incerteza e risco em praticamente todas as decisões de recursos hídricos. Este elemento é devido ao alto grau de irreversibilidade destas decisões adicionadas com incertezas hidrológicas e à inabilidade de prever o futuro com razoável certeza. Cohon (1978) cita um outro fator importante a ser considerado que é o que envolve a decisão pública que é complexa e aparentemente mal entendida e envolve, ainda, o condicionante social .

Em geral, o principal condicionante considerado em um projeto é o fator econômico. No entanto, ao longo do tempo, outros fatores foram sendo incorporados à análise dos projetos e, em cada projeto, existem condicionantes específicos a serem considerados. Estes fatores são determinados pelos conflitos existentes na área de implantação e sofrem ainda as influências socio-culturais. O fator mais evidente, e que tem ganho maior destaque ao longo

do tempo, é o fator do impacto ambiental. Como exemplo, Bordas e Lanna (1984) analisam este processo de mudança do ponto de vista de análise, nos usos dos recursos hídricos: Até há pouco tempo, o uso da água, tanto no Brasil como em outros países, era encarado dentro de perspectivas setoriais e em função de um objetivo final único. Embora o enfoque esteja mudando rapidamente e venha sendo substituído pela idéia de uso múltiplo integrado, atendendo a várias finalidades simultaneamente, essa abordagem parcial dos problemas da água deixou marcas profundas nos modos de pensar e, principalmente, na organização das estruturas administrativas e técnicas que respondem pelo uso do recurso água no Brasil. Vasconcellos (1993) apresenta o caso do desvio Tietê-Pinheiros Billings na bacia do alto Tietê, na Região Metropolitana de São Paulo, que ilustra bem a situação na qual a alteração ocorre, principalmente em função da urbanização da área. O sistema, originalmente construído com o objetivo principal de produção de energia elétrica, em função do acelerado desenvolvimento socioeconômico da área, teve sua situação alterada para os usos múltiplos (o que implica em múltiplos objetivos a serem considerados), entre eles: a geração de energia elétrica, abastecimento público de água, controle de cheias, diluição de efluentes, etc. Cohon (1978) destaca que a consideração de muitos objetivos no processo de planejamento acrescenta três maiores particularidades na solução dos problemas: primeiro, a programação e planejamento multiobjetivo promove regras mais apropriadas para os participantes no processo de planejamento e tomada de decisão; segundo, um maior número de alternativas, em geral, é identificado quando a análise multiobjetivo é empregada; terceiro, a percepção dos analistas sobre problema será mais realista se muitos objetivos são considerados.

É conveniente, neste momento, apresentar a distinção que Cohon (1978) faz entre planejamento e programação multiobjetivo. Planejamento é definido como a soma total de atividades de análises e tomadas de decisão pela percepção do problema para a implementação do projeto. Modelos de programação multiobjetivo são uma parte do processo de planejamento; eles se referem à geração e fases de evolução. Programação multiobjetivo é

uma forma específica de programação matemática, um procedimento matemático altamente estruturado e formal para encontrar a solução ótima para o problema de decisão. Programas matemáticos são modelos que têm a forma de otimização por restrições, isto é, alguns objetivos ou critérios da performance do sistema são maximizados ou minimizados sujeitos a restrições no sistema em questão.

A partir daqui, passou-se a discorrer sobre o planejamento multiobjetivo.

### **3.1 PLANEJAMENTO MULTIOBJETIVO**

O planejamento consiste em estabelecer etapas para se chegar ao objetivo desejado, ou seja, na análise multiobjetivo este procedimento consiste em obter a alternativa que atenda a um conjunto ideal de condicionantes envolvidos. O planejamento multiobjetivo proporciona uma forma de atender a muitos condicionantes conflitantes entre si, por isto, requer do analista o conhecimento de muitas interfaces de várias áreas.

Para a elaboração do planejamento multiobjetivo, Cohon (1978) destaca os seguintes passos, que devem ser seguidos:

- a) identificação e quantificação de objetivos;
- b) definição de variáveis de decisão e restrições;
- c) coleta de dados;
- d) geração e avaliação de alternativas;
- e) seleção da alternativa preferida;
- f) implementação da alternativa selecionada;

A seguir, foram detalhados cada um dos passos do planejamento multiobjetivo: a identificação de objetivos e sua modelagem; a tomada de decisão múltipla; a programação multiobjetivo e algumas de suas técnicas e, por fim, como escolher a função objetivo e o



algoritmo de solução. Posteriormente, foram apresentados alguns exemplos de aplicação da análise multiobjetivo.

### **3.2 IDENTIFICAÇÃO DE OBJETIVOS**

Existem várias formas de identificar objetivos. Os métodos, em geral, consistem em se obter o maior número de informações possíveis sobre o objeto em questão, no caso, o projeto, e verificar que metas deve atingir.

Quando se considera a definição de objetivos, tem-se que levar em conta o alerta, feito por Cohon (1978), de que a sociedade (e o governo como seu representante) é composta de vários grupos com interesses diferentes, cada um com seus próprios objetivos. Dessa forma, ele identifica três principais fontes para definição de objetivos:

- a) o conhecimento dos técnicos envolvidos a respeito do problema;
- b) os tomadores de decisão - identificá-los, no entanto, pode ser um sério risco, pois perceber quem são eles ou onde eles devem estar, freqüentemente, não é aparente, no contexto público da tomada de decisão;
- c) a terceira fonte usual para identificar objetivos é o material publicado, relativo ao problema em questão.

Na análise multiobjetivo, um dos pontos cruciais é justamente a definição dos objetivos a serem considerados em uma determinada situação decisória. Os objetivos a serem considerados no projeto podem ser conflitantes por natureza, e ao tratar de satisfazer todos eles simultaneamente a idéia de uma única solução ótima deixa de ser aplicável, afirmam Braga e Gobetti (1997).

Neste momento, foi feita uma discussão sobre a forma de quantificação de alguns objetivos, já visando uma maneira de como eles serão aplicados à bacia do rio dos Sinos.

### **3.2.1 QUANTIFICAÇÃO DE OBJETIVOS**

Em um projeto, vários são os condicionantes que estão envolvidos. Eles podem ser metas ou objetivos a serem alcançados, restrições a serem acatadas, etc. Na quantificação de objetivos podem ser estabelecidos parâmetros para expressá-los. Cohon (1978) destaca os seguintes objetivos: eficiência econômica; objetivos de equidade; objetivos de qualidade ambiental e outros, tais como, valor e qualidade estética, objetivos de energia, bem-estar social, quantificação do risco como um objetivo, etc. Nos projetos de recursos hídricos, um dos principais objetivos é a otimização do uso quantitativo e qualitativo dos recursos hídricos, que envolve aspectos econômicos, sociais e ambientais.

#### **EFICIÊNCIA ECONÔMICA**

Durante muito tempo, a minimização de custos foi tradicionalmente o único objetivo a ser atendido. Com o aumento de áreas de conflito, escasseamento dos recursos naturais, etc, outros valores passaram a ser também condicionantes em projetos. A eficiência econômica continua sendo, no entanto, importante condicionante a ser considerado. Este critério envolve principalmente o estabelecimento de relações entre os benefícios e os custos envolvidos.

Para que se tenha uma idéia do tipo de função a ser obtida, simplificando os objetivos como denominados apenas por "benefícios", teríamos a figura 3.1 para a relação benefício versus investimento.

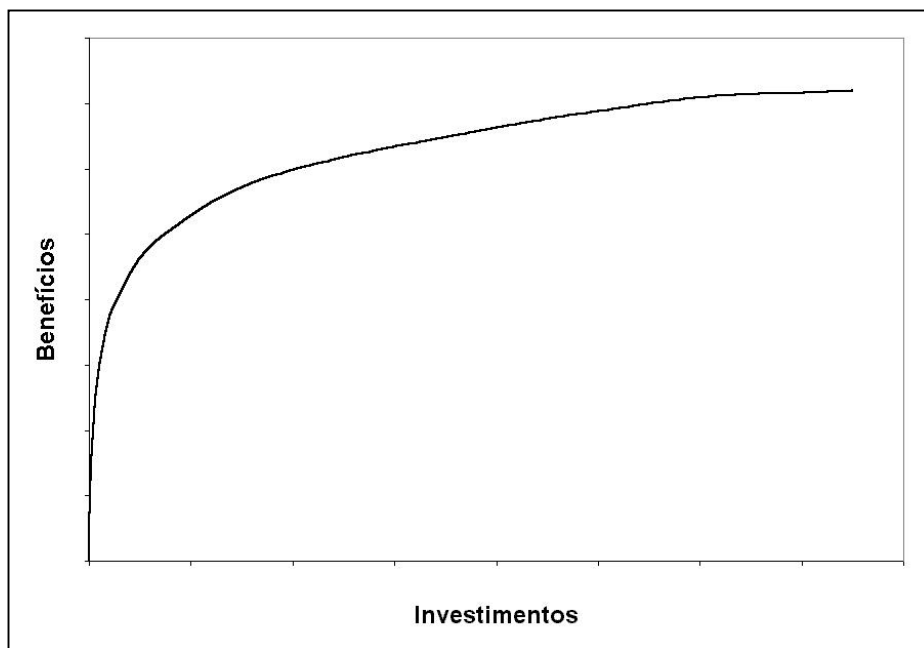


Figura 3.1 - Função benefício versus investimento

Se forem estabelecidos valores crescentes de investimento, para cada patamar ter-se-ia diferentes curvas de indiferença<sup>1</sup> para cada uma das diversas formas de investimento nas sub-bacias e para cada fonte de poluição. Simplificando esta curva para apenas duas formas de investimento, ter-se-ia algo semelhante à figura 3.2. Considerando a limitação do investimento, que seria representada por uma reta, ter-se-ia que a melhor forma de aplicação do recurso à bacia seria dada pela tangência da restrição orçamentária com a curva de indiferença que corresponder a maior satisfação possível.

---

<sup>1</sup> Uma curva de indiferença é definida como uma curva que representa um nível constante de satisfação ou, alternativamente, como um *locus* de pontos representando combinações de dois bens (ou conjuntos de bens) entre as quais o consumidor é indiferente (Miller, 1981)

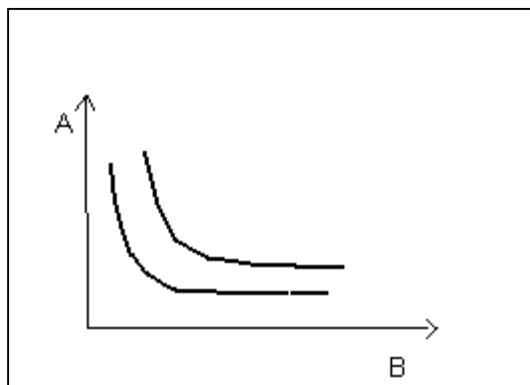


Figura 3.2 - Curvas de indiferença para valores diferentes de investimento, onde A e B são possíveis formas de investimento

Também, de acordo com a localização, pode-se obter diferentes retornos em termos de benefícios e variar, da mesma forma, a abrangência do benefício obtido. Por exemplo, o tratamento de uma fonte poluidora mais a montante na bacia, beneficia todo o trecho de jusante da fonte tratada. Assim como o tratamento de uma fonte, mais a jusante, grande poluidora, apesar de beneficiar um trecho menor do rio, poderia trazer um maior benefício. Desta forma, chega-se que a relação benefício versus investimento é uma função da localização da fonte poluidora e da sua ordem de contribuição para a poluição. Então, vem que, a visualização simplificada da função benefício versus investimento mais correta seria uma função também da localização.

Rogers et alli (1993), alertam que os recursos hídricos em Bangladesh, consomem uma grande proporção dos recursos destinados aos investimentos públicos. Como consequência, o conflito por recursos, entre a água e outros setores, está se tornando mais severo. O tradicional modo de análise e planejamento dos investimentos nos recursos hídricos tem que mudar, projeto por projeto (ou ainda, bacia por bacia), para incluir as relações de investimentos com outros setores e com todas as políticas de desenvolvimento nacional. Os autores propõem, também, uma metodologia de planejamento com o objetivo primário de

inserir investimentos nos recursos hídricos, nas políticas macroeconômicas. O modelo otimiza o valor presente dos investimentos para o desenvolvimento dos recursos hídricos, inserindo um modelo macroeconômico para examinar a interação entre estes investimentos, o crescimento da agricultura, por exemplo, e a performance de toda economia. O trabalho apresentado, proposto por Rogers et alli (1993), trata principalmente do setor agrícola, que tem grande importância nas questões relativas à importação e exportação de alimentos.

Outra avaliação a ser considerada dentro dos objetivos econômicos é adequação da avaliação para cada projeto específico. Por exemplo, Brzesowsky e Van Vilsteren (1988) estabelecem uma avaliação econômica da produção de cana de açúcar para diferentes sistemas de irrigação na Tailândia. Chakravorty e Roumasset (1994), por sua vez, alertam para a necessidade da readequação de modelos de planejamento e projetos de irrigação para situações de escassez de água, anexando aos custos de investimento no projeto, a eficiência entre o suprimento, a utilização e a coordenação entre eles.

## **OBJETIVOS DE EQÜIDADE**

Objetivos de equidade são políticas governamentais que tratam de duas linhas gerais de problemas: distribuição geográfica de objetivos e distribuição baseada em características demográficas ou sociais, tais como renda, classes sócioeconômicas, raças etc (Cohon, 1978).

A distribuição geográfica diz respeito às diferenças regionais, diferenças climáticas, históricas de desenvolvimento, características fisiográficas, etc, que conferem necessidades diferentes a cada local. As distribuições de renda, demográficas ou sociais, em linhas gerais, tratam de objetivos que buscam criar melhores condições às ditas minorias desprivilegiadas, ou de atender as necessidades provenientes das economias ou deseconomias (que surgem em consequência das aglomerações urbanas), por causa das diferenças da distribuição demográfica.

Em termos de projetos de recursos hídricos, pode-se dizer que esses objetivos estão diretamente relacionados aos problemas climáticos e a um desenvolvimento econômico desbalanceado. No Brasil, por exemplo, o principal problema na região Nordeste diz respeito à seca e para solucioná-lo, tem sido implementados vários projetos de irrigação. Como exemplo, Farias et alli (1993), citam dois desses projetos, tratam-se do Sistema Adutor Sobradinho-Terra Nova, em Pernambuco e da Transposição de Águas da Bacia do São Francisco para bacias situadas no Semi-árido Nordestino, que prevê a irrigação de terras localizadas nas regiões semi-áridas dos estados de Pernambuco, Paraíba, Rio Grande do Norte e Ceará. Outros problemas que podem ser realçados são os de saneamento ambiental, no qual são marcantes as diferenças entre as populações de alta e baixa renda, e as diferenças regionais e diferenças sócioeconômicas.

A quantificação destes objetivos de equidade é difícil, podendo ser melhor viabilizada pelo estabelecimento de prioridades com que serão atendidas.

## **OBJETIVOS DE QUALIDADE AMBIENTAL**

Gestão Ambiental, segundo Lanna (1996b), é o processo de articulação das ações dos diferentes agentes sociais que interagem em um dado espaço com vistas a garantir a adequação dos meios de exploração dos recursos ambientais-naturais, econômicos e socio-culturais- às especificidades do meio ambiente, com base em princípios e diretrizes previamente acordados/definidos.

Os objetivos de qualidade ambiental tendem a ser difíceis de quantificar por causa do grande número de parâmetros que podem definir a qualidade ambiental (Cohon, 1978).

O meio ambiente, por definição, é tudo que nos cerca, e qualquer alteração nele pode trazer conseqüências diversas. Essas conseqüências, muitas vezes, são difíceis de serem quantificadas sendo, muitas vezes, até imprevisíveis. Reforçando esta afirmativa, Haimes et

alli (1975) apontam a existência de múltiplos objetivos não comensuráveis. Se isso é real para a qualidade da água, para o meio ambiente como um todo esta multiplicidade de objetivos é ainda maior.

Um método que tem sido preconizado para tratamento das questões ambientais é o da quantificação econômica dos impactos de um projeto, que permite expressar as conseqüências desses impactos nos mesmos termos econômicos com que são considerados os objetivos de eficiência econômica. Existem muitos obstáculos para a realização desta quantificação, tais como incertezas científicas quanto ao conhecimento dos ciclos e processos ecológicos, valor atribuído e equilíbrio relativo do ecossistema. Além disso, há enormes problemas de medição empírica das variáveis relevantes de ecossistema e social, o número de espécies existentes em uma determinada área, por exemplo.

Uma forma de quantificação dos objetivos de qualidade ambiental tem sido a das técnicas de valoração ambiental, que foram desenvolvidas com o objetivo de estabelecerem valor, em termos monetários, ao meio ambiente. Entre as difíceis tarefas para o economista ou analista de projeto, está a de decidir quais os impactos ambientais e recursos são importantes e como medi-los e incluí-los, em termos monetários, em avaliações de projetos e programas. (Petry e Boeriu, 1995).

Meister (1977 apud Ely 1990), define três posições fundamentais no que concerne a privilegiar os aspectos econômicos dos problemas ambientais. Essas posições são:

- a) um grupo de economistas argumenta que os problemas do meio ambiente são problemas econômicos e que as Ciências Econômicas dispõem de teorias, instrumentação e propostas de políticas para resolvê-los;
- b) em oposição à visão deste grupo, há os que reconhecem um desafio na aplicação da teoria econômica para a questão ambiental. Estes argumentam que, sob o ponto de

vista das idéias não familiares de estados estáveis<sup>2</sup>, critérios ecológicos venham a ser substituídos por critérios econômicos;

- c) entre esses dois grupos, aparece um terceiro, que aceita as limitações quanto à capacidade das Ciências Econômicas de prescrever políticas para os problemas ambientais. Mas acredita que, para uma grande parte dos problemas do meio ambiente, os critérios de formulação de políticas ambientais devem basear-se nas Ciências Econômicas.

Existem algumas escolas de pensamento, quanto às questões ambientais, que são citadas por Ely (1990):

- a) escola pessimista, para a qual o problema da degradação ambiental é insolúvel;
- b) escola minimalista, para a qual a degradação ambiental é um problema menor quando comparado com problemas contemporâneos da sociedade;
- c) escola coletivista (socialista), que explica a deterioração da qualidade ambiental como consequência inevitável da exploração capitalista;
- d) escola de crescimento zero, que considera que a degradação ambiental é causada pelo aumento do consumo de bens, por isto, é preciso conter o crescimento da população e, como consequência, o da produção. Um argumento adicional desse grupo é o de que a terra é finita e que a natureza fixou as dimensões do meio ambiente natural e, portanto, o homem deveria fixar seus números e sua atividade econômica. É preciso estabelecer uma relação estável e equilibrada entre a sociedade humana e seu mundo natural;

---

<sup>2</sup> O ecossistema tende à estabilidade no longo prazo. As relações entre os elementos de um ecossistema garantem um ajustamento no tempo que tende a dar uma característica de estabilidade ao mesmo. O homem, entretanto, seja através de sua ação econômica, seja pela sua ação social, é o único agente que pode interferir no equilíbrio e na estabilidade de um ecossistema (Ely, 1990).



- e) escola da austeridade, para a qual o declínio da qualidade ambiental é produzido pelo excessivo e abusivo uso dos recursos. Acreditam que a austeridade é o melhor remédio, propondo menor consumo para conservar os recursos, diminuindo a produção e a poluição;
- f) escola de prioridades públicas, que vê o problema ambiental na ação do Governo, nos excessivos e maciços gastos com defesa nacional e exploração espacial, dando pouca atenção à proteção ambiental. A solução da questão ambiental está na realocação dos gastos públicos.

Considerando que a solução para o problema do rio dos Sinos passa pela implantação de estações de tratamento de esgoto- ETE e disposição final de resíduos sólidos urbanos, a FEPAM (2004) e SEMA (2004) recomendam alguns dados que devem ser levantados para o estudo de impacto ambiental e para obtenção da licença de instalação, entre eles um estudo do uso do solo nas faixas que circundam a gleba. Com mais detalhe, a Companhia Pernambucana do Meio Ambiente-CPRH (2003) recomenda que, para a elaboração de Estudo de Impacto Ambiental – EIA e Relatório de Impacto Ambiental-RIMA sejam analisados os seguintes impactos ambientais, considerando as modificações do meio ambiente a serem produzidas pelo empreendimento:

- a) degradação paisagística, em especial, decorrente da implantação de lagoas de estabilização, elevatórias, etc.;
- b) impactos da instalação da obra e das atividades desenvolvidas no canteiro de obras, sobre as comunidades vizinhas, em especial, quanto ao incômodo provocado por ruídos e disposição de resíduos;
- c) impactos da instalação da obra sobre a infra-estrutura existente (água, luz, telefone, acesso aos serviços de saúde e educação, etc.) e suas conseqüências sobre as atividades econômicas, etc;

- d) interferência perigosa das obras no trânsito de estradas existentes, com atividades que se desenvolvem nas proximidades da mesma;
- e) riscos de acidentes por produtos químicos ou materiais tóxicos que possam resultar em dano às pessoas ou ao meio ambiente;
- f) poluição das áreas dos acampamentos e sítios de trabalho por resíduos não adequadamente dispostos;
- g) danos e/ou destruição de habitats de vida silvestre e de recursos biológicos ou de ecossistemas que deverão ser preservados;
- h) descaracterização de unidades de conservação;
- i) alterações demográficas causadas na área de influência;
- j) retirada e recolocação compulsória de pessoas residentes, assim como a indução ao reassentamento desordenado da população em áreas não apropriadas;
- k) transmissão de doenças dos trabalhadores para as populações locais e vice-versa;
- l) criação de condições para a proliferação de vetores de doenças como mosquitos em água parada e ratos em lixos;
- m) impactos sobre a estabilidade de encostas e usos potenciais das águas como decorrência de intervenções nos recursos hídricos;
- n) impactos das operações de manutenção dos sistemas sobre a qualidade da água do(s) corpo(s) receptor(es) e sobre a comunidade vizinha, especialmente, quanto à produção de odores e ruído;
- o) impactos do armazenamento, transporte e disposição final do lodo;
- p) impactos na qualidade da água do(s) corpo(s) d'água receptor(es) pelo lançamento final de efluentes;
- q) possibilidade de comprometimento do uso de estuários (natação, pesca, turismo, etc), bem como da fauna e flora, pelo lançamento não adequado de esgotos;

- r) risco de baixa eficiência do sistema e/ou comprometimento do mesmo pelo não envolvimento adequado da comunidade no processo, especialmente nos casos de utilização de modelo “condominial”;
- s) comprometimento do desempenho adequado do sistema pela falta de controle quanto às ligações indevidas, despejos provenientes de postos de lavagem e lubrificação de veículos, introdução de objetos estranhos à rede, etc;
- t) risco de colapso de alguns componentes do sistema pela falta de manutenção e, conseqüentemente, o comprometimento da qualidade da água dos corpos receptores;
- u) possibilidade de transmissão de doenças de veiculação hídrica, deterioração do aspecto estético das praias, perturbação do equilíbrio ecológico do ambiente marinho, em decorrência de lançamento não adequado de esgotos no mar; (este item não se aplicaria à bacia do rio dos Sinos)
- v) risco de corrosão em coletores e emissários pela não contenção de gases em níveis mínimos compatíveis à segurança dos mesmos;
- w) risco de acidentes para inspetores quando da manutenção da rede, PV, etc.;
- x) risco da baixa eficiência do sistema (baixo índice de atendimento) em decorrência da não alocação de recursos às instalações prediais internas (as ações para permitir acesso à rede pública, em muitos casos, foge às possibilidades dos usuários, etc.);
- y) possibilidade de contaminação do solo e da(s) água(s) do(s) corpo(s) receptor(es) pelo transbordamento decorrente de eventuais cortes de energia elétrica e/ou de falhas nos processos de tratamento e funcionamento das elevatórias de esgoto;
- z) possibilidade de destruição acidental de sítios arqueológicos ou outros bens durante as escavações em vala;
- aa) alterações nos usos do solo, nas áreas destinadas às estações de tratamento de esgotos, rede, etc.;
- bb) outros fatores julgados necessários para a identificação dos impactos.

Pode-se observar, por estes diversos itens, que apesar da implantação da ETE beneficiar uma maior região, onde ela tratará o esgoto produzido, trazendo benefício social, como será visto mais adiante em Objetivo Social, a nível local, ao lugar onde ela será executada, trará um impacto ambiental negativo, principalmente para as populações vizinhas próximas, como mostram os exemplos dos itens a) b) c) d) j) k) l) n) aa). Existem vários exemplos de problemas ocasionados pela implantação de ETEs nas populações vizinhas. Um exemplo é o Projeto Socio-Ambiental em Porto Alegre, DMAE (2004), onde o Estudo de Impacto Ambiental/Relatório de Impacto no Meio Ambiente (EIA/RIMA) e a comunidade apontaram a possibilidade da existência de odores com a construção da ETE. Em função disso, foram retiradas as lagoas anaeróbias, inicialmente projetadas, sendo substituídas por reatores anaeróbios. Esta foi a alternativa proposta pelo Departamento Municipal da Água e Esgotos-DMAE para atender às exigências do EIA/RIMA e dos moradores. Outro exemplo é encontrado em Diário do Vale (2004) para a cidade de Volta Redonda onde segundo pesquisa realizada os seguintes problemas seriam causados pela ETE: Perigo para a saúde – o tipo de tratamento de esgoto previsto no projeto da ETE causa a emissão de uma nuvem de partículas contendo os mais diversos tipos de bactérias que proliferam nas fezes humanas. Essa nuvem pode atingir os moradores do bairro; Mau cheiro – Duas outras estações de tratamento de esgoto existentes na cidade, de porte bem menor do que o da ETE do Aterrado, causaram problemas de mau cheiro para os moradores das proximidades. Existem grandes chances de que esse problema no Aterrado seja bem pior; Desvalorização de imóveis – A instalação de estações de tratamento de esgoto com o porte da que será instalada no Aterrado causou desvalorização de imóveis existentes nas proximidades. No Aterrado, um bairro com grande concentração de residências, esse problema atingiria milhares de proprietários; o outro problema citado seria o custo. Mais um exemplo pode ser encontrado em Diário do Nordeste (1999) em Fortaleza que reporta o seguinte: Desde a sua inauguração, em 1998, a Estação de

Tratamento de Esgoto (ETE/Sanear), localizada na praia Leste-Oeste, tem causando um grande incômodo tanto às pessoas que residem nas proximidades do local onde foi construída, quanto àquelas que, apesar de morarem mais afastadas, não ficam livres do mau cheiro constantemente exalado na estação.

Pode-se constatar então que, se ela for executada em áreas com maior densidade populacional, com uma estrutura urbana consolidada, a probabilidade de que ocorra este impacto ambiental negativo é maior, além do que, nestes locais a oferta de áreas é menor e é maior o preço dos terrenos ( ISPN, 1995).

Ainda considerando o problema existente na Bacia dos Sinos, quanto aos resíduos sólidos, Luna Filho (2001) destaca que a escolha da localização para aterros sanitários é talvez o obstáculo mais difícil de superar, pois a resistência dos habitantes nas proximidades do local escolhido elimina muitos sítios potenciais. Esta afirmação confirma que é maior a probabilidade de que ocorra o impacto ambiental negativo nas populações vizinhas próximas, em áreas mais densamente povoadas.

## **OBJETIVOS QUANTITATIVOS E QUALITATIVOS EM PROJETOS DE RECURSOS HÍDRICOS**

Para fins deste trabalho, cabe destacar os objetivos quantitativos e qualitativos em recursos hídricos, entre os objetivos ambientais.

Os aspectos quantitativo e qualitativo dos recursos hídricos são influenciados pelos usos consutivos e não-consutivos, sendo que ambos interferem-se, mutuamente, quanto ao uso do recurso disponível.

Para a qualidade da água, convém aqui lembrar que seus valores quantitativos também influem na qualidade, Haines et alli (1975) comentam que objetivos primários correspondem diretamente aos padrões de qualidade da água e dependem particularmente das

características físicas, químicas e biológicas dos recursos hídricos; os objetivos secundários dizem respeito ao impacto do nível de qualidade da água na utilização do recurso hídrico e ao impacto do uso da água na sua qualidade. Como instrumento que norteia o uso destes critérios, temos a Resolução nº20/86 do CONAMA, que estabelece padrões de qualidade da água desejáveis para determinados tipos de uso, por classes.

Quanto aos aspectos quantitativos, a alocação de quantidades para os diversos setores de usuários tem consistido em buscar um ótimo para as alocações, buscando otimizar as relações benefício-custo (por setores e global) de acordo com o estabelecimento de prioridades, sendo que abastecimento humano e animal é prioritário, respeitando-se, outrossim, a vazão mínima de regularização do leito de rio. A formulação desse problema pode ser apresentada como:

$$\sum Q_{uso} \leq (Q_{rio} - Q_{reg.})$$

onde

$Q_{uso}$  é o valor alocado para cada usuário

$Q_{rio}$  é a vazão do rio

$Q_{reg.}$  é a vazão ambiental

sujeito ao estabelecimento de prioridades e a maximização dos retornos da alocação.

Convém, neste ponto, chamar a atenção para um alerta, feito por Frederiksen (1996), sobre a crise da água. Ele comenta que há quatro importantes restrições que devem ser consideradas:

- a) a escassez de tempo para agir se quer-se encontrar soluções para todas as necessidades;
- b) as limitações de medição avaliadas para assegurar os suprimentos de água essenciais;
- c) os diversos usos conflitantes;
- d) a habilidade mínima para gerenciar secas quando elas ocorrem sem aviso.

Nesse sentido, ele sugere treze soluções de procedimento a serem adotadas:

- 1) a maior parte da água em todo mundo é usada e está comprometida com a irrigação. Isto pode ser alterado;
- 2) toda água utilizada pela agricultura pode ser proveniente de relocação de outros propósitos;
- 3) uma redução menor na alocação de água para irrigação em áreas rurais pode minimizar distúrbios entre irrigantes. Essa redução seria necessária para atender necessidades urbanas;
- 4) tornar a agricultura mais eficiente liberaria quantidades substanciais de água;
- 5) o gerenciamento de demandas liberaria quantidade substancial de água nos setores urbanos e agrícolas de países em desenvolvimento;
- 6) o reuso da água servida tem potencial para atender a vários suprimentos de águas;
- 7) tornar o gerenciamento e a operação de bacias de rios mais efetivo iria oferecer significantes ganhos na disponibilidade de água;
- 8) mercados e comércio de água liberariam mais água, motivados por uma medida de alocação - a eficiência econômica;<sup>3</sup>
- 9) água pode ser relocada de outros usos para atender usos urbanos;
- 10) aumentar o controle da poluição aumentaria o suprimento de água usável;
- 11) há ainda montantes substanciais de água que poderiam ser utilizados em vários países;

---

<sup>3</sup> Existe uma série de discussões sobre a eficiência desta solução, que não vamos entrar em detalhes neste texto.

- 12) aumentar a reciclagem dos processos de água na indústria poderia reduzir usos consutivos e não consutivos da água;
- 13) oportunamente, deverá ser estimulada a eficiência do uso consutivo da água na produção e no processamento de safras.

Quando trata-se do aspecto de qualidade da água tem-se que Wang e Jamieson (2002) afirmam que, na maioria dos programas de recuperação de rios, a atenção inicial é focada em eliminar fontes de poluição pontual visto que estas são mais fácies de identificar e tratar. Entretanto o trabalho requerido é geralmente muito caro e pode levar muitos anos para ser completado. Eles continuam dizendo que a maior dificuldade surge quando regras de descarga de efluentes são estabelecidas individualmente, em ordem, para atingir com êxito um particular objetivo de qualidade da água para o rio, pois a decisão não é uma simples troca entre os custos de diferentes opções. Em seu lugar, é necessário, primeiramente, determinar qual opção satisfaz o objetivo de qualidade da água para o rio e igualmente considerando seus custos. Quando a alocação de carga de esgoto é incluída também como posição de seleção, então alguns meios de prever as conseqüências de diferentes combinações de padrões de descarga dos efluentes na qualidade da água do rio é requerida desde que o desejo é atingir com êxito um particular objetivo de qualidade da água do rio. Isto implica na necessidade de um modelo para prever a relação causa-efeito, levando em conta a capacidade de autodepuração do rio, incluindo diluição, dispersão e reoxigenação. De qualquer modo, igualmente para os modernos computadores, o peso computacional para rodar um modelo de simulação complexo para identificar a solução ótima é muito caro. Esta última afirmação é reforçada por Takyi e Lence (1999).

Existem vários modelos que podem servir de suporte para a simulação de intervenções para auxiliar a quantificação do objetivo qualidade e quantidade dos recursos hídricos. World Bank Group (1998c) afirma que quanto mais complexo é o modelo, mais



difícil e caro será sua aplicação a uma dada situação e coloca a complexidade de um modelo como função de quatro fatores:

- a) O número e tipo dos indicadores da qualidade da água – em geral, quanto mais indicadores são incluídos, mais complexo o modelo será. Adicionalmente, alguns indicadores são mais complicados de simular do que outros;
- b) O nível de detalhes espaciais – tanto quanto o número de fontes de poluição e pontos de monitoramento aumentam, serão dos dados requeridos e o tamanho do modelo;
- c) O nível de detalhes temporais – É mais fácil prever médias estáticas de longo prazo do que variações dinâmicas de curto prazo na qualidade da água. Estimativas pontuais de parâmetros de qualidade da água são usualmente mais simples que simulações estocásticas da distribuição de probabilidade destes parâmetros;
- d) A complexidade do corpo de água a ser analisado – pequenos lagos nos quais a água se mistura completamente são menos complexos que rios de médio porte, os quais são menos complexos que grandes rios, os quais são menos complexos do que grandes lagos, estuários e zonas costeiras.

O World Bank Group (1998c) recomenda alguns modelos que podem ser utilizados para trabalhos que envolvam a qualidade da água, porém afirma que qualquer modelo pode ser usado desde que sua complexidade seja adequada ao problema em questão.

Será apresentado o Modelo Hidrodinâmico de Simulação da Qualidade da Água – IPH5 que é um modelo bastante complexo que envolve a simulação hidrodinâmica do rio e também a qualidade da água sendo que na versão de março de 1999 considera os parâmetros de Demanda Bioquímica de Oxigênio- DBO, Oxigênio Dissolvido – OD e Coliformes Fecais. O trecho a ser simulado pode ser dividido em vários pontos de monitoramento, quantos forem convenientes ao estudo.

## MODELO HIDRODINÂMICO DE SIMULAÇÃO DA QUALIDADE DA ÁGUA - IPH5

O modelo em regime não-permanente desenvolvido por Tucci (1978) se divide em dois módulos: Hidrodinâmico e Qualidade da Água, que foram descritos a seguir. Deu-se, entretanto, mais ênfase ao módulo de Qualidade da Água.

### *Módulo Hidrodinâmico*

O estudo de escoamento em regime não-permanente gradualmente variado em um rio é descrito por duas equações diferenciais parciais básicas, a equação de continuidade, que considera a continuidade de massa do escoamento e a equação de momento, que representa os efeitos dinâmicos do escoamento.

As equações de continuidade e momento uni-dimensionais foram estudadas por vários autores. As considerações básicas feitas na derivação, são:

- a) O rio é lateralmente homogêneo, o que significa que as velocidades verticais e transversais são muito pequenas e a seção transversal é assumida horizontalmente. Em adição, o rio é uniforme na longitudinal;
- b) A pressão varia hidrosticamente na vertical;
- c) A declividade de fricção da equação diferencial é representada pelas fórmulas uniformes de Chezy ou Manning.

### *Módulo de Qualidade da Água*

A equação em regime não permanente de transporte de massa para uma substância não conservativa é

$$\frac{\partial(AC)}{\partial t} + \frac{\partial(QC)}{\partial x} = \frac{\partial\left(EA\frac{\partial C}{\partial x}\right)}{\partial x} + S_i$$

onde: C é o elemento de concentração; A é a área; Q é a vazão e E é o coeficiente de dispersão longitudinal que representa a distribuição não uniforme da velocidade (dispersão) e o valor médio espacial da difusão turbulenta;  $S_i$  é o termo de decaimento.

As considerações básicas feitas na derivação desta equação, são:

- a) O valor médio pode representar a variação da concentração e velocidade na seção transversal; conseqüentemente, o problema vem a ser unidimensional na direção longitudinal;
- b) O coeficiente de dispersão longitudinal representa o produto transversal da velocidade longitudinal e concentração na seção transversal média mais o valor médio espacial da difusão turbulenta.

O termo de decaimento para a DBO fica:

$$S_i = - (K_1 + K_3) AC + AL_a + q_l C_l$$

Onde:  $K_1$  é a taxa de reação carbonácea da DBO (por dia),  $K_3$  é a taxa coeficiente para remoção de DBO por sedimentação e absorção (por dia),  $L_a$  é a taxa de adição de DBO ao longo do comprimento (ppm por dia),  $q_l$  é a descarga lateral ( $m^2/s$ ),  $A$  é a área da seção transversal ( $m^2$ ) e  $C_l$  é a concentração de DBO no escoamento lateral (ppm).

O termo de decaimento para o OD fica:

$$S_i = - K_1 AC_{DBO} + K_2 A (C_s - C) - D_b A + q_l C_{l(OD)}$$

Onde:  $C_{DBO}$  é a concentração de DBO (ppm),  $K_2$  é o coeficiente de reaeração (por dia),  $C_s$  concentração de saturação de oxigênio dissolvido (ppm) e  $D_b$  é a remoção de oxigênio por depósito bentônico, respiração das plantas e acréscimo de oxigênio por fotossíntese (ppm/dia).

$K_2$  é dado pela fórmula de O'Connor e Dobbins (1958 apud Tucci 1978):

$$K_2 = \frac{(D_m v)^{\frac{1}{2}}}{2,303 y^{\frac{3}{2}}}$$

Onde:  $y$  é a profundidade e  $D_m$  é o coeficiente de difusão molecular calculado por:

$$D_m = 0.00192 (1.04^{(T-20)})$$

Onde : $T$  é a temperatura em °C,  $D_m$  em (pés/dia) e  $K_2$  1/dia;

Para o termo de decaimento de coliformes foi utilizado o mesmo termo da DBO, porém, com um K diferente.

## **OBJETIVO SOCIAL**

Melhorar a qualidade de vida é um dos objetivos para o bem estar social de que se tratou a seguir. Os objetivos sociais são de difícil especificação, devido às várias perspectivas com que podem ser observados, sendo que cada pessoa tem uma visão diferente a respeito. A isto se objeta que muitas das dimensões sociais são de índole qualitativa, sendo por isso impossível a sua medição, segundo Cohen e Franco (1993). A valorização social das conseqüências benéficas ou adversas de um projeto em uma economia de mercado baseia-se em dois postulados (Sassone e Schaffer, 1978 apud Lanna, 1996c): O valor social de um projeto é dado pela agregação dos valores que os indivíduos dessa sociedade lhe atribuem; O valor de um projeto para um indivíduo é igual a sua disposição de pagamento pelo mesmo, em uma situação de completa informação. O custo de oportunidade social pode ser complementarmente definido como o sacrifício que faz a sociedade ao utilizar um insumo ou fator num projeto concreto, em vez de atribuí-lo a outro alternativo (Cohen e Franco, 1993). A definição do problema, segundo ainda Cohen e Franco (1993) surge da comparação entre a situação vigente e um padrão politicamente desejável, trata-se, em suma, de responder às seguintes perguntas: Que necessidades serão satisfeitas e, por conseguinte, que serviços ou bens o projeto fornecerá? Quem são os integrantes do grupo-meta do projeto? Onde estão localizados? De quantos recursos se dispõe? Como serão providos os produtos do projeto, o que supõe comparar as alternativas existentes para a sua implementação?

Segundo Fontes et alli (2003), uma análise social indicará os índices de transformação e diminuição das diferenças sociais e a avaliação do impacto social das intervenções

implementadas. Uma forma de se medir o benefício social trazido para um determinado município por uma intervenção, pode ser feita através dos índices de desenvolvimento tais como, foram utilizados por Soares et alli (2003), Vaz (2004) e o Índice de Desenvolvimento Socioeconômico – IDESE da Fundação de Economia e Estatística – FEE (2003). Estes trabalhos utilizam como indicadores o número de domicílios com água tratada, número de domicílios com rede de esgoto, número de domicílios com tratamento de esgoto, número de domicílios com coleta de lixo entre outros. Um estudo sobre indicadores pode ser encontrado em Borja e Moraes (2003). Como exemplo, o IDESE utiliza quatro blocos de indicadores: Domicílio e Saneamento, Educação, Saúde e Renda. Neste trabalho, destacaram-se dois destes indicadores.

O indicador Domicílio e Saneamento é dado pela proporção de domicílios abastecidos com água tratada (peso 0,5), proporção de domicílios atendidos pela rede geral de esgoto ou pluvial (peso 0,4) e média de moradores por domicílio (peso 0,1).

O indicador Saúde é baseado no percentual de crianças nascidas com baixo peso, taxa de mortalidade de menores de 5 anos e expectativa de vida ao nascer, com participações iguais (um terço cada). Segundo Silvio (2003), se a população apresenta uma expectativa de vida elevada, isso indica que as condições de saneamento básico, alimentação, assistência médico-hospitalar e moradia são boas, além de haver o acesso a um meio ambiente saudável.

Um objetivo social muito considerado quando se trata de projetos envolvendo recursos hídricos é considerar a taxa de doenças de veiculação hídrica. A escolha de uma variável ou de um indicador, que reflita o estado de saúde de um grupo populacional, deve conciliar o compromisso entre a necessidade de efetivamente expressar a condição de saúde coletiva, por um lado, e a sua adequação à pesquisa em questão, por outro (Heller, 2000). A partir de um estudo detalhado onde foram analisados vários outros estudos Heller (2000) faz a seguinte afirmação: Os estudos realizados já permitem afirmar, com segurança, que intervenções em abastecimento de água e em esgotamento sanitário provocam impactos positivos em

indicadores diversos de saúde. Ainda mostra-se necessário o aprofundamento de sua compreensão para situações particularizadas, em termos da natureza da intervenção, do indicador medido, das características sócioeconômicas e culturais da população beneficiada e do efeito interativo das intervenções em saneamento e destas com outras medidas relacionadas à saúde. Ele ainda afirma que o entendimento da relação com a saúde de outras intervenções associadas ao saneamento ainda se revela incipiente.

Um estudo que detalha a correlação em termos de valores foi obtida por Martins et alli (2002) para a cidade de Itapetininga- SP onde eles obtiveram que para cada gasto da ordem de US\$ 2,26 em saneamento básico correspondem a redução de gastos de US\$2,63 pela prevenção de doenças infecciosas intestinais e helmintíases, porém eles afirmam que o modelo obtido não pode ser extrapolado para outros locais. Teixeira e Heller (2003) fazem um estudo de priorização de investimentos em saneamento baseado em indicadores epidemiológico e financeiro para o estado de Minas Gerais, porém ele utiliza custos já calculados para a implementação de cada projeto e uma estimativa do número de vidas que seriam salvas e da redução de incidência de diarreia. Eles ainda afirmam que o modelo desenvolvido é indicado no estabelecimento de prioridades de intervenções de reduzida quantidade de projetos de grande porte.

Motta S. e Mendes (1995), Motta et alli (1994), são alguns trabalhos que fazem a correlação entre investimentos em saneamento básico e vidas salvas. Em especial, o trabalho Motta et alli (1999) traz informações, reproduzidas na Tabela 3.1, onde é estabelecido o custo de investimento em saneamento para salvar uma vida humana. Baseado nesse trabalho, podemos considerar que o investimento de valores crescentes em saneamento traria como consequência um aumento do número de vidas salvas e a redução dos casos de doenças de veiculação hídrica.

Tabela 3.1 - Efeito do aumento do acesso aos serviços de saneamento de 1% para a população do Brasil de 1989. fonte: Motta et alli (1999)

	Serviços de Saneamento			
	Água tratada	Coleta de esgoto	Tratamento de Esgoto	Os três serviços
Vidas salvas de crianças (% do total de casos de mortalidade)	463 (2,5)	298 (1,6)	395 (2,1)	1133 (6,1)
Custo para cada vida salva (US\$)	115.102	214.562	175.207	164.385

Olhando os dados da tabela 3.1, pode-se observar que se houver um investimento em saneamento básico, ter-se-á melhoria em dois indicadores do IDESE, pois haverá melhoria dos indicadores Domicílio e Saneamento e Saúde. Observa-se que se, além da água tratada, for coletado e tratado o esgoto, o benefício social será maior. Segundo Freitas (2004) tem-se que a salubridade, de ordinário, reporta à idéia de uma cidade provida de equipamentos urbanos destinados a captar, remover e tratar o esgoto doméstico e industrial. Mas saudável também é a cidade que se ocupa de realizar serviços de coleta de lixo, limpeza de bueiros e logradouros para evitar sujidades e inundações. Salubre é a urbe planejada em sua distribuição espacial, separando as atividades industriais das comerciais e residenciais, ou conciliando-as, evitando contato próximo de usos incompatíveis ou impróprios. Pode-se acrescentar a isto, evitando as favelas, bolsões de pobreza. Fato este que ocorre na maioria das cidades e o Vale



dos Sinos não é uma exceção como pode-se constatar em Comitesinos (1998) onde relata que a região teve um crescimento rápido e desordenado, especialmente nos seus núcleos urbanos, a favelização crescente e a ocupação desordenada do solo tem gerado muitos problemas ao meio-ambiente. Pode-se acrescentar a isto os problemas de desigualdade social.

Um exemplo das conseqüências da desigualdade social pode ser encontrado segundo dados do Boletim Epidemiológico (SESAB/SUS,2002 apud Moteiro, 2003) o Brasil é o 13º país do mundo com maior número de casos de tuberculose, ultrapassa em média 8 mil casos, fato este decorrente de bolsões de pobreza, da alta densidade demográfica que elevam o risco de infecção. As populações mais carentes apresentam as condições propícias para ocorrência destas infecções, em função das aglomerações intradomiciliares. Levando-se isso em consideração o World Bank Group (1998b) afirma que os benefícios à saúde que poderiam ser obtidos pela expansão de serviços urbanos de água e esgotamento são grandes. Um exemplo do benefício que um esforço neste sentido traria pode ser encontrado em Porto Alegre onde tem-se dado muita importância a habitação, e buscado melhorar as condições de vida da população, principalmente as mais carentes (Porto Alegre,2004a). Tem-se que as pessoas muitas vezes não tem dinheiro nem para comprar comida e ganham a cidadania quando recebem a casa, como pode ser constatado nos depoimentos das reportagens encontradas em Porto Alegre (2004b) e Porto Alegre (2004c). Outro exemplo é o Programa Integrado Sócio-Ambiental que elevará o tratamento de esgotos da cidade de 15% para 76% (Porto Alegre, 2000).

O benefício quando um investimento é feito em melhoria para uma determinada área, naturalmente é mais sentido na área diretamente beneficiada, porém ela trará um benefício para a cidade como um todo elevando o padrão de vida da cidade , esta afirmação é feita por Chaves (1998) considerando Modelos de Valores Territoriais.

Levando-se tudo isto em consideração e fazendo um paralelo, pode-se compreender que se a intervenção for numa área mais densamente habitada, o benefício social será maior, pois atenderá a um maior número de domicílios e mais pessoas serão assistidas pelo benefício.

## **CONSIDERAÇÃO DO RISCO E INCERTEZAS COMO UM OBJETIVO**

A consideração do risco como um objetivo traz uma importante variável de análise, pois pondera a confiabilidade e as incertezas a que a análise está sujeita. Em recursos hídricos, por exemplo, variáveis de incerteza podem ser o tempo de retorno utilizado para projeto, o crescimento da população, os avanços tecnológicos, variáveis associadas ao tempo (clima), etc. Haines et alli (1975) citam quatro fatores associados às incertezas, como:

- a) sensibilidade, diz respeito à característica relacionada aos índices de performance do sistema (ou saída) para variações esperadas nas variáveis de decisão, parâmetros não controláveis, níveis de restrição ou coeficientes dos modelos;
- b) confiabilidade, diz respeito à característica do sistema de ser dinamicamente responsável por mudanças (incluindo variáveis aleatórias) nas decisões ao longo do tempo. Ela mede a habilidade das respostas significantes do sistema para sucessivas mudanças nas variáveis de decisão no tempo e/ou espaço;
- c) estabilidade, diz respeito à característica relacionada ao grau de variação da resposta média do sistema para decisões fixadas. Um sistema estável produz uma resposta média invariável para o valor médio do conjunto de decisões. Um sistema pode ser estável e ainda ter um importante componente aleatório.
- d) irreversibilidade, diz respeito à característica do sistema relacionada ao grau de dificuldade envolvido em recuperar estados ou condições prévias uma vez que ele tenha sido alterado por uma decisão (incluindo a “decisão” de não fazer nada).

Outras principais fontes de riscos e incertezas, comentadas, estão associadas a base de dados utilizada, modelos topológicos, capacidade dos modelos em representar o sistema real ou o enfoque utilizado, técnicas de otimização utilizadas, subjetividades humanas, etc.

## **OUTROS OBJETIVOS**

Por sua definição, na análise multiobjetivo a quantidade de objetivos e condicionantes são ilimitados. A sua quantificação deve ser adequada a cada caso específico, de acordo com as variáveis envolvidas no problema. Convém aqui apenas acrescentar mais um objetivo: a qualidade estética (que busca uma melhor apresentação, no que diz respeito à paisagem).

### **3.3 A TOMADA DE DECISÃO MÚLTIPLA**

Como na maioria das vezes o processo de tomada de decisão envolve o conflito de interesses, esse processo é que, muitas vezes, irá definir o método de análise. Nesse sentido, Saaty (1980) cita que a tomada de decisão envolve os seguintes processos:

- a) planejamento;
- b) geração do conjunto de alternativas;
- c) estabelecimento de prioridades;
- d) escolha da melhor política, após definição do conjunto de alternativas;
- e) alocação de recursos;
- f) determinação dos requisitos;
- g) previsão dos resultados;
- h) projeto dos sistemas;
- i) avaliação do desempenho;

- j) garantia da estabilidade do sistema;
- k) otimização;
- l) resolução de conflitos;

A análise de problemas de tomada de decisão múltipla é simultaneamente o mais complexo e o menos entendido na área de análise (Cohon, 1978). Cohon (1978) divide em três formas a análise:

- a) agregação de preferências individuais, que busca combiná-las;
- b) consulta a um tomador de decisões individual: este método consiste em consultar um especialista, que buscará combinar os diversos interesses e objetivos baseado em uma série de informações;
- c) previsão dos resultados da política adotada: a mais cínica, todavia realista, visão do processo de tomada de decisão pública é que, no conflito entre grupos de interesse, estes competem para ganhar tanto quanto é possível para seu próprio grupo. Dessa forma, os objetivos analíticos para esses métodos são da ordem da predição diretamente dependente da natureza das escolhas: quem ganha, quem perde, habilidade de barganha e força de cada grupo, qual decisão é politicamente mais aceitável, sendo que o método de problemas multiobjetivos de tomada de decisão múltipla é o que apresenta maior representatividade dos aspectos envolvidos.

### **3.4 PROGRAMAÇÃO MULTI OBJETIVO**

Para a solução de problemas multiobjetivo são requeridas técnicas de solução matemática de algoritmos e de programação. Esses métodos têm por objetivo combinar as diversas condicionantes do problema, as restrições às quais estão sujeitas, e buscar as alternativas que melhor atendam a essas solicitações.

Para melhor ser entendido esse contexto da tomada de decisões na programação multiobjetivo, foi lançado mão de um fluxograma apresentado por Cohon (1978), figura 3.3. Na figura, o fluxo de informações, de baixo-para-cima, diz respeito ao fluxo de informações do analista para o tomador de decisões; de cima-para-baixo, diz respeito ao fluxo de informações do tomador de decisões para o analista. Isso quer dizer que nas técnicas de programação multiobjetivo são incorporadas as preferências do ou dos tomadores de decisão.

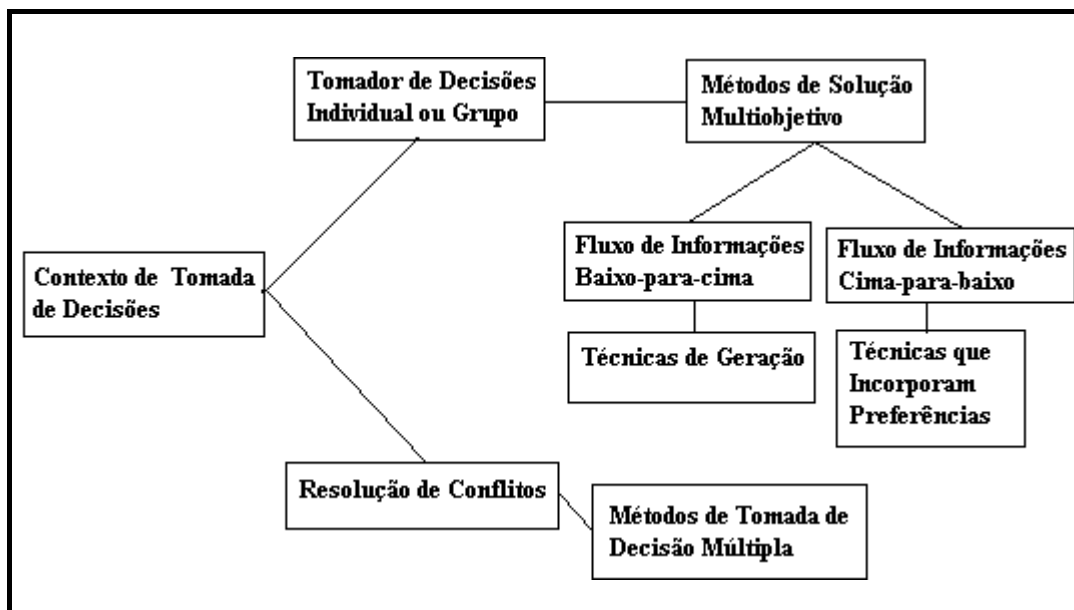


Figura 3-3 Contexto de Tomada de Decisões, Fonte: Cohon (1978)

Técnicas formais de modelagem para a tomada de decisão com múltiplos objetivos trazem muitos benefícios para o trabalho profissional em recursos hídricos e em todas as áreas afins, Hipel (1992a):

- 1) provê uma estrutura lógica na qual informações científicas, ambientais, sociais e outras informações relevantes são devidamente organizadas e apresentadas;
- 2) esta ferramenta constitui uma “linguagem comum” para uma efetiva discussão entre especialistas e leigos;

- 3) melhora da comunicação com os meios sociais nos quais o problema será melhor entendido e apreciado por todas as partes interessadas;
- 4) as técnicas de tomada de decisão podem ser tomadas em conta dos efeitos de objetivos múltiplos, quando determinada a melhor solução alternativa do projeto;
- 5) extensivas análises sensitivas podem ser conduzidas acerca de conseqüências de significativas mudanças nos parâmetros para a solução ótima ou de compromisso.

Hipel (1992b) apresenta uma série de atributos para classificação de métodos de pesquisa operacional, que podem definir qual a técnica de programação multiobjetivo será empregada:

- a) número de tomadores de decisão: pode ter um ou mais tomadores de decisão;
- b) número de objetivos: cada tomador de decisão pode ter um ou mais objetivos;
- c) tipos preferenciais: preferência ou pagamento por soluções alternativas, estados ou cenários possíveis podem ser quantificáveis ou não quantificáveis.
- d) probabilístico: a partir deste modelo, podem ser tomadas informações probabilísticas e por, esta razão, valores futuros do sistema podem somente ser previstos usando estratégias probabilísticas;
- e) determinístico: este modelo não contém componentes probabilísticos ou estocásticos;
- f) fuzzy: modelo que pode considerar informações fuzzy (difusas), descritas usando conjuntos fuzzy;
- g) estado de informação: um tomador de decisão pode, por exemplo, ter informação completa sobre o problema em estudo ou informações parciais. Na teoria dos jogos, há diversos estados de informação diferentes;
- h) estático: parâmetros do modelo, remanescentes, fixados no tempo, sendo que tempo não é uma variável do modelo;

- i) dinâmico: o tempo é uma variável no modelo, na qual pode descrever o sistema como uma mudança no tempo;
- j) normativo: uma técnica normativa dita que um tomador de decisões deverá pesquisar um objetivo bem definido;
- k) descritivo: um modelo descritivo captura as principais características do problema, em ordem, para descrever suas relações e a extensão das conseqüências que podem vir a ocorrer;
- l) concepção da solução: definição de procedimento humano ou otimização, a qual define o conjunto de soluções aceitáveis.

Passou-se então a apresentar técnicas de programação multiobjetivo. Existe vasta bibliografia disponível. Pode-se citar Haimes et alli (1975), Cohon (1978), Wilde e Beightler (1967), Cohon e Marks (1975), Braga (1987), Goodman (1984), Gobbetti e Barros (1993), Shafike, Ducksteine, Maddock III (1992), Bardossy e Duckstein (1992), Bogardi e Duckstein (1992), Ko, Fontane e Labadie (1992), Woldt e Bogardi (1992). Existem mais de cinquenta técnicas de programação multiobjetivo. Foi feita extensa pesquisa de métodos, que não vai-se citar aqui. Dentre as várias técnicas pesquisadas, foram pré-selecionadas algumas que foram consideradas que seriam adequadas para serem aplicadas. Estas serão descritas com mais detalhes adiante, a comparação entre elas ou escolha de qual aplicar será feita na aplicação da metodologia proposta à bacia do rio dos Sinos. Antes, porém, foi necessário o estabelecimento de algumas definições.

### 3.4.1 DEFINIÇÕES

Ótimo é um termo técnico que conota uma medida quantitativa e análise matemática. Define-se como Vetor geral de otimização, a relação abaixo:

$\min \{ f_1(\underline{x}), f_2(\underline{x}), \dots, f_n(\underline{x}) \}$  relativo a perdas

$\max \{ f_1(\underline{x}), f_2(\underline{x}), \dots, f_n(\underline{x}) \}$  relativo a ganhos

sujeito a  $g_k(\underline{x}) \leq 0$ ,  $k = 1, 2, \dots, m$

onde  $\underline{x}$  é o vetor n-dimensional de variáveis de decisão

$f_i(\underline{x})$ ,  $i = 1, 2, \dots, n$  são as n funções objetivo

$g_k(\underline{x})$ ,  $k = 1, 2, \dots, m$  são as m funções de restrição

Solução ótima, também conhecida como solução superior, é aquela que representa o valor mínimo (ou máximo, dependendo do objetivo) para todos os objetivos, simultaneamente. Isto é :

$f_i(x_{\text{ótimo}}) \leq f_i(x)$  para todo  $x$

onde:

$f_i(x)$  é a função objetivo

$f_i(x_{\text{ótimo}})$  é o ótimo da função objetivo

Em geral, problemas multiobjetivo não apresentam uma única solução, mas, sim, várias alternativas que são viáveis e adequadas a serem empregadas. O conceito de soluções



não inferiores, também conhecido como ótimo de Pareto, ou ainda solução eficiente, tendem, geralmente e particularmente, para o equilíbrio competitivo, em que não é possível alterar a solução sem que para que um objetivo seja beneficiado ocorra o detrimento de outro. Kuhn e Tucker (1951 apud Cohon, 1978) estenderam a teoria de programação não linear para funções objetivo para um problema em forma de um vetor de minimização, e introduziram condições necessárias e suficientes para soluções não inferiores, da seguinte maneira:

considerar-se-á um problema tal que:

maximize  $Z(x)$

sujeito a  $g_i(x) \leq 0, i = 1, 2, \dots, m$

esta condição de restrição pode também ser escrita como abaixo:

sujeito a  $x \in X$

onde

$$X = \left\{ \begin{array}{l} x \\ g_i(x) \leq 0, i = 1, 2, \dots, m \end{array} \right\}$$

As condições de Kuhn-Tucker são condições de estado tais que se  $x^*$  é uma solução ótima, então existe  $u$  com  $u_i \geq 0 \forall i = 1, 2, \dots, m$  e

$$x^* \in X$$

$$u_i g_i(x^*) = 0, i = 1, 2, \dots, m$$

$$\nabla Z(x^*) - \sum_{i=1}^m u_i \nabla g_i(x^*) = 0$$

Para funções convexas, o conjunto de soluções não inferiores é contínuo; para funções não-convexas, contudo, o conjunto de soluções não inferiores pode ser não conectado. A alternativa preferida é uma solução não inferior, a qual é encontrada como a decisão final, por meio de alguns critérios adicionais

## **DEFINIÇÕES PARA TÉCNICA FUZZY**

A técnica foi apresentada por Zadeh (1965). Ela consiste em uma classe de objetos com contínuos graus de pertinência. Tal como um conjunto é caracterizada por uma função subcomponente (característica) a qual determina para cada objeto um grau de pertinência distanciando entre zero e um.

A lógica Fuzzy como uma linguagem matemática tem se desenvolvido formalmente e necessita de uma série de definições tais como noção de inclusão, união, interseção, complemento, relação, convexidade e outros, para o seu entendimento. Como uma linguagem de modelação pode ser aplicada a várias situações da vida real que envolvem incertezas (fuzziness).

Com aplicações em várias áreas do conhecimento, a lógica Fuzzy é utilizada em uma série de situações onde os limites entre as classes é gradual ou não são perfeitamente definidos. Nestes casos a legenda das classes pode ser feita de forma não numérica, por exemplo para classes de altura de pessoas pode-se ter altas, baixas e médias. No exemplo o limite entre as classes não é bem definido.

Como uma teoria formal, a lógica fuzzy necessita de uma série de definições para o seu entendimento. Neste trabalho, são apresentadas algumas delas. Outras podem ser encontradas em Zimmermann (1991). Outra referência para aplicações da teoria dos sistemas fuzzy é apresentada por Terano et alli (1991).

## FUZZY (DIFUSO)

A utilidade da linguagem matemática para a modelação é indiscutível. Há limites porém para a sua utilização e a possibilidade de usar a linguagem matemática clássica, baseada em caracteres dicotômicos de teoria dos conjuntos, para modelar sistemas particulares e fenômenos sociais. Estas dificuldades, segundo Zimmermann (1991) são principalmente devido a que:

- a) situações reais são muito freqüentemente não dicotômicas e determinísticas e elas não podem ser descritas precisamente;
- b) a completa descrição de um sistema real freqüentemente requer um maior detalhamento de dados que o homem poderia reconhecer simultaneamente, processar e entender.

As incertezas de característica estocástica são estudadas pela teoria da probabilidade e estatística. Estas incertezas diferem da incerteza ou inexatidão devido a descrição de significados semânticos dos eventos, fenômenos ou sentenças, as quais foram chamadas de *fuzziness* (difusa). Em linguagem natural o significado das palavras é muito freqüentemente inexato. O significado de uma palavra pode ser bem definido, mas quando usamos a palavra como uma legenda para um conjunto, os limites com os quais objetos fazem ou não parte do conjunto vem a ser *fuzzy* (difuso) ou inexato (Zimmermann 1991).

Quanto as linhas de desenvolvimento, Zimmermann (1991) divide em duas linhas:

- a) como uma teoria formal na qual, quando madura, vem a ser mais sofisticada e especificada. Foi aumentada por idéias originais e conceitos tão bem quanto áreas da matemática clássica tais como álgebra, teoria gráfica, topologia e então pela generalização delas;
- b) como uma linguagem de modelação potente, que pode ser aplicada a uma larga fração de incertezas de situações da vida real. Porque da sua generalização isto pode ser bem

adaptado para diferentes circunstâncias e contextos. Em muitos casos este significará, todavia, as modificações contexto-dependente e especificações dos conceitos originais da teoria dos conjuntos fuzzy formal.

## CONJUNTOS FUZZY

Uma variável analítica, na qual os valores são sentenças em linguagem natural ou artificial em um algoritmo fuzzy, pode ser definida como sendo uma seqüência ordenada de instruções, as quais podem conter designação fuzzy e sentenças condicionadas (Zadeh, 1973). A execução de tais instruções é governada pela “regra de inferência composicional” e pela “regra da alternativa preponderante”. É conveniente classificar algoritmos fuzzy em várias categorias básicas, correspondentes a um tipo particular de aplicação: algoritmos de definição e identificação, algoritmos de geração; algoritmos de relação e procedimentos; algoritmos de decisão.

Um conjunto (dicotômico, *crisp*) clássico é normalmente definido como uma coleção de elementos ou objetos  $x \in X$ , o qual pode ser finito, contável ou incontável. Cada elemento singular pode também pertencer ou não pertencer a um conjunto  $A$ ,  $A \subseteq X$ . No caso formal, a sentença “ $x$  pertence a  $A$ ” ou é verdadeira, ou é falsa (Zimmermann, 1991).

Se  $X$  é uma coleção de objetos denotada genericamente por  $x$ , então um *conjunto fuzzy*  $A$  em  $X$  é um conjunto de pares ordenados:

$$A = \{ x, \mu_A(x) \mid x \in X \}$$

onde:  $\mu_A(x)$  é chamada função subcomponente (característica) ou grau de subcomponente ou pertinência (também medida de compatibilidade ou medida de fidelidade) de  $x$  em  $A$  a qual

mapeia (traça)  $X$  para o espaço subcomponente  $M$ . (quando  $M$  contém somente os dois pontos 0 e 1,  $A$  não é fuzzy e  $\mu_A(x)$  é idêntico para caracterizar funções de um conjunto não fuzzy).

A faixa de funções subcomponentes (de pertinência) é um subconjunto de números reais não negativos de quem o máximo (*supremum*) é infinito. Elementos com zero grau de pertinência são normalmente não listados. Algumas das formas comuns da função subcomponente ou característica são a forma triangular, trapezoidal, linear, parabólica, etc (ver figura 3.4).

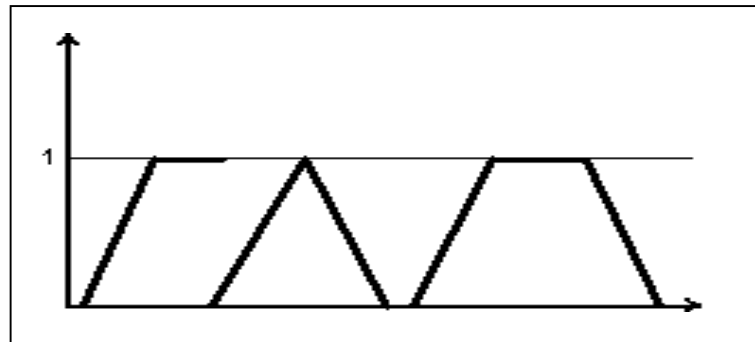


Figura 3-4 Algumas das formas comuns da função de subcomponente (característica): linear, triangular, trapezoidal

A função subcomponente  $\mu_C(x)$  da *interseção (intersection)*  $C = A \cap B$  é definida por

$$\mu_C(x) = \min \{ \mu_A(x), \mu_B(x) \} \quad , \quad x \in X$$

A função subcomponente  $\mu_D(x)$  da *união (union)*  $D = A \cup B$  é definida por

$$\mu_D(x) = \max \{ \mu_A(x), \mu_B(x) \} \quad , \quad x \in X$$

A função subcomponente do complemento (*complement*) de um conjunto fuzzy  $A$ ,  $\mu_{\bar{A}}(x)$  é definida por

$$\mu_{\bar{A}}(x) = 1 - \mu_A(x) \quad , \quad x \in X$$

Bellman e Giertz (1973 apud Zimmermann 1991), argumentam que para um ponto de vista lógico, interpretando a interseção como “e lógico” e a união como “ou lógico” e o conjunto fuzzy  $A$  como a sentença “o elemento  $x$  pertence ao conjunto  $A$ ”, pode ser aceita como mais ou menos verdadeira.

## OBJETIVO FUZZY NA TOMADA DE DECISÕES

Quando trata-se de tomada de decisão em contexto multiobjetivo tem-se que um objetivo fuzzy pode ser definido conforme Roubens (1997) da seguinte forma: Considere  $j$  um dado atributo sobre o qual as alternativas serão avaliadas. Um objetivo fuzzy pode ser caracterizado no seu atributo por um conjunto fuzzy  $\mu_j(x)$ ,  $x \in X_j$  onde  $X_j$  representa a escala de avaliação na dimensão  $j$ . Isto corresponde para a qualificação do objetivo fuzzy como seria desejável por um tomador de decisões. O próximo passo seria associar a avaliação com cada alternativa  $a_i \in A$  para cada dimensão  $j$ . Uma avaliação mal-conhecida ou mal-definida é representada por uma distribuição de possibilidade  $\pi_{ij}(x)$  e representa a consequência fuzzy da alternativa  $a_i$  para o atributo  $j$ .

### **3.4.2 TÉCNICAS DE GERAÇÃO**

O princípio destas técnicas é a geração e avaliação de alternativas, em função de vários objetivos, pelo analista. Não são incorporadas análises políticas ou preferenciais de tomadores de decisão. O método “Critical-Path Method” (CPM) ou “Program Evaluation Research Task” (PERT), conforme definido em James e Lee (1971), é uma aplicação da programação linear paramétrica para situações onde tempo e custo devem, ambos, ser considerados na seleção de uma seqüência de atividades ótima. Algumas técnicas nesta classe serão, a seguir, apresentadas.

### **MÉTODOS DE PONDERAÇÃO OU FUNÇÕES DE UTILIDADE (WEIGHTING METHOD OU UTILITY FUNCTIONS)**

O método de ponderação, ou das funções de utilidade, foi a primeira técnica desenvolvida para a geração de soluções não inferiores por vetor de otimização (Cohon e Marks, 1975). Ela estabelece preferências a cada um dos objetivos, ou seja, maximiza a utilidade social da alternativa:

$$\max \sum U(f(x))$$

onde U é a função de utilidade social

f(x) função objetivo

O método é uma aplicação direta das condições de Kuhn-Tucker para não-inferioridade. A formulação é uma função objetivo escalar e pode ser resolvida pelas técnicas existentes. A

variação paramétrica do limite inferior do objetivo da função de utilidade traça o conjunto não inferior.

### **MÉTODOS POR RESTRIÇÃO (CONSTRAINT METHOD)**

Partindo-se do método por ponderação, conforme Cohon e Marks (1975), requer-se identificar valores iniciais do limite inferior da função de utilidade. Resolvendo problemas escalares, para cada um dos objetivos, nos quais usa-se uma função utilidade diferente, para cada problema irá gerar o conjunto de menor limite para todos os objetivos, que garantirá a condição de não inferioridade. O resultado para todas as soluções serão, para cada objetivo, um valor igual ao número total de objetivos. O mínimo de todos estes valores para um particular objetivo provê o valor ótimo do limite inferior com o qual chega-se ao método por restrições.

O método por restrições consiste em otimizar um objetivo, enquanto outros são restritos a valores pré-estabelecidos. Dessa forma, restringe-se o conjunto de soluções possíveis a serem otimizadas. Matematicamente falando, consiste em restringir o número de valores que cada um dos objetivos (variáveis) pode assumir.

### **3.4.3 TÉCNICAS QUE REQUEREM UMA ARTICULAÇÃO A PRIORI DE PREFERÊNCIAS**

Esses métodos de análise, requerem que o tomador de decisões apresente a priori suas preferências, que serão incorporadas na análise. A seguir, serão comentadas algumas abordagens nesta classe.



## **PROGRAMAÇÃO COM DEFINIÇÃO PRÉVIA DOS OBJETIVOS (GOAL PROGRAMMING)**

Conforme definido por Charnes e Cooper (1961) a programação meta (goal programming) consiste na minimização do módulo dos desvios em relação a objetivos desejados pré-definidos:

$$\min f(x) = \min \sum || Z(x) - Z_o(x) ||$$

onde  $f(x)$  é a função objetivo

$Z(x)$  é o objetivo para o valor de  $x$

$Z_o(x)$  é o objetivo desejado pré definido para o valor de  $x$

## **AVALIAÇÃO DE FUNÇÕES DE UTILIDADE OU FUNÇÕES DE INDIFERENÇA (ASSESSING UTILITY FUNCTIONS OU INDIFERENCE FUNCTIONS)**

A avaliação de funções de utilidade ou funções de indiferença é uma forma de determinação de ponderação a ser aplicada às funções matemáticas que expressam cada objetivo. Estas ponderações podem ser definidas pela identificação de preferências entre diversas alternativas. É então determinada a utilidade adicional das alternativas preferidas em relação às menos preferidas:

$$\min \sum_i (f(x_{otimo\ i} - c))$$

onde  $i$  é determinado pela ordem de preferência pelas alternativas (quando  $i = 1$ ,  $c = 0$ , quando  $i > 1$ ,  $c=1$ )

$f(x)$  é função objetivo

Neste método, as funções de utilidade podem ser: ordinais, quando dão uma ordem das alternativas, não indicam porém o grau de preferência de uma alternativa em relação à outra; ou cardinais, quando apresentam uma ordem e um grau de preferência de uma alternativa em relação à outra.

### **ESTIMAÇÃO DOS PESOS ÓTIMOS E APROXIMAÇÃO PARAMÉTRICA (ESTIMATION OF OPTIMAL WEIGHTS OU PARAMETRIC APPROACH)**

A linha que passa pelo ponto de tangência da posição não-inferior e a curva de indiferença social é substituída por preferências: a declividade desta linha é proporcional à relação dos pesos nos objetivos (definidos por Margli e Major, apud Cohon e Marks, 1975). Se os pesos são conhecidos, a solução ótima compromisso é obtida resolvendo-se a função-objetivo de  $x$  sujeita à restrição dos pesos:

$$\min f(x) = \min \sum \theta_i Z_i(x)$$

$$\text{em geral } \sum \theta_i = 1$$

onde  $f(x)$  é a função objetivo

$Z(x)$  são os objetivos

$\theta$  são os pesos relativos

Quando a importância relativa dos pesos é conhecida e constante, do ponto de vista da utilidade, isso implica em utilidades aditivas e lineares. Tem-se, então, a Aproximação Paramétrica.

## **MÉTODO ELECTRE (ELIMINATION AND CHOICE TRANSLATING REALITY-ELECTRE METHOD): ELECTRE I, II E III**

O método, apresentado por Roy (1971), procura estruturar uma ordem parcial das alternativas, obtidas pela não inferioridade. O método é baseado no que Roy chama de relações em hierarquia (outranking relationship), R. A relação é análoga para a ordem de preferência das alternativas; contudo, a transitividade não é requerida, ou seja, a relação  $x^1Rx^2$  significa que  $x^1$  é preferível a  $x^2$ , contudo,  $x^1Rx^2$  e  $x^2Rx^3$  não necessariamente implica que  $x^1Rx^3$ . No Electre, a relação de hierarquia é desenvolvida para um conjunto de soluções não-inferiores. Soluções inferiores não são consideradas, e uma deve ser com o conjunto de soluções não-inferiores  $X^*$ . Muito do método está relacionado com a construção de relações hierárquicas para valores opinados, fornecidos pelo tomador de decisões. No Electre, os valores opinados tem a forma de pesos nos objetivos: uma “condição de concordância”, que é uma medida do quanto o decisor concorda com a proposição entre duas alternativas; e uma “condição de discordância”, que é uma medida do quanto o decisor discorda com a proposição entre duas alternativas. O método utiliza valores que permitem definir relações de indiferença, preferência fraca e preferência estrita do decisor em relação às alternativas.

$$C(i,j) = (\text{soma dos pesos onde } i < j) / (\text{soma total dos pesos})$$

$$D(i,j) = (\text{intervalo máximo onde } i > j) / (\text{distância total da escala})$$

Os critérios para a determinação dos valores que determinam os pesos para cada um dos objetivos, estão sujeitos a: imprecisões, por causa da dificuldade de determiná-los, sempre na ausência de flutuações aleatórias; indeterminação, desde que o método de

avaliação resulte em uma escolha arbitrária relativa entre várias possíveis definições; incertezas, desde que o valor envolvido varie com o tempo.

O método Electre II usa relações de excedência em hierarquia forte e fraca, dentre as alternativas em ordem, para trazer aproximadamente uma completa ordem de preferência das alternativas.

O método Electre III é uma extensão dos métodos Electre I e II. Nesse método, a relação de dominância entre duas alternativas é caracterizada pelo grau de credibilidade. Constrói-se, dessa forma, uma matriz de concordância global, considerando a importância relativa de todos os  $m$  critérios dentro da família de critérios  $F$ . Cada elemento da matriz é definido por:

$$C(x_z, x_y) = \frac{\sum_{j=1}^m [k_j C_j(x_z, x_y)]}{\sum_{j=1}^m k_j}$$

onde

$k_j$  é o peso do critério  $j$ ;

$C(x_z, x_y)$  índice de concordância global, exprime em qual medida as avaliações das alternativas  $x_z$  e  $x_y$  sobre todos os critérios, estão em concordância com a proposição:  $x_z$  desclassifica  $x_y$ ;

O grau de credibilidade pode ser definido como sendo o índice de concordância global  $C(x_z, x_y)$  afetado pelos índice de discordância  $D_j(x_z, x_y)$ :

se  $F(x_Z, x_Y) = \{ j \in F \mid D_j(x_Z, x_Y) > C(x_Z, x_Y) \} = 0$  então:  $d(x_Z, x_Y) = C(x_Z, x_Y)$

se

$$F(x_Z, x_Y) \neq 0 \quad \text{então} \quad d(x_Z, x_Y) = C(x_Z, x_Y) \prod_{j \in F(x_Z, x_Y)} \frac{1 - D_j(x_Z, x_Y)}{1 - C(x_Z, x_Y)}$$

A hierarquia de preferências é estabelecida a partir do índice de credibilidade, por meio de um algoritmo de classificação que constrói duas pré-ordens de classificação, uma descendente e outra ascendente, cuja agregação permite obter a classificação final das alternativas.

## PROGRAMAÇÃO DE COMPROMISSO (COMPROMISE PROGRAMMING)

Essa técnica identifica soluções não dominadas, as quais são as mais próximas da solução ideal para algumas distâncias medidas. A solução ideal pode ser definida como:

$$Z^* = (Z_1^*, Z_2^*, Z_3^*)$$

onde,  $Z_i^*$  é o melhor valor para cada objetivo  $i$ .

Uma medida  $L_p$  é usada para estabelecer quão perto a alternativa está do ponto ideal.

$$L_p = \left\{ \sum_i \left[ \frac{Z_i^* - Z_i}{Z_i^* - Z_i^{**}} \right]^p \right\}^{p-1}$$

onde

$Z_i^{**}$  é o pior valor da  $i$ -ésima função objetivo;

$w_i$  é o ponderador correspondente.

A alternativa com distância mínima com respeito a p é selecionada como a solução de compromisso.

### **PROGRAMAÇÃO POR COMPOSIÇÃO (COMPOSITE PROGRAMMING)**

A programação por composição, uma extensão da programação de compromisso. A técnica é capaz de analisar um problema multidimensional  $R^n$ , contudo, será muito difícil de visualizar a solução além da dimensão  $R^3$ . A metodologia usada na programação por composição para superar este problema é dividir um processo de projeto complexo em seus elementos componentes, em termos de indicadores básicos e grupos de indicadores em sucessivas quantidades limites de indicadores no nível mais alto.

A estrutura do modelo de programação por composição é formada pelo agrupamento de indicadores básicos, em quantidades baseadas em características similares, ou pelo desejo de contrastar características diferentes através de análises de intercâmbio, sendo que o conjunto inicial de indicadores resulta em indicadores básicos agrupados. O segundo nível de indicadores é formado pelo primeiro grupamento de indicadores de nível, com níveis subseqüentes, formados por grupamentos contínuos até o mais alto indicador de nível ter sido especificado. Nesse caso de projeto de rede, este nível final pode ser ilustrado através do intercâmbio entre precisão e custo.

Eis o cálculo da distância, composta com uma discreta estrutura, começando com a normalização do impacto relação  $R(x)$ . Usando o máximo ( $R_1$ ) e o mínimo ( $R_s$ ), o valor normalizado de R, definido como S, pode ser computado como:

$$S_i = \frac{R - R_s}{R_1 - R_s} \qquad S_i = \frac{R_1 - R}{R_1 - R_s}$$

onde a fórmula selecionada depende de se o máximo ( $R_1$ ) é o melhor ou pior valor. É importante notar que esta normalização causará a coordenada (1,1) como sendo o ponto ideal em toda análise de intercâmbio. Então, sempre, ainda que o objetivo possa ter minimizado o critério, o grau para o qual é minimizado, é refletido pelo grau em que  $S_i$  é igual a 1.0. Considerando-se a programação por compromisso, eliminado do fator  $p$ , no peso  $w$ , tem-se a seguinte distância por composição para o  $j$ -ésimo grupo de indicadores:

$$L_j = \left[ \sum_{i=1}^{n_j} w_{ij} S_{ij}^{p_j} \right]^{\frac{1}{p_j}}$$

onde

$L_j$  é a distância composta para o primeiro grupo nível  $j$  para indicadores básicos;

$n_j$  é o número de indicadores básicos no grupo  $j$ ;

$w_{ij}$  ponderador que expressa a importância relativa do índice básico  $i$  no primeiro grupo nível  $j$ , tal que sua soma é igual a um;

$S_{ij}$  valor normalizado do índice básico  $i$  no primeiro grupo nível dos indicadores básicos;

$p_j$  fator balanço entre indicadores para o grupo  $j$ .

## **PROGRAMAÇÃO DE COMPROMISSO FUZZY (FUZZY COMPROMISE PROGRAMMING): PCF-I**

Na programação de compromisso fuzzy (Zeleny, 1973, 1982), uma distância  $l_p$ -normal é baseada em técnicas multiobjetivo. Nessa programação, assim como em várias outras técnicas de algoritmos multiobjetivos, utilizam-se métodos de conversão de problemas multiobjetivos em problemas de otimização escalar simples, os problemas resultantes, porém são de otimização Fuzzy.

São elaboradas funções objetivo para cada uma das alternativas. Números fuzzy são definidos em um intervalo apropriado, do qual os pontos extremos representam o ideal e o pior caso. Valores de funções-objetivo medidos numericamente podem também ser dados na forma de números fuzzy refletindo a imprecisão da avaliação. O conjunto de funções-objetivo, valores fuzzy (difuso) ou dicotômico (crisp)  $\hat{f}_i(a)$  é, dessa maneira, definido. Onde  $a \in D$  é o conjunto de alternativas possíveis,  $i = 1, \dots, I$  onde  $I$  é o número de funções objetivo, e o sinal  $\hat{\ }^{\wedge}$  denota números fuzzy.

O próximo passo é a definição do ponto ideal e do ponto pior. O ponto ideal representa uma ou mais “melhores saídas” possíveis para cada objetivo. O pior ponto representa uma ou mais “piores saídas” possíveis para as ainda possíveis soluções. Para cada solução possível, o valor da função objetivo não pode (por definição) exceder os valores representados pelo ponto ideal, e não podem (por definição) ser menores que os valores correspondentes ao pior ponto. Pontos Ideal e pior podem ser definidos como valores dicotômicos (crisp) ou valores fuzzy, havendo possibilidade de esses dois pontos ocorrerem nos casos em que o significado de uma ideal ou pior situação não pode ser diretamente quantificado. Pontos ideal e pior são definidos da seguinte maneira:

vetor  $(y_1, \dots, y_I)$  é um ponto ideal, e  $(w_1, \dots, w_I)$  é um pior ponto se para cada  $i = 1, \dots, I$

$y_i$  e  $w_i$  são números fuzzy.

se  $\mu_{y_i}(y_i^*) = 1$  e  $\mu_{w_i}(w_i^*) = 1$ , então

$w_i^* \leq t_i \leq y_i^*$  para  $\forall u \in D \wedge \forall t_i$  tal que  $\mu_{f_i(u)}(t_i) > 0$

e

se  $t_i < w_i^*$  então  $\mu_{w_i}(t_i) = 0$



se  $y_i^* < t_i$  então  $\mu_{y_i}(t_i) = 0$

onde  $\mu$  denota uma função componente.

A programação de compromisso fuzzy é aplicada com base nas funções objetivo, pontos extremos e funções componentes. Como na programação de compromisso dicotômica (crisp), os objetivos são escalados e mapeados em um intervalo fechado  $[0,1]$ . A  $i$ -ésima função fuzzy de graduação é dada por:

$$F(\hat{y}_i, \hat{w}_i, \hat{f}_i(a)) = \frac{\hat{y}_i - \hat{f}_i(a)}{\hat{y}_i - \hat{w}_i}$$

fazendo as respectivas funções componentes de  $F$ ,  $\hat{y}_i$ ,  $\hat{w}_i$ ,  $\hat{f}_i(a)$  serem denotadas como  $\mu_F(t)$ ,  $\mu_{y_i}(y)$ ,  $\mu_{w_i}(w)$ ,  $\mu_{f_i}(f)$ , onde os argumentos  $t$ ,  $y$ ,  $w$ ,  $f$  são variáveis substitutas (dummy), e  $0 \leq t \leq 1$  por construção. Então o número fuzzy  $F$  do lado esquerdo da equação anterior pode ser calculado de duas maneiras diferentes:

- 1) pela aritmética fuzzy, efetuam-se as operações indicadas;
- 2) pela direta aplicação da extensão do princípio no produto cartesiano dos conjuntos definindo  $\hat{y}_i$ ,  $\hat{w}_i$ ,  $\hat{f}_i(a)$ :

$$\mu_F(t) = \begin{cases} \sup \{ \min (\mu_{y_i}(y), \mu_{w_i}(w), \mu_{f_i}(f)) \text{ se } t = (y-f)/(y-w) \\ 0 & \text{nos demais} \end{cases}$$

Conforme citam Bardossy e Duckstein (1992) na exposição que fazem do método, a segunda maneira é computacionalmente mais adequada e resulta em menor número de funções componentes que a primeira.

A função F é calculada pela aplicação direta do princípio da extensão, como um número fuzzy dependendo somente em a para cada objetivo i:

$$\hat{g}_i(a) = F(\hat{y}_i, \hat{w}_i, \hat{f}_i(a))$$

então, o máximo do mínimo de funções componentes do produto cartesiano:

$$(\mu_{y2}(y), \mu_{w2}(w), f_2(a=A))$$

deve ser encontrada no plano (w,y), ao longo do segmento de linha representando a equação:

$$t = \frac{y - f}{y - w}$$

dentro do domínio possível.

Uma vez que o número fuzzy  $\hat{g}_i(a)$  tenha sido obtido para todo objetivo i, PCF-I, em analogia com a programação de compromisso dicotômica (crisp), consiste em encontrar a ação a na qual minimiza a expressão:

$$\hat{I}_P(a)^P = \sum_{i=1}^I \alpha_i (\hat{g}_i(a))^P$$

Utilizando os ponderadores, os resultados da PCF-I são obtidos usando como critério números fuzzy aritméticos e a técnica de ordenamento fuzzy de Dubois e Prade (1980) e de Chen (1985) ou Kaufmann e Gupta (1988).

## **PROGRAMAÇÃO DE COMPOSIÇÃO FUZZY (FUZZY COMPOSITE PROGRAMMING): PCF-II**

Esta programação é uma extensão da técnica de programação de compromisso fuzzy (Bardossy et alli, 1985). Nesta técnica, a distância medida é construída para distâncias com diferentes  $p$  valores. Assim como na técnica PCF-I, são também utilizadas técnicas de conversão. A PCF-II é uma técnica de programação multiobjetivo multinível ou hierárquica, na qual o algoritmo de compromisso fuzzy PCF-I, apenas desenvolvido, é aplicado sucessivamente a níveis diferentes, até o problema multiobjetivo geral com  $I$  objetivos ser transformado em um problema objetivo singular (único). Esta transformação é feita passo por passo, reagrupando, para cada nível (representando os níveis de saída), subconjuntos  $A_{i,k}$  e funções objetivo, para formar um novo objetivo composto  $g_{i,k}(a)$ . O número da função objetivo até o nível  $n$ , tem de ser menor que o número de funções objetivo até o nível  $n-1$ . Isso assegura que, em um número finito de passos, um problema objetivo singular seja definido. Usando estas funções objetivo, uma seqüência de problemas multiobjetivos é gerada. A primeira, uma indicação Nível 1, é o problema de programação de compromisso normalizada (ver programação de compromisso fuzzy -PCF-I).

Fazendo o nível 1 subconjunto  $A_{1,i} = \{i\}$   $i = 1, \dots, I$ , onde o número de subconjuntos  $L(1)$  é igual  $I$ . O problema 1 é:

$$\min(\hat{g}_{1i}(a) = \hat{g}_i(a). \text{para } i = 1, \dots, L(1). e. a \in D)$$

A regra para construir recursivamente problemas subsequentes é definida da seguinte forma: após ter definido n-1 níveis de subconjuntos e objetivos - um número  $L(n)$  de n nível subconjuntos  $A_{nk}$ , são definidos então, como para executar várias condições:

1) O  $A_{nk}$ -s deve ser subconjunto do conjunto original de objetivos;

$$A_{n,k} \subset \{1, \dots, I\}$$

Nenhum novo objetivo pode ser introduzido durante os cálculos;

2) Eles são aos pares desunidos (pairwise disjoint):

$$A_{n,i} \cap A_{n,j} = \emptyset \text{ se } i \neq j$$

Dessa maneira, não haverá a contagem de qualquer dos objetivos duas vezes.

3) Sua união contém todos objetivos possíveis

$$\bigcup_{i=1}^{L(n)} A_{n,i} = \{1, \dots, I\}$$

então nenhum objetivo será esquecido.

4) A nova partição divide menos que a partição prévia:

se  $j \leq L(n-1)$  que  $\exists i$  tal que  $A_{n-1,j} \subset A_{n,i}$

5) A n-ésima partição contém um menor número de subconjuntos que n-1:

$$L(n) < L(n-1)$$

A função objetivo (a qual deverá ser minimizada) até o nível n é definida como:

$$\hat{g}_{n,i}(a) = \left( \sum_{j \in A_{n,j}} \alpha_{n,j} \hat{g}_{n-1,j}(a)^{p_{n,i}} \right)^{\frac{1}{p_{n,i}}}$$

onde os ponderadores  $\alpha_{n,j}$  formam um conjunto combinação convexo:

$$0 \leq \alpha_{n,j} < 1$$

$$\sum_{j \in A_{n,i}} \alpha_{n,j} = 1$$

Os expoentes (então chamados de fatores de balanço)  $p_{n,j}$  deverão satisfazer:

$$1 \leq p_{n,j} < +\infty$$

Os ponderadores  $\alpha_{n,j}$ , deverão ser definidos em ordem, para refletir a importância do objetivo indexado  $n,j$  (Técnicas para encontrar esses ponderadores podem ser encontradas, por exemplo, em Goicoechea et al, 1982). Os fatores de balanço refletem a permutabilidade entre distâncias para pontos ideais e para objetivos ao longo da mesma classe; como estabelecido previamente, para os valores  $p=1$ , média para toda compensação. Valores da funções fuzzy  $\hat{g}_{n,i}(a)$  são calculados usando o princípio da extensão da mesma maneira como para a técnica PCF-I. Através dos passos acima, até uma função objetivo singular final

ter sido empreendida, é necessário comparar os resultados, os quais, como no caso de PCF-I, são um problema de otimização fuzzy.

## **MÉTODO DE ORGANIZAÇÃO POR ORDENAÇÃO DE PREFERÊNCIAS (A PREFERENCE RANKING ORGANIZATION METHOD) - PROMETHEE**

Baseado em Brans e Vincke (1985), Gobbetti e Barros (1993) apresentam o método PROMETHEE, como vê-se a seguir. Esse método, semelhantemente ao método Electre, estabelece uma estrutura de preferência entre alternativas discretas. Assim, define-se, para cada critério, uma função de preferência dada por:

$$P(a,b) = \begin{cases} 0 & \text{se } f(a) \leq f(b) \\ p[f(a) - f(b)] & \text{se } f(a) > f(b) \end{cases}$$

onde a e b são duas alternativas possíveis e f é um critério a ser maximizado.

Essa função indica a intensidade da preferência de a sobre b, baseada no desvio entre os valores de f. Ela é determinada separadamente para cada critério, e seu valor está compreendido entre 0 (indiferença) e 1 (preferência total).

A função de preferência é representada graficamente pela função H(x), onde:

$$H(x) = \begin{cases} P(a,b) & x \geq 0 \\ P(b,a) & x \leq 0 \end{cases}$$

e

$$x = f(a) - f(b)$$

No método PROMETHEE, o problema da classificação das alternativas é tratado definindo-se o índice de preferência global de a sobre b,  $\pi(a,b)$ , para cada  $a,b \in X$  (sendo X o conjunto total das alternativas).

Estabelecendo-se uma função de preferência  $P_i(a,b)$  para cada critério  $i=1,2,\dots,n$ , calcula-se  $\pi(a,b)$  por:

$$\pi(a,b) = \sum_{i=1}^n \alpha_i P_i(a,b)$$

onde  $\alpha_i, i=1,2, \dots, n$ , são pesos associados a cada critério. Este índice é uma medida da preferência de a sobre b, em relação a todos os critérios.

O índice de preferência global possibilita a avaliação de cada alternativa,  $a \in X$ , mediante a consideração das duas quantidades seguintes:

Fluxo de importância positivo:  $\phi^+(a) = \sum_{x \in X} \pi(a,x)$

Fluxo de importância negativo:  $\phi^-(a) = \sum_{x \in X} \pi(x,a)$

A classificação das alternativas é feita com base nos valores de  $\phi^+(a)$  e  $\phi^-(a)$ .

Considerando-se, para cada  $a \in X$ , o fluxo de importância líquido, como sendo:

$$\phi(a) = \phi^+(a) - \phi^-(a)$$

escolhe-se a alternativa com o maior valor de  $\phi$  como a preferida.

### 3.4.4 TÉCNICAS QUE REQUEREM UMA ARTICULAÇÃO PROGRESSIVA DE PREFERÊNCIAS

Essas técnicas requerem que, em vários estágios do desenvolvimento, sejam incorporadas as preferências dos tomadores de decisão. Algumas alternativas serão, a seguir, comentadas.

#### MÉTODO POR PASSOS (STEP METHOD) - STEM

Desenvolvido por Benayoun et alli (1971 apud Cohon, 1978), o método, como uma técnica interativa, deve convergir para a melhor solução de compromisso, dado que o número de interações não ultrapasse o número de objetivos. Esse método é baseado em uma noção geométrica de ótimo, isto é, na distância mínima para a solução ideal, com modificações destes critérios derivados das reações dos tomadores de decisão em relação à solução obtida.

Minimize  $d'_\infty$

sujeito a  $w_k [M_k - Z_k(x)] - d'_\infty \leq 0$  onde  $k = 1, 2, \dots, p$

$$d'_\infty \geq 0$$

$$x \in F_d^i$$

onde  $x^k$  a solução para  $k(s)$  derivados das otimizações individuais;

$Z_k$  são os objetivos ;

$M_k$  é o valor máximo para os  $k(s)$  objetivos:  $M_k = Z_k(x^k)$ ;

$d'_\infty$  é a distância da solução ideal;



$F_d^i$  é a região possível até a interação  $i$ .

$w_k$  é o ponderador definido por

$$w_k = \frac{\alpha_k}{\sum_k \alpha_k}$$

e

$$\alpha_k = \frac{M_k - n_k}{M_k} \left[ \sum_{j=1}^n (c_j^k)^2 \right]^{-\frac{1}{2}}$$

onde

$n_k$  é o valor mínimo para o  $k$ -ésimo objetivo, isto é, o menor número na  $k$ -ésima coluna da tabela de pagamentos;

$c_j^k$  são os coeficientes da função objetivo, assumindo que cada objetivo é uma função linear:

$$Z_k(x) = c_1^k x_1 + c_2^k x_2 + \dots + c_n^k x_n, k = 1, 2, \dots, p$$

Restrições

$$x \in F_d^i$$

$$Z_k(x) \geq Z_k(x^i) \quad \forall k \neq k^*$$

$$Z_{k^*} \geq Z_{k^*}(x^i) - \Delta Z_{k^*}$$

Cohon (1978), apresenta o seguinte algoritmo:

1) construa uma tabela de pagamentos otimizando os  $p$  objetivos individualmente, encontrando

$M_k$ , e  $n_k$ ,  $k = 1, 2, \dots, p$

2) encontre o valor de  $\alpha_k$ ,  $k = 1, 2, \dots, p$ . ajuste  $i = 0$ .

- 3) encontre  $w_k$  e resolva o problema de minimização, chamando a solução obtida  $x(i)$ . [ $F_d^0 = F_d$ ]
- 4) Apresente ao tomador de decisão  $Z_k [x(i)] \forall k$ :
- a) se a solução for satisfatória, pare; a solução de compromisso é  $x(i)$ ;
  - b) se a solução não for satisfatória e  $i < (p - 1)$ , vá para o passo 5.
  - c) se a solução não for satisfatória e  $i = (p-1)$ , pare. Realize outros procedimentos se for necessário.
- 5) O tomador de decisão define  $k^*$  e  $\Delta Z_{k^*}$ , respectivamente objetivos com valores satisfatórios e a quantidade em que os objetivos satisfatórios devem ser alterados para melhorar os objetivos não satisfatórios. Se o tomador de decisões não puder fazê-lo, pare. Execute outros procedimentos. De outra forma, vá para o passo 6);
- 6) Defina uma nova região de soluções possíveis  $F_d^{i+1}$  que satisfaça as restrições. Ajuste  $\alpha_{k^*} = 0$  e vá para o passo 3). Incremente  $i$  de uma unidade.

## **MÉTODO INTERATIVO DE PONDERAÇÃO (INTERACTIVE WEIGHTING METHOD)**

Este método consiste em, a cada passo da pesquisa, serem estabelecidas preferências pelas soluções para determinar uma nova estimativa da solução. Aproximação interativa desenvolvida por Geoffrion e examinada por Feinberg (apud Haimes et alli, 1975), que usa funções de indiferença para determinar a solução preferida de utilidade máxima.

Geoffrion (1967 apud Cohon 1978) desenvolveu um algoritmo que procede mais diretamente para a solução de compromisso ótima para uma determinada função de utilidade. Ela evita o desenvolvimento da representação do conjunto não inferior inteiro. O problema de Geoffrion considera

maximize  $U[Z_1(x), Z_2(x)]$

sujeito a  $x \in F_d$

onde  $U[ ]$  é uma função de utilidade bi-dimensional definida sobre dois objetivos;

$F_d$  é um conjunto convexo.

O particular esquema de ponderação que Geoffrion usa é a solução de

maximize  $Z(x, \alpha) = \alpha Z_1(x) + (1-\alpha)Z_2(x)$

sujeito a  $x \in F_d$

na qual os ponderadores em  $Z_1$  e  $Z_2$  devem somar 1.

### **3.5 ESCOLHA DA FUNÇÃO OBJETIVO E ALGORITMO DE SOLUÇÃO**

A escolha da técnica depende da percepção do analista, dos resultados requeridos e, obviamente, da sua preferência por determinados procedimentos matemáticos (Cohon, 1978). Essa escolha depende dos custos de processamento, do tipo de resultados obtidos, e da complexidade do problema.

A adequação da escolha do tipo de algoritmo é um importante procedimento para a solução de um problema multiobjetivo, principalmente no que diz respeito a representatividade da técnica escolhida em relação ao problema real. Teclé (1992) apresenta quatro das possíveis conseqüências desse tipo de adequação da representação:

- 1) a solução resultante para situação técnica não suficientemente representativa pode ser inadequada ou insatisfatória;
- 2) técnicas utilizáveis (useful techniques) podem ser julgadas inapropriadas, como acontece no caso do ELECTRE;
- 3) a inadequação pode, conseqüentemente, resultar em decisões erradas, incorrendo em perdas em termos de tempo, energia e dinheiro;
- 4) uma escolha não adequada pode desencorajar usuários potenciais para a aplicação de técnicas de análise multiobjetivo para problemas globais reais.

Alguns critérios qualitativos que, em geral, são considerados quando da escolha da técnica, segundo Bogardi e Duckstein (1992), são:

- a) transparência da estrutura do modelo;
- b) divisão da autoridade de tomada de decisão do grupo de tomadores de decisão;
- c) flexibilidade para absorver mudanças de atitudes do grupo de tomadores de decisão;
- d) colocar o mínimo possível de “stress” no grupo de tomadores de decisão em busca de respostas simples e decisão na interação.

Sendo assim, quatro grupos de critérios devem ser considerados para a escolha da técnica a ser utilizada, segundo Tecle (1992):

- 1) com relação ao tomador de decisões ou do analista: este critério diz respeito ao grau de conhecimento do tomador de decisões ou do analista em relação ao problema, à técnica, à metodologia, etc;
- 2) com relação à técnica ou algoritmo: parâmetros, facilidade de uso da técnica, tempo de processamento necessário, etc;

- 3) com relação ao problema: possibilidade de uso de critérios não numéricos, se possui número finito de alternativas, se é um problema dinâmico, se é não linear, etc;
- 4) com relação às soluções: consistência das soluções, estabilidade dos resultados com respeito a mudanças nos valores dos parâmetros, confiança nos resultados obtidos, etc.

Por fim, alguns passos que devem ser seguidos para avaliar problemas multiobjetivo de gerenciamento de recursos em bacias hidrográficas. Esses passos, segundo Teclé (1992), são:

- 1) definição dos objetivos desejados, ou propósitos, que a técnica de decisão multiobjetivo deverá atender;
- 2) seleção do critério de avaliação que diz respeito às capacidades técnicas dos objetivos (modelagens e restrições) (obtidos no passo 1) ;
- 3) listagem e especificação de técnicas de decisão multiobjetivo disponíveis para atingir os objetivos desejados;
- 4) determinação da capacidade técnica ou dos níveis de performance da técnica que dizem respeito ao critério de avaliação por cenário e solução usada em cada técnica;
- 5) construção de uma matriz de avaliação (técnicas versus ordem de critérios), elementos dos quais representam as capacidades de técnicas alternativas em termos dos critérios selecionados (obtidas no passo 4);
- 6) análise da performance da alternativa da técnica de análise multiobjetivo especificada no passo 3 e aplicada no passo 4);
- 7) execução da análise de sensibilidade nas técnicas de análise multiobjetivo para testar sua robustez (estabilidade) com relação a mudanças em parâmetros e preferências estruturais dos tomadores de decisão e, então, selecionar a técnica mais confiável.

Para a obtenção da técnica de programação, Teclé (1992) apresenta um algoritmo baseado na programação por composição (Teclé, 1988 apud Teclé, 1992) que permite que se faça esta escolha. No primeiro nível, diferentes  $L_p$ -normas, conforme definido mais adiante, são aplicadas para checar uma composição usando cada um dos quatro grupos de critérios e, então, uma diferente  $L_p$ -norma é aplicada para proceder o intercâmbio entre estes quatro grupos. Um ordenamento de preferências finais das alternativas técnicas de análise multiobjetivo sob condições é, então, alcançada. As  $L_p$ -normas,  $\Phi_k$  para cada das  $k(k=1, \dots, K)$  agregadas para grupos de critérios, são:

$$\Phi_k = \left\{ \sum_{i=1}^{I_k} \rho_k \alpha_{ik} \left[ \frac{d_{ik}^* - d_{ijk}}{d_{ik}^* - d_{ik}^{**}} \right]^{P_k} \right\}^{\frac{1}{P_k}}$$

onde:

$d_{ijk}$  é a performance das alternativas  $j, j= 1, \dots, j$ , em termos de critérios  $i, i=1, \dots, I_k$ , no grupo de critério  $k, k= 1, \dots, K$  ;

$I_k$  é o número de critérios por grupo de critérios;

$\rho_k$  é o parâmetro da programação de compromisso;

$\alpha_{ik}$  é o peso particular associado com o critério  $i$  e ao grupo de critérios  $k$ ;

$d_{ik}^*$  e  $d_{ik}^{**}$  são determinados utilizando-se as seguintes equações;

$$d_{ik}^* = \max (d_{ijk})$$

$$d_{ik}^{**} = \min (d_{ijk})$$

Uma vez que o conjunto das  $L_p$ - distâncias em cada grupo de critérios  $k$  é determinado, a função objetivo composta,  $G$ , para a técnica de análise multiobjetivo do problema selecionado, pode ser obtida usando-se:

$$G = \left[ \sum_{k=1}^K \beta_k \Phi_k^q \right]^{\frac{1}{q}}, \text{ para } K$$

e

$$\sum_{k=1}^K \beta_k = 1, \text{ para } K$$

onde:

$\beta_k$  é o peso do grupo de critérios  $k$ , e  $q$  é o parâmetro de intercâmbio grupo inter-critério.

### 3.6 EXEMPLOS DE APLICAÇÃO DA ANÁLISE MULTIOBJETIVO

A solução para os problemas existentes na bacia do rio dos Sinos passa pela determinação de alternativas de implantação de estações de tratamento de efluentes. Em situações similares a encontrada no rio dos Sinos, existem alguns poucos exemplos de aplicação da análise multiobjetivo. Curiosamente, não foi encontrado na literatura nenhum trabalho nessa linha por durante quase doze anos. Seguindo a linha da análise multiobjetivo, para os exemplos que serão citados, observa-se que os objetivos considerados variam de acordo com a abordagem dada ao problema. A determinação destes objetivos é feita a partir das prioridades, consideradas em cada problema, e das técnicas de programação em análise multiobjetivo utilizadas para a sua solução. Serão destacadas, a seguir, as técnicas aplicadas e os objetivos considerados nestes exemplos, o que nos orienta sobre as formas adotadas de

programação multiobjetivo e a respeito das maneiras como foram estabelecidas as prioridades:

- a) Kansakar e Polprasert (1983) utilizaram o Método de Programação com a Definição Prévia dos Objetivos (*goal programming method*) para o gerenciamento integrado de águas servidas. Foram considerados três objetivos: minimizar o custo, o impacto na qualidade da água e o impacto no uso da terra. Foram estudados três casos, obtidos atribuindo-se a diferentes prioridades aos três objetivos considerados;
- b) Burn e Mcbean (1985) utilizaram dois objetivos: qualidade da água e os custos associados. Como esses dois objetivos são obviamente conflitantes, foi necessário maximizar (minimizar) um objetivo. Enquanto provê um dado nível de satisfação do segundo objetivo (isto é, qualidade maximizada, sujeita a restrição de que uma quantidade de dinheiro dispendido no tratamento não excedesse uma quantidade “C”). Um valor apropriado para C foi determinado por exame do conjunto não-inferior de soluções, como definido pela variação paramétrica de C, na solução do problema determinístico.
- c) Para a seleção multiobjetivo de alternativas de gerenciamento para efluentes, Teclé et alli (1988) aplicaram técnicas de programação de compromisso, o ELECTRE I e a teoria dos jogos cooperativos. Eles utilizaram cinco objetivos, quais sejam: proteção da água subterrânea, qualidade do efluente, reutilização de águas servidas, confiabilidade do sistema e recursos necessários;
- d) Dimitrova e Kosturkov (1988), minimizam a soma dos custos de remoção de resíduos para alguns valores de descargas. A poluição do rio é reduzida pelo tratamento de águas residuárias em estações de tratamento. Então, o problema relacionou-se com encontrar a combinação de estágios de tratamento de águas residuárias para diferentes valores de descargas. Desta maneira, uma combinação é garantir uma qualidade requerida da água no rio para um custo total mínimo de tratamento das águas residuárias, em parte ou em toda bacia de contribuição.



- e) Em Flug et alli (2000) a análise multiobjetivo é descrita para quantificar a qualitativa taxação de objetivos para aspectos natural, cultural, recreacional e recursos ambientais, e para por em perigo a proteção de espécies. A informação é então usada em uma análise de tomada de decisão multicritério para acessar os impactos e negociação que existem para várias alternativas de gerenciamento dos recursos hídricos. O genérico método de média dos pesos introduzido por Goicoechea et alli (1982 apud Flug et alli, 2000) onde a taxa de valores da matriz são medidas do aumento da vontade, foi utilizado.
- f) Para a bacia do rio Paraíba do Sul, Pessôa et alli (2003) utilizaram o método de Análise Hierárquica sendo que foram considerados quatro objetivos, quais sejam: Qualidade da Água, avaliou as alternativas segundo a Demanda Bioquímica de Oxigênio –DBO nos tramos da bacia hidrográfica, através de um modelo analítico; Saúde, avaliou as alternativas pela opinião de especialista com acesso a dados de baixa qualidade em que o conhecimento, pelo avaliador, da região da bacia, das morbidades envolvidas e dos bancos de dados de saúde consultados, representam um componente importante no resultado da avaliação; Receptividade Política do Município, a avaliação das alternativas é baseada apenas na opinião e conhecimento do avaliador, no caso membros do Comitê, eventualmente apoiando-se em alguns dados numéricos esparsos. Custo, depois de ordenados os trechos pelos três primeiros objetivos é que se estimou o custo de cada trecho.

## 4 METODOLOGIA

A metodologia que foi adotada visou estabelecer uma forma de implementação do planejamento multiobjetivo para procurar equacionar o conflito entre os diversos objetivos existentes na busca da solução ótima para o planejamento de unidades de gerenciamento.

Tratando de uma abordagem multiobjetivo para hierarquização de etapas de implantação de tratamento de efluentes para a despoluição do rio dos Sinos, buscou-se modelar cada objetivo em suas reais escalas de valores e complexidade. Para tal procurou-se usar metodologias conhecidas para a modelagem de cada objetivo da bacia. A novidade é o casamento delas tornando o problema mais complexo de ser resolvido e buscando a adequação de técnicas de programação multiobjetivo para a solução do mesmo, sem ter que reduzir a modelagem dos objetivos a escalas comuns entre si de avaliação. Para tal usou-se antigos conceitos de implementação do Planejamento Multiobjetivo como eram em sua origem

A metodologia foi aplicada à bacia do rio dos Sinos para escolha de alternativas para implantação de estações de tratamento de esgoto. A solução foi pela elaboração de uma função de compromisso que serviu como auxílio à tomada de decisão para a definição da melhor alternativa, da seguinte forma:

a) Identificação e/ou definição de condicionantes para a bacia do rio dos Sinos :

- levantamentos de critérios para o estabelecimento de prioridades;
- definição de objetivos a serem atingidos para a bacia ;
- critérios de avaliação dos objetivos e definição de restrições;

b) Função de compromisso:

- identificação das características do problema de modelagem da função de compromisso;

- definição do método de escolha da técnica de programação multiobjetivo a ser utilizada para a formulação do problema da bacia do rio dos Sinos;
- escolha da técnica de programação multiobjetivo a ser utilizada para a formulação do problema da bacia do rio dos Sinos;
- formulação do problema da bacia do rio dos Sinos;
- elaboração da função de compromisso;
- elaboração de relações para trabalhabilidade da função de compromisso;
- variação das prioridades estabelecidas para objetivos da bacia e elaboração de alternativas de investimento;
- definição de preferências.

Na seqüência cada etapa foi descrita.

#### **4.1 IDENTIFICAÇÃO E/OU DEFINIÇÃO DE CONDICIONANTES PARA A BACIA DO RIO DOS SINOS**

Para identificar e/ou definir condicionantes envolvidos (técnico, econômico, social, ambiental, incertezas, etc) foi feito um levantamento e/ou verificação dos mesmos junto à bacia do rio dos Sinos.

##### **4.1.1 LEVANTAMENTOS DE CRITÉRIOS PARA O ESTABELECIMENTO DE PRIORIDADES**

O levantamento de critérios para o estabelecimento de prioridades é um importante passo da metodologia e foi feito para a bacia do rio dos Sinos e apresentado no item 2.3. O

levantamento foi norteado por trabalhos e estudos existentes na bacia e por regulamentações. Obtendo-se à partir deste levantamento, as seguintes conclusões:

A definição por prioridades pode seguir várias linhas. De acordo com a prioridade estabelecida será o impacto sentido em termos de melhorias na qualidade da água na bacia do rio dos Sinos. Verifica-se que os principais critérios para a definição das prioridades são os parâmetros indicadores da qualidade da água, a localização, os usos, a capacidade de autodepuração e os custos envolvidos.

Quanto aos parâmetros indicadores da qualidade da água, é indicado que, para um trabalho que não tenha a pretensão de detalhar a qualidade da água do rio dos Sinos, bastaria que fossem considerados os seguintes parâmetros: coliformes fecais, a demanda bioquímica de oxigênio - DBO e o oxigênio dissolvido - OD. A definição também poderá se dar de acordo com a preferência da fonte de poluição. Estas definições teriam influência na localização a ser adotada.

A localização das fontes poluidoras será determinante para a definição das prioridades e na forma de tratamento a ser implementado, seja pontual ou não-pontual. De acordo com a ocorrência das fontes poluidoras, implicará ainda se o tratamento será feito mais a montante ou a jusante na bacia. Isto seguirá também os usos existentes na bacia.

Os usos são o principal parâmetro utilizado pela resolução nº 20/86 do CONAMA para o enquadramento de rios, portanto, são determinantes para definir os limites da qualidade da água desejada em cada trecho. Foi necessário, desta forma, o estabelecimento dos usos prioritários que influenciaram na definição das estações de tratamento a serem implementadas para se atingir as exigências de cada uso. Buscou-se a adequação da implementação das estações de tratamento aos usos ocorrentes na bacia e às suas exigências de qualidade da água. Estas definições, no entanto, estão vinculadas a capacidade de autodepuração do rio.

A capacidade de autodepuração também está relacionada com as características do escoamento do curso d'água. Estas características de escoamento dizem respeito à capacidade

de aeração, hidrodinâmica, oxigênio dissolvido, vazão, e outras. Ela influencia no estabelecimento de prioridades na medida em que a capacidade de suporte do rio ou a qualidade desejada para um determinado trecho é superada. Buscou-se, desta forma implementar as estações de tratamento de modo a respeitar estes limites desejados. Porém, é importante que sejam considerados os custos de implantação, manutenção e operação das estações.

Os custos foram o principal limitante para a definição das estações de tratamento a serem implementadas. Levando-se em consideração que deveria ser empregado o mínimo em termos de tratamento, tem-se que um incremento no custo a ser investido deveria ser tal que os incrementos em termos de benefícios trazidos justifiquem este aumento no custo.

#### **4.1.2 DEFINIÇÃO DE OBJETIVOS A SEREM ATINGIDOS PARA A BACIA**

A definição de objetivos a serem atingidos para a bacia foi norteada pelos critérios para o estabelecimento de prioridades. Desta forma, foram identificados quatro objetivos para a bacia do rio dos Sinos: econômico, qualidade da água, social e ambiental. Eles foram modelados da seguinte forma:

##### **OBJETIVO ECONÔMICO**

Quanto aos objetivos econômicos, foi considerado o máximo a ser investido de acordo com a solução proposta para a bacia, buscando a definição do valor ótimo a ser investido. Foram utilizadas funções de custo tendo como variável a vazão da estação de tratamento ( $C=f(Q)$ ), apresentadas em Rio Grande do Sul (1996). A partir dos custos de tratamento das fontes de poluição, para cada sub-bacia da divisão adotada em Rio Grande do Sul (1996),

foram ajustadas, pelo método de mínimos quadrados, uma relação entre o custo unitário anual, que é o custo total anual dividido pela vazão ( $m^3/dia$ ), e a vazão em ( $m^3/dia$ ).

## **OBJETIVO QUALIDADE DA ÁGUA**

Quanto aos objetivos qualitativos, para os recursos hídricos, foi utilizado o modelo IPH5 (ver item 3.2.1 em Objetivos Quantitativos e Qualitativos em Projetos de Recursos Hídricos) desenvolvido por Tucci (1978) e já ajustado à bacia por Moretti (1980) e Garcia (1997). O modelo foi aplicado ao trecho que apresenta maiores problemas em termos de qualidade da água, que está a jusante de Campo Bom. No trecho em questão, o rio está sujeito a remanso do rio Jacuí. Foram simulados os parâmetros de qualidade da água: demanda bioquímica de oxigênio - DBO, coliformes fecais e oxigênio dissolvido - OD. O modelo foi aplicado considerando a discretização em 21 seções transversais, ao longo do trecho de estudo e considerando 96 intervalos de tempo de 2 horas. Existe uma contribuição de montante pela cabeceira e cada seção transversal e trecho entre as seções tem suas características e contribuições laterais.

## **OBJETIVO SOCIAL**

Quanto aos objetivos sociais, foram buscadas formas de atender aos anseios sociais da bacia do rio dos Sinos no que diz respeito à melhor localização para implementação das estações de tratamento. Considerando o que foi discutido na Revisão Bibliográfica quanto aos indicadores que os índices de desenvolvimento socioeconômico utilizam, este objetivo foi relacionado com a densidade populacional. A concentração populacional ao longo trecho de estudo foi dividida em classes analíticas fuzzy, de acordo com a intensidade da ocupação.

Para o objetivo social, tem-se então que uma maior densidade populacional implicará em que haja um maior comprometimento social da solução adotada.

A divisão da concentração populacional da bacia ao longo do trecho de estudo em classes fuzzy foi baseada na densidade demográfica, obtida pelo censo da Fundação Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística –IBGE (apud Rio Grande do Sul, 1995) em Sinopse Preliminar do Censo Demográfico do Rio Grande do Sul em 1991. Deve-se considerar que as classes apenas correlacionam um trecho do rio dos Sinos com outro e não devem ser generalizadas. Pela mancha de ocupação urbana observa-se que há uma maior concentração populacional junto a foz e esta vai se esparçando à medida que vai-se seguindo para montante. Onde existe maior concentração populacional a classe fuzzy considerada foi chamada de “Mais Moradores”. À medida que diminui a concentração populacional as classes foram chamadas de “Moradores”, “ $\pm$  Moradores” e “Poucos Moradores”.

Para a divisão nas classes foi considerada uma estimativa da concentração populacional para cada uma das seções de discretização do trecho em estudo (usada para o objetivo Qualidade da Água) o que indicou a necessidade de divisão em quatro classes. Adotaram-se classes fuzzy por serem os limites de passagem de uma classe para outra não claramente definidos, ou seja, a concentração populacional não é bruscamente variada com o limite dos municípios. As classes foram consideradas pela passagem de uma densidade para outra ao longo do trecho em estudo quando foi considerada a pertinência “um” e a aproximação dos limites das classes foi considerada a diminuição da pertinência. Foi considerado que onde começa a redução da pertinência em uma classe, inicia-se a pertinência na outra classe. Para a passagem da classe “Mais Moradores” para a classe “Moradores” foi considerada a distância de quatro seções de discretização do rio dos Sinos, considerando a variação da concentração populacional de Esteio para Sapucaia do Sul. Para as demais classes foi considerada a variação em duas seções de discretização por ser a variação de densidade

mais rápida devido a proximidade dos limites dos municípios, passagem de um município a outro, e da redução da intensidade da mancha de ocupação populacional.

## **OBJETIVO AMBIENTAL**

Quanto aos objetivos ambientais, estes foram baseados na análise de impacto ambiental para ETEs. Porém, a solução proposta para a bacia do rio dos Sinos, detalhada em Rio Grande do Sul (1996), não define os locais aonde serão implantadas as ETEs. Então, a modelagem deste objetivo considerou o impacto ambiental no meio ambiente urbano, que será sentido pelas populações vizinhas próximas. Considerando que a probabilidade de que ocorra o impacto ambiental negativo é maior quanto maior a densidade demográfica, a modelagem também foi relacionada às classes analíticas fuzzy de divisão da concentração populacional ao longo do trecho do rio dos Sinos estudado.

## **RESUMO**

Em resumo, tem-se que as funções objetivos, para cada um dos objetivos, foram obtidas da seguinte forma:

$f(\text{objetivo econômico}) = \text{valor obtido através das relações de custo } C=f(Q)$

$f(\text{objetivo qualidade água}) = \text{valor obtido pela simulação do IPH5}$

$f(\text{objetivo social}) = \text{valor estabelecido pela pertinência nas classes fuzzy}$

$f(\text{objetivo ambiental}) = \text{valor estabelecido pela pertinência nas classes fuzzy}$

onde  $f_i(\text{objetivo})$  é o valor das funções objetivo



### **4.1.3 CRITÉRIOS DE AVALIAÇÃO DOS OBJETIVOS E DEFINIÇÃO DE RESTRIÇÕES**

De acordo com os objetivos definidos, foram estabelecidos os valores de variação possíveis ou desejáveis para cada um dos objetivos em questão. Os critérios de avaliação e restrições tiveram como finalidade definir um espaço factível para a variação dos objetivos.

Matematicamente, estabeleceu-se o valor máximo e mínimo que cada objetivo podem assumir, ou seja:

$$\text{mínimo } f_i(\text{objetivo}) \leq f_i(\text{objetivo}) \leq \text{máximo } f_i(\text{objetivo})$$

## **4.2 FUNÇÃO DE COMPROMISSO**

Levando-se em consideração os condicionantes e alternativas de tratamento existentes, foi encontrada uma função de compromisso para a bacia do rio dos Sinos. Esta função foi de minimização, sujeita a restrições socio-econômicas, ambientais, etc. O que se pretende é que a função permita aos tomadores de decisão buscarem a melhor solução de compromisso para um determinado cenário. É necessário, neste momento, esclarecer uma dúvida que poderá surgir: não se deve confundir o problema da bacia do rio dos Sinos, que está se buscando resolver pelo planejamento multiobjetivo, com o problema da modelagem da função de compromisso, que também tem objetivos e restrições específicas.

### **4.2.1 IDENTIFICAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS DO PROBLEMA DE MODELAGEM DA FUNÇÃO DE COMPROMISSO**

As características dizem respeito ao problema de modelagem da função de compromisso, à facilidade de uso do modelo, ao conhecimento requerido para o seu uso e

facilidade de aprendizagem, à confiabilidade dos resultados obtidos com a técnica aplicada. Foram identificadas as características do problema de modelagem da função de compromisso. Esta identificação se fez necessária para que se tivesse uma idéia das formas de procedimento a serem utilizadas. Foram considerados critérios que dizem respeito ao grau de conhecimento do tomador de decisões ou do analista em relação ao problema, à técnica, à metodologia; parâmetros, facilidades de uso do técnica, tempo de processamento necessário, e outros; possibilidade de uso de critérios não numéricos, se possui número finito de alternativas, se é um problema dinâmico, se é não linear, e outros; e com relação às soluções, se são consistentes, estabilidade dos resultados com respeito a mudanças nos valores dos parâmetros, confiança nos resultados obtidos, etc.

#### **4.2.2 DEFINIÇÃO DO MÉTODO DE ESCOLHA DA TÉCNICA DE PROGRAMAÇÃO MULTI OBJETIVO A SER UTILIZADA PARA A FORMULAÇÃO DO PROBLEMA DA BACIA DO RIO DOS SINOS**

A escolha da técnica foi baseada nas características do problema de modelagem da função de compromisso, buscando-se a técnica mais simples, que, no entanto, atenda às necessidades do problema. A técnica de programação por composição que foi utilizada por Teclé (1992) (ver item 3.5 Escolha da Função Objetivo e Algoritmo de Solução), foi a escolhida para ser utilizada.

#### **4.2.3 ESCOLHA DA TÉCNICA DE PROGRAMAÇÃO MULTIOBJETIVO A SER UTILIZADA PARA A FORMULAÇÃO DO PROBLEMA DA BACIA DO RIO DOS SINOS**

Procedeu-se, então, a escolha da técnica de programação multiobjetivo a ser utilizada para a formulação do problema da bacia do rio dos Sinos. A definição da técnica a ser utilizada na formulação deste problema foi um passo muito importante e sensível na busca da solução. Isso ocorreu porque todo o desenvolvimento do trabalho se baseou nesta definição.

Consistiu em estabelecer um ordenamento das técnicas preferidas a serem empregadas para o equacionamento do problema, pela técnica de Programação por Composição. Foi escolhido o **Método por Restrição** ( Constraint Method), primeira técnica selecionada.

O método por restrições consiste em otimizar um objetivo enquanto os outros são restritos a valores pré-estabelecidos. Dessa forma, restringe-se o conjunto de soluções possíveis a serem otimizadas. Matematicamente falando, consiste em restringir o número de valores que cada um dos objetivos pode assumir.

#### **4.2.4 FORMULAÇÃO DO PROBLEMA DA BACIA DO RIO DOS SINOS**

Uma vez definida a técnica a ser aplicada, procedeu-se a formulação do problema da bacia do rio dos Sinos, buscando configurar o mesmo em suas várias condicionantes. Buscou-se interrelacionar os objetivos e restrições de acordo com o método de formulação adotado.

De acordo com a técnica escolhida é que se deu a formulação do problema da bacia do rio dos Sinos. Cada técnica tem um procedimento específico, que influenciou na elaboração de como o problema será trabalhado. Tem-se, então, o estabelecimento das relações entre os objetivos e o peso de cada um deles com relação a solução do problema. De uma forma geral, este estabelecimento consistiu em:

minimizar  $f(\text{objetivo econômico})$

maximizar  $f(\text{objetivo qualidade água})$

maximizar  $f(\text{objetivo social})$

minimizar  $f(\text{objetivo ambiental})$

#### **4.2.5 ELABORAÇÃO DA FUNÇÃO DE COMPROMISSO**

De acordo com a formulação do problema da bacia do rio dos Sinos, foi elaborada a função de compromisso que buscou a congregação dos objetivos da bacia e restrições a esses objetivos. A função de compromisso buscou espelhar, da melhor forma possível, a relação entre as possíveis alternativas de solução para a bacia. A função de compromisso estabeleceu a interrelação das variáveis de decisão com as suas respectivas valorações, para a busca das soluções não inferiores para um determinado cenário estabelecido. A função de compromisso buscou modelar, o mais completo possível, o problema de tomada de decisão real.

A função de compromisso buscou, da melhor forma possível, estabelecer uma relação entre os objetivos, ou seja:

minimizar  $\{ \sum f_i(\text{objetivo}) \}$  relativo a perdas

maximizar  $\{ \sum f_i(\text{objetivo}) \}$  relativo a ganhos

sujeito a  $\text{mínimo } f_i(\text{objetivo}) \leq f_i(\text{objetivo}) \leq \text{máximo } f_i(\text{objetivo})$

onde  $f_i(\text{objetivo})$  é o valor das funções objetivo.

Sendo que foi adotada como a seguir se apresenta:

$$F(\text{objetivos}) = \min \sum \alpha f(\text{objetivo})$$

onde  $F(\text{objetivos})$  é a função de compromisso,  $\alpha$  é o peso atribuído a variável de decisão, que será negativo caso a variável de decisão seja maximizada; e  $f(\text{objetivo})$  é a função objetivo ou variável de decisão.

#### **4.2.6 ELABORAÇÃO DE RELAÇÕES PARA TRABALHABILIDADE DA FUNÇÃO DE COMPROMISSO**

Considerando a forma de trabalho com o Método por Restrições, para a elaboração de relações de trabalhabilidade da função de compromisso, foi buscada a melhor forma de manejo da função de compromisso, pela elaboração de tabelas e gráficos. A facilitação do uso da função de compromisso visou a uma melhor forma de permitir que várias alternativas e prioridades fossem testadas para a busca do conjunto de soluções não inferiores para a bacia do rio dos Sinos.

#### **4.2.7 VARIAÇÃO DAS PRIORIDADES ESTABELECIDAS PARA OBJETIVOS DA BACIA E ELABORAÇÃO DE ALTERNATIVAS DE INVESTIMENTO**

Uma vez formulado o problema da bacia do rio dos Sinos e elaborada a função de compromisso foi buscado o conjunto de soluções não inferiores para o mesmo, de forma a atender aos objetivos e restrições para a bacia. Pela variação das prioridades, por parâmetros de referência para a qualidade da água ou fontes poluidoras, por exemplo, foram verificadas as suas respectivas interferências nos resultados finais do conjunto de soluções não inferiores. Foram elaboradas possíveis alternativas de investimento para a bacia, de forma a que os benefícios obtidos justificassem os investimentos a serem feitos.

#### **4.2.8 DEFINIÇÃO DE PREFERÊNCIAS**

Inicialmente, a proposta do trabalho era a de gerar uma alternativa de solução para a bacia, porém, observou-se que inúmeras seriam as possibilidades a serem simuladas. Diante da dificuldade de propor limites de montantes de investimento e/ou formas de tratamento dos parâmetros de referência, e para que as proposições fossem mais compatíveis com a realidade da bacia, resolveu-se consultar o Comitê do Rio dos Sinos – Comitesinos, como tomador de decisão. Por intermédio do seu então presidente, o engenheiro Paulo Renato Paim, conseguiu-se uma reunião com a Comissão Técnica de Acompanhamento – CPA quando ficou clara a preocupação do Comitê com a SAÚDE.

## **5 APLICAÇÃO À BACIA DO RIO DOS SINOS**

A aplicação à bacia do rio dos Sinos seguiu os passos previstos na metodologia: primeiramente foram identificados e/ou definidos os condicionantes para a bacia, depois foi elaborada a função de compromisso.

A intenção foi elaborar, para a bacia do rio dos Sinos, uma função de compromisso que possa ser entendida e utilizada por possíveis tomadores de decisão, como auxílio na elaboração de alternativas de investimento que visem a melhoria da qualidade da água do rio dos Sinos e atenda ainda a outros objetivos, tais como: comprometimento social, minimização do impacto ambiental, e outros.

### **5.1 IDENTIFICAÇÃO E/OU DEFINIÇÃO DE CONDICIONANTES PARA A BACIA DO RIO DOS SINOS**

Foram identificados os condicionantes (objetivos e restrições) a que a modelagem do problema da bacia do rio dos Sinos estava sujeita. O levantamento foi norteado por trabalhos e estudos existentes na bacia e por regulamentações.

#### **5.1.1 DEFINIÇÃO DE OBJETIVOS A SEREM ATINGIDOS PARA A BACIA**

Conforme descrito na metodologia, foram estabelecidos critérios para o estabelecimento de prioridades e foram identificados quatro objetivos a serem atingidos para a bacia do rio dos Sinos. Os objetivos identificados foram: econômico, qualidade da água, comprometimento social e menor impacto ambiental. A seguir, cada objetivo foi modelado e

depois foram estabelecidos os limites máximo e mínimo de valores que cada objetivo pode assumir.

## OBJETIVO ECONÔMICO

Para o objetivo econômico, foi considerado o máximo a ser investido na solução proposta para a bacia em Rio Grande do Sul (1996), e buscada a definição do valor ótimo a ser investido. Foram utilizadas funções de custo que tivessem como variável a vazão da estação de tratamento ( $C = f(\text{vazão})$ ) apresentadas em Rio Grande do Sul (1996). Para cada fonte poluidora foi estabelecida uma relação entre o custo unitário anual, que é o custo total anual dividido pela vazão ( $\text{m}^3/\text{dia}$ ), e a vazão em ( $\text{m}^3/\text{dia}$ ). A relação foi obtida para custo versus vazão e custo versus DBO, que serviu como parâmetro para a variação do custo quando foi alterada a vazão ou a DBO (ver figuras 5.1 e 5.2). O custo total anual inclui os custos de investimento amortizado para 20 anos, a uma taxa de 12%, e custos de manutenção e operação. A partir das relações, foram ajustadas, por mínimos quadrados, funções para o custo, que são apresentadas nas equações abaixo:

$$\text{Resíduos Sólidos Domésticos} \Rightarrow C.\text{Unit. Anual} \left( \frac{\text{US\$}}{\text{vazão}} \right) = 0,44$$

$$\text{População Urbana} \Rightarrow C.\text{Unit. Anual} \left( \frac{\text{US\$}}{\text{vazão}} \right) = 25,52$$

$$\text{Drenagem Pluvial Urbana} \Rightarrow C.\text{Unit. Anual} \left( \frac{\text{US\$}}{\text{vazão}} \right) = 10^{0,019[\log(\text{vazão})]^2 - 0,189 \log(\text{vazão}) + 1,656}$$



$$\text{Dessedentação de Animais} \Rightarrow C.\text{Unit. Anual} \left( \frac{\text{US\$}}{\text{vazão}} \right) = 10^{0,024[\log(\text{vazão})]^2 - 0,042 \log(\text{vazão}) + 0,859}$$

$$\text{População Rural} \Rightarrow C.\text{Unit. Anual} \left( \frac{\text{US\$}}{\text{vazão}} \right) = 83,67$$

$$\begin{aligned} \text{Efluentes Industriais} \Rightarrow C.\text{Unit. Anual} \left( \frac{\text{US\$}}{\text{vazão}} \right) &= 28,092[\log(\text{vazão})]^4 - 356,973[\log(\text{vazão})]^3 \\ &+ 1696,084[\log(\text{vazão})]^2 - 3549,737[\log(\text{vazão})] + 3155,612 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Fontes Difusas Rurais} \Rightarrow C.\text{Unit. Anual} \left( \frac{\text{US\$}}{\text{DBO}_5} \right) &= 0,0013\text{DBO}_5^3 - 0,082\text{DBO}_5^2 \\ &+ 1,506\text{DBO}_5 + 5,713 \end{aligned}$$

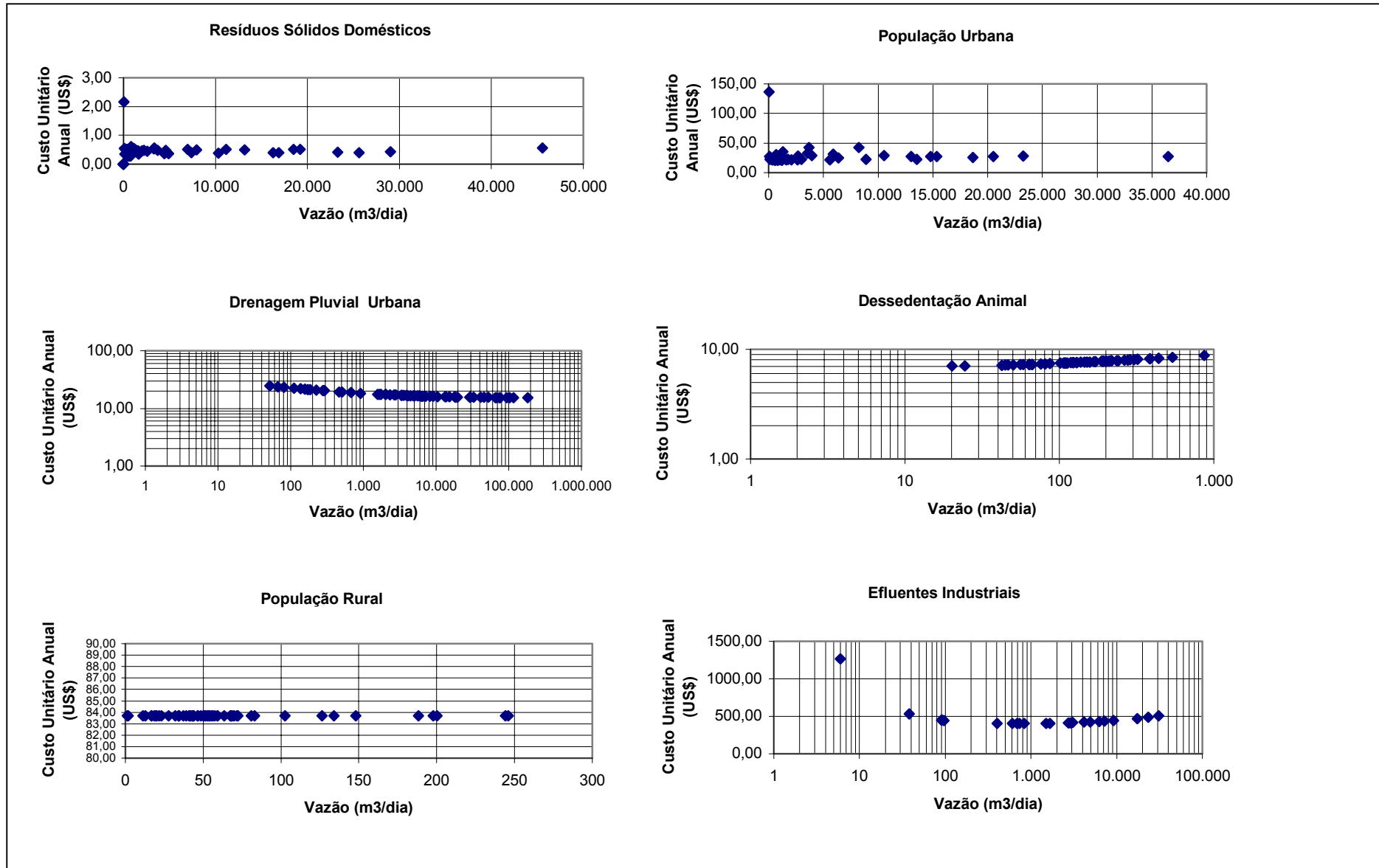


Figura 5-1 - Curvas Custo Unitário Anual (US\$) versus Vazão (m<sup>3</sup>/dia)

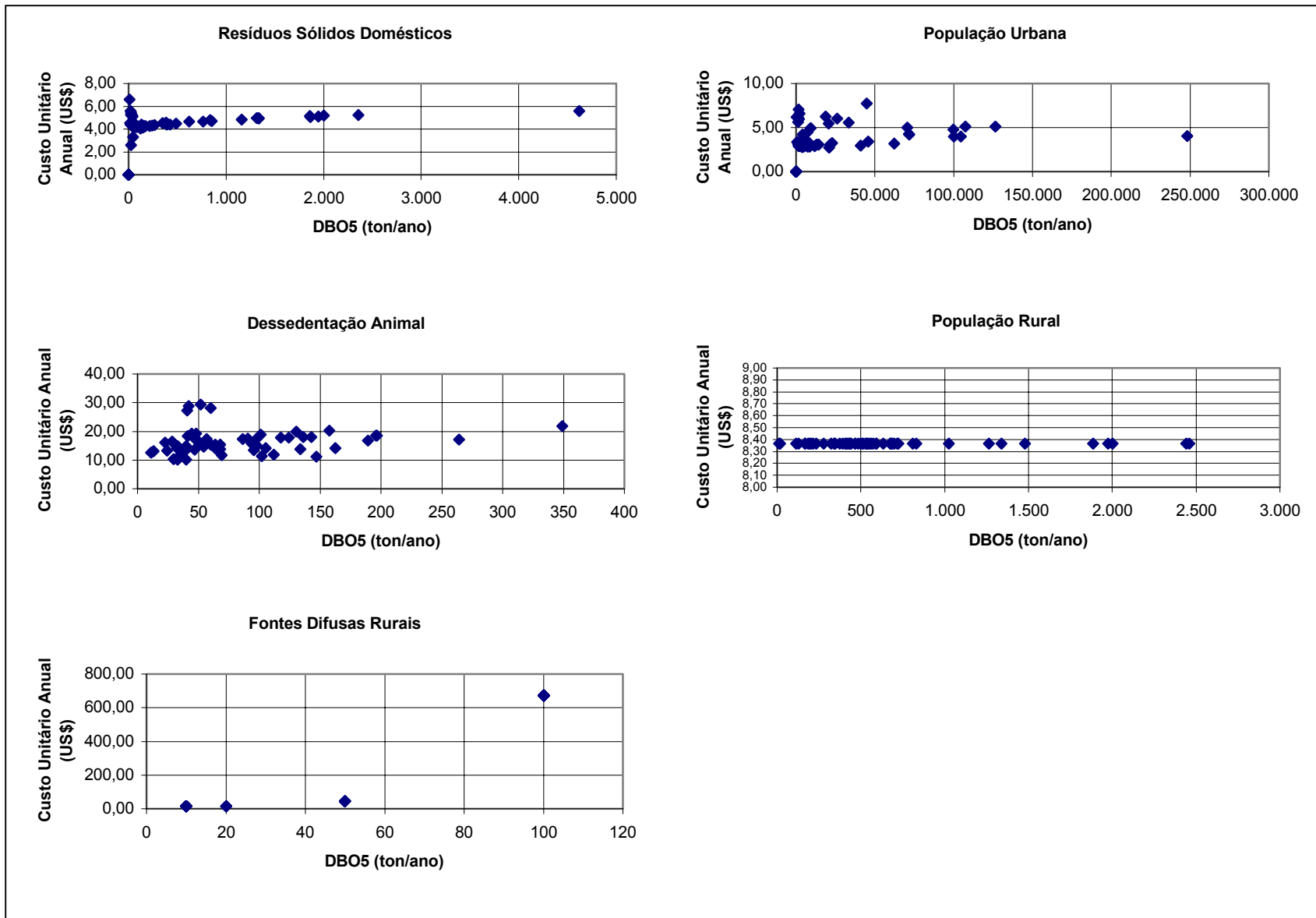


Figura 5-2 - Curvas Custo Unitário Anual (US\$) versus DBO<sub>5</sub>(ton/ano)

## OBJETIVO QUALIDADE DA ÁGUA

Conforme as prioridades estabelecidas pelos parâmetros indicadores da qualidade da água e capacidade de autodepuração, foi adotado o modelo hidrodinâmico e de qualidade da água IPH5, apresentado por Tucci (1978), como ferramenta para representar o objetivo de qualidade da água para o rio dos Sinos.

### AJUSTE DO MODELO IPH5 AO RIO DOS SINOS

O modelo foi aplicado ao trecho dos rio dos Sinos à jusante de Campo Bom. Esse trecho foi adotado por ser o que tem bons dados disponíveis para o ajuste e por ser o trecho onde ocorre a maior contribuição de efluentes. O ajuste adotado foi o feito por Garcia (1997). Na tabela 5.1, são encontrados os valores de contribuição lateral utilizados e as sub-bacias, e na figura 5.3, as localização das seções transversais.

O modelo IPH5 foi primeiramente rodado para regime permanente, para um nível de jusante, na sua foz, de 8,90m e, posteriormente, para o regime não permanente para níveis de jusante variando de 8,89 a 9,05 por meio de senóide calculada por Garcia (1997), que procura representar a variação da seiche real. O valor médio de seiche de 0,99, correspondente aos valores utilizados, tem uma probabilidade de excedência de 5% para os meses de dezembro a fevereiro segundo Zamanillo (1988 apud Garcia 1997). Para as duas situações, a condição de contorno de montante foi considerada constante e igual a  $14,43 \text{ m}^3/\text{s}$  que é a vazão média para a menor faixa de vazões, das sete faixas de vazões em que foram medidos os dados de qualidade de água considerados por Garcia (1997). Convém observar que a vazão utilizada é maior que a vazão mínima de sete dias para um tempo de retorno de 2 anos. A vazão foi adotada por ser muito baixa a probabilidade de ocorrer, concomitantemente, o evento crítico nas bacias do Sinos e do Guaíba.

Tabela 5-1 - Contribuições Laterais e valores adotados

Trecho	Sub-bacias	Distância (m)	Rugosid.(m/m)	k1 (l/dia)	k(coli l/dia)	Vazão (m3/s)	OD (mg/l)	DBO (mg/l)	Coli(NMP/100ml)
Cabeceira	(11) a (53)						6,75	1,93	2,70E+07
1-2	1/8(54)	3633	0,030	0,20	1,05	0,25	6,60	58,90	2,00E+06
2-3	(10)+1/8(54)	3633	0,030	0,20	1,05	0,25	6,60	58,90	1,30E+07
3-4	½(9)+3/4(54)	3633	0,030	0,20	1,05	0,25	6,60	58,90	2,00E+07
4-5	(8)+1/2(9)	3125	0,030	0,20	1,05	0,87	8,70	19,50	2,20E+07
5-6	(7)	3125	0,030	0,20	1,05	0,87	8,70	19,50	1,50E+07
6-7	1/3(55)	3125	0,030	0,20	1,05	0,87	8,70	19,50	5,20E+06
7-8	1/3(55)	3125	0,030	0,20	1,05	0,87	8,70	19,50	5,20E+06
8-9	(6)+1/3(55)	3500	0,030	0,20	1,05	0,18	8,70	154,90	2,20E+07
9-10	½(4)+(5)	3600	0,030	0,20	1,05	0,19	8,70	154,90	1,00E+07
10-11	½(4)	2400	0,030	0,20	1,05	0,28	8,70	6,50	1,80E+06
11-12		3200	0,030	0,20	1,05	0,37	8,70	6,50	0,00E+00
12-13	(3)+1/4(56)	2400	0,030	0,20	1,05	0,28	8,70	6,50	9,10E+06
13-14	¼(56)	3200	0,030	0,20	1,05	0,37	8,70	6,50	6,10E+06
14-15	½(56)	2200	0,030	0,20	1,05	0,26	8,70	6,50	1,20E+07
15-16		3800	0,030	0,20	1,05	0,44	8,70	6,50	0,00E+00
16-17		3400	0,030	0,20	1,05	0,40	8,70	6,50	0,00E+00
17-18	(2)	3300	0,030	0,20	1,05	0,10	8,40	48,70	1,30E+06
18-19	1/3(1)+(57)+ 1/2(58)	3100	0,030	0,20	1,05	0,10	8,40	48,70	3,80E+07
19-20	1/3(1)+1/2(58)	2900	0,030	0,20	1,05	0,09	8,40	48,70	1,60E+07
20-21	1/3(1)+(59)	3600	0,030	0,20	1,05	0,16	8,40	90,30	3,10E+07

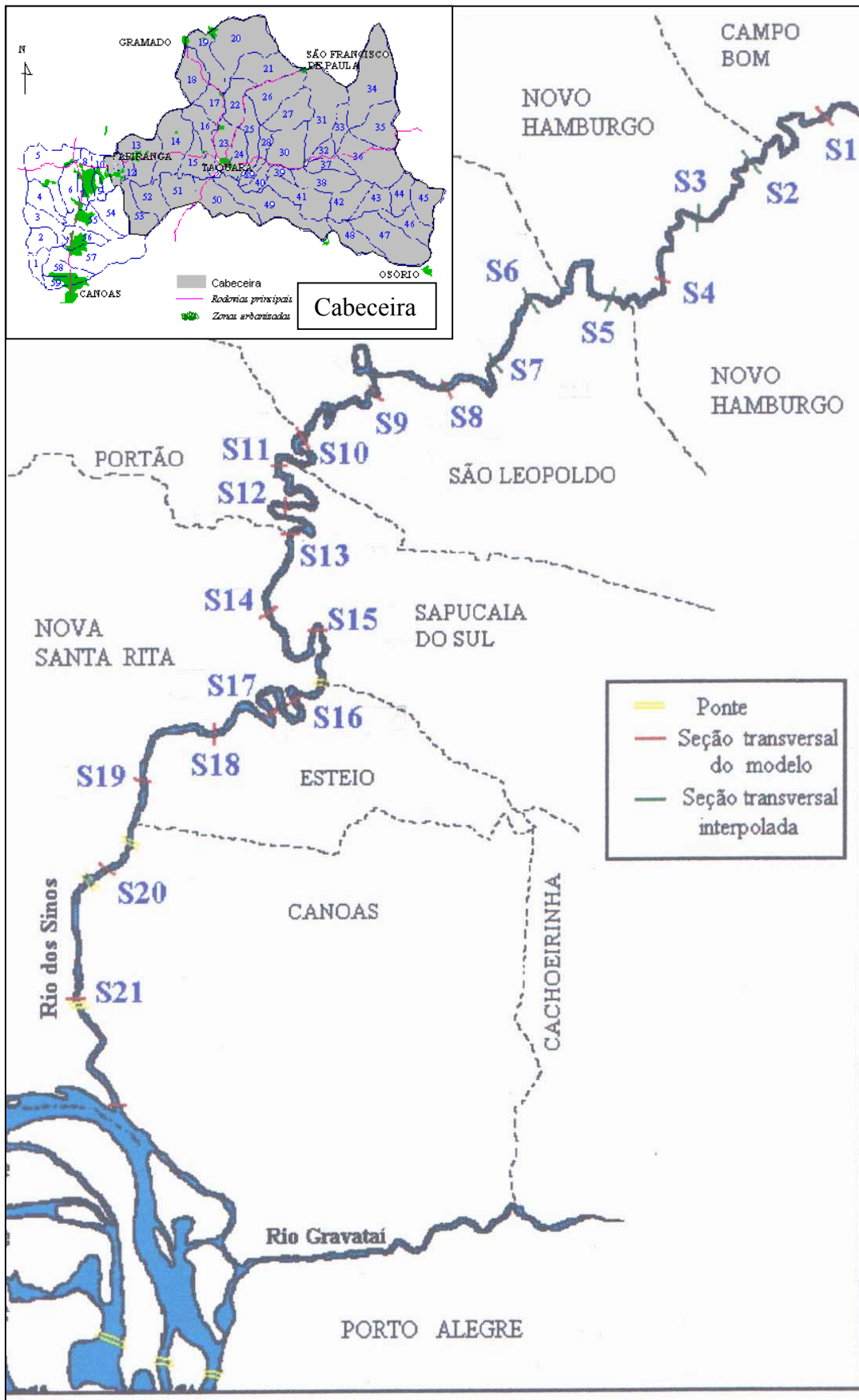


Figura 5-3 - Localização das seções transversais do modelo. Fonte: Garcia (1997)

Os valores obtidos, para níveis, vazões, oxigênio dissolvido, DBO e coliformes são coerentes com os valores observados para o rio dos Sinos, conforme Garcia (1997). Com a simulação em regime não-permanente, o escoamento é melhor representado, principalmente no que diz respeito a parte hidráulica do modelo, o refluxo que ocorre no rio dos Sinos pelo delta do Jacuí, o que permite que seja simulada a dinâmica do escoamento, no que diz respeito à sua capacidade de autodepuração para as piores situações. A simulação em regime não permanente representa o remanso que ocorre na foz, com uma conseqüente redução da vazão, o que piora as condições de diluição do rio. Se a vazão de montante for pequena o bastante para permitir o refluxo de uma vazão negativa no rio dos Sinos, a condição de diluição do rio será melhorada pelo refluxo próximo à foz e fará com que o rio tenha situação pior em seções mais à montante. Quanto aos parâmetros de qualidade da água, observa-se que, para o oxigênio dissolvido, ocorre uma depleção no valor; já para a DBO, por serem os valores muito baixos, a variação não chega a ser significativa, e para os coliformes, por serem os valores envolvidos muito grandes, a variação pode ser considerada pequena (ver tabela 5.2 e figuras 5.4 a 5.8). Sendo assim, o modelo é adequado para representar o objetivo de qualidade da água para o rio dos Sinos.

Tabela 5-2- Comparação entre as simulações de regime permanente e não permanente

Seção	Níveis (m)			Seção	Vazões (m <sup>3</sup> /s)			Seção	DBO (mg/l)			Seção	Col (NMP/100ml)			Seção	OD (mg/l)		
	RP 8,90	RNP 8,89	RNP 9,05		RP 8,90	RNP 8,89	RNP 9,05		RP 8,90	RNP 8,89	RNP 9,05		RP 8,90	RNP 8,89	RNP 9,05		RP 8,90	RNP 8,89	RNP 9,05
1	1,45	1,44	1,45	1	14,43	14,43	14,43	1	1,93	1,93	1,93	1	2,7E+07	2,7E+07	2,7E+07	1	6,75	6,75	6,75
2	1,59	1,59	1,59	2	14,43	14,43	14,43	2	1,88	1,88	1,88	2	2,4E+07	2,4E+07	2,4E+07	2	6,70	6,69	6,70
3	1,82	1,83	1,83	3	14,43	14,43	14,42	3	1,82	1,82	1,82	3	2,0E+07	2,0E+07	2,0E+07	3	6,64	6,64	6,64
4	1,71	1,71	1,71	4	14,43	14,43	14,42	4	1,79	1,79	1,79	4	1,9E+07	1,9E+07	1,9E+07	4	6,61	6,61	6,62
5	1,40	1,40	1,40	5	14,43	14,43	14,42	5	1,76	1,76	1,76	5	1,7E+07	1,7E+07	1,7E+07	5	6,58	6,58	6,58
6	1,46	1,49	1,48	6	14,43	14,42	14,41	6	1,72	1,71	1,71	6	1,5E+07	1,5E+07	1,5E+07	6	6,54	6,53	6,54
7	1,63	1,67	1,68	7	14,43	14,43	14,40	7	1,66	1,66	1,65	7	1,3E+07	1,3E+07	1,3E+07	7	6,48	6,49	6,47
8	1,88	1,94	1,94	8	14,43	14,39	14,43	8	1,59	1,58	1,59	8	1,0E+07	1,0E+07	1,0E+07	8	6,41	6,38	6,42
9	6,06	6,15	6,10	9	14,43	14,28	14,54	9	1,47	1,46	1,46	9	7,2E+06	7,1E+06	7,1E+06	9	6,29	6,28	6,29
10	2,99	3,05	3,05	10	14,43	14,35	14,52	10	1,41	1,41	1,40	10	6,0E+06	5,8E+06	5,8E+06	10	6,23	6,26	6,20
11	2,41	2,47	2,50	11	14,43	14,38	14,48	11	1,38	1,37	1,37	11	5,3E+06	5,1E+06	5,1E+06	11	6,20	6,19	6,18
12	2,49	2,58	2,54	12	14,43	14,32	14,55	12	1,33	1,31	1,32	12	4,4E+06	4,2E+06	4,3E+06	12	6,15	6,11	6,18
13	3,27	3,37	3,31	13	14,43	14,40	14,54	13	1,25	1,23	1,24	13	3,3E+06	3,1E+06	3,2E+06	13	6,07	6,05	6,07
14	2,91	2,99	3,00	14	14,43	14,88	13,91	14	1,16	1,16	1,14	14	2,4E+06	2,3E+06	2,3E+06	14	5,99	6,01	5,90
15	6,36	6,24	6,47	15	14,43	15,27	13,22	15	1,08	1,07	1,06	15	1,7E+06	1,6E+06	1,6E+06	15	5,90	5,91	5,84
16	4,51	4,55	4,63	16	14,43	16,08	11,85	16	0,94	0,93	0,92	16	9,8E+05	9,1E+05	9,1E+05	16	5,77	5,78	5,69
17	4,10	4,13	4,25	17	14,43	16,98	10,66	17	0,84	0,83	0,82	17	6,0E+05	5,5E+05	5,5E+05	17	5,67	5,68	5,60
18	5,75	5,76	5,90	18	14,43	17,81	9,86	18	0,73	0,72	0,71	18	3,3E+05	3,1E+05	3,0E+05	18	5,56	5,56	5,51
19	5,24	5,24	5,39	19	14,43	18,56	9,29	19	0,63	0,62	0,61	19	1,8E+05	1,7E+05	1,6E+05	19	5,46	5,46	5,41
20	4,75	4,74	4,90	20	14,43	19,16	8,83	20	0,55	0,54	0,53	20	7,2E+04	6,8E+04	5,9E+04	20	5,37	5,36	5,33
21	8,90	8,89	9,05	21	14,43	19,76	8,31	21	0,72	0,71	0,70	21	2,9E+05	2,7E+05	2,6E+05	21	5,54	5,56	5,48

RP é a simulação em regime permanente, RNP é a simulação em regime não permanente e os números são o nível de jusante do rio



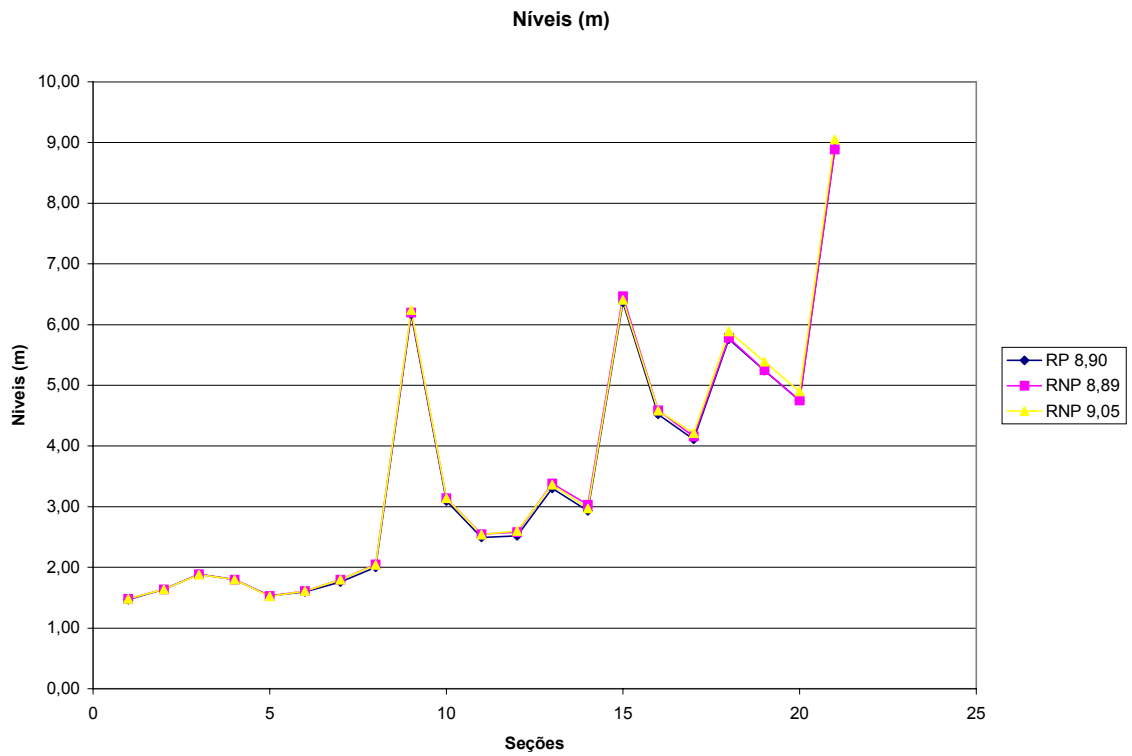


Figura 5-4 - comparação entre níveis regime permanente e não permanente

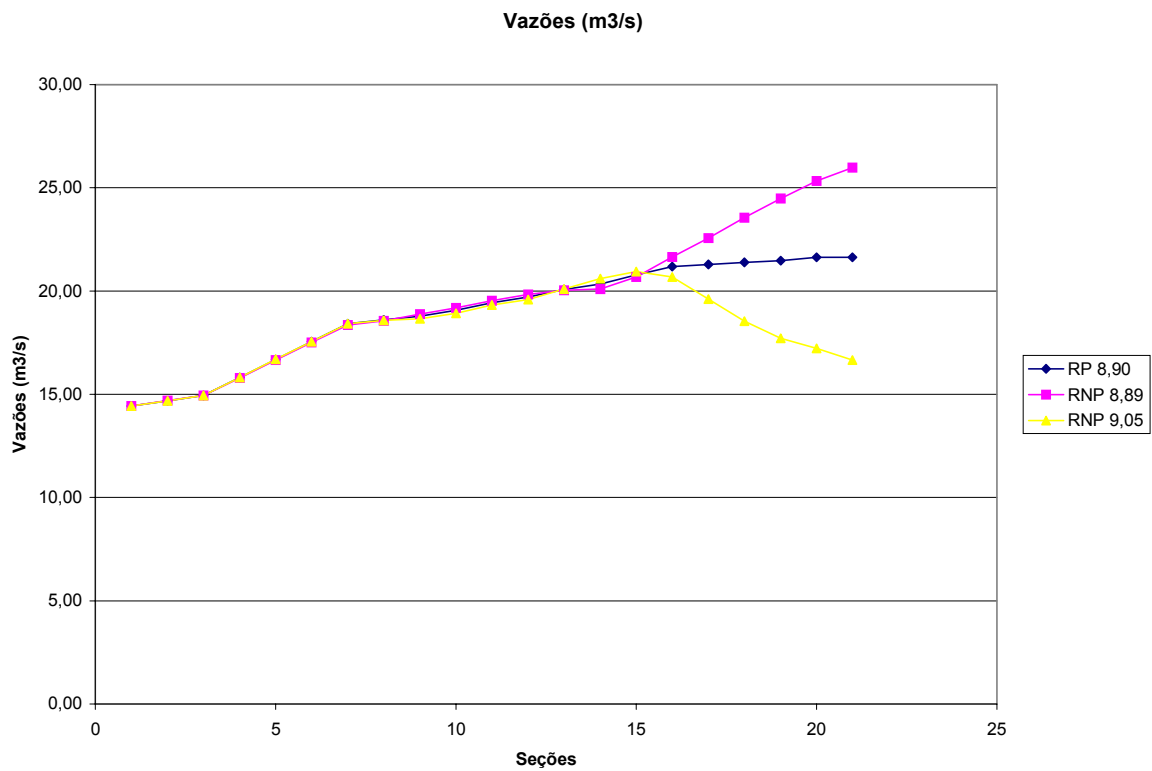


Figura 5-5- Comparação entre vazões para regime permanente e não permanente

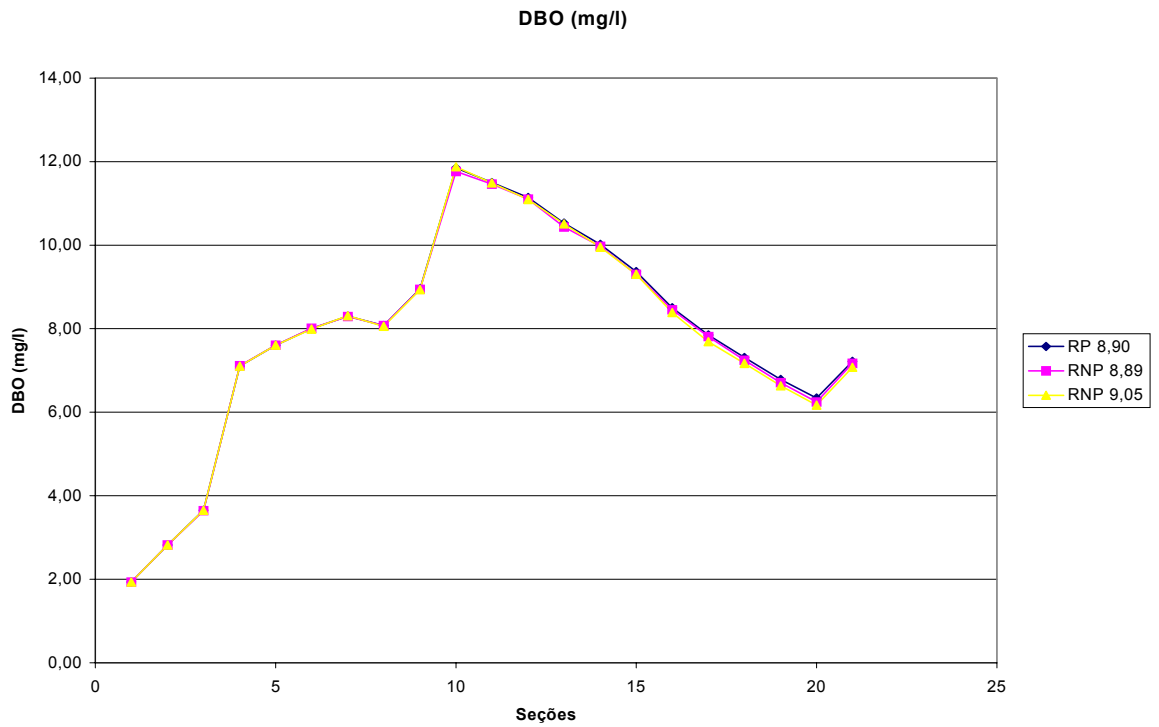


Figura 5-6- Comparação entre DBO (mg/l) entre regime permanente e não permanente

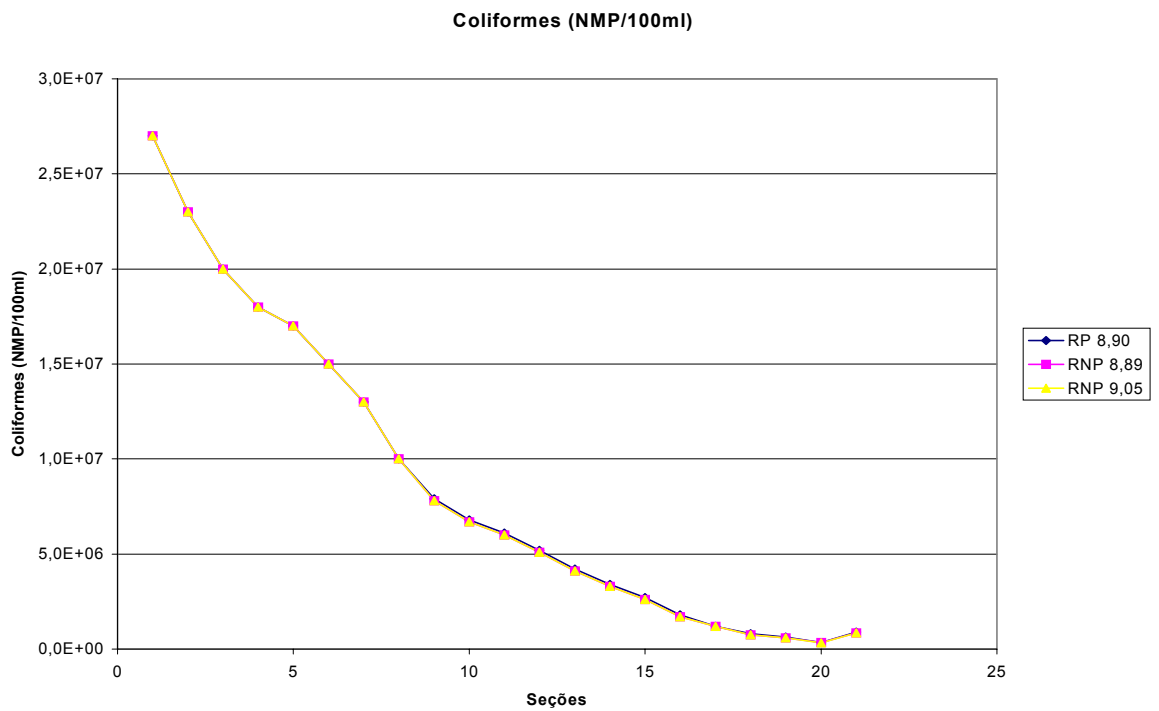


Figura 5-7 - Comparação entre coliformes (NMP/100ml) para regime permanente e não permanente

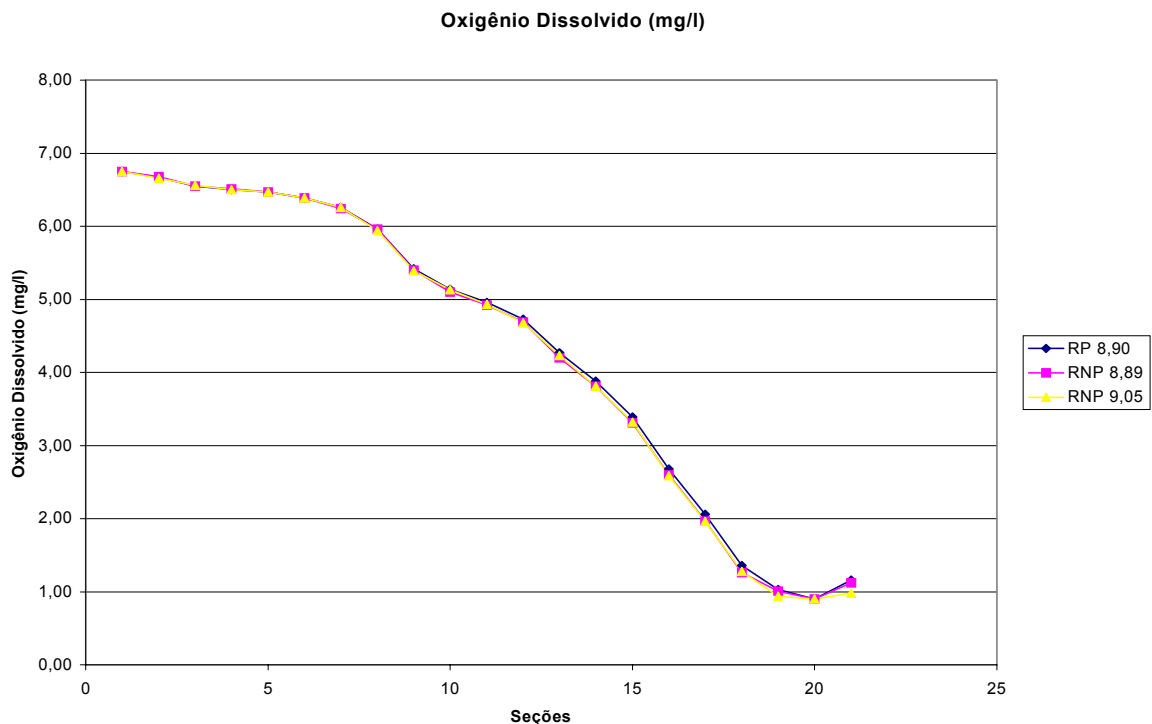


Figura 5-8- Comparação entre oxigenio dissolvido (mg/l) entre regime permanente e não permanente

## OBJETIVO SOCIAL

Buscou-se o maior comprometimento social para a bacia do rio dos Sinos no que diz respeito à melhor localização para implementação das estações de tratamento. Buscou-se também verificar o maior benefício social trazido pela alternativa de tratamento da poluição, como forma de tratamento e sua metodologia de implantação, por exemplo, e projetos que envolvem a mobilização da sociedade para fontes não pontuais e a viabilização de estações de maior porte para fontes pontuais.

Considerando o que foi discutido na revisão bibliográfica, tem-se que os índices de desenvolvimento, tais como o Índice de Desenvolvimento Socioeconômico – IDESE, da Fundação de Economia e Estatística – FEE (2003), utilizam como indicadores o número de domicílios atendidos com rede de água, o número de domicílios com rede de esgoto, a

expectativa de vida da população (o que indica boas condições de saneamento básico e meio ambiente saudável) entre outros. Levando isto em consideração, pode-se chegar a conclusão de que se uma intervenção, no sentido de melhorar o saneamento, for feita em uma região mais densamente habitada, o benefício social será maior.

Ainda considerando que o investimento nos três serviços de saneamento básico (água tratada, coleta de esgoto e tratamento de esgoto), conforme Motta e Mendes (1999), reduzem o custo para cada vida salva, tem-se que, se for aumentado o número de vidas salvas, ter-se-á um aumento da expectativa de vida da população. Isto é, devido a o aumento do investimento em saneamento, no caso, tratamento do esgoto, ter-se-ia uma conseqüente redução no número de casos de doenças de veiculação hídrica.

Para a modelagem deste objetivo de comprometimento social da solução para a bacia do rio dos Sinos, levou-se em consideração os fatores acima e o fato que, no trecho escolhido para o trabalho, que é de Campo Bom até a foz, as principais fontes de poluição são efluentes de população urbana e de resíduos sólidos, segundo Rio Grande do Sul (1996).

Tem-se então que, se houver um tratamento dos efluentes em áreas mais densamente urbanizadas, tem-se um maior comprometimento social da solução adotada. Há que se considerar também que quanto maior for a estação de tratamento, maior a economia de escala.

Levando-se em consideração a concentração populacional na bacia, pode-se estabelecer a seguinte função (figura 5.9 e equação abaixo) para a distribuição da população em relação aos trechos do rio dos Sinos. Deve-se alertar que esta distribuição é apenas de um trecho do rio em relação ao outro e não deve ser generalizada.

### Distribuição da População

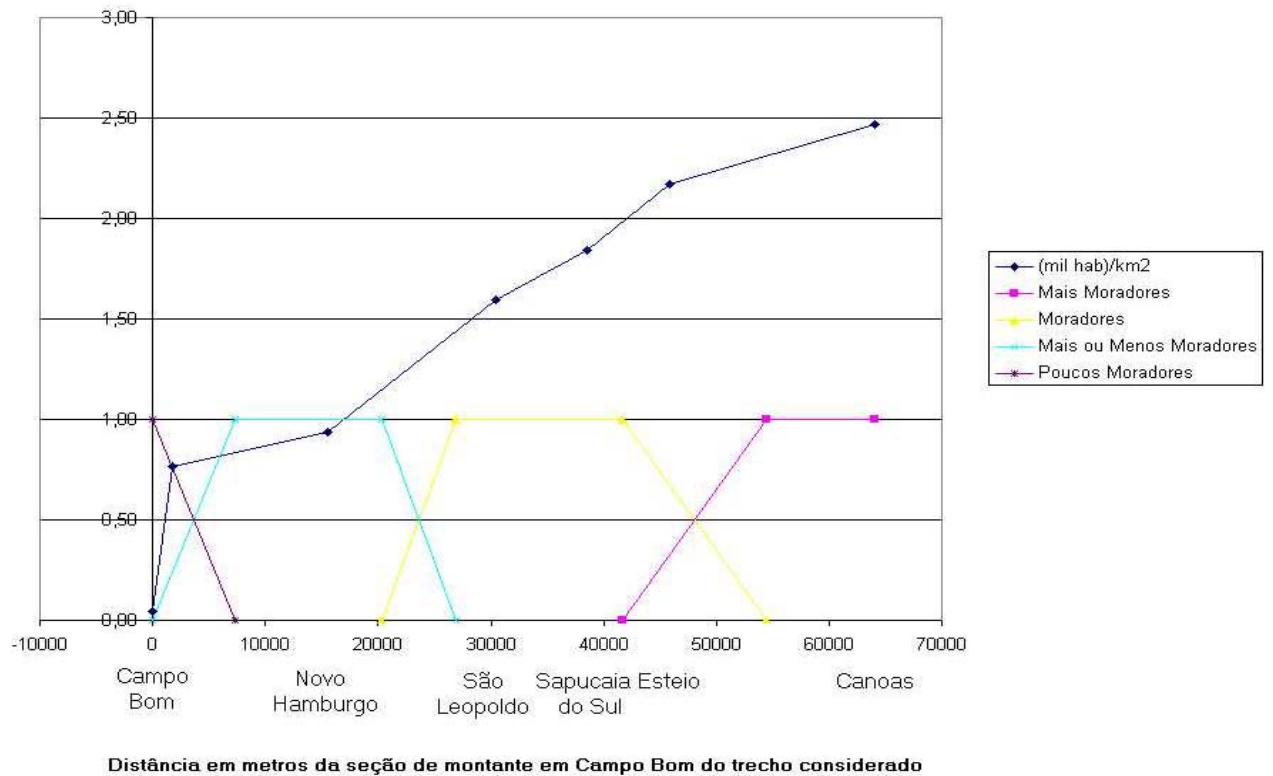


Figura 5.9 – Estabelecimento das classes fuzzy de distribuição da população em relação à densidade demográfica nos trechos do rio dos Sinos. A fonte da densidade demográfica é a da Fundação Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE (apud Rio Grande do Sul, 1995) em Sinopse Preliminar do Censo Demográfico do Rio Grande do Sul em 1991

Equação que estabelece as classes fuzzy para diferentes níveis de concentração populacional em relação aos trechos do rio dos Sinos, onde  $x$  é a distância em metros da seção de montante em Campo Bom do trecho considerado

Classe	Limites (m)	função de pertinência
Mais Moradores	63999 a 54399	1
Moradores	54399 a 41699	$0,00008 (x-41699)$
Moradores	54399 a 41699	$0,00008 (54399-x)$
	41699 a 26899	1
	26899 a 20274	$0,00015 (x-20274)$
± Moradores	26899 a 20274	$0,00015 (26899-x)$
	20274 a 7266	1
	7266 a 0	$0,00014x$
Poucos Moradores	7266 a 0	$0,00014 (7266-x)$
	<0	1

Segundo o que foi apresentado acima, pode-se obter que, se uma intervenção é feita num trecho aonde é maior a densidade demográfica, tem-se então um maior comprometimento social da intervenção. Sendo assim, pode-se estabelecer uma correlação da distribuição da população com níveis de comprometimento social da intervenção. Alerta-se que esta associação não deve ser generalizada e é apenas estabelecida para relações entre os trechos do rio dos Sinos. Para exemplificar o estabelecimento das classes, nota-se que: a classe de população “mais moradores”, que implica em maior densidade demográfica, será relacionada com a classe social “social”, que seria o trecho onde haveria um maior comprometimento social da intervenção e, assim, de forma decrescente, obteve-se as seguintes classes:

<b>População</b>	<b>social</b>
Mais Moradores	social
Moradores	± social
± Moradores	pouco social
Poucos Moradores	não social

## **OBJETIVO AMBIENTAL**

Pelas técnicas de valoração ambiental convencionais, poder-se-ia obter maiores informações do que a população local consideraria como objetivo ambiental para a bacia do rio dos Sinos. Infelizmente, não foi possível fazer uma pesquisa deste porte na bacia para se obter a opinião da população. Outra forma seria a de se consultar tomadores de decisão da bacia, tais como prefeitos, entidades atuantes, etc. No entanto, para uma maior simplicidade, e para que o trabalho não tenha uma visão partidária, e, sim, mais imparcial do problema, optou-se pela indicação do objetivo.

Conforme o que foi discutido na revisão bibliográfica, há uma série de análises que devem ser feitas para a avaliação do impacto ambiental para a implantação de uma estação de tratamento de esgoto – ETE, em uma determinada área. No entanto, a solução proposta em Rio Grande do Sul (1996), não identifica as áreas onde serão implantadas as ETEs. Serão consideradas então, as interferências no meio ambiente urbano. A implementação deste objetivo foi norteadada por dois fatores:

- a) impacto causado pelo tamanho da estação de tratamento ( no ambiente) de acordo com sua localização.
- b) impacto causado na vizinhança da estação de tratamento ( principalmente núcleos urbanos).

O impacto poderá ser sentido pela alteração estética do ambiente e pelos odores.

A escolha de estações em núcleos urbanos implicaria em utilizar estações que ocupem menor área. Estas estações, no entanto, são, em geral, mais caras para a execução de sua infraestrutura. O que, também, diferiria da solução proposta em Rio Grande do Sul (1996) que é o tratamento de efluentes da população urbana através de lagoas de estabilização em série.

Considerando que este será um impacto local nas populações vizinhas próximas da estação, tem-se que, quanto maior a densidade populacional, maior a probabilidade de que ocorra o impacto ambiental negativo. Sendo assim, foram utilizadas as mesmas classes de distribuição da população apresentadas anteriormente. Exemplificando a distribuição das classes, percebe-se que a classe população “mais moradores”, que apresenta maior densidade demográfica, apresenta uma maior probabilidade de que ocorra um impacto ambiental negativo, então, a classe ambiental é “grande impacto negativo”, e assim, sucessivamente, foram estabelecidas as demais classes. Alerta-se que estas classes foram estabelecidas apenas relacionado um trecho do rio dos Sinos com outro, e não devem ser generalizadas. Abaixo estão apresentadas as classes estabelecidas.

<b>População</b>	<b>Ambiental</b>
Mais Moradores	grande impacto negativo
Moradores	impacto negativo
± Moradores	pouco impacto negativo
Poucos Moradores	nenhum impacto negativo

### **5.1.2 CRITÉRIOS DE AVALIAÇÃO DOS OBJETIVOS E DEFINIÇÃO DE RESTRIÇÕES**

De acordo com os objetivos definidos foram os critérios para a sua avaliação. Esses critérios dizem respeito aos valores de variação possíveis ou desejáveis para os objetivos em questão. A partir desta delimitação dos valores para os objetivos, foram definidas restrições para os mesmos. Os critérios e restrições têm como finalidade definir um espaço factível para a variação dos objetivos.

Os condicionantes econômicos foram estabelecidos por funções ajustadas à bacia. Foram definidos por um mínimo, que é não fazer nenhum investimento, e um máximo, que é a implementação da solução técnica estabelecida para a bacia em Rio Grande do Sul (1996), solução esta que foi considerada inviável de ser aplicada.

O objetivo de qualidade da água teve como critério de avaliação a simulação do modelo IPH5. Para as restrições, foram estabelecidos dois limites: pela alternativa de não se fazer nada e os valores que seriam obtidos pela implementação da solução técnica encontrada para a bacia proposta em Rio Grande do Sul (1996); foram estabelecidos como valores mínimos e máximos para a bacia.

Para os objetivos sociais, foram estabelecidas classes analíticas fuzzy para a variação dos objetivos pretendidos, conforme apresentado anteriormente. Sendo assim, o maior valor



foi dado pela pertinência total (um) na classe de comprometimento social “social” e um mínimo, dado pela pertinência total (um), classe “não-social”.

Para os objetivos de qualidade ambiental, também foram estabelecidas classes analíticas fuzzy para os impactos ambientais. Desta forma, o maior valor foi dado pela pertinência total (um) na classe de impacto ambiental “grande impacto negativo” e um mínimo dado pela pertinência total (um) na classe “nenhum impacto negativo”.

## **5.2 FUNÇÃO DE COMPROMISSO**

Depois de modelados os objetivos, definiu-se a função de compromisso. A partir dos condicionantes e alternativas de tratamento existentes, foi encontrada uma função de compromisso para a bacia do rio dos Sinos, que foi de minimização sujeita a restrições socio-econômicas, ambientais e de qualidade da água, que permita aos possíveis tomadores de decisão buscarem a melhor solução de compromisso para um determinado cenário.

### **5.2.1 IDENTIFICAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS DO PROBLEMA DE MODELAGEM DA FUNÇÃO DE COMPROMISSO**

A identificação das características do problema de modelagem da função de compromisso se fez necessária para que se tenha uma idéia das formas de procedimento a serem utilizadas. As características dizem respeito ao problema, à facilidade de uso do modelo, ao conhecimento requerido para o seu uso e facilidade de aprendizagem, à confiabilidade dos resultados obtidos com a técnica aplicada. Dentre as várias características, identificam-se as seguintes:

- a) número de variáveis: o número de variáveis foi considerado igual a quatro, correspondentes a cada um dos objetivos da bacia;

- b) fluxo de informações: somente foi consultado um tomador de decisões no momento de definição de preferências para a bacia;
- c) quadro de configuração: foram considerados os conflitos existentes entre os objetivos;
- d) limitantes de hardware e software: a metodologia deveria ser adequada a ser utilizada em microcomputadores;
- e) método de variação dos objetivos: a modelagem dos objetivos foi determinística e fuzzy;
- f) disponibilidade de dados: a área trabalhada foi a jusante de Campo Bom por ser a que tem maior disponibilidade de dados;
- g) compreensão: buscou-se adotar técnicas que fossem de mais fácil utilização e compreensão por possíveis tomadores de decisão;
- h) o modelo deveria considerar as características dinâmicas da variação dos parâmetros de qualidade da água;
- i) continuidade: o modelo deveria ser adequado para que seja dada continuidade na sua implementação para a bacia do rio dos Sinos;
- j) a estrutura do modelo deveria ser transparente;
- k) o modelo deveria ser flexível para absorver mudanças;
- l) não requerer muito tempo para simulação;
- m) que apresente resultados confiáveis e consistentes.

## **5.2.2 ESCOLHA DA TÉCNICA DE PROGRAMAÇÃO MULTIOBJETIVO A SER UTILIZADA PARA A FORMULAÇÃO DO PROBLEMA DA BACIA DO RIO DOS SINOS**

A definição da técnica de programação multiobjetivo a ser utilizada na formulação do problema foi um passo muito importante e sensível na busca da solução para os problemas da bacia do rio dos Sinos. Isso ocorre porque todo o desenvolvimento do trabalho se baseou nessa definição. Foram ser considerados critérios que dizem respeito a:

- a) o grau de conhecimento do tomador de decisões ou analista em relação ao problema, à técnica, à metodologia;
- b) parâmetros, facilidades de uso da técnica, tempo de processamento necessário e outros;
- c) possibilidade de uso de critérios não numéricos, se possui número finito de alternativas, se é um problema dinâmico, se é não linear, e outros;
- d) com relação às soluções, se são consistentes, estabilidade dos resultados com respeito a mudanças nos valores dos parâmetros, confiança nos resultados obtidos, etc.

Para a escolha da técnica a ser utilizada para a formulação do problema da bacia do rio dos Sinos foram consideradas as características para o problema de modelagem da função de compromisso. Dentre as várias técnicas, foram pré-selecionadas, a partir dos critérios anteriormente descritos, as seguintes possíveis:

### **Técnicas de Geração**

- 1) Métodos de Ponderação ou Funções de Utilidade (Weighting Method ou Utility Functions)
- 2) Métodos por Restrição (Constraint Method);

### **Técnicas que requerem uma articulação à priori de preferências**

- 3) Programação com Definição Prévia dos Objetivos (Goal Programming)
- 4) Avaliação de Funções de Utilidade ou Funções de Indiferença (Assessing Utility Functions ou Indifference Functions)
- 5) Estimação dos Pesos Ótimos e Aproximação Paramétrica (Estimation of Optimal Weights ou Parametric Approach)
- 6) Método Electre (Elimination and Choice Translating Reality-Electre Method): Electre I, II e III
- 7) Programação de Compromisso Fuzzy (Fuzzy Compromise Programming): PCF-I
- 8) Programação de Composição Fuzzy (Fuzzy Composite Programming) : PCF-II
- 9) Método de Organização por Ordenação de Preferências (A Preference Ranking Organization Method) - PROMETHEE

### **Técnicas que requerem uma articulação progressiva de preferências**

- 10) Método por Passos (Step Method) - STEM
- 11) Método Interativo de Ponderação (Interactive Weighting Method)

Dentre essas onze técnicas que foram consideradas como adequadas em uma seleção prévia, foi escolhida apenas uma para a modelação do problema da bacia do rio dos Sinos. Para se proceder à seleção da técnica que foi utilizada, primeiramente foram definidos os pesos dados a cada característica do problema de modelagem da função de compromisso e a avaliação de cada técnica em relação a cada característica, por valores que variam de 1 a 5, um para o pior valor e cinco para o melhor valor. A definição foi baseada em critérios subjetivos e no trabalho de Teclé (1992). A definição de valores é apresentada na tabela 5.3. Utilizando a programação por composição (Teclé, 1992), simplificada, temos que o cálculo da distância composta com uma discreta estrutura, começando com normalização do impacto

Tabela 5-3 - Definição de valores para cálculo da distância composta da Programação por composição e cálculo da distância

Carac- Terística	Peso	Técnicas										
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
A	1	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
B	1	1	1	3	3	3	3	3	3	3	5	5
C	2	1	5	3	3	3	1	5	5	1	3	3
D	1	5	5	3	3	3	3	3	3	3	1	1
E	1	5	5	5	5	5	3	5	5	3	5	5
F	1	5	5	3	3	3	3	3	3	3	1	1
G	3	1	1	3	3	3	3	3	3	3	5	5
H	2	1	5	1	1	1	1	1	1	1	1	1
I	2	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
J	3	1	1	3	3	3	3	3	3	3	5	5
K	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
L	1	5	5	3	3	3	3	3	3	3	1	1
M	3	5	5	3	3	3	3	3	3	3	1	1
Distância composta		13,5	9,5	12	12	12	13,5	11	11	13,5	11,5	11,5

**Características:** a) número de variáveis: o número de variáveis será considerado igual a quatro correspondente a cada um dos objetivos da bacia; b) fluxo de informações: somente será consultado um tomador de decisões no momento de definição de preferências para a bacia; c) quadro de configuração: serão considerados os conflitos existentes entre os objetivos; d) limitantes de hardware e software: a metodologia deverá ser adequada a ser utilizada em microcomputadores; e) método de variação dos objetivos: a modelagem dos objetivos é determinística e fuzzy; f) disponibilidade de dados: a área trabalhada será a jusante de Campo Bom por ser a que tem maior disponibilidade de dados; g) compreensão: buscar-se-á adotar técnicas que sejam de mais fácil utilização e compreensão por possíveis tomadores de decisão; h) o modelo deverá considerar as características dinâmicas da variação dos parâmetros de qualidade da água; i) continuidade: o modelo deverá ser adequado para que seja dada continuidade na sua implementação para a bacia do rio dos Sinos; j) a estrutura do modelo deverá ser transparente; k) o modelo deverá ser flexível para absorver mudanças; l) não requerer muito tempo para simulação; m) que apresente resultados confiáveis e consistentes.

**Técnicas:** 1) Métodos de Ponderação ou Funções de Utilidade ( Weighting Method ou Utility Functions); 2) Métodos por Restrição (Constraint Method); 3) Programação com Definição Prévia dos Objetivos (Goal Programming); 4) Avaliação de Funções de Utilidade ou Funções de Indiferença (Assessing Utility Functions ou Indifference Functions); 5) Estimativa dos Pesos Ótimos e Aproximação Paramétrica (Estimation of Optimal Weights ou Parametric Approach); 6) Método Electre (Electre Method): Electre I, II e III; 7) Programação de Compromisso Fuzzy (Fuzzy Compromise Programming): PCF-I; 8) Programação de Composição Fuzzy (Fuzzy Composite Programming) : PCF-II; 9) Método de Organização por Ordenação de Preferências (A Preference Ranking Organization Method) – PROMETHEE; 10) Método por Passos (Step Method) – STEM; 11) Método Interativo de Ponderação (Interactive Weighting Method)

relação  $R(x)$ . Usando o máximo ( $R_1$ ) e o mínimo ( $R_s$ ), o valor normalizado de  $R$ , definido como  $S$ , pode ser computado como:

$$S_i = \alpha (R - R_s) / (R_1 - R_s) \qquad S_i = \alpha (R_1 - R) / (R_1 - R_s)$$

onde  $\alpha$  é o peso de cada critério dentro do grupo;

onde a fórmula selecionada depende se o máximo ( $R_1$ ) é o melhor ou pior valor, sendo que foi utilizada a segunda equação. É importante notar que essa normalização tornará a coordenada (1,1), o ponto ideal em toda análise de intercâmbio. Então, sempre, ainda que o objetivo possa ser minimizado do critério, o grau para qual é minimizado, é refletido pelo grau o qual  $S_i$  é igual a 1.0. Considerando-se a programação por composição, eliminado do fator,  $p$ , no peso  $w$ , temos a seguinte distância por composição para o  $j$ -ésimo grupo de indicadores:

$$L_j = \left[ \sum_{i=1}^{n_j} w_{ij} S_{ij}^{p_j} \right]^{1/p_j}$$

onde

$L_j$  é a distância composta para o primeiro grupo nível  $j$  para indicadores básicos;

$n_j$  é o número de indicadores básicos no grupo  $j$ ;

$w_{ij}$  ponderador expressa a importância relativa do índice básico  $i$  no primeiro grupo nível  $j$  tal que sua soma é igual a um (foi adotado igual a um);

$S_{ij}$  valor normalizado do índice básico  $i$  no primeiro grupo nível dos indicadores básicos;

$p_j$  fator balanço entre indicadores para grupo  $j$ , foi considerado igual a um.

Os resultados obtidos para as distância são apresentados na tabela 5.3 . De acordo com os critérios adotados, a técnica a ser utilizada foi a técnica (2) **Métodos por Restrição (Constraint Method)**;

### 5.2.3 FORMULAÇÃO DO PROBLEMA DA BACIA DO RIO DOS SINOS

A formulação do problema foi feita de acordo com os procedimentos do Método por Restrições escolhido como sendo o mais adequado de se aplicar à bacia do rio dos Sinos.

O problema consiste em interrelacionar os objetivos de modo a ter várias alternativas de solução para bacia do rio dos Sinos. A busca da solução se deu pela otimização de um objetivo e fixação dos demais, e também pela variação da localização. Os objetivos para a bacia do rio dos Sinos foram adotados como sendo as variáveis de decisão.

Considerando que os objetivos para a bacia do rio dos Sinos que foram considerados são qualidade da água, econômico, social e ambiental, o problema pôde ser formulado da seguinte maneira: buscar a melhor qualidade da água ao menor custo, que tenha maior comprometimento social e que cause o menor impacto ambiental.

As variáveis de decisão, dessa forma, foram adotadas da maneira como a seguir se apresenta e foram atribuídos pesos de um a cinco a cada uma delas, de maneira subjetiva, pois a prioridade a ser dada é uma escolha do tomador de decisões.

a) a primeira variável de decisão foi a qualidade da água, que foi dada pela variação dos parâmetros oxigênio dissolvido - OD , demanda bioquímica de oxigênio - DBO e coliformes. Para esta variável, buscou-se uma redução dos picos de poluição e melhora da qualidade do rio como um todo, aproximando do enquadramento do rio. A esta variável foi atribuído o peso quatro.

- b) a segunda variável foi o custo, que foi avaliada pelo custo do tratamento a cada fonte de poluição e uma função da localização da fonte de poluição. A esta variável foi atribuído o peso cinco.
- c) a terceira variável foi o comprometimento social do tratamento feito. Ela foi função do tipo de fonte tratada e da densidade demográfica. A esta variável foi atribuído o peso três.
- d) a quarta variável foi o impacto ambiental. Cada estação de tratamento a ser implementada teve um impacto ambiental em função de uma série de elementos tais como vizinhança, área ocupada, etc. Neste trabalho, ela foi estabelecida em função da densidade demográfica. A esta variável foi atribuído o peso dois.

#### **5.2.4 ELABORAÇÃO DA FUNÇÃO DE COMPROMISSO**

De acordo com a formulação do problema para a bacia do rio dos Sinos, foi elaborada a função de compromisso que buscou a congregação dos objetivos e restrições para o problema em questão. A função de compromisso buscou espelhar, da melhor forma possível, a relação entre as alternativas de solução para a bacia. A função de compromisso deveria estabelecer interrelação das variáveis de decisão com as suas respectivas valorações, para a busca das soluções não inferiores para um determinado cenário estabelecido. A função de compromisso deveria buscar modelar, da forma mais completa possível, o problema de tomada de decisão real.

Para que a função de compromisso atingisse seus objetivos, foi adotada uma relação mínimo versus máximo para a bacia do rio dos Sinos, já que o método escolhido para a modelagem do problema foi o método por restrição e a função deveria também variar com a localização. Sendo assim, a função de compromisso deveria espelhar esta facilidade que o método nos permite, ou seja, otimizar um dos objetivos e fixar o valor dos demais. A função é apresentada na equação abaixo.



$$F(x) = \min \sum \alpha f(x)$$

onde  $F(x)$  é a função de compromisso,  $\alpha$  é o peso atribuído a variável de decisão que foi negativo caso a variável de decisão seja maximizada, e  $f(x)$  é a variável de decisão.

Sendo assim, os pesos da variável qualidade da água e comprometimento social foram negativos. O procedimento de análise da função de compromisso deu-se pela otimização de uma variável por vez e fixação das demais, isto em função da localização. Foi analisada a variação das variáveis de decisão por trechos de rio e por fontes de poluição.

### **5.2.5 ELABORAÇÃO DE RELAÇÕES PARA TRABALHABILIDADE DA FUNÇÃO DE COMPROMISSO**

A facilitação do uso da função de compromisso visa a uma melhor forma de permitir que várias alternativas e prioridades sejam testadas para a busca do conjunto de soluções não inferiores para a bacia do rio dos Sinos, devido a complexidade com que foram modelados os objetivos para a bacia do rio dos Sinos.

Estas relações para a trabalhabilidade da função de compromisso buscam estabelecer uma melhor visualização dos valores que cada um dos objetivos pode assumir dentro da formulação proposta para o problema da bacia do rio dos Sinos. Estes valores foram estabelecidos por trechos entre as seções de modelagem do objetivo Qualidade da Água ou por fontes de poluição. Para um melhor estudo das alternativas de solução, as entradas no modelo de simulação de qualidade de água foram divididas por fontes de poluição como apresentado na tabela 5.4. Esta divisão foi feita baseada nos valores de DBO para cada sub-bacia de contribuição de cada trecho de rio, utilizado na discretização do rio dos Sinos para o

objetivo Qualidade da Água, conforme pode ser observado na tabela 5.1. Infelizmente, esta simplificação pode causar distorções para a avaliação do parâmetro coliformes.

Tabela 5.4 – Porcentagem de ocorrência de DBO por fontes de poluição

Trecho	Res.Sl.Dom	Pop.Urb.	D.P.Urb.	Desd.Anim	Pop.Rur	Efl. Ind.	F.D.Rur.	TOTAL
Cabec.	14,57	12,37	2,12	65,73	0,69	1,02	3,50	100,00
1-2	41,78	35,46	6,70	10,16	0,44	4,61	0,86	100,00
2-3	33,31	28,27	11,67	21,44	0,31	4,34	0,66	100,00
3-4	41,16	34,94	7,81	10,23	0,42	4,60	0,84	100,00
4-5	31,41	26,66	22,01	12,17	0,27	7,06	0,43	100,00
5-6	35,55	30,18	20,25	9,32	0,65	3,57	0,48	100,00
6-7	45,04	38,23	7,76	3,79	0,60	3,90	0,69	100,00
7-8	45,04	38,23	7,76	3,79	0,60	3,90	0,69	100,00
8-9	43,09	36,58	5,54	5,39	0,69	7,80	0,91	100,00
9-10	22,58	19,17	0,81	28,14	0,79	26,75	1,76	100,00
10-11	14,45	12,26	4,07	47,06	0,90	18,29	2,97	100,00
11-12	14,45	12,26	4,07	47,06	0,90	18,29	2,97	100,00
12-13	24,48	20,78	4,51	40,51	0,42	7,91	1,40	100,00
13-14	43,56	36,97	6,52	4,41	0,07	7,87	0,60	100,00
14-15	43,56	36,97	6,52	4,41	0,07	7,87	0,60	100,00
15-16	43,56	36,97	6,52	4,41	0,07	7,87	0,60	100,00
16-17	3,72	3,15	3,01	86,97	0,64	0,39	2,12	100,00
17-18	3,72	3,15	3,01	86,97	0,64	0,39	2,12	100,00
18-19	40,46	34,34	4,13	9,72	0,13	10,57	0,65	100,00
19-20	36,94	31,36	5,81	19,28	0,07	5,98	0,57	100,00
20-21	36,60	31,07	8,62	17,26	0,06	5,94	0,46	100,00

Onde Res.Sl.Dom. é resíduos sólidos domésticos, Pop.Urb. é população urbana, D.P.Urb. é drenagem pluvial urbana, Desd. Anim. é dessedentação animal, Pop. Rur é população rural, Efl. Ind. é efluentes industriais, F.D.Rur é fontes difusas rurais

A tabela 5.5 apresenta os custos de tratamento. Estes são os valores que foram assumidos pelo objetivo econômico no caso da opção pelo tratamento de uma determinada fonte de poluição em um determinado trecho do rio. Estes custos foram obtidos de Rio Grande do Sul (1996), de acordo com o custo de tratamento para cada fonte de poluição em cada sub-bacia de contribuição, conforme a tabela 5.1, para cada um dos trechos adotados na discretização do rio para o objetivo Qualidade da Água. Estes são os custos da solução proposta, admitida como máximo valor que o objetivo econômico pode assumir. O valor

mínimo que o objetivo econômico pode assumir é não fazer tratamento nenhum e, assim, a sociedade teria que assumir as conseqüências de aceitar o rio poluído.

Tabela 5-5 – Custos em US\$ dos tratamentos por fontes de poluição e trechos do rio

Trechos	Res. Sl. Dom.	Pop. Urb.	D. P. Urb.	Desd. Ani	Pop. Rur.	Efl. Ind.	F. D. Rur.	TOTAL
Cabeceira	38.599	1.742.964	5.709.504	69.228	213.714	2.725.860	1.962.303	12.462.171
1-2	1.293	68.962	198.481	103	1.401	219.664	17	489.921
2-3	4.186	255.160	661.993	931	4.260	829.127	157	1.755.813
3-4	8.629	469.720	1.345.948	702	9.181	1.486.570	174	3.320.924
4-5	4.864	403.734	798.142	644	4.668	1.444.537	209	2.656.798
5-6	1.589	117.802	283.929	142	3.410	278.909	140	685.920
6-7	4.117	215.015	600.892	107	5.513	1.362.569	47	2.188.259
7-8	4.117	215.015	600.892	107	5.513	1.362.569	47	2.188.259
8-9	13.628	690.689	2.049.838	529	22.266	4.047.352	186	6.824.487
9-10	5.927	210.741	745.591	2.708	22.909	8.787.942	278	9.776.096
10-11	312	13.096	40.024	407	2.479	567.634	139	624.090
11-12								0
12-13	2.865	120.159	346.225	1.713	5.354	2.859.584	312	3.336.212
13-14	2.358	99.597	285.743	76	406	2.859.584	35	3.247.799
14-15	4.717	199.193	571.486	152	812	5.719.168	70	6.495.597
15-16								0
16-17								0
17-18	146	7.385	8.997	1.857	4.058	0	2.171	24.614
18-19	30.848	1.209.648	3.413.271	2.340	9.591	17.210.834	1.002	21.877.534
19-20	4.981	209.076	593.058	877	1.014	1.559.815	862	2.369.684
20-21	6.571	304.811	814.890	1.070	1.122	2.088.647	2.895	3.220.005
TOTAL	139.747	6.552.765	19.068.904	83.693	317.670	55.410.362	1.971.043	83.544.183

Onde Res.Sl.Dom. é resíduos sólidos domésticos, Pop.Urb. é população urbana, D.P.Urb. é drenagem pluvial urbana, Desd. Anim. é dessedentação animal, Pop. Rur é população rural, Efl. Ind. é efluentes industriais, F.D.Rur é fontes difusas rurais

Considerando os dois limites estabelecidos para o objetivo Qualidade da Água, que foram um máximo, a implementação da solução proposta em Rio Grande do Sul (1996), e um mínimo, que é não fazer tratamento nenhum, teve-se valores intermediários que poderiam ser obtidos pela implementação parcial da solução. Esta implementação parcial poderia ser feita pelo tratamento de uma determinada fonte de poluição ou o tratamento de todas as fontes de poluição de um determinado trecho do rio. O que se buscou foi obter o máximo de benefício em termos de melhoria da qualidade da água, que justificassem os investimentos a serem feitos para a obtenção desta melhoria.

Para obter-se os gradientes de variação desta melhoria da qualidade da água para a implementação parcial da solução, foi simulado o tratamento de cada um dos trechos, como se apenas um determinado trecho fosse tratado<sup>1</sup> 100% (cem por cento), para todas as fontes de poluição, que são apresentadas nas figuras 5.10 a 5.12, e, também, foi simulado o tratamento por fontes de poluição, como se apenas uma determinada fonte de poluição fosse tratada 100% (cem por cento) em todos os trechos, que são apresentados nas figuras 5.13 a 5.15.

As possibilidades de implementação do tratamento na bacia são diversas. Considerando a possibilidade do tratamento em cada um dos trechos em que foi discretizado o rio para o objetivo Qualidade da Água, fez-se necessário verificar, para cada um destes trechos, qual seria o valor assumido pelos objetivos Social e Ambiental. Considerando a distância do trecho da seção de montante em Campo Bom, poder-se-ia verificar qual a pertinência do trecho dentro de cada uma das classes em que foram divididos os objetivos Social e Ambiental. Os valores que foram assumidos pelos objetivos social e ambiental, no caso do tratamento em cada um dos trechos, são apresentados na tabela 5.6.

---

<sup>1</sup> Os valores apresentados nos gráficos dizem respeito ao intervalo de tempo 88 da simulação para a qualidade da água, correspondente a um nível da linha d'água de 9,05m na foz, por ser o intervalo que apresentava os piores valores para a qualidade da água do rio dos Sinos.

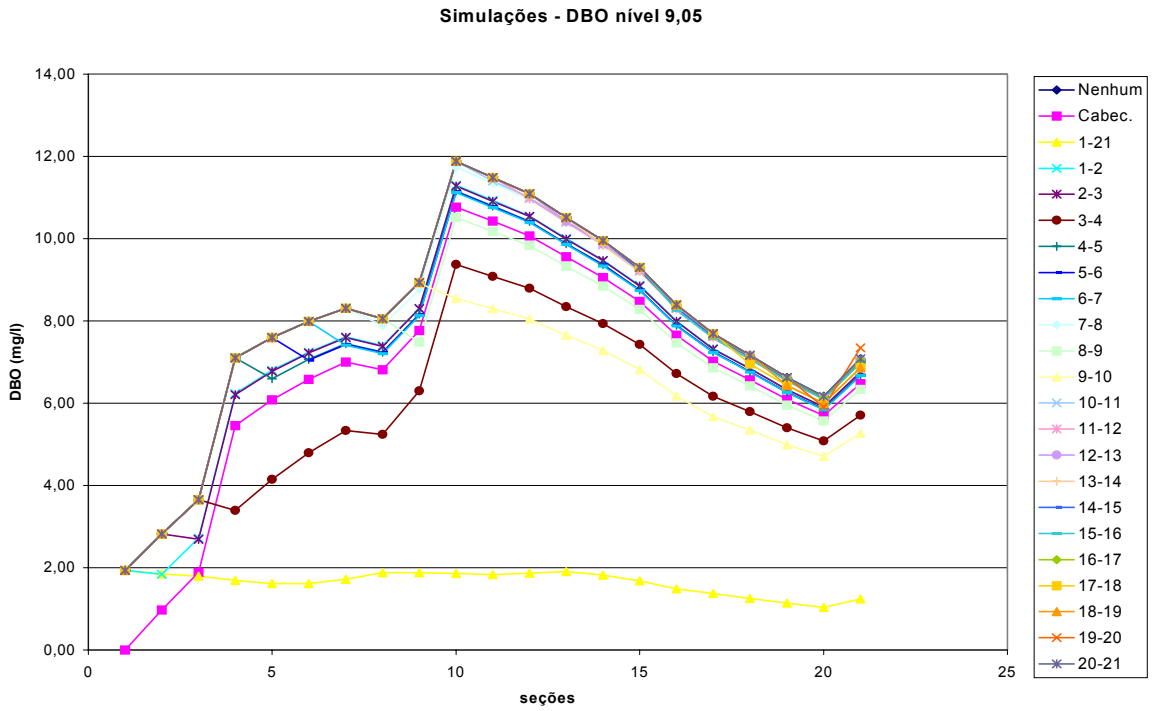


Figura 5-10 - Simulação de tratamentos por trechos de rio para DBO

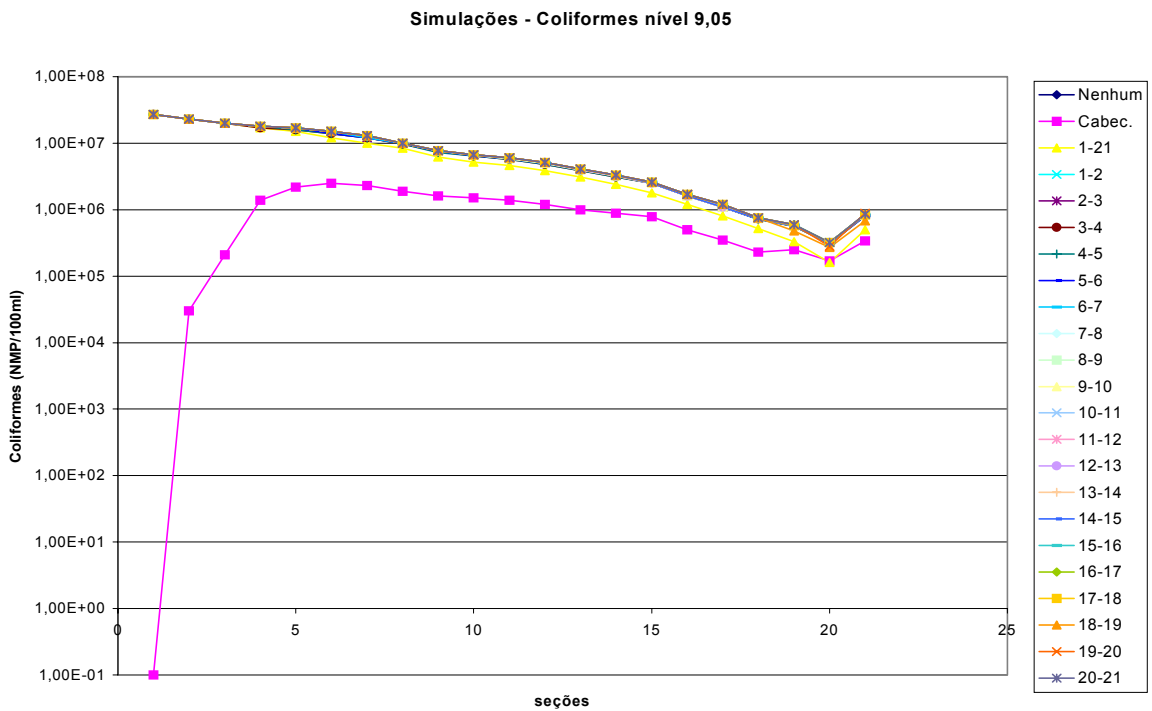


Figura 5-11 - Simulação de tratamentos por trechos para Coliformes

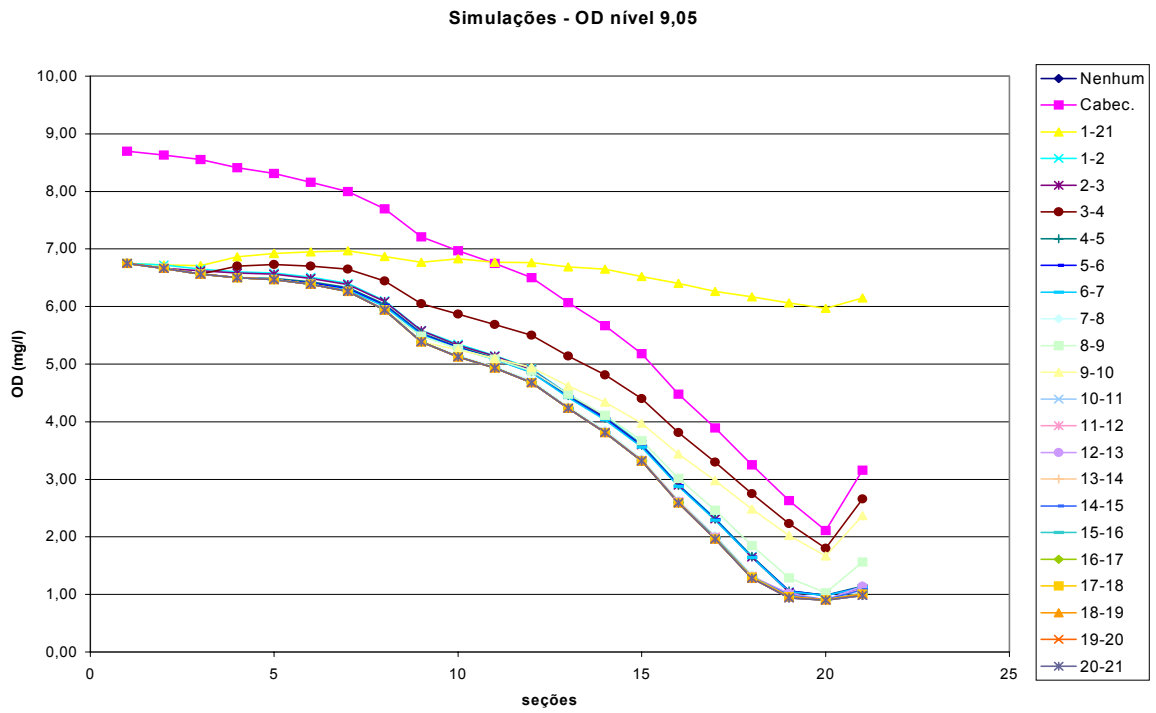


Figura 5-12 - Simulação de tratamento por trechos de rio para OD

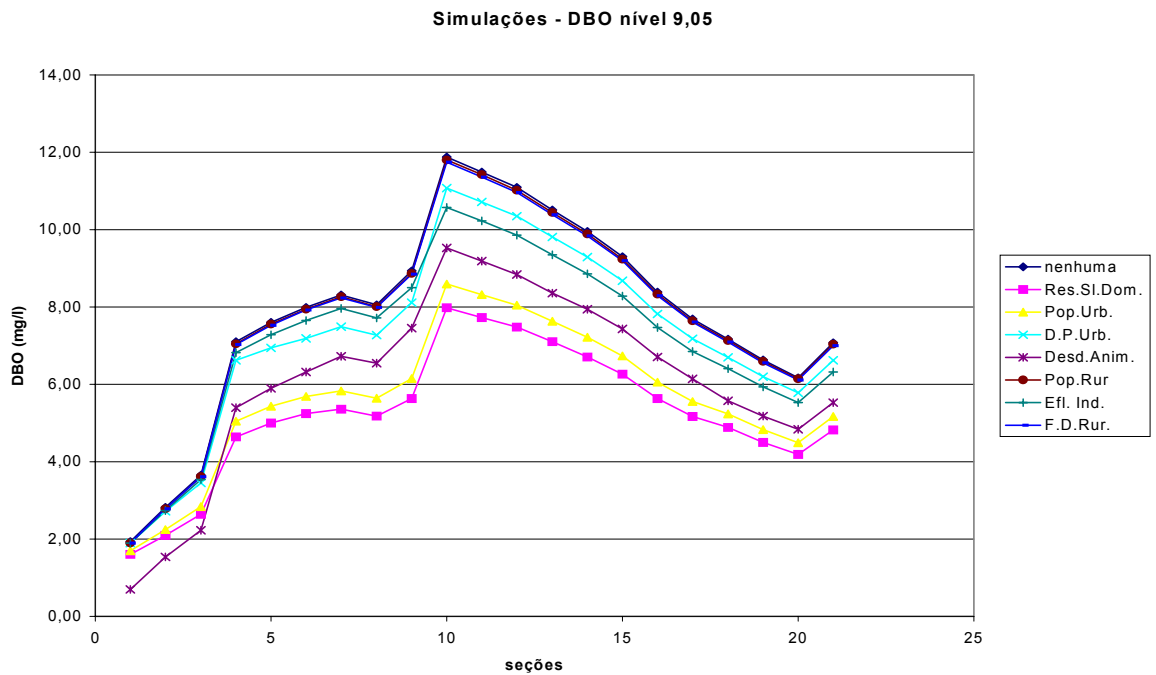


Figura 5-13 - Simulações de tratamento por fontes de poluição para DBO

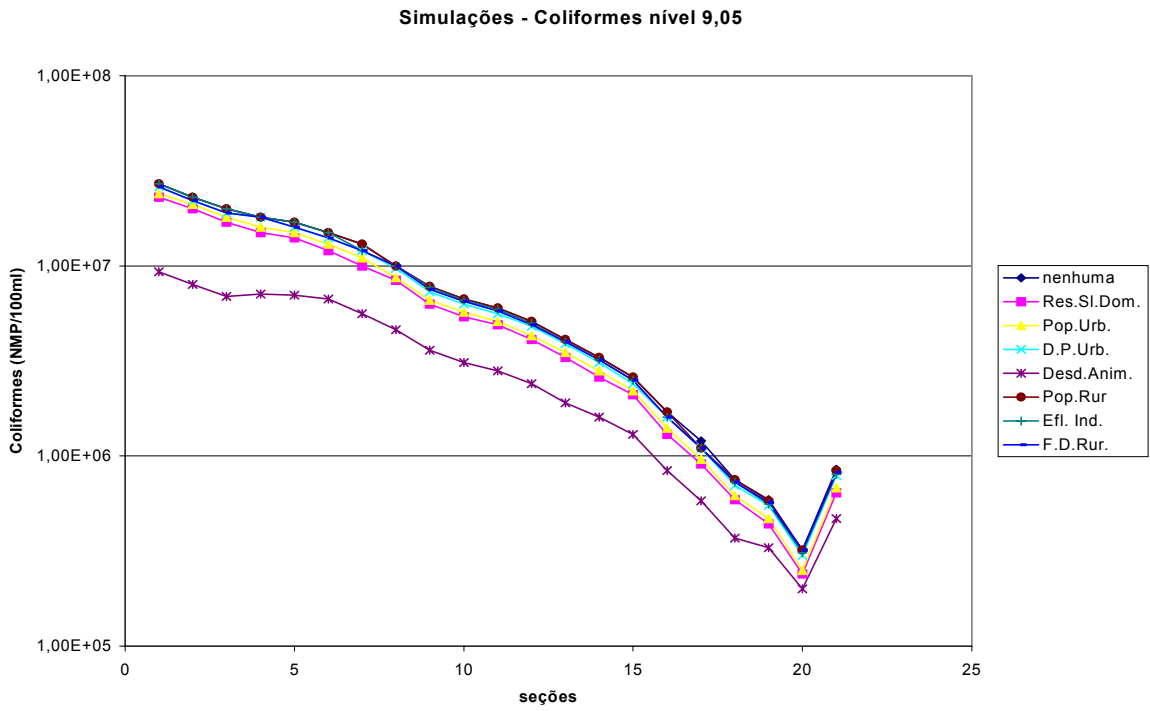


Figura 5-14 - Simulações por fontes de poluição para Coliformes

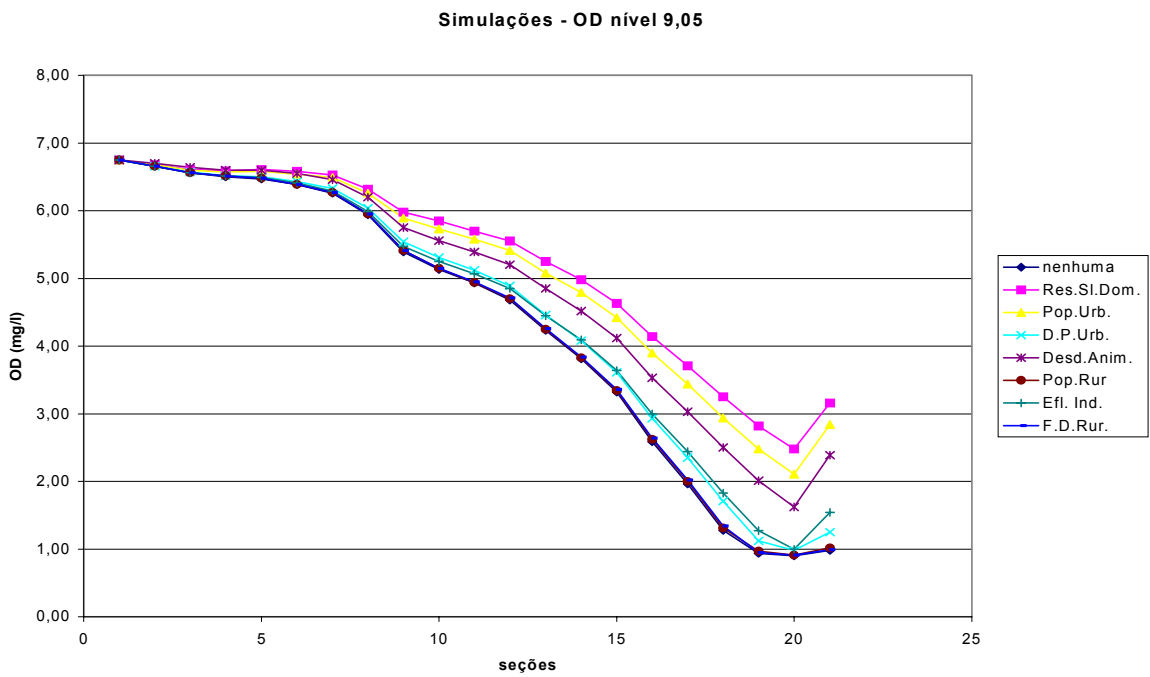


Figura 5-15 - Simulações por fontes de poluição para OD

Tabela 5-6 – Valores assumidos pelos objetivos social e ambiental

Trecho	Dist	Dist.Acum	População	Objetivo Social	Objetivo Ambiental
Cabeceira	0	0	1Poucos Moradores	1não social	1nenhum impacto negativo
1-2	3633	3633	0,51Poucos Moradores/0,51+-Moradores	0,51não social/0,51pouco social	0,51nenhum impacto negativo/0,51pouco impacto negativo
2-3	3633	7266	1 +- Moradores	1pouco social	1pouco impacto negativo
3-4	3633	10899	1+- Moradores	1pouco social	1pouco impacto negativo
4-5	3125	14024	1+- Moradores	1pouco social	1pouco impacto negativo
5-6	3125	17149	1+- Moradores	1pouco social	1pouco impacto negativo
6-7	3125	20274	1+- Moradores	1pouco social	1pouco impacto negativo
7-8	3125	23399	0,53+- Moradores/0,47 Moradores	0,53pouco social/0,47+-social	0,53pouco impacto negativo/0,47impacto negativo
8-9	3500	26899	1Moradores	1+-social	1impacto negativo
9-10	3600	30499	1Moradores	1+-social	1impacto negativo
10-11	2400	32899	1Moradores	1+-social	1impacto negativo
11-12	3200	36099	1Moradores	1+-social	1impacto negativo
12-13	2400	38499	1Moradores	1+-social	1impacto negativo
13-14	3200	41699	1Moradores	1+-social	1impacto negativo
14-15	2200	43899	0,84Moradores/0,18Mais Moradores	0,84+-social/0,18social	0,84impacto negativo/0,18grande impacto negativo
15-16	3800	47699	0,54Moradores/0,48\Mais Moradores	0,54+-social/0,48social	0,54impacto negativo/0,48grande impacto negativo
16-17	3400	51099	0,26Moradores/0,75Mais Moradores	0,26+-social/0,75social	0,26impacto negativo/0,75grande impacto negativo
17-18	3300	54399	1Mais Moradores	1social	1grande impacto negativo
18-19	3100	57499	1Mais Moradores	1social	1grande impacto negativo
19-20	2900	60399	1Mais Moradores	1social	1grande impacto negativo
20-21	3600	63999	1Mais Moradores	1social	1grande impacto negativo



## **5.2.6 VARIAÇÃO DAS PRIORIDADES ESTABELECIDAS PARA OBJETIVOS DA BACIA E ELABORAÇÃO DE ALTERNATIVAS DE INVESTIMENTO**

Uma vez formulado o problema e elaborada a função de compromisso, buscou-se o conjunto de soluções não inferiores para o mesmo, de forma a atender aos objetivos e restrições para a bacia do rio dos Sinos. A obtenção da melhor solução de compromisso se deu pela otimização de um objetivo enquanto os outros ficam fixados a determinados valores. Pela variação das prioridades, que podem ser por parâmetros de referência para a qualidade da água ou fontes poluidoras, por exemplo, poderiam ser verificadas as suas respectivas interferências nos resultados finais do conjunto de soluções não inferiores. Poderiam ser elaboradas as possíveis alternativas de investimento para a bacia de forma a que os benefícios obtidos justifiquem os investimentos a serem feitos.

Desta forma, como um exemplo, foi otimizado primeiramente o objetivo Qualidade da Água e os valores para os demais objetivos foram fixados de acordo com as tabelas e gráficos das relações para a trabalhabilidade da função de compromisso.

Observando-se os gráficos (figuras 5.10 a 5.15) e tabelas (5.5 e 5.6) obtidos para a função de compromisso, pode-se inferir que os melhores resultados de tratamento de trechos seriam os trechos 3-4 e 9-10, se observa-se pela DBO, que tem custos respectivos de US\$ 3.320.924,22 e US\$ 9.776.095,64. O trecho 3-4 tem pertinência total (um) nas classes “pouco social”, para o comprometimento social da solução, e “pouco impacto negativo”, para a avaliação ambiental da solução, ou seja a solução não implicaria em grande comprometimento social mas, em compensação, teria também pouco impacto ambiental negativo no ambiente urbano. O trecho 9-10 tem pertinência total (um) nas classes “± social”, para o comprometimento social da solução, e “impacto negativo”, para a avaliação ambiental da solução, ou seja, a solução teria um bom comprometimento social, mas também traria um impacto ambiental negativo no ambiente urbano.

Para as fontes de poluição, a que daria melhor resultado, ainda olhando pela DBO, seria o tratamento dos resíduos sólidos domésticos, seguida pela população urbana. Se observaram-se os custos desse tratamento, vê-se que o mais barato é o tratamento dos resíduos sólidos domésticos, que custa em torno de US\$139.746,71, enquanto a população urbana custa em torno de US\$6.552.764,90. Se supuserem-se patamares para investimento na bacia, vê-se que seria mais viável primeiramente investir no tratamento de resíduos sólidos domésticos e depois em partes do tratamento da população urbana.

Olhando-se pelo parâmetro coliformes, vê-se que os melhores resultados seriam obtidos com o tratamento da dessedentação animal. Cabe aqui um parênteses. Há uma divergência do resultado obtido por Rio Grande do Sul (1996) de que, para o parâmetro coliformes, os melhores resultados seriam obtidos pelo tratamento dos efluentes da População Urbana. Olhando o gráfico 5.11, observa-se que a maior melhoria é obtida pelo tratamento de todas as fontes de poluição do trecho da cabeceira, e que o tratamento dos outros trechos pouco influi na concentração de coliformes no rio. Como na cabeceira, pela distribuição adotada, a maior concentração é a dessedentação animal, esta pode ter sido a causa da divergência dos resultados para as fontes de poluição que mais interferem nos níveis de concentração dos coliformes, gráfico 5.14.

O tratamento da dessedentação animal custa em torno de US\$83.692,57, portanto mais barato que os resíduos sólidos domésticos e, com a melhora dos coliformes, ter-se-ia um maior benefício social, já que os coliformes são os responsáveis pela transmissão de doenças. Mas, ainda assim, ficaríamos longe dos padrões de enquadramento da classe 3, que seja. Na tabela 5.7 estão resumidas as alternativas comentadas.

Tem-se então que seriam várias as opções para alternativas de tratamento do rio dos Sinos. A prioridade a ser dada a cada tratamento varia de acordo com os interesses da bacia, se será dada prioridade ao tratamento de uma determinada fonte de poluição ou a um determinado trecho da bacia.

Tabela 5-7 – Alguns exemplos de possíveis alternativas considerando a otimização do objetivo qualidade da água

Parâmetro Referência	Prioridade	Melhores Resultados	Custo (US\$)	Objetivo Social	Objetivo Ambiental
DBO	Trecho	9-10	9.776.095	1 ±Social	1 impacto negativo
		3-4	3.320.924	1 pouco social	1 pouco impacto negativo
	Fontes	Resíduos Sólidos Domésticos	139.746		
		População Urbana	6.552.764		
Coliformes	Trecho	Cabeceira	12.462.170	1 não social	1 nenhum impacto negativo
		Fontes	Dessedentação Animal	83.692	

### 5.2.7 DEFINIÇÃO DE PREFERÊNCIAS

Diante das diversas alternativas a serem simuladas, resolveu-se, neste ponto do trabalho, mudar a metodologia previamente estabelecida e consultar um tomador de decisões. Resolveu-se procurar o Comitê de Bacias do Rio dos Sinos – Comitesinos. O primeiro contato foi com seu então presidente, o eng<sup>o</sup> Paulo Renato Paim. Na oportunidade, foi exposto o trabalho até então desenvolvido e dúvidas com relação a cenários a simular. As dúvidas foram levadas à Comissão Técnica de Acompanhamento – CPA.

Foi realizada então uma reunião com a CPA no dia 03 de julho de 2002, na qual foi exposto o trabalho já desenvolvido. Ficou clara a preocupação do comitê com a SAÚDE.

Com esse direcionamento, seria mais interessante tratar os coliformes. Se fosse dada prioridade a esse parâmetro, a fonte mais significativa seria tratar a dessedentação animal. Porém foi colocada a dificuldade do tratamento dessa fonte por um dos membros da CPA. Ainda assim, considerando os coliformes, segue-se que as fontes mais significativas são resíduos sólidos domésticos e população urbana.

Foi colocado que a saúde também está relacionada com a coleta de esgoto, pois sanear também é melhorar a saúde da população, o que estaria relacionado com efluentes domésticos. Foi explicado que o custo adotado para essa fonte de poluição envolve os custos de coleta e tratamento dos efluentes da população urbana. Baseado no trabalho de Motta e Mendes (1999), o custo por vida salva para os três serviços de saneamento (tratar a água, coletar o esgoto e tratar o esgoto) é menor do que para cada serviço em separado. Como na bacia dos Sinos já existe o serviço de água tratada, restaria investir nos outros dois serviços. Mas sanear também é retirar o lixo.

Foi questionada, porém, a distribuição utilizada para coliformes baseada nos dados de DBO. Foi explicado que, na oportunidade, os dados necessários para uma melhor distribuição não estavam disponíveis. Decidiu-se então dar prioridade ao parâmetro DBO com tratamento prioritário dos resíduos sólidos domésticos e seguido de efluentes urbanos, que são os tratamentos que têm melhores resultados para DBO e coliformes, e de outras fontes. Estudar-se-á em qual trecho deverá ser aplicado o recurso que trará melhor resultado, buscando como objetivo principal a melhora da qualidade da água do rio.

A segunda preocupação do comitê é “gente”, quando, então, se daria prioridade ao objetivo de comprometimento social. Com esse objetivo, conforme metodologia adotada, dar-se-ia prioridade ao tratamento dos trechos de jusante. Foi colocado que se tratar o trecho 3-4, que é mais à montante, ter-se-iam melhores resultados para a qualidade da água ou ainda o trecho 9-10. Segundo a colocação de um dos membros, cada prefeito tem interesse em realizar obras na sua jurisdição, o que envolve a negociação política, que deve ser envolvida na discussão do gerenciamento da bacia.

No entanto, a principal prioridade é SAÚDE. Optou-se por trabalhar mais a saúde e apresentar um estudo mais detalhado de uma só prioridade. Foi estabelecido que o prazo seria de 15 anos, e com um investimento anual de US\$ 500.000,00. Para a simulação do cenário fixado, será considerada a eficiência das estações de tratamento.

## 6 RESULTADOS E CONCLUSÕES

Na aplicação da metodologia à bacia do rio dos Sinos, foram identificados quatro objetivos a serem compatibilizados, quais sejam: a eficiência econômica; a melhoria da qualidade da água, expressa pela concentração de DBO, OD e coliformes; o comprometimento social e o menor impacto ambiental. Foi ainda elaborada uma função de compromisso e estabelecidas relações para sua trabalhabilidade.

Quanto aos objetivos identificados e suas relações para a trabalhabilidade da função de compromisso, obteve-se que:

- a) a eficiência econômica foi estabelecida em termos das funções de custo obtidas de Rio Grande do Sul (1996), em que, para cada estação de tratamento da solução proposta foi estimado um custo. Estes custos foram agrupados por fontes de poluição e por trechos. A divisão dos trechos foi baseada na discretização, que foi utilizada para simular o objetivo de qualidade da água;
- b) a qualidade da água foi estabelecida em termos da concentração de DBO, OD e coliformes. Ela foi simulada pelo modelo hidrodinâmico em regime não permanente e de qualidade da água, IPH5. Foram simulados o tratamento de cada um dos sub-trechos em que foi dividido o trecho de estudo ( que vai de Campo Bom até a foz) e de cada uma das fontes de poluição;
- c) o comprometimento social foi estabelecido por classes analíticas fuzzy, em função da distribuição populacional. Para o estabelecimento, foi considerada a solução de maior comprometimento social aquela que atende a um maior número de pessoas. Para as relações de trabalhabilidade da função de compromisso, foram identificados o nível de comprometimento social para cada um dos trechos em que o trecho de estudo foi dividido.
- d) o impacto ambiental também foi estabelecido em termos de classes analíticas fuzzy em função da distribuição populacional. Para o seu estabelecimento, foram consideradas as

interferências no meio ambiente como um todo, norteadas, por dois fatores: o impacto causado por uma estação depende de seu tamanho e sua localização; o impacto causado na vizinhança da estação de tratamento (principalmente núcleos urbanos). Semelhantemente ao objetivo social, foram identificados os impactos ambientais para cada um dos sub-trechos em que o trecho de estudo foi dividido.

Sendo assim, a função de compromisso tem por objetivo identificar as soluções ótimas para a bacia do rio dos Sinos. Ela busca uma maior eficiência econômica, uma melhor qualidade da água, um maior comprometimento social e um menor impacto ambiental.

Diante do apresentado, verificou-se que inúmeras seriam as possibilidades de simulação de cenários para a bacia do rio dos Sinos. Por isso, resolveu-se mudar a metodologia de trabalho e consultar um tomador de decisões, no caso o Comitê Sinos, para melhor orientação quanto a que restrições adotarmos para os objetivos. Nesse sentido, incorporou-se preferências à técnica escolhida, o Método por Restrição, que é uma técnica de geração. Foi, dessa forma, simulado o cenário, que a seguir apresentado, para a identificação de trechos prioritários a serem tratados. Vão ser discutidos os critérios adotados para obtenção dos resultados bem como será feita uma análise dos resultados obtidos.

## **6.1 CRITÉRIOS ADOTADOS E DEFINIÇÃO DE TRECHOS PRIORITÁRIOS**

A primeira prioridade adotada foi, conforme preferência do comitê, a SAÚDE. De acordo com essa prioridade, o parâmetro de referência considerado foi o coliformes e, em seguida, a DBO.

O trabalho com a função de compromisso se deu da seguinte forma.

De acordo com as preferências acima definidas, em primeiro lugar, deveria ser otimizado o objetivo Qualidade da Água. Esta otimização se deu buscando a alternativa que

traria a maior melhoria nos níveis de concentração dos coliformes e, a seguir, DBO, no rio dos Sinos. Foram ordenados os trechos de preferência para o tratamento de efluentes. Porém, esta definição estava sujeita a uma restrição econômica que é um máximo de US\$ 7.500.000,00 por ano. Então, a melhoria na qualidade da água foi buscada procurando-se verificar o custo da alternativa de incluir mais um trecho para ser tratado. A ordenação dos trechos de preferência para o tratamento implicou em determinados níveis de comprometimento social e impacto ambiental que serão sentidos de acordo com o trecho a ser tratado.

Devido aos possíveis problemas pela distribuição adotada para os coliformes, foi considerado apenas o tratamento do trecho da cabeceira, que é o que mais influi nos níveis de concentração do coliformes. Segundo as concentrações em cada fonte de poluição, foi dada prioridade a dessedentação animal, resíduos sólidos domésticos e população urbana.

Tendo como prioridade a DBO, foram consideradas as fontes poluidoras que, tratadas, mais reduziriam a concentração do parâmetro considerado. A seguir, foram considerados os trechos em que essas fontes tratadas mais reduziam a concentração do parâmetro prioritário. Foi considerado ainda que a prioridade seria para a redução do pico de maior concentração de DBO, quando este era o parâmetro de referência considerado e, depois, para uma melhora da qualidade da água do rio como um todo.

As eficiências adotadas para os tratamentos considerados foram: parâmetro DBO, eficiência de 83% ; parâmetro coliformes, eficiência de 93%.

Desta forma, foram estabelecidos os trechos prioritários a serem tratados, cujo ordenamento pode ser visto na tabela 6.1, onde:

coluna 1 – ordem do trecho por preferência para tratamento;

coluna 2 – parâmetro de referência considerado;

coluna 3 – a fonte poluidora a ser tratada;

coluna 4 – o trecho em que a fonte poluidora deve ser tratada;

coluna 5 – custo do tratamento da fonte poluidora naquele trecho específico;

coluna 6 – custo acumulado do tratamento dos trechos até o trecho em questão;

coluna 7 – nível de comprometimento social da alternativa de tratar o trecho

coluna 8 – impacto ambiental sentido no trecho a ser tratado;

Nas figuras 6.1 a 6.3 podem ser observadas as simulações do objetivo qualidade da água, visto que elas indicam a redução acumulada da concentração dos parâmetros de referência (coliformes, DBO, OD) que seriam obtidas caso fosse tratado até o trecho da ordem de preferência para o tratamento, da seguinte forma:

Nenhum é a simulação do rio onde nenhum trecho foi tratado;

simul 01 é a simulação do tratamento do trecho de ordem 01;

simul 02 é a simulação do tratamento dos trechos de ordem 01 e 02;

simul 03 é a simulação do tratamento dos trechos de ordem 01, 02 e 03 e assim por diante;

Classes 1, 2 e 3 são os limites de classe adotados pela resolução CONAMA nº 20/86.

As simulações 19, opção 01, e 19, opção 02, são alternativas de próximos tratamentos após o trecho de ordem 18.

Foi considerado um investimento máximo de US\$ 7.500.000,00 por ano, devido ao valor previsto pelo comitê ser de US\$ 500.000,00 por ano para 15 anos. Considerando valores cumulativos, ou seja, a cada ano teria um acréscimo de US\$500.000,00 no investimento feito por ano, chegar-se-ia a um valor de US\$7.500.000,00 por ano.



Tabela 6.1 - Ordenamento dos trechos prioritários e valores assumidos pelos objetivos

Ordem	Parâmetro Referência	Fonte	Trecho	Custo Parcial (US\$/ano)	Custo Acumulado (US\$/ano)	Objetivo Social	Objetivo Ambiental
1	coliformes	desd.animal	cabeceira	69.228	69.228	1 não social	1 nenhum impacto negativo
2	coliformes	res.sl.dom.	cabeceira	38.599	107.827	1 não social	1 nenhum impacto negativo
3	coliformes	pop.urb.	cabeceira	1.742.964	1.850.791	1 não social	1 nenhum impacto negativo
4	DBO	res.sl.dom.	09-10	5.927	1.856.718	1+-social	1 impacto negativo
5	DBO	res.sl.dom.	03-04	8.629	1.865.347	1 pouco social	1 pouco impacto negativo
6	DBO	pop.urb.	09-10	210.741	2.076.088	1+-social	1 impacto negativo
7	DBO	pop.urb.	03-04	469.720	2.545.807	1 pouco social	1 pouco impacto negativo
8	DBO	desd.animal	09-10	2.708	2.548.515	1+-social	1 impacto negativo
9	DBO	desd.animal	03-04	702	2.549.217	1 pouco social	1 pouco impacto negativo
10	DBO	res.sl.dom.	08-09	13.628	2.562.845	1+-social	1 impacto negativo
11	DBO	pop.urb.	08-09	690.689	3.253.534	1+-social	1 impacto negativo
12	DBO	desd.animal	08-09	529	3.254.063	1+-social	1 impacto negativo
13	DBO	res.sl.dom.	01-02	1.293	3.255.356	0,51não social / 0,51pouco social	0,51nenhum impacto negativo / 0,51 pouco impacto negativo
14	DBO	res.sl.dom.	02-03	4.186	3.259.541	1 pouco social	1 pouco impacto negativo
15	DBO	pop.urb.	01-02	68.962	3.328.503	0,51não social / 0,51pouco social	0,51nenhum impacto negativo / 0,51 pouco impacto negativo
16	DBO	pop.urb.	02-03	255.160	3.583.663	1 pouco social	1 pouco impacto negativo
17	DBO	desd.animal	02-03	931	3.584.594	1 pouco social	1 pouco impacto negativo
18	DBO	desd.animal	01-02	103	<b>3.584.697</b>	0,51não social / 0,51pouco social	0,51nenhum impacto negativo / 0,51 pouco impacto negativo
19	opção 1	desd.animal	todos demais trechos	9.492	3.594.189		
		res.sl.dom.	todos demais trechos	67.485	3.661.674		
		pop.urb.	todos demais trechos	3.114.530	6.776.204		
		efl ind	09-10 parte	723.796	<b>7.500.000</b>	1+- social	1 impacto negativo
19	opção 2	efl ind	09-10 parte	3.915.303	<b>7.500.000</b>	1+- social	1 impacto negativo

### Trechos Prioritários - nível 9,05 - Coliformes

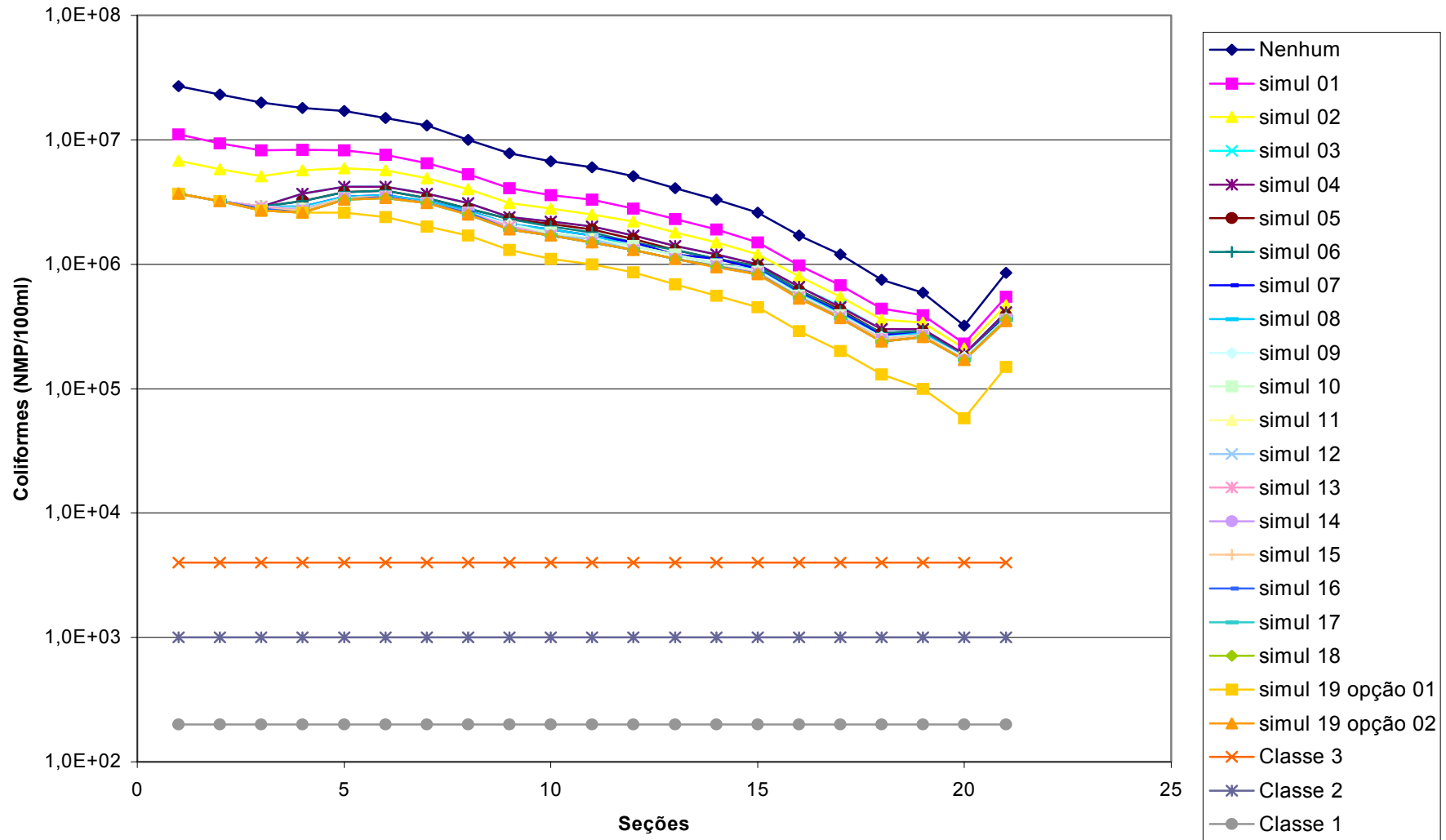


Figura 6-1 - Objetivo qualidade da água para trechos prioritários , parâmetro coliformes

Trechos Prioritários - nível 9,05 - DBO

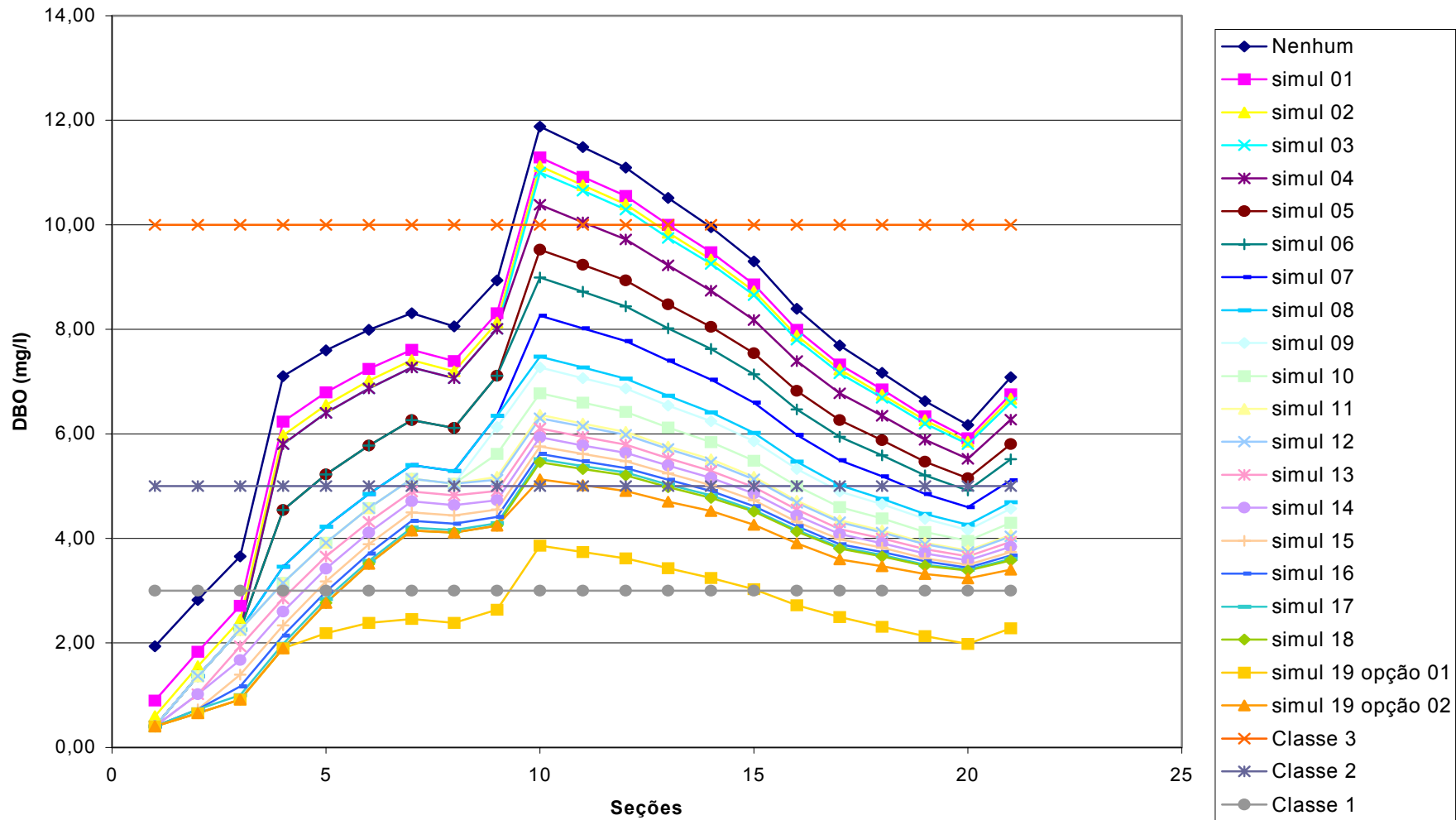


Figura 6-2 - Objetivo qualidade da água para trechos prioritários, parâmetro DBO

Trechos Prioritários - nível 9,05 - OD

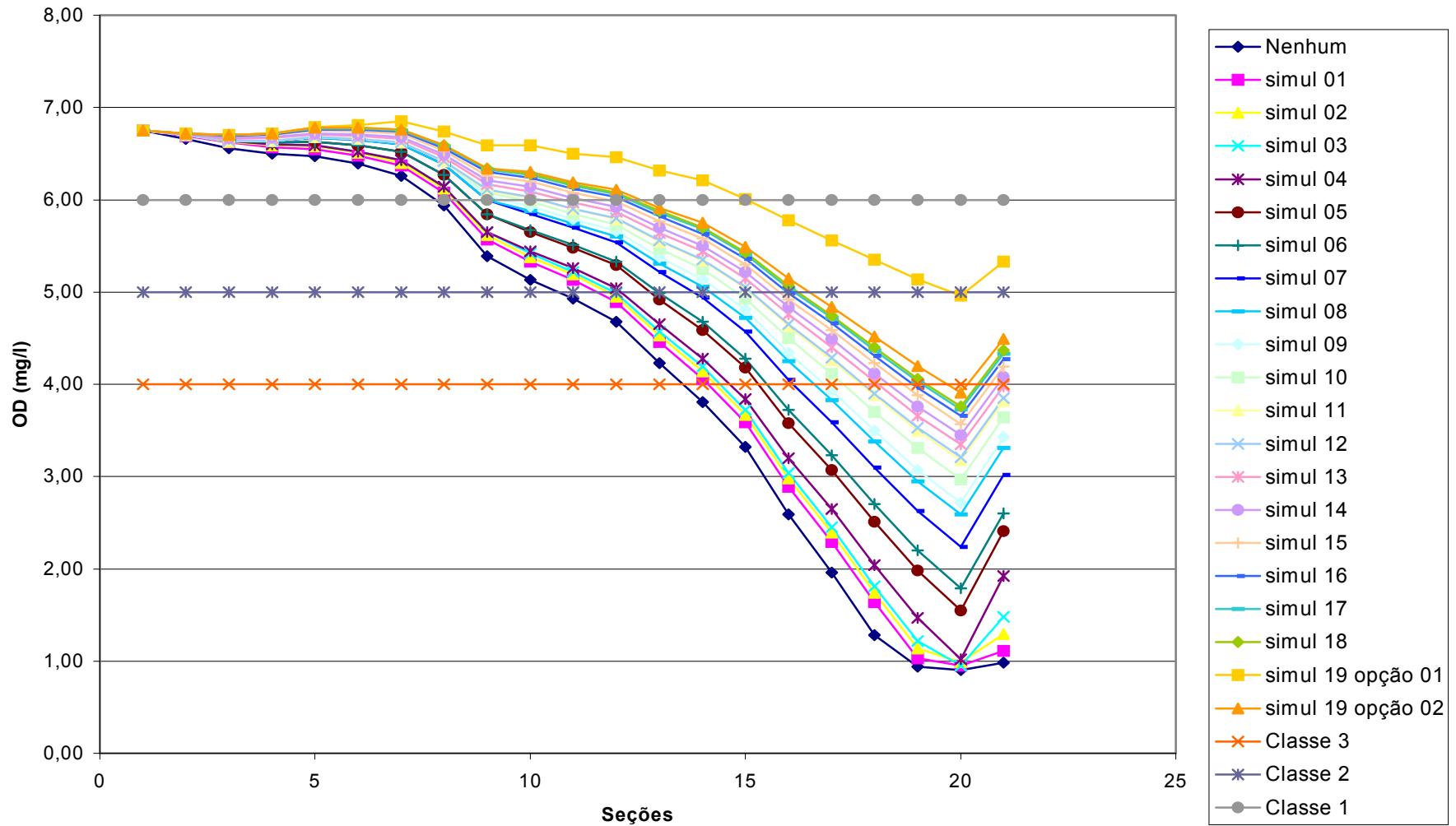


Figura 6-3 -Objetivo qualidade da água para trechos prioritários, parâmetro OD

## 6.2 ANÁLISE DOS RESULTADOS

De uma forma geral, olhando pela tabela 6.1, pode-se verificar que, para o objetivo Qualidade da Água, a prioridade é dada ao tratamento dos trechos mais à montante, mesmo quando considerado o parâmetro coliformes. Isto considerando que a despoluição do rio traria uma menor incidência de doenças de veiculação hídrica e, conseqüentemente, um maior benefício à saúde.

Considerando que o objetivo Qualidade da Água foi analisado à parte, o tratamento dos trechos mais à montante, no entanto, não implicaria em um maior benefício social, já que seriam feitos em áreas de menor concentração populacional. Apesar de que trariam benefício à qualidade do rio, com menor impacto ambiental no meio urbano.

No entanto, a partir do trecho de preferência para tratamento de ordem 18, não existem trechos de distinta prioridade, o que inclui o tratamento de trechos mais à jusante, onde a densidade demográfica é maior. Desta forma, poder-se-ia obter um maior benefício social da solução, pois não adianta ter o rio despoluído se não houver uma coleta e tratamento do esgoto e retirada do lixo nas áreas mais densamente habitadas. Maximiza-se, assim, o benefício à saúde da população da bacia.

Considerando-se estes fatores, pode-se abrir as alternativas de tratamento para uma negociação na bacia, dando, desta forma, liberdade para que os prefeitos de municípios mais a jusante no rio também tenham incentivos para investir no tratamento de esgoto em sua própria jurisdição. Conseguem-se, assim, minimizar os atritos decorrentes de prioridades para investimento na bacia.

A seguir, foi feita uma análise por parâmetros adotados para a identificação da qualidade da água. As análises são basicamente no que diz respeito ao benefício acumulado, obtido para a qualidade da água, e o valor a ser investido, em dólares

### **6.2.1 PARÂMETRO COLIFORMES**

Nas simulações, com prioridade ao parâmetro coliformes, são reduzidas as concentrações deste parâmetro, porém, quando a prioridade é o parâmetro DBO, as reduções no parâmetro coliformes são menos significativas. A simul 19, opção 01, reduz bastante a concentração de coliformes em relação a simul 03. As reduções não são suficientes para o enquadramento sequer na classe 3, devido aos altos valores de concentração deste parâmetro.

### **6.2.2 PARÂMETRO DBO**

No estado atual, o rio dos Sinos tem um pequeno trecho, próximo à cabeceira, na classe 1; outro pequeno trecho à jusante do primeiro na classe 2; um trecho próximo à seção 10, que está na classe 4 e o restante, na classe 3.

Considerando o pico em que a concentração de DBO é maior, tem-se que, na simul 05, todo o rio se enquadra pelo menos na classe 3. Seria necessário investir para isto US\$ 1.865.346,88 por ano para o tratamento. Na simul 18, o rio se aproxima quase todo de estar na classe 2. Seriam necessários, então, US\$ 3.584.696,56 por ano. Na simul 19, opção 01, todo o rio estaria na classe 2, porém, para que fosse alcançada a classe 1, seriam necessários maiores investimentos, no entanto todo o rio estaria na classe 1, exceto um trecho próximo à seção 10.

Se observar-se, em termos de redução da concentração de DBO, com a simul 13, Ter-se-ia uma redução de 6 mg/l de DBO. Seriam necessários US\$ 3.255.355,51 por ano. Os próximos US\$ 329.340,95 trariam um benefício adicional de quase 1 mg/l, simul 18. Para que fosse obtido mais um benefício adicional de 1mg/l, seriam necessários US\$ 3.915.303,44 por ano, simul 19, opção 01

### **6.2.3 PARÂMETRO OD**

Para o OD, a relação se inverte, ou seja, procura-se aumentar a concentração no rio. Na situação atual, o rio, no trecho inicial, à montante, se enquadra na classe 1, um pequeno trecho à jusante deste trecho inicial, na classe 2, outro trecho mais à jusante na classe 3 e os demais, na classe 4.

Com a simul 18, tem-se que apenas um pequeno trecho junto à foz não estaria na classe 3. Com a simul 19, opção 01, todo o rio estaria na classe 2.

Com US\$ 3.584.696,56, tem-se um ganho de 3mg/l, o rio passa quase todo para a classe 3. Com mais US\$ 3.915.303,44, ter-se-ia um ganho de mais, apenas, 1 mg/l, porém, seria o suficiente para o rio passar todo para a classe 2.

### **6.2.4 OUTRAS ANÁLISES**

A primeira observação é que a simul 19, opção 01, é melhor que a simul 19, opção 02, pois apresenta menores concentrações de coliformes e DBO e maiores concentrações de OD.

Para os trechos a partir da simul 18, não se destacam trechos prioritários a serem tratados na simul 19, opção 01, porém, a prioridade seria para os trechos mais à montante, pois, segundo indicam as simulações, estes teriam mais efeito sobre a melhora da qualidade da água do rio. A ordem, segundo as prioridades adotadas, seria, pelo parâmetro coliformes, tratar a dessedentação animal e, pelo parâmetro DBO, os resíduos sólidos domésticos e, em seguida, o efluente da população urbana.

Segundo as prioridades adotadas, após esses trechos, seria indicado investir na fonte poluidora dos efluentes industriais no trecho 09-10, por ser esta a fonte que, depois das já citadas, traria melhores resultados e, por ser o trecho 09-10 o que traz maior redução ao pico de maior concentração da DBO. Na simul 19, opção 2, ve-se a simulação para o tratamento de

parte da contribuição deste trecho. O valor total para o tratamento da fonte de efluentes industriais no trecho 09-10 seria de US\$ 8.787.941,57 por ano.

### **6.3 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES**

Foram desenvolvidas a ferramenta e a metodologia, a fim de buscar formas de quantificar, avaliar e analisar múltiplos objetivos envolvidos na tomada de decisão em projetos, planejamento e gerenciamento de bacias hidrográficas. O desenvolvimento da metodologia inclui formas de identificação e/ou definição de condicionantes envolvidos e a elaboração de função de compromisso.

O trabalho usou, como estudo de caso, a bacia do rio dos Sinos, e todo o desenvolvimento se baseou nos dados desta bacia, atingindo, assim, os objetivos da pesquisa para a bacia. Foram identificados quatro condicionantes principais para a bacia do rio dos Sinos, quais sejam: eficiência econômica, melhoria da qualidade da água, comprometimento social e minimização do impacto ambiental. Cada um dos condicionantes foi modelado por metodologias já consagradas para tal, a novidade nesse sentido foi o casamento delas tornando o problema mais complexo de ser resolvido. Foi desenvolvida uma função de compromisso pela programação multiobjetivo, pelo método de restrições. A novidade neste sentido foi a incorporação de preferências do tomador de decisões ao método, mudando o fluxo de informações. A técnica deixou de ser de geração, tornou-se uma técnica que incorpora preferências.

Foi elaborada, desta forma, uma tabela e gráficos para o auxílio da tomada de decisão para planejamento de intervenções no rio dos Sinos. Definindo-se o que deve ser feito primeiro em um plano de despoluição para a bacia. O trabalho, no entanto, foi baseado em uma linha de preferências estabelecida pelo Comitesinos. Nada impede, porém, que estas preferências se alterem, se for o caso, reordenando-se os trechos prioritários de acordo com as



novas preferências estabelecidas. Isto é perfeitamente viável, já que a função de compromisso já está desenvolvida.

Todo o trabalho, no entanto, se baseou em dados preexistentes, sendo identificadas algumas deficiências nestes dados. Foram, ainda, feitas algumas simplificações e suposições.

Diante do que foi estudado e analisado seria recomendável que:

1) de forma genérica:

- a metodologia fosse aplicada a outras bacias para verificação e melhor validação da mesma;
- estudo de melhores formas de avaliação econômica dos tratamentos a serem empreendidos;

2) para a bacia do rio dos Sinos

- atualização dos dados de qualidade e quantidade da água e hidráulicos do rio para uma melhor representação deste pela modelagem;
- melhor identificação e mapeamento das fontes poluidoras na bacia do rio dos Sinos;
- melhor representação da distribuição populacional na bacia;
- um estudo mais aprofundado dos impactos ambientais da solução proposta para a bacia;

Para futuras pesquisas que podem ser feitas, levando-se em consideração o tema abordado, pode-se dizer que o mesmo é bastante amplo, e as pesquisas podem ser feitas em muitas linhas. Abaixo, são apresentadas algumas idéias:

- a) estabelecer relações entre lotes ou glebas vagos em relação a densidade populacional para diversas cidades, para verificação da porcentagem de áreas ainda não utilizadas para zonas de urbanização consolidada;
- b) elaborar estudos no sentido de melhor fixar parâmetros para a identificação de fontes poluidoras, principalmente fontes difusas. As fontes pontuais, atualmente, se exigem que

sejam licenciadas pela FEPAM. Devido a isto, existe um cadastro das mesmas. Porém, para as fontes difusas isto é mais difícil, apesar de existir um cadastro, o que pode acarretar em erros de estimativa de suas cargas poluidoras;

- c) Estabelecer critérios claros para a atenuação de cargas poluidoras. As fontes poluidoras geram uma determinada carga de poluição que normalmente é atenuada até chegar ao seu lançamento nos cursos d'água. No entanto, os critérios para esta atenuação não são pré-estabelecidos, o que pode ocasionar distorções na estimativa da contribuição da carga poluidora das fontes de poluição;
- d) Pesquisar, no sentido da verificação da aplicabilidade dos diversos métodos de programação multiobjetivo a planejamentos de unidades de gerenciamento, que envolvam recursos hídricos;

## 7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AMARAL G.L., OLENIKE J.E. 2004 **A Insuportável Carga Tributária Empresarial Brasileira**. Estudo do Instituto Brasileiro de Planejamento Tributário disponível na World Wide Web  
[http://www.ibpt.com.br/arquivos/estudo/INSUORTAVEL\\_CARGA\\_TRIBUTARIA\\_EMPRESARIAL.pdf](http://www.ibpt.com.br/arquivos/estudo/INSUORTAVEL_CARGA_TRIBUTARIA_EMPRESARIAL.pdf)
- AMARAL G.L., OLENIKE J.E., NASCIMENTO G.M.F. 2004 **Tributação sobre a Renda, Consumo e Patrimônio no Brasil**. Estudo do Instituto Brasileiro de Planejamento Tributário disponível na World Wide Web  
[http://www.ibpt.com.br/arquivos/estudos/TRIBUTACAO\\_SOBRE\\_A\\_RENDA,\\_PATRIMONIO\\_E\\_CONSUMO.pdf](http://www.ibpt.com.br/arquivos/estudos/TRIBUTACAO_SOBRE_A_RENDA,_PATRIMONIO_E_CONSUMO.pdf)
- AVELINE C.C., BEMVENUTI A., BECKER C., GRILLO H., LEAL R.P., PORCHER R., VOSS W.V. 1995 **Os Banhados do Rio dos Sinos- E Porque Devem ser Preservados**. UPAN. Ed. Agatha. 82p.
- BARDOSSY A., BOGARDI I., DUCKSTEIN L. 1985 **Composite Programming as na Extension of Compromise Programming**. In.: “Mathematics of Multiple Objective Optimization”, P. Serafini, (Editor). Springer Verlag, Wien, pp. 375-408, 1985;
- BÁRDOSSY A., DUCKSTEIN L. 1992 **Analysis of a Karstic Aquifer Management Problem by Fuzzy Composite Programming** Water Resources Bulletin American Water Resources Association vol 28 n 1 p 63- 73. feb.
- BOGARDI J.J., DUCKSTEIN L. 1992 **Interactive Multiobjective Analysis Embedding the Decision Maker’s Implicit Preference Function** Water Resources Bulletin. vol 28 n1. jan/feb.

- BORDAS M.P., LANNA A.E. 1984 **Problemas de Utilização e Controle dos Recursos Hídricos no Brasil** . Publicação 10. Instituto de Pesquisas Hidráulicas-UFRGS. Porto Alegre. 130p.
- BORJA P.C., MORAES L. R. S. 2003 **Indicadores de Saúde Ambiental com Enfoque para a Área de Saneamento. Parte 1 – Aspectos Conceituais e Metodológicos. Parte 2 – Estudos de Caso.** Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental. Engenharia Sanitária e Ambiental. Vol. 8, n° 1, jan/mar, n° 2, abr/jun. p.13-38.
- BRAGA JR.B.P.F. 1987 **Técnicas de Otimização e Simulação Aplicadas em Sistemas de Recursos Hídricos** em “Modelos para Gerenciamento de Recursos Hídricos” F.T. Barth., C.T. Pompeu, H.D. Fill, C.E.M. Tucci, J. Kelman, B.P.F. Braga jr. vol 1. cap 5. Associação Brasileira de Recursos Hídricos.
- BRAGA B., GOBETTI L. 1997 **Análise Multiobjetivo** em “Técnicas Quantitativas para o Gerenciamento de Recursos Hídricos” org. R.L.L. Porto. cap 7. Associação Brasileira de Recursos Hídricos.
- BRANS J. e VINCKE P. 1985 **A Preference Ranking Organization Method (The PROMETHEE Method for Multiple Criteria Decision-Making.** Management Science vol. 31 n. 6 p.647-656;
- BRZESOWSKY W.J., VAN VILSTEREN A.E.M. 1988 **An Economic Evaluation of Sugar Cane Production Under Different Water Supply Systems in Thailand.** Agricultural Water Management, vol 13 p. 83-91.
- BURN D.H., MCBEAN E.A. 1985 **Optimization Modelling of Water Quality in a Uncertain Environment** Water Resources Research vol 21. n7. p934-940. July.
- CHAKRAVORTY U., ROUMASSET J. 1994 **Incorporating Economic Analysis in Irrigation Design and Management** Journal of Water Resources Planning and Management. vol 120 n. 6 p.819-835.

- CHARNES A. COOPER W.W. 1961 **Management Models and Industrial Applications of Linear Programming**. Vols I e II, John Willey and Sons, New York, New York;
- CHAVES E. M. B. 1998 **A Economia Urbana e os Recursos Hídricos** Simpósio Internacional de Recursos Hídricos **Anais**. out. Gramado.
- CHEN, S. H. 1985 **Ranking Fuzzy Numbers wuith Maximizing Set and Minimizing Set**. Fuzzy Sets and Systems n° 17 p 113-129.
- COHEN E., FRANCO R. 1993 **Avaliação de Projetos Sociais** 3ª edição de 1999 Editora Vozes 312p. Petrópolis.
- COHON J.L. 1978 **Multiobjective Programming and Planning**. Mathematics in Science and Engineering. vol 140. Academic Press. New York. 333p.
- COHON J.L. MARKS D.H. 1975 **A Review and Evaluation of Multiobjective Programming Techniques** Water Resources Research vol 11 n 2. April.
- COMITESINOS 1998 **Comitesinos 10 Anos- Comitê de Preservação Gerenciamento e Pesquisa da Bacia do Rio dos Sinos – Um Divisor na Política das Águas no RS** apoio Companhia Riograndense de Saneamento-Corsan, Pró-Guaíba, Governo do Estado do Rio Grande do Sul. São Leopoldo. 22p.
- CONAMA 1986 **Resolução n° 20** Conselho Nacional de Meio Ambiente.
- COMPANHIA PERNAMBUCANA DO MEIO AMBIENTE – CPRH 2003 **Termo de Referência para Elaboração de Estudo de Impacto Ambiental – EIA, Relatório de Impacto Ambiental – RIMA Relacionado à Implantação de Sistemas de Esgotos Sanitários**. Disponível na World Wide Web  
<http://www.cprh.pe.gov.br/downloads/tr-esgotos-sanitarios.pdf>;
- DE LUCA S.J., MONTEGGIA L.O.,MILANO L.B.H.,MARQUES D.M.L.M., CASTRO C., CYBIS L.F. 1987 **A Problemática dos Resíduos Líquidos Industriais na Bacia do Rio dos Sinos. Relatório Final**. Instituto de Pesquisas Hidráulicas vol 1. 191p.

DIÁRIO DO NORDESTE 1999 **Praia da Leste Oeste Continua com o Mau Cheiro**  
disponível na World Wide Web

<http://diariodonordeste.globo.com/1999/02/05/010047.htm>

DIARIO DO VALE 2004 **Moradores do Aterrado Rejeitam Estação de Tratamento de Esgoto** em Diário on-line disponível na World Wide Web

<http://www2.uol.com.br/diariodovale/arquivo/2001/junho/25/page/fr-politica.htm>

DIMITROVA I. KOSTURKOV J. 1988 **Optimization of Water Quality in River Basin** in “Computational Methods in Water Resources” Numerical Methods for Transport and hydrologic Processes. Internacional Conference 7. **Anais** vol 2. p405-410. june.

DMAE 2004 **Socioambiental: o Futuro de Porto Alegre Passa por Aqui** Departamento Municipal de Água e Esgoto da Prefeitura de Porto Alegre. Disponível da World Wide Web

<http://www.portoalegre.rs.gov.br/dmae/interna.asp?proj=263&secao=776&m1=12525>

DUBOIS D., PRADE H. 1980 **Fuzzy Sets and Systems: Theory and Applications** Academic Press, New York.

ELY A. 1990 **Economia do Meio Ambiente - Uma Apreciação Introdutória Interdisciplinar da Poluição, Ecologia e Qualidade Ambiental**. Ed.4. Fundação de Economia e Estatística Siegfried Emanuel Heuser. Porto Alegre. 180p.

ERLENKOTTER D. 1976 **Coordinating Scale and Sequencing Decisions for Water Resources Projets** In “ Economic Modeling for Water Policy Evaluation” R.M. Thall, E. Heady, T. Schad, A K. Schwartz, R. G. Thompson North-Holland / TIMS Studies in the Management Sciences American Elsevier Publishing company, Inc. New York. 261p.

FARIAS J.C.M., MELO P.A., SOARES F.G., KABBAZ D.H. 1993 **Avaliação do Uso Múltiplo das Águas do Rio São Francisco – Síntese dos Estudos**. CESF- Companhia Hidro-elétrica do São Francisco. Comissão de Integração Elétrica

Regional: Seminário Especial sobre Meteorologia, Hidrologia e sua Influência sobre a Geração de Energia Elétrica - HIDROCER - Síntese dos Trabalhos Apresentados. Florianópolis. Ago.

FEPAM 2004 **Informações Básicas para Licenciamento de Estações de Tratamento de Esgoto Sanitários Públicos Empreendimentos Novos; Instruções Técnicas para Licenciamento Prévio de Sistemas de Destino Final de Resíduos Sólidos Urbanos**

Fundação Estadual de Proteção Ambiental Henrique Luis Roessler. Disponível na World Wide Web <http://www.fepam.rs.gov.br/central/formularios/licdiversas.asp>.

FLUG M., SEITZ H.L.H., SCOTT J.F. 2000 **Multicriteria Decision Analysis Applied to Glen Canyon Dam** Journal of Water Resources Planning and Management. vol 126. n5. p27-276. set/out.

FONTES M., FARIA V., BRASIL J.S. 2003 **A Valoração e Avaliação de Impacto Social** Disponível na World Wide Web

[http://www.socialtec.org.br/download/avaliacao\\_download/valoracao\\_e\\_avaliacao.doc](http://www.socialtec.org.br/download/avaliacao_download/valoracao_e_avaliacao.doc)

FREDERIKSEN H.D. 1996 **Water Crisis in Developing World: Misconceptions About Solutions.** Journal of Water Resources Planning and Management. Mar/Apr. vol 122 n.2, p79-87.

FREITAS J. C. 2004 **O Estatuto da Cidade e o Equilíbrio no Espaço Urbano** disponível na World Wide Web

<http://www.mp.sp.gov.br/caouma/Doutrina/Urb/O%20EstatutoFreitas.htm>

FUNDAÇÃO DE ECONOMIA E ESTATÍSTICA – FEE 2003 **IDESE – Índice de Desenvolvimento Socioeconômico** Disponível na World Wide Web

[http://www.fee.tche.br/main\\_frames.htm](http://www.fee.tche.br/main_frames.htm)

GARCIA, R.L. 1997 **Simulação da Qualidade da Água em Regime Não-Permanente no Rio dos Sinos, RS** Dissertação de Mestrado. Instituto de Pesquisas Hidráulicas UFRGS. Porto Alegre. 124p.

- GOBBETTI, L.E.C., BARROS, M.T.L., 1993 **Análise Multiobjetivo Aplicada ao Planejamento de Sistemas de Recursos Hídricos** Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos 10, Simpósio de Recursos Hídricos do Cone Sul 1. **Anais**. vol 1. p 317-326. Gramado. nov.
- GOICOECHEA A., HANSEN D.R., DUCKSTEIN L. 1982 **Multiobjective Decision Analysis with Engineering and Business Applications** John Wiley, New York, New York.
- GOLDEN J. OUELLETTE R.P., SAARI S., CHEREMISINOFF P.N. 1979 **Environmental Impact Data Book**. Ann Arbor Science.
- GOODMAN A.S. 1984 **Principles of Water Resources Planning** Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey. 563p.
- HAASE J. 2004 **Projeto Marca d'Água – Bacia 21 – Bacia do Rio Sinos (Rio Grande do Sul)**. Disponível na World Wide Web <http://www.marcadagua.org.br/bacia21.htm>
- HAASE J., COBALCHINI M.S., LEITE E.H., PINEDA M.D.S., SILVA M.L.C. 1997 **Questionamento da Aplicabilidade da Resolução CONAMA 20/86**
- HAIMES Y.Y. 1976 **Water Resources Systems Analysis: an Assessment of Direction** In “Economic Modeling for Water Policy Evaluation” R.M. Thrall, E. Heady, T. Schad, A K. Schwartz, R. G. Thompson North Holland / TIMS Studies in the Management Sciencies. American Elsevier Publish Company, Inc. New York. 261p.
- HAIMES Y.Y., HALL W.A., FREDMAN H.T. 1975 **Multiobjective Optimization in Water Resources Systems - The Surrogate Worth Trade-off Method**. Developments in Water Science. Elsevier Scientific Publishing Company. Amsterdam. 200p.
- HELLER L. 2000 **Saneamento e Saúde** Organização Pan-Americana da Saúde, Escritório Regional da Organização Mundial da Saúde – Representação do Brasil. Brasília. 97p.



- HIPEL K.W. 1992a **Multiple Objective Decision Making in Water Resources- Foreword.** Water Resources Bulletin. vol 28 n 1. p1-2.
- HIPEL K.W. 1992b **Multiple Objective Decision Making in Water Resources.** Water Resources Bulletin. vol 28 n 1. p 3-12.
- ISPN 1995 **Demanda, Oferta e Necessidade dos Serviços de Saneamento** ISPN-Instituto Sociedade, População, Natureza, Ministério do Planejamento e Orçamento, Secretaria de Política Urbana, Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada, Brasília, 220p, cap.6. Série Modernização do Setor Saneamento vol.4.
- JAMES L.D., LEE R.R. 1971 **Economics of Water Resources Planning.** McGraw-Hill Book Company 615p.
- JARDIM S.B. 2003 **A Cobrança Eficiente pela Garantia de Disponibilidade e pelo Uso da Água: Proposta de um Modelo Multicritério de Gestão** Tese de Doutorado. Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 347p.
- JORDÃO E.P., PESSOA C.A. 1975 **Tratamento de Esgotos Domésticos- Concepções Clássicas de Tratamento de Esgotos** vol 1 CETESB São Paulo 544p.
- KANSAKAR B.R., POLPRASERT C. 1983 **Integrated Wastewater Management** Journal of Environmental Engineering, vol 109. n. 3. p 619-630 June.
- KAUFMAN A., GUPTA M.M. 1988 **Fuzzy Mathematical Models in Engineering and Management Science** North Holland, Amsterdam p 338.
- KO K.S., FONTANE D. G., LABADIE J.W. 1992 **Multiobjective Optimization of Reservoir Systems Operation** Water Resources Bulletin. vol 28 n 1. p111-127.
- KRAMER R.A., EISEN-HECHT J.T. 2002 **Estimating the Economic Value of Water Quality Protection in the Catawba River Basin.** Water Resources Research. vol 38. n9. p21-1 a 21-10.

- KUHN H., TUCKER A. 1951 **Non Linear Programming** Proc. Berkeley Symp. Math. Statist. Probability, 2nd. J. Neyman ed, pp 481-492. Univ. of California Press. Berkeley.
- LANNA A.E.L. 1977 **A Modelagem no Planejamento Racional dos Recursos Hídricos** Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária,9. Belo Horizonte.
- LANNA A.E.L. 1996a **Aspectos Econômicos do Uso e Conservação dos Recursos Hídricos** Encontro Técnico sobre Uso e conservação de Recursos Hídricos. 30p.
- LANNA A. E. L. 1996b **Introdução à Gestão Ambiental e à Análise Econômica do Ambiente** Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre.
- LANNA A. E. L. 1996c **Introdução à Microeconomia e à Valoração Social de Projetos** Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre.
- LEITE E.H., HAASE J., PINEDA M.D., SILVA M.L.C., COBALCHINI M. S. 1998 **Qualidade dos Recursos Hídricos Superficiais da Bacia do Guaíba- Subsidio para o Processo de Enquadramento** Simpósio Internacional sobre Gestão de Recursos Hídricos **Anais**. Gramado. Disponível na World Wide Web <http://geocities.yahoo.com.br/singreh/Web/544/109.pdf>
- LUNA FILHO E. P. 2001 **A Coleta e a Disposição Municipal de Resíduos Sólidos: Gestão Integrada, Aspectos Administrativos, Jurídicos e Gerenciais** Banco de Textos sobre Desenvolvimento Sustentável, Disponível na World Wide Web [http://www.unilivre.org.br/centro/textos/Forum/Residuos\\_Solidos.htm](http://www.unilivre.org.br/centro/textos/Forum/Residuos_Solidos.htm)
- MACEDO P.B., MACHADO E.S., MANZOCHI L.B., ROORDA M.S. 2003 **Plano de Despoluição Hídrica da Bacia do Alto Iguaçu** XV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. **Anais**. Curitiba. Nov.

- MARIN M.C.F.C., RAMOS F. 2003 **Análise de Benefício Econômico em Despoluição Hídrica como Instrumento de Suporte à Tomada de Decisões: Estudo de Caso da Bacia do Alto Iguaçu** XV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. **Anais**. Curitiba. Nov.
- MARTINS G., BORANGA J.A., LATORRE M.R.D.O., PEREIRA H. A. S.L. 2002 **Impacto do Saneamento Básico na Saúde da População de Itapetininga – SP de 1980 a 1997** Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental- ABES, Engenharia Sanitária e Ambiental vol. 7 n° 3 jul/set e n° 4 out/dez p.161-188.
- MENDES C.A. B. 1994 **Modelling of Pollutant Distribution in Surface Runoff in Ungauged Catchments Using Geographical Information Systems**. Tese de Doutorado Universidade de Bristol. 290p Bristol. England. August.
- MILANO L.B.M. 1988 **A Problemática Ambiental de Resíduos Líquidos na Bacia do Rio dos Sinos- Relatório**. 8p.
- MILLER R. L. 1981 **Microeconomia** Ed. McGraw-Hill do Brasil. 507p. São Paulo.
- MONTEIRO P. H. 2003 **O Homem e Seus Caminhos: Tuberculose e AIDS** Produto do Núcleo José Reis de Divulgação Científica da ECA/USP-São Paulo- março/abril. Disponível na World Wide Web  
[http://www.eca.usp.br/nucleos/njr/voxscientiae/yara\\_paulo13.html](http://www.eca.usp.br/nucleos/njr/voxscientiae/yara_paulo13.html)
- MORETTI L.B.M. 1979 **Estudo da Qualidade das Águas do Rio dos Sinos e de sua Capacidade Autopurificadora** Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental 10. 40p.
- MORETTI L. 1980a **Modelo Matemático Aplicado ao Rio dos Sinos** Seminário sobre Poluição e Possibilidade de Recuperação do Rio dos Sinos 16p.
- MORETTI L.B.M.M. 1980b **Análise de Autodepuração em Cursos de Água: Aplicação ao Rio dos Sinos** Instituto de Pesquisas Hidráulicas. Dissertação de Mestrado. 131p.

- MOTTA R. S., MENDES A.P.F., MENDES F.E., YOUNG C.E.F. 1994 **Perdas e Serviços Ambientais do Recurso Água para Uso Doméstico** Pesquisa e Planejamento Econômico v.24. n 1, p 35-72, abr.
- MOTTA R.S., MENDES A P. 1995 **Estimativas de Custos de Saúde Associados à Poluição Hídrica no Brasil** em MOTTA R S. “Contabilidade Ambiental: Teoria, Metodologia e Estudos de Casos no Brasil” . IPEA. Rio de Janeiro. cap.8 p81-92.
- MOTTA R.S., REZENDE L., MENDES F.E. 1999 **Estimation of Water Quality Control Benefits and Instruments in Brasil** em MAY P. “ Natural Resource Valuation and Policy in Brasil” Columbia Press. cap.7. p173-203. New York.
- OSWALD V. 2003 **BID: Carga Tributária no Brasil é Insuportável**. Artigo publicado no jornal O GLOBO em 17 de outubro no Rio de Janeiro disponível na World Wide Web <http://www.fenacon.org.br/pressclipping/outubro2003/oglobo/oglobo171003.htm>
- PEREIRA J.S., LANNA A.E. 1998 **O Enquadramento dos Corpos d'Água em Classe de Uso como Instrumento de Gestão e a Necessidade de Revisão da Resolução CONAMA n.20/86**. Simpósio Internacional sobre Gestão de Recursos Hídricos. **Anais**.
- PESSÔA J.A., MAGALHÃES P.C., AZEVEDO J.P.S. 2003 **Hierarquização de Ações de Esgotamento Sanitário pela Estruturação das Preferências do Comitê de Bacia XV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos Anais** Curitiba. Nov.
- PETRY B. BOERIU P. 1995 **Environmental Impact Assessment**. Internatioanal Institute for Infrastructural, Hydraulic and Environmental Engineering. Delft. Netherlands.
- PILAR J.V. 2003 **Desenvolvimento de um Sistema de Apoio à Decisão para a Otimização de Traçados de Obras de Engenharia Civil: O Caso do Sistema de Defesa Contra Inundações da Cidade de Resistencia, Argentina**. Tese de Doutorado. Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 128p.

- PORTO ALEGRE 1992 **Meio Ambiente e Saneamento: Diretrizes para o Plano Diretor de Porto Alegre. Proposta.** 78p.
- PORTO ALEGRE 2000 **Prefeitura de Porto Alegre- Política de Habitação Popular – 1997/2000** Departamento Municipal de habitação da Prefeitura de Porto Alegre – DEMHAB Folheto de Divulgação 71p. Dezembro.
- PORTO ALEGRE 2004a **Administração Popular já Entregou Quase 4 mil Obras à Cidade** Jornal AGORA da Prefeitura Municipal de Porto Alegre. n119. maio.
- PORTO ALEGRE 2004b **Esta Casa Mudou a Minha Vida** Jornal AGORA da Prefeitura Municipal de Porto Alegre. n117. março.
- PORTO ALEGRE 2004c **Novas Casas Garantem Vida Melhor para 222 Famílias na Zona Norte** Jornal AGORA da Prefeitura Municipal de Porto Alegre. n115. março.
- PRATES S.H., DE LUCA S.J. 1997 **Diagnóstico Atual e Simulação da Futura Qualidade das Águas do Rio dos Sinos/RS** 9p. XIX Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. Anais. Foz do Iguaçu.
- PROJETOAGUA 2004 **Tâmisa: um Rio que é Exemplo de Limpeza** disponível na World Wide Web <http://www.soaresoliveira.br/projetoagua/tamisa.html>
- RIO GRANDE DO SUL 1995 **Simulação de uma Proposta de Gerenciamento dos Recursos Hídricos na Bacia do Rio dos Sinos. Relatório Técnico Parcial nº 1 (RTP-01) Diagnóstico dos Usos e Disponibilidade da Água na Bacia. Memorial Descritivo volume 1** Magna Engenharia Ltda. Governo do Estado do Rio Grande do Sul. Secretaria de Obras Públicas, Saneamento e Habitação – SOPSH. Conselho de Recursos Hídricos – CRH/RS. Fundo de Investimentos em Recursos Hídricos – FRH/RS.
- RIO GRANDE DO SUL 1996 **Simulação de uma Proposta de Gerenciamento dos Recursos Hídricos na Bacia do Rio dos Sinos. Relatório Final dos Estudos (RF)** Magna Engenharia Ltda. Governo do Estado do Rio Grande do Sul. Secretaria de

- Obras Públicas, Saneamento e Habitação- SOPSH. Conselho de Recursos Hídricos - CRH/RS. Fundo de Investimentos em Recursos Hídricos- FRH/RS.
- ROGERS P., HURST C., HARSHADEEP N. 1993 **Water Resources Planning in a Strategic Context: Linking the Water Sector to the National Economy**. Water Resources Research. vol. 29. n.7, p 1895-1906. july.
- ROSAURO N.M.L. 1979 **Modelo Hidrodinâmico para Rios e Redes de Canais Naturais**. Dissertação de Mestrado. Instituto de Pesquisas Hidráulicas. Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- ROUBENS M. 1997 **Fuzzy Sets and Decision Analysis** Fuzzy Sets and Systems n90 p199-206 February.
- ROY B. 1971 **Problems and Methods with Multiple Objective Functions**. Mathematical Programming, vol 1 n 2 p.239-266.
- SAATY, T.L. 1980 (1991) **Método de Análise Hierárquica** Tradução Wainer da Silveira e Silva. McGraw-Hill , Makron Books. 367p. São Paulo.
- SEMA 2004 **Roteiro Básico de Elaboração de Estudo Prévio de Impacto Ambiental e Relatório de Impacto Ambiental (EIA/RIMA)** Estado do Rio Grande do Sul, Secretaria do Meio Ambiente, Departamento de Florestas e Áreas Protegidas. Disponível na World Wide Web  
<http://www.sema.rs.gov.br/sema/html/pdf/r-eiarim.pdf>
- SHAFIKE N. G., DUCKSTEIN L., MADDOCK III T. 1992 **Multicriterion Analysis of Groundwater Contamination Management** Water Resources Bulletin. vol 28. n1. p33-44. jan/feb.
- SILVIO 2003 **N1 – Texto 11 – Geografia/Prof Silvio** Disponível na World Wide Web  
[http://br.share.geocities.com/sousaraujo/n1\\_text\\_11\\_IDH\\_Brasil.html](http://br.share.geocities.com/sousaraujo/n1_text_11_IDH_Brasil.html)
- SOARES J. H. P., ROTUNNO FILHO O. C., AREND FILHO L. A., GONÇALVES R. C., MONTEIRO L. C. R., ABADALAD M. A. 2003 **Classificação Multivariada de**

- Indicadores Socioeconômicos Aplicada aos Municípios da Baixada Fluminense, RJ, como Subsídio à Gestão de Recursos Hídricos** XV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. **Anais**. Nov. Curitiba.
- TAKYI A.K., LENCE B.J. 1999 **Surface Water Quality Management Using a Multiple-Realization Chance Constraint Method** Water Resouces Resarch vol 35, n5, p1657-1670.
- TECLE A. 1992. **Selecting a Multicriterion Decision Making Technique for Watershed Resources Management** Water Resources Bulletin. vol 28. n1. p 129-140. february.
- TECLE A., FOGEL M., DUCKSTEIN L. 1988 **Multicriterion Selection of Wastewater Management Alternatives** Journal of Water Resources Planning and Management, vol 114, n 4. July.
- TEIXEIRA J.C., HELLER L. 2003 **Priorização de Investimentos em Saneamento Baseada em Indicadores Epidemiológico e Financeiro** Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental – ABES, Engenharia Sanitária e Ambiental, vol.8, n 3 , jul/set, p.187-195.
- TERANO T., ASAI K., SUGENO M. 1991 **Fuzzy Systems Theory and its Applications** Academic Press. London. 268p.
- TUCCI, C.E.M. 1978 **Hydraulic and Water Quality Model for a River Network**. Tese de Doutorado. Colorado State University. 218p.
- VASCONCELLOS M.C. 1993 **Conflitos do Uso da Água em Grandes Aglomerações Urbanas – Caso de São Paulo**. Comissão de Integração Elétrica Regional: Seminário Especial sobre Meteorologia, Hidrologia e sua Influência sobre a Geração de Energia Elétrica - HIDROCER - Síntese dos Trabalhos Apresentados. Florianópolis.
- VAZ J. C. 2004 **Medindo a Qualidade de Vida** Publicado originalmente como DICAS n° 27 em 1994. Disponível na World Wide Web  
<http://www.federativo.bndes.gov.br/dicas/D027.htm>

- VON SPERLING M. 1996 **Padrões de Efluentes e de Corpos d'Água adotados no Brasil.Uma análise da Resolução CONAMA n.20.** Seminário Internacional de Tratamento e Disposição de Esgotos Sanitários **Anais** p 97-113
- WANG C.G., JAMIESON D. G. 2002 **An Objective Approach to Regional Wastewater Treatment Planning** Water Resources Research vol 38, n3 , p4-1 a 4-7.
- WILDE D.J., BEIGHTLER C.S. 1967 **Foudations of Otimization** Prentice-Hall, Inc Englewood Cliffs. 480p.
- WOLDT W., BOGARDI I. 1992 **Ground Water Monitoring Network Design Using Multiple Criteria Decision Making and Geostatistics.** Water Resources Bulletin, vol 28, n1, p45-62.
- WORLD BANK GROUP 1998a **Optimizing Wastewater Treatment** em “Pollution Prevention and Abatement Handbook” Effective july.
- WORLD BANK GROUP 1998b **The Effects of Pollution on Health: The Economic Toll** em Pollution Prevention and Abatement Handbook. Effective July.
- WORLD BANK GROUP 1998c **Water Quality Models** in “Pollution Prevention and Abatement Handbook” Effective july.
- ZADEH L.A. 1965 **Fuzzy Sets** Information and Control n 8 p 338-353
- ZADEH L.A. 1973 **Outline of a New Approach to the Analysis of Complex Systems and Decision Processes.** IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, v. smc-3. n1. Jan.
- ZELENY,M. 1973 **Compromise Programming** In. Multiple Criteria Decision Making, J.L. Cochrane and M.Zeleny (Editors). University of South Carolina Press, Columbia, South Carolina, p263-301
- ZELENY, M. 1982 **Multiple Criteria Decision-Making.** McGraw-Hill Book Co., New York;



ZIMMERMANN 1991 **Fuzzy Set Theory and Its Applications** 2.ed. Kluwer Academic Publishers. Massachusetts. 399p.

ZUFFO A.C., REIS L.F.R., SANTOS R.F., CHAUDHRY F.H. 2002 **Aplicação de Métodos Multicriterias ao Planejamento de Recursos Hídricos** Revista Brasileira de Recursos Hídricos. vol 7. n1. p81-102. jan/mar.