

**RINALDO CÉSAR DE CARVALHO**

**ANÁLISE MATEMÁTICA DE INVESTIMENTOS EM PROCESSOS DE  
DESPOLUIÇÃO DE BACIAS HIDROGRÁFICAS**

Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Heinz Dieter Fill

Co-orientador: Prof. Eloy Kaviski

**CURITIBA**

**2005**

Ronise Capasso,  
minha companheira,  
dedico-lhe esta dissertação.

## AGRADECIMENTOS

Merecem minha mais profunda gratidão as seguintes pessoas:

Professor Fabio Ramos, *in memoriam*, grande motivador e pai da idéia;

Professor Eloy Kaviski, pela inestimável ajuda  
e coragem de encarar esse desafio em um tempo tão curto;

Professor Heinz Dieter Oskar August Fill;

Professores Miriam Mine e Marcelo Bessa, pelas oportunas sugestões;

Professor Mauro Sérgio P. Fonseca, da PUC-PR, pelo estímulo;

Professor Maurício Serra, sempre receptivo e acolhedor;

Professores, Colegas, Funcionários e Coordenador do Mestrado;

Maurício Reinert, pela ajuda e colaboração;

Sônia Portalupi, com sua alegria contagiante e entusiasmo;

Cláudio Bastos, pelas sugestões;

Robert e Simone da Rocha, pelas revisões em inglês;

Antonio Vitorino Cardoso, pelo suporte e incentivo;

Zirca Carvalho, minha mãe, pelo apoio sempre presente;

Ronise Capasso, minha noiva, que,

com sua personalidade única e atitude positiva,

auxiliou-me a superar essa fase difícil,

de incertezas, problemas de saúde e dificuldades financeiras;

E todos que me ajudaram, direta ou indiretamente,

a transformar essa idéia em realidade.

Formular um problema do mundo real  
como um problema de programação é,  
em si mesmo, uma arte.

Katta G. Murty

## SUMÁRIO

<b>LISTA DE ILUSTRAÇÕES</b> .....	vii
<b>LISTA DE SIGLAS</b> .....	viii
<b>RESUMO</b> .....	ix
<b>ABSTRACT</b> .....	x
<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	1
1.1 GERAL.....	1
1.2 ENQUADRAMENTO DOS RIOS E QUALIDADE DA ÁGUA.....	3
1.3 OBJETIVOS.....	4
1.4 LINHAS DE PESQUISA.....	4
1.5 HIPÓTESES.....	4
1.6 MÉTODO APLICADO.....	5
1.7 ESTRUTURA DO TRABALHO.....	7
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	9
<b>3 MODELO MATRICIAL</b> .....	15
3.1 INTRODUÇÃO.....	15
3.2 MÉTODO PROPOSTO.....	15
3.3 CUSTOS.....	20
3.4 BENEFÍCIOS.....	22
3.4.1 Quantificação dos Benefícios de Cada MDH.....	22
3.4.2 Quantificação dos Benefícios de Cada Conjunto de MDH.....	23
3.4.3 Método do Valor Presente.....	25
3.4.4 Função Objetivo.....	26
<b>4 ALGORITMO GENÉTICO</b> .....	28
4.1 INTRODUÇÃO.....	28
4.2 DESCRIÇÃO DO ALGORITMO.....	30
<b>5 ESTUDO DE CASO</b> .....	34
5.1 INTRODUÇÃO.....	34
5.2 A BACIA DO RIO PALMITAL.....	34
5.3 DADOS HIDROLÓGICOS.....	37
5.4 MATRIZ DAS FONTES DE POLUIÇÃO.....	40
5.5 MEDIDAS DE DESPOLUIÇÃO HÍDRICA.....	47
5.5.1 Medidas de Gestão.....	49
5.5.2 Medidas de Implementação de Serviços e Obras.....	49
5.5.2.1 Identificação e eliminação de ligações irregulares de esgoto.....	49
5.5.2.2 Implantação, manutenção e operação de coletores tronco e interceptores e de rede de esgoto.....	50
5.5.2.3 Implantação, manutenção e operação de estações de tratamento de esgoto doméstico.....	50
5.5.2.4 Diluição de esgoto e sistemas de tratamento de efluentes industriais.....	53
5.5.2.5 Melhoria e ampliação dos serviços de varrição de áreas urbanas.....	54
5.5.2.6 Remoção de ocupações em áreas irregulares, coleta de lixo, construção de aterro sanitário, compostagem, reciclagem e cobertura vegetal.....	56
5.5.2.7 Criação de parques e áreas verdes ao longo de rios.....	56
5.6 SOLUÇÃO DO ESTUDO DE CASO COM O USO DOS PROGRAMAS EVOLVER E ADV_DIF.....	59
5.7 RESULTADOS.....	60

<b>6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES .....</b>	<b>67</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>69</b>
<b>APÊNDICES.....</b>	<b>75</b>

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1	- DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DE UMA BACIA HIDROGRÁFICA HIDROGRÁFICA.....	16
TABELA 1	- CONJUNTOS DE MEDIDAS DE DESPOLUIÇÃO.....	17
TABELA 2	- VALOR RELATIVO DE CADA PONTO DE APLICAÇÃO.....	24
FIGURA 2	- DIAGRAMA DE CARGAS PONTUAIS NO RIO PALMITAL.....	36
MAPA 1	- BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO PALMITAL.....	38
FIGURA 3	- CURVA DE DESCARGA DO RIO PALMITAL EM VARGEM GRANDE.....	39
TABELA 3	- MATRIZ DAS FONTES DE POLUIÇÃO.....	42
TABELA 4	- MEDIDAS DE DESPOLUIÇÃO HÍDRICA.....	48
TABELA 5	- RESULTADOS COM O INVESTIMENTO DE 2 MILHÕES DE REAIS.....	61
TABELA 6	- RESULTADOS COM O INVESTIMENTO DE 4 MILHÕES DE REAIS.....	62
TABELA 7	- RESULTADOS COM O INVESTIMENTO DE 7 MILHÕES DE REAIS.....	63
TABELA 8	- RESULTADOS COM O INVESTIMENTO DE 11 MILHÕES DE REAIS.....	64
TABELA 9	- RESULTADOS COM O INVESTIMENTO DE 16 MILHÕES DE REAIS.....	65
TABELA 10	- RESULTADOS FINAIS DE CONCENTRAÇÃO.....	66
GRÁFICO 1	- CONCENTRAÇÕES E VALORES INVESTIDOS.....	66
FIGURA 4	- POPULAÇÃO INICIAL DE RATOS.....	76
FIGURA 5	- NOVA POPULAÇÃO DE RATOS.....	77
FIGURA 6	- POPULAÇÃO FINAL DE RATOS.....	77
TABELA 11	- POTENCIAL DE BENEFÍCIO DAS MEDIDAS.....	79
TABELA 12	- RESULTADOS OBTIDOS COM USO DO <i>SOFTWARE</i> EVOLVER.....	80
FIGURA 7	- SEÇÃO TRANSVERSAL TRAPEZOIDAL.....	83

## LISTA DE SIGLAS

AG	- Algoritmo Genético
DBO	- Demanda Bioquímica de Oxigênio
DNAEE	- Departamento Nacional de Águas e Energia
DNOS	- Departamento Nacional de Obras e Saneamento
EC	- Elemento Computacional
EPA	- Environmental Protection Agency
ETA	- Estação de Tratamento de Água
ETE	- Estação de Tratamento de Esgoto
MA	- Manual
ME	- Mecânica
MDH	- Medidas de Despoluição Hídrica
OD	- Oxigênio Dissolvido
PD	- Programação Dinâmica
PDHBAI	- Plano de Despoluição Hídrica da Bacia do Alto Iguaçu
PL	- Programação Linear
PQA	- Parâmetros de Qualidade da Água
Ps	- Pontos de avaliação
QUAL2E	- Enhanced Stream Water Quality Model
RALF	- Reator Anaeróbico de Lodo Fluidizado
SANEPAR	- Companhia de Saneamento do Paraná
SUDERHSA	- Superintendência de Desenvolvimento de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental
SUREHMA	- Superintendência dos Recursos Hídricos e Meio Ambiente
UAD	- Áreas Urbanas com Alta Densidade
UC	- Unidade Característica
UR	- Áreas Urbanas Residenciais
WASP4	- Water Quality Analysis Simulation Program

## RESUMO

Uma análise matemática de investimentos em processos de despoluição de bacias hidrográficas justifica-se pelo grande valor e utilidade dos recursos hídricos. A evolução dos sistemas de análise em gerenciamento das águas e os avanços em programação computacional têm permitido consideráveis simplificações no uso de modelos de simulação. O presente estudo tem por objetivo disponibilizar um ferramental de auxílio à tomada de decisões quanto à aplicação de medidas de despoluição hídrica. Mediante o uso de análise matemática com base nos algoritmos genéticos, buscou-se otimizar a seqüência de investimentos necessários para aproximar os rios de suas condições de enquadramento. Para tanto, fez-se necessário investigar os métodos de programação matemática aplicáveis, analisar os parâmetros de qualidade da água e os sistemas de classificação dos rios, identificar as fontes de poluição do objeto de estudo, analisar os custos e os benefícios envolvidos na aplicação das medidas de despoluição e executar um modelo de simulação capaz de fornecer resultados para análise. Aplicou-se o método proposto na bacia do Rio Palmital, que faz parte da bacia do Altíssimo Iguaçu. Para solucionar o problema de otimização foi empregado o programa EVOLVER 4.0.8 da Palisade Corporation, um adendo ao Microsoft Excel para a resolução de algoritmos genéticos. Acoplado a este *software* foi utilizado o programa ADV\_DIF, desenvolvido nesta dissertação para determinar a concentração de poluentes ao longo do rio. Com os resultados obtidos foi possível demonstrar toda a potencialidade do método proposto, sendo suficiente para cumprir o objetivo estabelecido. Ao final do trabalho foram sugeridas algumas oportunidades de continuidade e melhoria dos métodos desenvolvidos.

## **ABSTRACT**

A mathematical analysis of investments in river basins depollution processes can be justified by the great value and utility of the water resources. The evolution of water management analysis systems and the advancement on computational programming had greatly simplified the use of simulation models. The objective of this research is to provide a tool to assist decision making in application of water depollution plans. It was intended to optimize the necessary sequence of investments in order to indicate a way to meet the stream quality standards by using of mathematical analysis based on genetic algorithms. Some steps were taken to achieve this objective. The first was to investigate the applicable mathematical programming models. Second was to analyze the water's quality standards and the stream classification method. The third was to identify the pollution sources of the object of study. The fourth was to analyze the costs and rewards of the depollution plans. Finally, the simulation model was used to generate the data for analysis. The method was applied to the Palmital River basin, which is part of Iguaçu basin. The software Evolver 4.0.8 of Palisade Corporation, which is an add-in to Microsoft Excel, was utilized to solve the genetic algorithm. A program called ADV\_DIF was developed in this study to determine the pollutants concentrations along the river. With the results was possible to demonstrate the potentiality of the developed method. At least, some suggestions for future research and improvements were made.

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 GERAL

Manter níveis satisfatórios de qualidade da água em rios e lagos tem se mostrado uma difícil tarefa. HALL e DRACUP (1974) alertavam que “por décadas os rios e lagos têm servido como um mecanismo de despejo para uma variedade de produtos de descarte que, se acreditou, poderiam ser assimilados ou arrastados até aquele depósito final de capacidade infinita, o oceano”. Porém, com o aumento da industrialização, agravado pelo rápido crescimento populacional, tanto a capacidade de assimilação dos rios, quanto de transporte, têm sido insuficientes. Desta forma, ficou estabelecido que o tratamento dos produtos a serem descartados teria como resultado final um efluente que propiciasse um nível aceitável de qualidade no corpo receptor, fosse ele rio ou lago (CHAPRA, 1997). Contudo, para saber qual o grau de tratamento que se deve adotar é necessário estabelecer uma relação entre a carga de poluente e a concentração resultante no corpo receptor. Segundo CHAPRA (1997), a concentração é uma quantidade intensiva que representa a “intensidade” ao invés da “quantidade” de poluição.

Nas bacias hidrográficas, os usos múltiplos dos recursos hídricos acarretam grandes variações na concentração de poluentes ao longo do seu percurso. A adoção de parâmetros promove a definição da qualidade da água e possibilita o seu enquadramento dentro de classes. Atingir os parâmetros de qualidade da água necessários para enquadrar um corpo hídrico requer o uso de medidas capazes de gerar um benefício, ou seja, reduzir a carga poluidora, a um certo custo, sendo tanto mais severas quanto mais alto o parâmetro de qualidade exigido. RAMOS e MARIN (2000) consideram que a decisão de recuperar a qualidade dos recursos hídricos é uma decisão de caráter global, de recuperação do ambiente, decisão esta fundamental à espécie humana, sendo uma decisão da sociedade que os corpos d'água atinjam graus de qualidade que atendam o seu enquadramento, segundo legislação específica. Todavia, SOBEL (1965) afirma que para um conjunto de objetivos de qualidade, geralmente existem muitos programas alternativos para alcançá-los. O menor custo é um critério útil de escolha entre eles.

A capacidade dos rios de assimilação das cargas poluidoras se deriva da habilidade da água em dissolver o oxigênio presente no ar atmosférico. A medida desta capacidade é representada pela quantidade de oxigênio dissolvido, geralmente abreviada por OD. Por sua vez, a medida da carga colocada sobre esta capacidade representa a demanda bioquímica de oxigênio (DBO). Cada despejo de efluentes num corpo hídrico produz uma elevação na concentração dos poluentes que sofre, com o passar do tempo, uma diminuição contínua, chamada de decaimento, que depende fundamentalmente das condições do corpo hídrico em questão. A alta proporção de matéria orgânica despejada nos rios constitui uma fonte de nutrição para os organismos ali presentes. O OD na água é utilizado por estes organismos durante o seu metabolismo, assim, com o aumento da matéria orgânica presente nos rios, essa quantidade de OD tende a diminuir proporcionalmente. Como os peixes e plantas aquáticas necessitam desse oxigênio para sobreviver, se sua concentração ficar abaixo de um certo nível crítico, a sobrevivência desses seres vivos e de seu ecossistema fica ameaçada. Por estas razões, a quantidade de OD é comumente usada com parâmetro de qualidade da água, sendo considerado por ARBABI e ELZINGA (1975) como o critério básico para determinação da qualidade das águas. Seus valores mínimos são dispostos em padrões e cabe às fontes poluidoras a garantia de sua permanência dentro de tais limites.

Uma das grandes dificuldades por parte dos responsáveis pelos processos de despoluição está em se determinar qual medida deve ser tomada em primeiro lugar e até que ponto sua aplicação se traduz em benefícios significativos, comparados com o seu custo. Na prática, a escolha da melhor medida ou do melhor conjunto de medidas representa uma tarefa complicada, pois, além do custo envolvido no processo, deve-se levar em conta o tempo e a viabilidade necessários para sua execução. Além disso, deve-se ter em mente que, dependendo da extensão e das características da bacia, juntamente com a quantidade de usos dos recursos hídricos, representados pela diversidade de captações de água e lançamentos de poluentes, a aplicação das medidas de despoluição torna-se um processo bastante extenso e aleatório. Obviamente, toda ação desse tipo é

motivada pela necessidade e pelo interesse dos usuários e das entidades competentes.

Aproveitando a evolução dos sistemas de análise em gerenciamento hídrico e os avanços em programação computacional, que permitem consideráveis simplificações no desenvolvimento de modelos de simulação, e, face ao grande valor e utilidade dos recursos hídricos, o presente estudo busca, através do desenvolvimento de um algoritmo matemático, disponibilizar uma ferramenta com o intuito de auxiliar na hierarquização da aplicação de medidas de despoluição hídrica, buscando encontrar a seqüência ótima de investimentos a serem aplicados de maneira a minimizar os custos inerentes a esse processo, e indicar o caminho para o enquadramento dos rios nas suas determinadas classes.

## 1.2 ENQUADRAMENTO DOS RIOS E QUALIDADE DA ÁGUA

Entidades governamentais e outros órgãos reguladores determinam limites de emissão de poluentes de forma a garantir níveis aceitáveis de qualidade da água. Constituem-se, desta forma, os padrões que devem ser seguidos para que os rios fiquem dentro do seu enquadramento, garantindo o uso a que se destinam. Muitas vezes, porém, a quantidade de resíduos biológicos dispostos nos corpos d'água excede as suas capacidades naturais de assimilação, resultando numa água com qualidade inaceitável (CARDWELL e ELLIS, 1993). Faz-se, assim, a necessidade de intervenções, com o objetivo de diminuir a poluição, fazendo com que o rio retorne às suas condições iniciais, recolocando-o dentro do grupo a que se enquadra. Tais intervenções podem se dar, basicamente, através de medidas estruturais e não-estruturais. Medidas estruturais são caracterizadas por obras e melhorias físicas. Como exemplos de medidas estruturais, citam-se: ampliação da rede de esgotos, melhoria dos serviços de varrição de áreas urbanas, eliminação de ligações de esgoto irregulares, entre outras. As medidas não-estruturais têm, por sua vez, um caráter mais voltado à educação e fiscalização, onde é possível citar, por exemplo, fiscalização ambiental, controle e fiscalização das fontes difusas, domésticas e industriais de poluição das águas, programa de educação ambiental, etc.

### 1.3 OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo desenvolver um ferramental de auxílio à decisão quanto aos investimentos necessários em medidas de despoluição hídrica, mediante o uso de Análise Matemática com base nos Algoritmos Genéticos.

Para isso faz-se necessário (objetivos específicos):

- a) identificar e analisar as características pertinentes à determinação da qualidade da água;
- b) identificar e discriminar os custos envolvidos na aplicação das medidas de despoluição;
- c) identificar e analisar os métodos de programação matemática aplicáveis ao estudo em questão;
- d) identificar a matriz das fontes de poluição do objeto de estudo;
- e) identificar, analisar e executar um modelo de simulação, de modo a obter resultados para análise.

### 1.4 LINHAS DE PESQUISA

O Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental apresenta três áreas de concentração e algumas linhas de pesquisa. O presente trabalho trata da Modelagem Matemática, envolvendo o Gerenciamento de Recursos Hídricos e a Engenharia Ambiental, enquadrando-se, portanto, nas Tecnologias para Sistemas Ambientais e Urbanos.

Cabe lembrar, ainda, que o desenvolvimento de modelos e algoritmos auxiliares do projeto se enquadram na Modelagem Matemática.

### 1.5 HIPÓTESES

A hipótese principal formulada para o presente trabalho refere-se à “possibilidade da utilização de um algoritmo genético no auxílio à busca da melhor

seqüência de intervenções em recursos hídricos, levando em conta custos e benefícios em termos monetários”.

Com relação à melhoria da qualidade da água, algumas hipóteses podem ser levantadas em relação aos pontos de avaliação dos parâmetros de qualidade da água. Assim, a verificação pode ser realizada em pontos:

- a) móveis, determinados na bacia pelo seu uso;
- b) móveis, localizados próximos aos pontos de aplicação das medidas de despoluição hídrica;
- c) fixos, distribuídos criteriosamente pela bacia.

Avaliando-se os prós e contras de cada uma das alternativas, optou-se por fixar os pontos em locais estrategicamente determinados, que representem da melhor forma possível a bacia como um todo, facilitando a comparação quando da aplicação de medidas de despoluição, apesar de, com a fixação dos pontos, ocorrer verificações desnecessárias quando não houver aplicação de medidas que modifiquem a qualidade da água nesse local.

## 1.6 MÉTODO APLICADO

A pesquisa foi realizada através de uma visão sistêmica do problema, que consiste na compreensão do todo a partir da análise global das partes envolvidas e de sua interação. Destacam-se, a seguir, os principais elementos componentes deste trabalho:

- a) os aspectos relativos à qualidade da água terão como parâmetro, entre os vários indicadores que caracterizam sua qualidade (como temperatura, cor, cheiro e sabor) a concentração de oxigênio dissolvido (OD) presente no corpo d'água, que é, segundo SOBEL (1965) particularmente importante;
- b) a quantificação da remoção da carga de DBO das medidas de despoluição será baseada no estudo que tem como título “*Construção do Modelo que Relaciona Medidas de Despoluição com a Remoção de Carga e seus Efeitos Sobre o Corpo Hídrico e Seus Custos*”

(FERNANDES, 2005). Tais valores são obtidos de forma indireta com base no Plano de Despoluição Hídrica da Bacia do Alto Iguaçu, visto que não são encontrados de forma direta na literatura. Os custos de implementação das medidas de despoluição foram retirados da tabela “*Principais Medidas de Despoluição Hídrica em Termos de Remoção de Carga Característica e Custos Unitários*” (FERNANDES, 2005);

- c) no estudo de caso, a matriz das fontes de poluição será identificada através da obtenção de dados da Superintendência de Desenvolvimento de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental (SUDERHSA), dentro do Plano de Despoluição Hídrica da Bacia do Alto Iguaçu (SUDERHSA, 2000).

Para o desenvolvimento matemático optou-se pelo Algoritmo Genético devido à sua adequação a problemas não-lineares, onde cada parâmetro é tratado como uma variável dependente incapaz de ser resolvida isoladamente das demais. Apesar da confiabilidade do método, cabe citar SANT’ANA (1987): “os resultados da modelagem formal somente devem ser aceitos no contexto de seu propósito e de suas limitações”. PORTER et al. (1980) afirmam que o modelo pode ser usado como substituto ao raciocínio crítico e seu resultado aceito sem questionamento em virtude da sofisticação da técnica e do equipamento usados. Porém, o modelo matemático deve ser considerado apenas uma ferramenta adicional na avaliação preliminar, não substituindo a sistemática convencional de planejar e projetar, menos ainda a experiência e bom senso do projetista (SANT’ANA, 1987).

No estudo de caso foi utilizado o *software* Evolver, da Palisade Corporation, em sua versão 4.0.8 (PALISADE, 2004). Este *software* funciona em conjunto com planilhas criadas no Microsoft Excel e é acoplado ao programa ADV\_DIF, que tem, por sua vez, a função de determinar as concentrações no Rio Palmital. As informações detalhadas sobre o Evolver e a formulação e listagem do ADV\_DIF se encontram nos apêndices.

## 1.7 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho está estruturado em seis capítulos, distribuídos da seguinte forma:

O primeiro capítulo apresenta o tema, introduzindo questões de qualidade da água e enquadramento dos rios, além de sua interação com o uso dos recursos hídricos. Contém, ainda, a importância do trabalho, seus objetivos, linhas de pesquisa, hipóteses, método aplicado e, finalmente, a estrutura do trabalho.

No segundo capítulo é realizada uma revisão da fundamentação teórica da utilização de Modelos Matemáticos no Gerenciamento de Recursos Hídricos, destacando sua importância no setor. As técnicas de otimização mais utilizadas são brevemente descritas, demonstrando a evolução ocorrida no segmento com o decorrer dos anos. Finaliza-se com a revisão dos Algoritmos Evolutivos, dos quais fazem parte os Algoritmos Genéticos utilizados como sistema de otimização no presente estudo.

No terceiro capítulo é desenvolvido o modelo matricial utilizado na busca de solução pelo algoritmo genético.

No quarto capítulo introduz-se o algoritmo genético utilizado na busca da melhor utilização dos recursos disponíveis para a aplicação de medidas de despoluição em bacias hidrográficas.

No quinto capítulo é desenvolvido o estudo de caso, que se inicia com uma breve descrição da bacia do Palmital. Na seqüência é realizada uma descrição dos dados e funções disponíveis, bem como as adequações que se fizeram necessárias para permitir seu uso dentro da formulação proposta. Finalizando o capítulo, são apresentados os resultados numéricos das concentrações de poluentes obtidos com a utilização do Algoritmo Genético.

No sexto capítulo são apresentadas as conclusões obtidas e são realizadas sugestões e propostas para futuros trabalhos.

Finalizando o trabalho são apresentados as referências bibliográficas utilizadas e os apêndices: 1 – *SOFTWARE* EVOLVER 4.0.8; 2 – EXEMPLO DE APLICAÇÃO DO EVOLVER 4.0.8; 3 – FORMULAÇÃO MATEMÁTICA DO PROGRAMA ADV\_DIF e 4 – LISTAGEM DO PROGRAMA ADV\_DIF, necessários à elucidação dos dados e métodos utilizados no desenvolvimento da dissertação.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Há algumas décadas, numerosas técnicas de otimização têm sido usadas em gerenciamento hídrico e o uso de métodos analíticos tem-se mostrado útil na determinação da melhor estratégia para avaliar o tratamento de efluentes provenientes de múltiplas fontes que utilizam como despejo final um mesmo corpo d'água. Segundo ELLIS (1987) o método de análise de sistemas que prevalece nesses casos é a Programação Linear (PL).

Desenvolvida após a segunda guerra mundial como instrumento de administração, a PL é aplicada a problemas onde uma função objetivo linear deve ser otimizada, isto é maximizada ou minimizada, sujeita a restrições também lineares (ANDRADE, 1998). Esses modelos, quando aplicados ao gerenciamento dos recursos hídricos, usualmente buscam determinar o menor custo de tratamento, em função da sua eficiência na remoção da DBO, assegurando os limites mínimos de OD estabelecidos para o corpo hídrico analisado. Normalmente, seu objetivo é encontrar a melhor alocação possível do recurso hídrico dentro de um certo tempo em complexos sistemas de água. Porém, na maioria das aplicações práticas em gerenciamento hídrico, tanto as funções objetivo, quanto suas restrições, não se encontram na forma linear. Muitas adaptações têm sido usadas em aplicações reais com o intuito de converter problemas não-lineares em lineares para que se possa fazer uso de algoritmos de programação linear. Exemplos incluem diferentes esquemas de linearização e sucessivas aproximações (LOUCKS et al., 1981).

SOBEL (1965) demarca a natureza dos sistemas de controle da qualidade da água enquanto reconhece a necessidade de programas de uso dos recursos de bacias hidrográficas. Em seu estudo apresenta modelos de programação para vários problemas de melhoria da qualidade da água e compara uma formulação de PL com a política tradicionalmente utilizada. Discute, ainda, a aplicação de modelos de minimização de custos e afirma não ser esta a consideração mais importante no gerenciamento da qualidade das águas.

REVELLE et al. (1968), por sua vez, aplicam um modelo de PL no gerenciamento da qualidade da água na bacia de um rio, selecionando a eficiência das estações de tratamento de maneira a atingir os padrões de OD a um mínimo custo. A função objetivo é estruturada em termos de custos das estações de tratamento. A principal restrição previne a violação dos padrões de OD. No estudo de caso os resultados são comparados aos obtidos pelo uso da Programação Dinâmica (PD) e os efeitos nas mudanças nos padrões de OD são explorados através do uso de variáveis duais. Em contrapartida, ARBABI e ELZINGA (1975) discutem o problema de alcançar os parâmetros de OD desejados num rio enquanto otimizam alguma função objetivo e afirmam que com o uso de técnicas os algoritmos de programação matemática que descrevem modelos de gerenciamento da qualidade da água de rios, podem ser formulados com um máximo de três restrições lineares por trecho. Ressaltam, ainda, que, em casos onde as funções de custo não são lineares ou onde as variáveis envolvidas são discretas, a solução do problema é facilitada pela presença de restrições lineares. O uso de técnicas simples de eliminação de restrições pode auxiliar a reduzir significativamente o tamanho do problema matemático, tornando factível a análise em modelos de larga escala.

O estudo realizado por CARDWELL e ELLIS (1993) apresenta modelos de otimização para alocação de despejos de poluentes provenientes de múltiplas fontes que incorporam incertezas tanto do parâmetro quanto do modelo. Estas duas fontes de incerteza são importantes e se inter-relacionam por um mecanismo capaz de gerar bons resultados práticos e teóricos. Com o uso de uma estrutura de otimização desenvolvida a partir de três diferentes modelos de simulação de qualidade da água, um mais simples, que tem por base as equações de Streeter-Phelps (STREETER e PHELPS, 1925), e dois outros mais sofisticados, desenvolvidos pelo *Environmental Protection Agency* (EPA), órgão de proteção ambiental dos Estados Unidos, o “*Enhanced Stream Water Quality Model - QUAL2E*” e o “*Water Quality Analysis Simulation Program - WASP4*”, concluíram que, em termos das políticas de controle adotadas, cada modelo de simulação gerou diferentes resultados, destacando-se sua capacidade de admitir variabilidade operacional e, com isto, identificar programas de controle de custo-eficiência que não precisam permanecer estáticos.

Programação não-linear é uma forma de otimização usada na resolução de problemas onde a função objetivo e suas restrições não estão todas na forma linear (SIMONOVIC, 2000). Em geral, a solução de um problema não-linear consiste num vetor de variáveis de decisão que otimiza uma função objetivo não-linear sujeita a uma série de restrições não-lineares. Nenhum algoritmo pode resolver todo problema específico dentro da descrição acima. De qualquer forma, um substancial progresso tem sido alcançado com a adoção de certas suposições sobre essas funções, sendo possível citar algumas aplicações de sucesso em problemas de programação não-linear como, por exemplo, em problemas sem restrições, com restrições lineares, problemas quadráticos, convexos, não-convexos e geométricos (HILLIER e LIEBERMAN, 1990). A maior limitação na aplicação de algoritmos de programação não-linear a problemas de gerenciamento hídrico reside no fato de que os algoritmos de programação não-linear geralmente não conseguem distinguir entre otimização local e otimização global, resultando numa dificuldade nas aplicações práticas.

Segundo SIMONOVIC (2000) a Programação Dinâmica (PD) leva vantagem em relação às demais ferramentas de otimização, pois não é afetada pela forma da função objetivo e das restrições, sendo, assim, freqüentemente usada no gerenciamento hídrico. A PD requer que o problema seja separado em um número finito de estágios. Em cada um desses estágios é identificado um número de possíveis condições do sistema e uma solução ótima é identificada, fornecendo subsídio para que se encontre a solução ótima do estágio seguinte. LIEBMAN e LYNN (1966) desenvolvem um modelo de programação dinâmica com o objetivo de minimizar o custo necessário para o tratamento de poluentes de forma a atender aos padrões específicos na concentração de OD em rios, concluindo que, apesar da solução ótima encontrada não ser prática por diversos motivos, ela fornece um parâmetro de comparação para os responsáveis pelas decisões finais nos processos de despoluição. A técnica pode, ainda, ser utilizada para investigar muitos outros problemas além da simples determinação da taxa de remoção de DBO. É possível, por exemplo, usá-la, quando se dispõe de várias alternativas, como auxiliar na busca da melhor alocação dos recursos de uma estação de tratamento.

Nos últimos anos muitos pesquisadores têm procurado novos métodos que combinem eficiência e recursos para encontrar uma otimização global (SIMONOVIC, 2000). Um conjunto de técnicas, conhecido como algoritmos evolutivos, parece ter um grande potencial, pois apresenta uma promessa de atingir ambos. Técnicas evolutivas se baseiam em similaridades com os processos biológicos, onde uma população de indivíduos é exposta a um processo coletivo de aprendizagem, que evolui de geração em geração. Uma população é arbitrariamente criada e sujeita aos processos de seleção, recombinação e mutação através de estágios, conhecidos como gerações. O progresso na busca é atingido pela avaliação de todos os indivíduos na população, selecionando os melhores e recombinação-os de forma a criar gerações com maior probabilidade de terem suas características aprimoradas. Todo o processo é inspirado nos mecanismos de evolução de populações dos seres vivos (KAVISKI e KREMER, 2004) e revela uma similaridade à regra de Darwin de evolução das espécies. Fazem parte deste grupo os chamados Algoritmos Genéticos (AG). Segundo SIMONOVIC (2000) os algoritmos evolutivos apresentam algumas vantagens significativas como, por exemplo, o fato de não necessitarem de solução inicial, apresentarem grande aplicação em problemas não-lineares e em sistemas complexos e promoverem a geração de várias soluções muito próximas da solução ótima, fornecendo, no caso do gerenciamento de recursos hídricos, flexibilidade adicional à tomada de decisões.

No presente estudo, os benefícios esperados com a aplicação de medidas de despoluição hídrica (MDH) são determinados pelas variações na qualidade da água, em função da concentração de poluentes, através da adoção de parâmetros de qualidade da água (PQA) que melhor caracterizem a bacia. As medições são realizadas em seções transversais, estrategicamente escolhidas ao longo da bacia.

As condições dos corpos hídricos dependem fundamentalmente de seus usos, assim, o benefício obtido com a aplicação de medidas de despoluição deve levar em conta a importância relativa dos usos dos recursos para cada bacia hidrográfica. Dentre os diversos usos dos recursos hídricos, pode-se destacar alguns principais, passíveis de serem avaliados, como: abastecimento urbano e industrial, irrigação, dessedentação de animais, piscicultura, geração de energia elétrica,

navegação, assimilação de esgoto doméstico, industrial e difuso, recreação e lazer e usos ecológicos. Cada uso apresenta um grau de importância próprio em função das necessidades e interesses dos usuários da bacia hidrográfica, tendo um peso relativo associado ao seu valor em cada ponto de avaliação. Na determinação desses pesos relativos, em relação à bacia hidrográfica como um todo, optou-se por relacionar, como sugerem RAMOS e MARIN (2000), o grau de ocorrência de cada uso dos recursos com a sua respectiva importância, levando-se em conta os parâmetros de qualidade da água que melhor caracterizem as fontes de poluição envolvidas.

MARIN (2001) sugere que os benefícios relativos às intervenções em despoluição hídrica sejam quantificados através de um parâmetro de decisão, denominado parâmetro Z, que tem como objetivo identificar o cenário de medidas de despoluição hídrica mais adequado à bacia em questão, dentro de um horizonte de projeto estabelecido. O parâmetro Z pode ser quantificado pela seguinte expressão:

$$Z_m = \frac{B_1 \cdot peso_1 + B_2 \cdot peso_2 + \dots + B_m \cdot peso_m}{peso_1 + peso_2 + \dots + peso_m}, \quad (2.1)$$

onde:

$Z_m$  = Parâmetro de decisão que representa o benefício quanto à implantação de medidas de despoluição hídrica que compõem um determinado cenário de despoluição;

$m$  = seção de controle mais à jusante da área de estudo;

$peso_i$  = peso da seção de controle  $i$  de acordo com a utilização dos recursos hídricos, com  $i$  variando de 1 a  $m$ ;

$B_i$  = Benefício localizado na seção de controle  $i$  quanto à implantação de medidas de despoluição hídrica de um determinado cenário.

MARIN propõe que a quantificação dos benefícios esperados com a implantação de medidas de despoluição hídrica seja determinada pela média

ponderada entre os benefícios esperados com a aplicação isolada das medidas de despoluição, nas seções de controle e em função dos usos dos recursos hídricos.

Com o objetivo de que, independentemente da região da bacia em que se esteja propondo a implantação de MDH, a avaliação dos benefícios considere não apenas o benefício local de despoluição, mas também os reflexos dessas medidas em relação a toda a bacia, os benefícios dos cenários de MDH, implantados ao longo da bacia hidrográfica, são quantificados em relação à seção de controle mais a jusante da bacia.

A determinação de um parâmetro, tendo como base o parâmetro Z, resultou na seguinte expressão:

$$B_j = \frac{\sum_{i=1}^n b_i \cdot p_i}{\sum_{i=1}^n p_i}, \quad (2.2)$$

onde:

$B_j$  = Parâmetro que representa o benefício gerado pela implantação de um conjunto de MDH numa determinada etapa do processo de despoluição;

$p_i$  = Peso do ponto de avaliação de acordo com a utilização dos recursos hídricos.

Como o processo de despoluição pode ser realizado em mais de uma etapa, o benefício total gerado pela aplicação dos conjuntos de MDH será dado por:

$$B = \sum_{j=1}^m B_j. \quad (2.3)$$

Apesar da coerência do parâmetro  $B$ , foi adotada, para a determinação dos benefícios esperados com a aplicação de conjuntos de medidas de despoluição, a expressão proposta no capítulo 3 – MODELO MATRICIAL.

### 3 MODELO MATRICIAL

#### 3.1 INTRODUÇÃO

Nas bacias hidrográficas, devido à diversidade de usos dos recursos hídricos, a qualidade da água tende a diminuir e, por vezes, atingir estados abaixo dos padrões estipulados pela legislação, podendo ameaçar seu ecossistema, além de comprometer a saúde de seus usuários. Emerge dessa situação a necessidade da aplicação de medidas de despoluição hídrica (MDH) com o objetivo de restaurar a qualidade original das águas da bacia. Essas medidas podem ser estruturais, representadas por obras civis, ou, por medidas de gestão, não-estruturais, representadas, basicamente, por investimentos em educação e fiscalização. A utilização de tais medidas, por sua vez, demanda recursos financeiros que, normalmente são limitados e, por isso, devem ser utilizados da melhor forma possível. Tal utilização dos recursos deve, ainda, atender a critérios previamente especificados de modo a se obter o máximo de benefícios, representados por uma remoção eficaz de poluentes, com o menor custo possível.

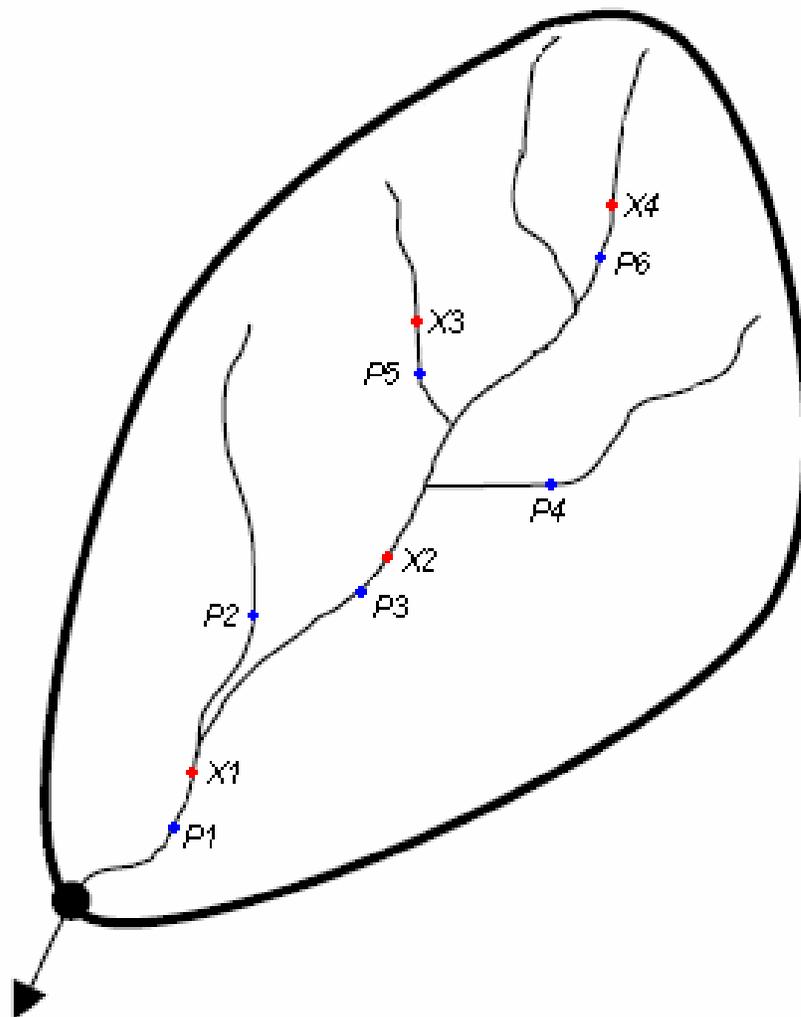
A proposta de um modelo com base nos algoritmos inteligentes vem, então, auxiliar na busca do melhor conjunto de medidas de despoluição capaz de gerar o máximo de remoção de poluentes, fazendo uso dos recursos financeiros disponíveis, dentro de um tempo de projeto pré-definido. O objetivo não é atingir o enquadramento dos rios, mas sim deixá-los com a melhor qualidade possível, através da utilização de um certo valor fixo para investimento. Realizando-se estudos para uma lista de possíveis investimentos podem ser realizadas análises técnicas, econômicas e políticas sobre o manancial investigado.

#### 3.2 MÉTODO PROPOSTO

O método proposto é apresentado para solucionar um exemplo hipotético, descrito na seqüência.

Considera-se uma bacia hidrográfica (fig. 1) onde estão sendo aplicados os conjuntos de medidas de despoluição  $M_1$ ,  $M_2$ ,  $M_3$  e  $M_4$ , nos pontos  $X_1$ ,  $X_2$ , e  $X_3$  e  $X_4$ , respectivamente, distribuídos ao longo de sua extensão.

FIGURA 1 – DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DE UMA BACIA HIDROGRÁFICA



FONTE: O autor

Observa-se que, apesar da possibilidade de aplicações parciais das medidas de despoluição, no presente exemplo, por questões de simplificação, as medidas apenas serão consideradas como executadas ou não. Assim, cada conjunto  $M_i$  ( $i = 1$  a 4) é composto por  $m_j$  ( $j = 1$  a 5) medidas de despoluição, de acordo com a tabela a seguir, onde o “1” representa a aplicação e o “0” a não aplicação da medida  $m_j$ .

O objetivo da aplicação de cada conjunto  $M_i$  é produzir uma redução na concentração de poluentes. A variação dessa concentração deve ser verificada com o uso de parâmetros de qualidade da água, em  $P_s$  ( $s = 1$  a  $6$ ) pontos de avaliação pré-definidos, distribuídos estrategicamente ao longo da bacia, de forma a coincidir com os pontos de captação dos principais usuários.

TABELA 1 – CONJUNTOS DE MEDIDAS DE DESPOLUIÇÃO

Medidas ( $m_j$ )	Conjuntos de Medidas de Despoluição ( $M_i$ )			
	$M_1$	$M_2$	$M_3$	$M_4$
$m_1$	1	0	0	1
$m_2$	0	1	0	1
$m_3$	0	1	1	1
$m_4$	1	1	0	0
$m_5$	0	0	1	0

FONTE: O autor

Organizando-se as variáveis em forma de equações, resulta:

$$\begin{aligned}
 M_1 &= m_1 + m_4 \\
 M_2 &= m_2 + m_3 + m_4 \\
 M_3 &= m_3 + m_5 \\
 M_4 &= m_1 + m_2 + m_3.
 \end{aligned}
 \tag{3.1}$$

Dessa forma, para o exemplo em questão, conclui-se que a qualidade da água no ponto de avaliação  $P_6$  é afetada somente pelo conjunto de medidas  $M_4$ ; no ponto  $P_5$  pelo conjunto  $M_3$ ; no ponto  $P_3$  pelos conjuntos  $M_2$ ,  $M_3$  e  $M_4$ ; e que no ponto  $P_1$  sofre influência de todos os conjuntos de MDH aplicados. Nos pontos  $P_2$  e  $P_4$ , a água não tem suas características alteradas pela aplicação das MDH. Observa-se que muito embora o ponto  $P_1$  pareça ser o mais beneficiado em termos de tratamento, pois a água que o atinge tem seu estado melhorado continuamente

durante o trajeto, sua qualidade depende ainda dos despejos realizados durante esse percurso, o que pode alterar brutalmente suas características. Demonstra-se, com isso, a interdependência dinâmica entre a aplicação dos conjuntos de medidas de despoluição, os usos dos recursos e os pontos de avaliação dos parâmetros de qualidade da água.

Pode-se escrever a transformação linear das  $m_j$  medidas isoladas no conjunto  $M_i$  de medidas de despoluição. Ou seja, o vetor conjunto de medidas é obtido através do produto entre o vetor medidas de despoluição e a matriz das aplicações, em notação matricial representado por:

$$M_i = A \cdot m_j \quad (i = 1, \dots, 4 \text{ e } j = 1, \dots, 5), \quad (3.2)$$

sendo  $A = [a_{ij}]$ , onde os termos  $a_{ij}$  podem ter valor zero ou um, de acordo com o seguinte critério:

- a)  $a_{ij} = 1$ , quando a medida  $m_j$  pertence ao conjunto  $M_i$ ;
- b)  $a_{ij} = 0$ , quando a medida  $m_j$  não pertence ao conjunto  $M_i$ .

Assim, no caso de 4 conjuntos de medidas que utilizam 5 medidas na sua composição, resulta:

$$\begin{bmatrix} M_1 \\ M_2 \\ M_3 \\ M_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} & a_{15} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} & a_{25} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} & a_{35} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} & a_{45} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} m_1 \\ m_2 \\ m_3 \\ m_4 \\ m_5 \end{bmatrix}. \quad (3.3)$$

Ajustando os valores de  $A = [a_{ij}]$  para a combinação do exemplo em questão, tem-se:

$$\begin{bmatrix} M_1 \\ M_2 \\ M_3 \\ M_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} m_1 \\ m_2 \\ m_3 \\ m_4 \\ m_5 \end{bmatrix}. \quad (3.4)$$

Cabe, porém, lembrar que num processo de despoluição as medidas podem ser aplicadas aos poucos, de maneira distribuída, acompanhando a evolução do projeto. Assim, no método proposto serão consideradas utilizações parciais, representando, além dos valores extremos 0 e 1, todos os demais situados neste intervalo, correspondendo à porcentagem de aplicação de cada medida  $m_j$ .

Convém salientar que um processo de despoluição pode ser realizado em mais de uma etapa, sendo que cada etapa, por sua vez, pode ser composta por um ou mais conjuntos de medidas de despoluição hídrica e que o número de conjuntos de medidas aplicadas em cada etapa depende do número de pontos de aplicação adotados.

Generalizando para  $i$  conjuntos de  $j$  medidas de despoluição, aplicadas em  $h$  pontos, na primeira etapa de um processo realizado em  $p$  etapas, tem-se:

$$\begin{bmatrix} M_{11} \\ M_{21} \\ \vdots \\ M_{m1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{m1} & a_{m2} & \cdots & a_{mn} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} m_1 \\ m_2 \\ \vdots \\ m_n \end{bmatrix}, \quad (3.5)$$

ou, ainda, simplesmente

$$M_{i1} = A \cdot m_j. \quad (3.6)$$

Para a segunda etapa, tem-se:

$$\begin{bmatrix} M_{12} \\ M_{22} \\ \vdots \\ M_{m2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{m1} & a_{m2} & \cdots & a_{mn} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} m_1 \\ m_2 \\ \vdots \\ m_n \end{bmatrix}, \quad (3.7)$$

e, assim, sucessivamente até ser completada a última etapa ( $p$ ) do processo de despoluição,

$$\begin{bmatrix} M_{1p} \\ M_{2p} \\ \vdots \\ M_{mp} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{m1} & a_{m2} & \cdots & a_{mn} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} m_1 \\ m_2 \\ \vdots \\ m_n \end{bmatrix}. \quad (3.8)$$

Generalizando para  $M_j$  conjuntos formados pela combinação de  $m_j$  medidas de despoluição, aplicadas em  $X_h$  pontos de aplicação, na  $k$ -ésima etapa do processo, tem-se:

$$\begin{bmatrix} M_{1k} \\ M_{2k} \\ \vdots \\ M_{mk} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{m1} & a_{m2} & \cdots & a_{mn} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} m_1 \\ m_2 \\ \vdots \\ m_n \end{bmatrix}. \quad (3.9)$$

Ou, em notação matricial, simplesmente:

$$M_{ik} = A \cdot m_j \quad (i = 1, \dots, m; j = 1, \dots, n \text{ e } k = 1, \dots, p). \quad (3.10)$$

### 3.3 CUSTOS

Os custos associados aos conjuntos de medidas representam o capital empregado na sua instalação e manutenção, quando necessária. Esses valores são função direta da quantidade da medida aplicada, pois uma medida pode ser realizada para diferentes dimensionamentos, variando tanto seu custo quanto o

benefício gerado. Os custos não devem ultrapassar o capital disponível para cada etapa do projeto, nem apresentar valores negativos, visto que representam retiradas de dinheiro. Da mesma forma o seu somatório não pode ultrapassar o total previsto para o projeto, assim:

$$0 \leq \sum_{i=1}^m C_i \leq R, \quad (3.11)$$

onde:

$C_i$  = custo de aplicação de cada conjunto de medidas  $M_i$ ;

$R$  = recursos financeiros disponíveis, representam o valor total no presente a ser aplicado gradualmente, em cada etapa do projeto.

Em cada etapa o custo total será determinado pelo somatório dos custos de todas as medidas adotadas em cada conjunto. Para  $M_i$  conjuntos formados pela combinação de  $m_j$  medidas de despoluição, aplicadas em  $X_h$  pontos de aplicação, na  $k$ -ésima etapa do processo, tem-se:

$$\begin{bmatrix} C_{1k} \\ C_{2k} \\ \vdots \\ C_{mk} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{m1} & a_{m2} & \cdots & a_{mn} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} c_1 \\ c_2 \\ \vdots \\ c_n \end{bmatrix}, \quad (3.12)$$

ou, em notação matricial, simplesmente

$$C_{ik} = A \cdot c_j \quad (i = 1, \dots, m; j = 1, \dots, n \text{ e } k = 1, \dots, p). \quad (3.13)$$

Muito embora, na prática, possam existir diferenças nos valores dos custos das medidas em função do local de sua aplicação, por questão de simplificação e pela não disponibilidade de dados, optou-se por considerar seus valores como fixos, independentemente do local da aplicação das medidas.

### 3.4 BENEFÍCIOS

#### 3.4.1 Quantificação dos Benefícios de Cada MDH

Na determinação do modelo, uma questão complexa é a que envolve a obtenção dos benefícios gerados com a utilização das medidas de despoluição. Algumas considerações serão feitas a esse respeito de forma a tornar factível o método utilizado.

Cada medida de despoluição  $m_j$  aplicada a um corpo hídrico gera um benefício  $b_j$ , avaliado em termos da redução da carga de poluentes, sendo tanto maior quanto maior for a capacidade de remoção dessa carga. O benefício gerado pela aplicação individual de MDH nos pontos de avaliação será considerado como sendo função da variação na concentração de poluentes e do peso do parâmetro de qualidade da água utilizado, representado a seguir:

$$b_{jk} = \sum_{x=1}^t \Delta W_x \cdot q_x, \quad (3.14)$$

onde:

$b_{jk}$  = benefício gerado no ponto de avaliação  $P_S$  devido à implantação da MDH  $m_j$ , na  $k$ -ésima etapa do processo de despoluição;

$\Delta W_x$  = redução na concentração do parâmetro de qualidade  $x$  ( $x = 1$  a  $t$ ), no  $P_S$ ;

$q_x$  = peso relativo do PQA.

Os pesos relativos dos PQA considerados na formulação matemática acima devem necessariamente somar um (1) num mesmo ponto de aplicação. Ou seja,

$$\sum_{x=1}^t q_x = 1. \quad (3.15)$$

Cabe lembrar que os benefícios não podem assumir valores negativos, visto que representam uma melhoria. Um valor negativo representaria diminuição da qualidade da água da bacia, o que seria um absurdo e inviabilizaria a aplicação das medidas de despoluição. Assim,

$$b_{jk} \geq 0. \quad (3.16)$$

Como as condições do corpo hídrico dependem das ações realizadas nas etapas anteriores, conclui-se que, com o decorrer do processo, as cargas de poluentes tendem a diminuir de forma não-linear. Será adotado um decrescimento exponencial na capacidade de gerar benefícios, representada pela diminuição na concentração de poluentes, de cada uma das MDH, denominado fator de redução e dado pela seguinte fórmula:

$$b_{jk} = \delta^{k-1} \cdot b_{j1}, \quad (3.17)$$

$$0 < \delta < 1,$$

onde:

$\delta$  = taxa de decrescimento da capacidade de remoção de poluentes da MDH  $m_j$ .

### 3.4.2 Quantificação dos Benefícios de Cada Conjunto de MDH

O benefício gerado pelo conjunto de medidas não deve ultrapassar o necessário para enquadrar o rio dentro da sua classe, o que impõe um limite superior teórico na quantidade de medidas aplicadas. Todavia, na prática, observa-se que atingir os níveis exigidos pela legislação é uma tarefa muito difícil e, às vezes, impossível de se realizar em curtos espaços de tempo.

Analogamente aos custos, em cada etapa o benefício total será determinado pelo somatório dos benefícios de todas as medidas adotadas em cada conjunto. Porém, os benefícios gerados pela implantação de cada conjunto de medidas de despoluição devem levar em conta a importância do uso dos recursos. Isto será considerado através da adoção de pesos relativos, determinados em cada um dos

pontos de avaliação. A capacidade de remoção de poluentes (eficiência), expressa em porcentagem pelo escalar  $\alpha_i$  ( $i=1$  a  $4$ ), será associada a cada ponto de aplicação  $X_h$ , sendo determinada pelo grau de concentração de poluentes. Seu valor não poderá obviamente ultrapassar a unidade, que corresponde a 100%.

Assim, no exemplo apresentado, cada ponto de aplicação terá um valor relativo à capacidade de remoção, independente da medida aplicada, conforme indica a tabela 2.

TABELA 2 – VALOR RELATIVO DE CADA PONTO DE APLICAÇÃO

Pontos de Aplicação	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$
Valor associado ( $\alpha_i$ )	50%	60%	75%	75%
	0,5	0,6	0,75	0,75

FONTE: O autor

Em notação matricial os valores da capacidade de remoção de poluentes ( $\alpha_i$ ) podem ser representados pela matriz diagonal  $\Delta$ , representada a seguir,

$$\Delta = \begin{bmatrix} \alpha_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \alpha_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \alpha_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \alpha_4 \end{bmatrix}. \quad (3.18)$$

Os benefícios podem ser representados da seguinte maneira:

$$\begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ B_3 \\ B_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \alpha_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \alpha_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \alpha_4 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \\ b_4 \\ b_5 \end{bmatrix}. \quad (3.19)$$

Substituindo os valores de  $\alpha_i$  pelos valores da tabela, tem-se:

$$\begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ B_3 \\ B_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,5 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0,75 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0,75 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \\ b_4 \\ b_5 \end{bmatrix}. \quad (3.20)$$

Generalizando para  $M_i$  conjuntos formados pela combinação de  $m_j$  medidas de despoluição, na  $k$ -ésima etapa do processo, e, levando-se em conta a importância do ponto de aplicação  $X_h$  dessas medidas, independentemente de qual medida for aplicada neste ponto, tem-se:

$$\begin{bmatrix} B_{1k} \\ B_{2k} \\ \vdots \\ B_{mk} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \alpha_2 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & \alpha_m \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{m1} & a_{m2} & \cdots & a_{mn} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_n \end{bmatrix}, \quad (3.21)$$

ou, em notação matricial, simplesmente

$$B_{ik} = \Delta \cdot A \cdot b_j \quad (i = 1, \dots, m; j = 1, \dots, n \text{ e } k = 1, \dots, p). \quad (3.22)$$

### 3.4.3 Método do Valor Presente

Como os resultados dos parâmetros  $B_{ik}$  representam os benefícios obtidos pela aplicação dos conjuntos de MDH em cada etapa do projeto, propõe-se, para que seja possível comparar os resultados, a utilização do Método do Valor Presente. Este método consiste em se calcular o valor presente relativo a cada etapa do processo, de acordo com a expressão a seguir, e somá-lo ao investimento inicial de cada alternativa (CASAROTTO e KOPITKE, 1987).

$$VP(B_{ik}) = \sum_{T=1}^a \frac{B_{ikT}}{(1+d)^T} = Y, \quad (3.23)$$

onde:

$VP(B_{ik}) = Y$  = Valor presente do parâmetro de benefício  $B$ ;

$d$  = taxa de desconto;

$T$  = unidade de tempo;

$a$  = número de períodos.

#### 3.4.4 Função Objetivo

O problema em questão consiste em maximizar a função benefício sujeito a restrições de ordem financeira, viabilidade física, entre outras, dependendo dos locais de aplicação, das medidas aplicadas e do número de etapas necessárias. O objetivo consiste em aumentar o benefício em termos de despoluição total da bacia.

$$Max B = \sum_{i=1}^m B_i, \quad (3.24)$$

onde:

$B$  = função de benefício total da bacia.

Alternativamente, é possível formular a função objetivo em termos da concentração de poluentes onde, ao invés de se buscar a maximização do benefício, busca-se a minimização dessa concentração, representada por:

$$Min c = \sum_{x=1}^t c'_x \cdot q_x, \quad (3.25)$$

onde:

$c'_x$  = concentração de poluentes após a aplicação dos conjuntos de medidas;

$q_x$  = peso relativo do parâmetro de qualidade  $x$ .

No presente estudo, o parâmetro de qualidade da água analisado será a demanda bioquímica de oxigênio (DBO) que TCHOBANOGLIOUS e SCHROEDER (1987) definem como sendo a quantidade de oxigênio necessária para a metabolização da matéria orgânica biodegradável existente no meio aquático. Justifica-se esta escolha, pois, dentre os constituintes mais importantes encontrados nos corpos hídricos, o oxigênio dissolvido ocupa posição de destaque. Isto se dá em primeiro lugar pela razão óbvia de que o oxigênio é fundamental para a manutenção de formas de vida aeróbicas importantes não só para o equilíbrio ambiental, mas também como fonte de alimentos para o homem (BRANCO et al., 1991).

Embora o conceito de DBO não seja adequado como medida única de avaliação do impacto de poluentes, ele possibilita uma avaliação importante do estado de qualidade da água. Cabe lembrar que a DBO referida corresponde à oxidação metabólica da matéria orgânica, da qual resulta o gás carbônico ( $\text{CO}_2$ ), água ( $\text{H}_2\text{O}$ ) e amônia ( $\text{NH}_3$ ), conhecida como DBO carbonácea. A concentração de oxigênio dissolvido na água é resultado de um balanço entre as quantidades produzidas, consumidas e injetadas, e a massa que resulta no meio. Conhecendo-se essas quantidades produzidas e consumidas, um balanço de massa possibilita a obtenção de uma equação diferencial para o cálculo do teor de oxigênio dissolvido na água.

Ainda segundo BRANCO et al. (1991), a quantidade consumida é função da DBO que caracteriza o despejo em estudo. Assim, na determinação do benefício em termos de despoluição hídrica a DBO desempenha importante papel como parâmetro de qualidade da água. A avaliação dos resultados em termos da redução na concentração de poluentes, necessária no estudo de caso, foi obtida com o uso de um programa de computador, desenvolvido para o presente trabalho em linguagem Turbo Pascal 7.0, denominado ADV\_DIF. No Apêndice 3 encontram-se os modelos matemáticos utilizados para a formulação do programa e no Apêndice 4 a listagem do programa ADV\_DIF. Este programa funciona acoplado ao Evolver 4.0.8 utilizando como dados de entrada os resultados do algoritmo genético e fornecendo ao Evolver seus resultados obtidos, num ciclo contínuo.

## 4 ALGORITMO GENÉTICO

### 4.1 INTRODUÇÃO

Algoritmos genéticos são modelos de otimização que tem como base a evolução dos seres vivos. Os primeiros estudos foram desenvolvidos nos anos setenta por JOHN HOLLAND (1975) na Universidade de Michigan, nos Estados Unidos, que ficou impressionado com a facilidade com a qual os sistemas biológicos podem realizar tarefas que escapam até dos mais poderosos supercomputadores. KAUFFMAN (1995), DAVIES (2001), BENTLEY (2002), entre outros cientistas concordam que sistemas biológicos complexos evoluíram para atingir esse nível de complexidade. A evolução tem produzido sistemas com capacidades enormes, através de mecanismos relativamente simples de auto-reprodução que seguem algumas regras básicas:

- a) *evolução ocorre ao nível dos cromossomos*. Ou seja, o organismo não evolui, apenas serve de veículo no qual os genes são conduzidos e passados adiante. São os cromossomos que sofrem alterações com o reagrupamento dos genes;
- b) *a natureza tende a fazer mais cópias dos cromossomos que produzem um organismo mais adaptado*. Se um organismo sobrevive tempo suficiente e é saudável, seus genes têm uma capacidade maior de ser passados às próximas gerações através da reprodução;
- c) *a diversidade deve ser mantida na população*. Aparentemente, mutações aleatórias acontecem com frequência na natureza com o objetivo de garantir a ocorrência de variações nos organismos. Estas mutações genéticas geralmente resultam numa útil, e até mesmo vital, característica de sobrevivência das espécies. Com uma gama maior de possíveis combinações, uma população está menos sujeita a fraquezas comuns, como vírus, por exemplo, ou outros problemas associados à procriação consangüínea que poderiam vir a afetar e destruir todos os seus indivíduos.

HOLLAND (1975) aplicou essas propriedades da evolução a seqüências simples de números que representavam os cromossomos. Codificando seu problema numa seqüência binária, para representar os cromossomos, e fazendo com que computadores gerassem muitas seqüências binárias aleatórias, de forma a produzir uma população, determinou seu algoritmo genético que, apesar de simples e robusto, encontrou soluções ótimas para uma grande variedade de problemas.

Assim, nos algoritmos genéticos, a busca da solução para um problema é modelada em uma estrutura de dados que se assemelha a de um cromossomo. Com a aplicação de operadores são geradas combinações dessa estrutura, com a preservação de certas informações críticas. Segundo WHITLEY (1994) uma implementação do algoritmo genético começa com uma população (geralmente randômica) de cromossomos que são então avaliadas para gerar oportunidades reprodutivas de forma que os cromossomos que representam uma solução “melhor” tenham mais chances de se reproduzir do que os que representam solução “pior”. Sendo as definições de solução melhor ou pior relativas à população atual.

Segundo KAVISKI e KREMER (2004) os algoritmos genéticos diferem dos tradicionais métodos de otimização em 4 aspectos importantes:

- a) usam um código para as variáveis de controle ao invés das próprias variáveis;
- a) pesquisam numa população a solução para uma outra população, ao invés de fazer uma pesquisa individual;
- b) usam somente a informação da função objetivo e não de suas derivadas;
- c) usam regras de transição probabilísticas ao invés de usar regras determinísticas.

Numa interpretação formal o algoritmo genético refere-se ao modelo introduzido e estudado por HOLLAND (1975) e seus estudantes, e, ainda hoje, a maior parte da teoria existente sobre o tema aplica-se ao modelo por ele introduzido, bem como variações do que é referido em seu estudo como “algoritmo genético canônico” (WHITLEY, 2004). Em linhas gerais um algoritmo genético é qualquer modelo que tem por base populações e faz uso de operadores de seleção e re-

combinação para gerar novos pontos amostrais em um espaço de busca. Assim, muitos desses algoritmos foram introduzidos de forma experimental e utilizados como ferramenta de otimização.

#### 4.2 DESCRIÇÃO DO ALGORITMO

Os algoritmos genéticos geralmente tratam de problemas não lineares, onde cada parâmetro não pode ser tratado como uma variável independente capaz de ser resolvida isoladamente das demais. Um exemplo descritivo desses algoritmos é examinado por KAVISKI e KREMER (2004) e consiste em minimizar uma função  $f(\mathbf{x})$ , sendo  $\mathbf{x}$  um vetor com dimensão  $p$ , cujos componentes estão compreendidos em intervalos finitos:  $a_i \leq \mathbf{x}_i \leq b_i$ ,  $i = 1, \dots, p$ . Para aplicação do algoritmo genético o vetor  $\mathbf{x}$  é transformado numa corrente de *bits* através da utilização da seguinte expressão:

$$z = \sum_{i=1}^p \left[ \frac{\mathbf{x}_i - a_i}{b_i - a_i} \cdot (2^{t-1} - 1) + \frac{1}{2} \right] \cdot 2^{(i-1)t}. \quad (4.1)$$

Onde  $t$  representa o número de *bits* considerado para representar cada um dos componentes do vetor  $\mathbf{x}$ , e  $z$  é uma variável binária com  $s = p \cdot t$  (*bits*). Computacionalmente a variável  $z$  pode ser representada por um vetor com  $p$  números inteiros que ocupam  $\frac{t}{8}$  *bytes* (geralmente  $t = 32$  *bits*).

Conhecendo-se a variável  $z$  é possível determinar os componentes do vetor  $\mathbf{x}$ , fazendo-se uso da seguinte expressão:

$$\mathbf{x}_i = a_i + (b_i - a_i) \cdot \frac{\left[ \frac{z}{2^{(i-1)t}} \right] \cdot 2^t}{2^{t-1} - 1}, \quad (i = 1, \dots, p) \quad (4.2)$$

Os seguintes passos devem ser considerados na aplicação do algoritmo genético:

- a) gera-se aleatoriamente uma população  $z_j$  ( $j = 1, \dots, n$ ), sendo  $n$  o tamanho da população. Parte desta população, geralmente 30%, é escolhida de forma que a função objetivo seja inferior a um limite máximo que deve ser previamente estabelecido. Para cada valor de  $z_j$ , pode-se, com o uso da expressão (4.2), determinar  $\mathbf{x}_j$ ;
- b) a população deve ser classificada em ordem crescente em função dos valores da função objetivo  $f(\mathbf{x}_j)$ ,  $j = 1, \dots, n$ . Para cada elemento da população associa-se uma probabilidade, estimada por:

$$p(\mathbf{x}_j) = \frac{\left[ \frac{n-j+1}{f(\mathbf{x}_j)} \right]^2}{S}, \quad (j = 1, \dots, n), \quad (4.3)$$

sendo:

$$f(\mathbf{x}_{j-1}) \leq f(\mathbf{x}_j), \quad (j = 2, \dots, n), \quad (4.4)$$

e,

$$S = \sum_{j=1}^n \left[ \frac{n-i+j}{f(\mathbf{x}_j)} \right]^2. \quad (4.5)$$

Se  $f(\mathbf{x}_1)$  é inferior a um limite mínimo aceitável o processo iterativo é encerrado, e o vetor  $\mathbf{x}_1$  é adotado como solução;

- c) uma nova população é formada a partir da população existente por meio de 3 processos:
- reprodução: Usando a distribuição de probabilidades discreta definida em 4.3 sorteiam-se aleatoriamente  $n$  valores  $\mathbf{x}'_j$  ( $j = 1, \dots, n$ ).

Através da expressão 4.1 são determinadas as variáveis  $z'_j$  correspondentes.

- recombinação: São sorteados aleatoriamente  $r$  pares de elementos da população. Geralmente adota-se  $r$  como um percentual de  $n$ , por exemplo,  $r$  é 60% de  $n$  ( $r = 0,6n$ ). Considera-se que cada par de elementos pode se acasalar uma vez. Para cada par de variáveis sorteadas escolhe-se aleatoriamente um *bit*  $m$  compreendido entre 1 e  $s$ . Por exemplo, considerando-se que um par de elementos é constituído pelas variáveis  $z'_7$  e  $z'_{31}$ , a recombinação é realizada transferindo-se o conteúdo dos primeiros 10 *bits* (neste caso  $m = 10$ ) de  $z'_7$  para  $z'_{31}$ , e de  $z'_{31}$  para  $z'_7$ :

Antes da recombinação:

$$\begin{array}{l} z'_7 \quad 0011011101 \mid 001111\dots 011110101111111 \\ z'_{31} \quad 0111101110 \mid 01101\dots 101100001110010 \end{array}$$

Após a recombinação:

$$\begin{array}{l} z'_7 \quad 0111101110 \mid 001111\dots 011110101111111 \\ z'_{31} \quad 0011011101 \mid 01101\dots 101100001110010 \end{array}$$

- mutação: Para cada par de elementos da população que foram recombinados considera-se que pode ocorrer um processo de mutação. A mutação é simulada sorteando-se aleatoriamente um número inteiro  $l$  entre 0 e  $u$ , sendo  $u$  o número máximo de mutações que podem ocorrer num determinado elemento. Geralmente  $u$  é adotado como um percentual de  $s$ , por exemplo,  $u = 0.05s$ . Quando  $l > 0$ , sorteiam-se  $l$  números aleatórios entre 1 e  $s$ , que identificam os *bits* em que ocorrem as mutações. Em cada um dos *bits* selecionados aplica-se o operador  $\neg$  (não lógico).

por exemplo, supondo-se que para a variável  $z'_l$ ,  $l = 2$ , e que os *bits* sorteados são iguais a 7 e 121 (neste caso  $s = 128$ ), a mutação é processada da seguinte forma:

Antes da mutação: $z'_l$	011110111000111	...	011110101111111
	↓		↓
Após a mutação: $z'_l$	011110011000111	...	011110111111111
	↑		↑    ↑
	<i>Bit 7</i>		<i>Bit 121    Bit 128</i>

- a população identificada pelas variáveis  $z_j$  ( $j = 1, \dots, n$ ) é substituída pelas variáveis  $z'_j$ . Com a expressão (2) determinam-se as variáveis correspondentes  $x_j$ . O processamento do algoritmo prossegue com o retorno ao passo (b).

No estudo de caso, a ferramenta de otimização utilizada foi o algoritmo genético, sendo a solução ótima encontrada com auxílio do *software* Evolver 4.0.8. As informações referentes a este *software* se encontram no Apêndice 1 e um exemplo de seu uso é descrito no Apêndice 2.

## 5 ESTUDO DE CASO

### 5.1 INTRODUÇÃO

O estudo de caso foi realizado com a aplicação do modelo proposto na bacia do Rio Palmital, de forma a otimizar a seqüência de aplicações de medidas de despoluição, com o objetivo de aproximar esse rio da situação em que foi enquadrado. A bacia do Rio Palmital faz parte da bacia do Altíssimo Iguaçu que possui área superior a 560 km<sup>2</sup> e abriga as captações de água dos Rios Iguaçu e Irai (ANDREOLI, 1999).

### 5.2 A BACIA DO RIO PALMITAL

O Rio Palmital, afluente da margem direita do Rio Irai, com uma bacia com mais de 90 km<sup>2</sup>, recebe diversas contribuições de esgotos provenientes de áreas muito povoadas, como a Vila Zumbi, onde um número superior a 2000 habitações não dispõe de estrutura de coleta e tratamento de esgoto (ANDREOLLI, 1999). O transporte do esgoto e lixo existente nas valas de drenagem e galerias pluviais, principalmente após períodos de estiagens, provoca alterações significativas na qualidade da água, o que tem causado paralisações na Estação de Tratamento de Água – ETA Iguaçu. A Prefeitura de Pinhais está desenvolvendo um trabalho visando a melhoria das condições do Rio Palmital, com o intuito de reverter o seu processo de degradação ambiental. Existe a possibilidade de melhora da qualidade da água através da implantação de sistemas de coleta e tratamento avançado de esgotos, relocação de moradias, implantação de matas ciliares e revisão de alguns critérios de urbanização implantados na região. Manter o Rio Palmital como um manancial da cidade de Curitiba é um grande desafio e todos os esforços neste sentido demonstram a possibilidade de convivência pacífica entre um manancial e a urbanização.

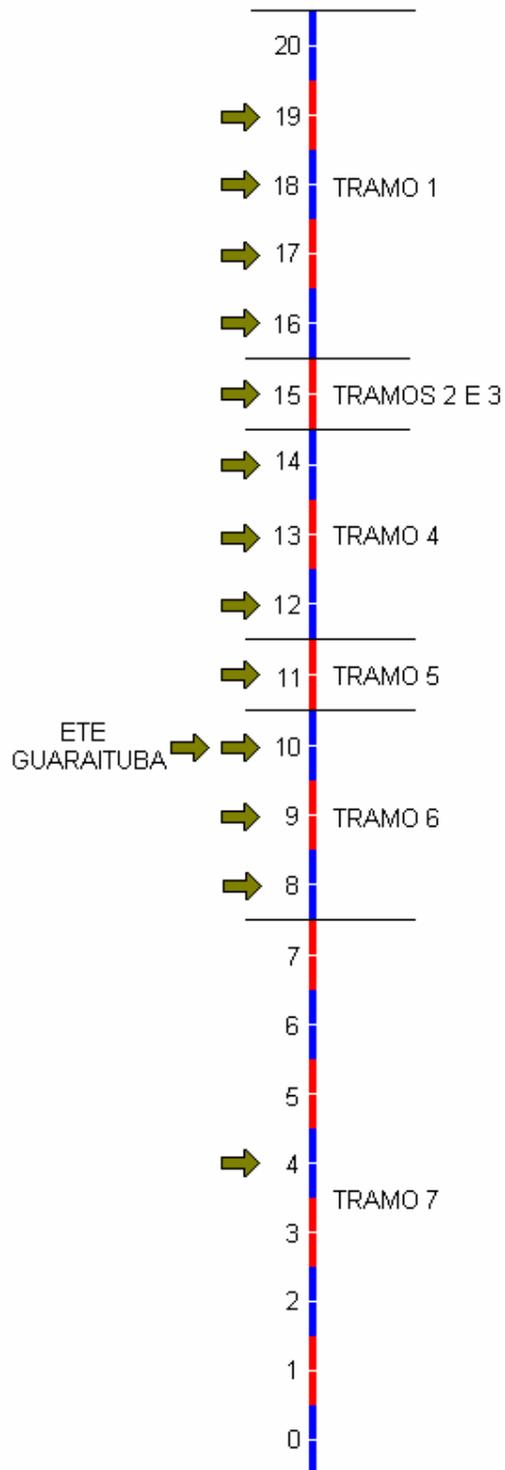
Com suas nascentes localizadas no município de Colombo, o Rio Palmital atravessa regiões predominantemente rurais até atingir o município de Pinhais, onde suas margens apresentam alto índice de ocupação urbana. Até o final da década de

1950, o rio era caracterizado por uma grande quantidade de meandros, havendo muitos obstáculos naturais como acúmulo de troncos e galhos de árvores, além da vegetação aquática, que geravam problemas de enchentes e tinham como consequência prejuízos às plantações localizadas ao longo de seu curso. A solução deste problema veio com a realização de um grande trabalho de regularização fluvial, pelo atualmente extinto Departamento Nacional de Obras e Saneamento (DNOS, 1957). Segundo este órgão, as obras de regularização fluvial atenuaram sensivelmente o problema, apesar de não resolvê-lo totalmente, pois, no seu trecho final, existem problemas crônicos devido ao represamento provocado pelo Rio Irai (KRÜGER, 1997).

O diagrama a seguir (fig. 2) foi construído com o intuito de facilitar a visualização da distribuição de cargas pontuais, indicadas por setas, nos elementos computacionais que compõem os tramos. Sua construção se deu com base no Projeto Iguaçu, Meta Física MF 1.1.2 – Levantamento e Mapeamento dos Pontos de Captação, Lançamento de Efluentes e Fontes Difusas, incluindo a Definição de Vazões e Cargas Poluidoras (Matriz de Fontes de Poluição) FERNANDES (2005). Lembrando que cada elemento computacional (EC) apresenta 1 (um) quilômetro de comprimento e a partir do diagrama pode-se concluir que:

- a) o tramo 1 possui 5 km de extensão e contém os elementos computacionais numerados de 16 a 20;
- b) os tramos 2 e 3 possuem 1 km de extensão, contendo o EC 15;
- c) o tramo 4 possui 3 km de extensão e contém os elementos computacionais 12, 13 e 14;
- d) o tramo 5 possui 1 km de extensão e contém o EC 11;
- e) o tramo 6 possui 3 km de extensão e contém os elementos computacionais 8, 9 e 10. Destaca-se a presença da ETE Guaraituba no EC 10;
- f) o tramo 7 é o mais extenso com 8 km, contendo os elementos computacionais numerados de 0 à 7.

FIGURA 2 – DIAGRAMA DE CARGAS PONTUAIS NO RIO PALMITAL



FONTE: O autor

NOTA: Construído a partir de dados do Projeto Iguazu (FERNANDES, 2005).

### 5.3 DADOS HIDROLÓGICOS

De acordo com KRÜGER (1997) os dados fluviométricos da estação fluviométrica Vargem Grande (código do Departamento Nacional de Águas e Energia - DNAEE 65006055), operada pela Superintendência de Desenvolvimento de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental (SUDERHSA), podem ser usados para caracterizar hidrologicamente a bacia do Rio Palmital. Este posto se localiza a um quilômetro a montante da foz deste rio e drena uma área de 87 km<sup>2</sup>. Sua instalação data de março de 1984 e se encontra atualmente em operação. A seguir são apresentadas a BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO PALMITAL (mapa 1) e a CURVA DE DESCARGA DO RIO PALMITAL EM VARGEM GRANDE (fig. 3).

A classificação do Rio Palmital, quanto à qualidade de sua água, obedece à portaria n°20, de 12 de maio de 1992, da Superintendência de Recursos Hídricos e Meio Ambiente (SUREHMA, 1992), que determina o enquadramento da Bacia do Rio Iguaçu, disposta a seguir:

*Art.1º - Todos os cursos d'água da Bacia do Rio Iguaçu de domínio do Estado do Paraná, pertencem à Classe "2".*

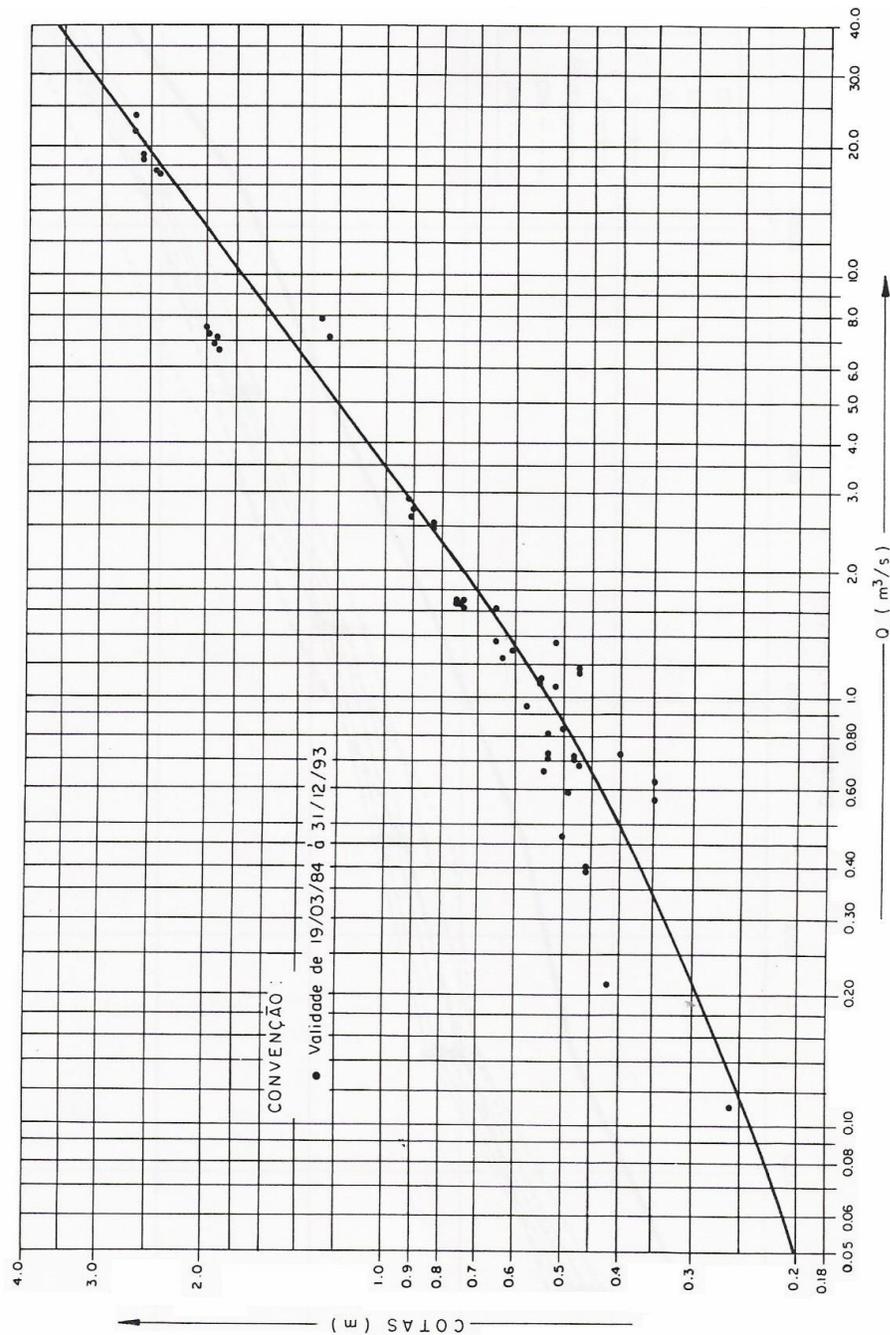
*Art.2º - Constitui exceção ao enquadramento constante:*

*VI - Rio Belém contribuinte da margem direita do rio Iguaçu, e seus afluentes, a jusante do Bosque João Paulo II, Município de Curitiba, que pertence à Classe "3".*

*VII - Rio Barigüi, contribuinte da margem direita do rio Iguaçu, a jusante do Parque Barigüi, Município de Curitiba, que pertence à Classe "3".*



FIGURA 3 – CURVA DE DESCARGA DO RIO PALMITAL EM VARGEM GRANDE



<b>C E H P A R</b> CURITIBA — BRASIL		ESTUDOS DE SIMULAÇÃO DO ESCOAMENTO DO RIO PALMITAL NA REGIÃO METROPOLITANA DE CURITIBA	PROJETO: <i>[assinatura]</i>
REF.: HG-78	F-09		DESENHO: henrique luiz scremin.
FOLHA: 01 - 01		ARQUIVO:	Curva de descarga do rio Palmital em Vargem Grande
CLIENTE: C O M E C		NÚMERO: 035	VISTO: <i>[assinatura]</i>
			APROVADO: <i>[assinatura]</i>

FONTE: CEHPAR

NOTA: Figura extraída do Projeto HG-77, Curitiba, 1995.

## 5.4 MATRIZ DAS FONTES DE POLUIÇÃO

A determinação da matriz das fontes de poluição (tabela 3) utilizada no estudo de caso se deu através do Projeto Iguaçu, Meta Física MF 1.1.2 – Levantamento e Mapeamento dos Pontos de Captação, Lançamento de Efluentes e Fontes Difusas, incluindo a Definição de Vazões e Cargas Poluidoras (Matriz de Fontes de Poluição) FERNANDES (2005).

Após a definição de um diagrama topológico com base no Plano de Despoluição Hídrica da Bacia do Alto Iguaçu (PDHBAI) e no Projeto Experimental para Análise de Outorgas, executados pela SUDERHSA (2000), foi realizada a construção de uma matriz de fontes de poluição. Esta matriz teve como base o PDHBAI, os dados do Cadastro dos Grandes Usuários de Recursos Hídricos da Bacia do Alto Iguaçu, realizado pela SUDERHSA em 2000, e o Projeto Experimental para Análise de Outorgas.

A matriz em questão se divide em três grandes grupos de dados:

- a) características da bacia em análise;
- b) vazões encontradas;
- c) cargas poluidoras;

Os dados característicos da bacia compreendem, entre outros valores relevantes, a extensão do rio, sua declividade longitudinal, o coeficiente de *Manning* e a área e a população da bacia hidrográfica. Os valores de vazões foram obtidos com base no PDHBAI, que, por sua vez, é baseado no Projeto HG-77 – *Regionalização de Vazões em Pequenas Bacias Hidrográficas do Estado do Paraná* (KAVISKI e KRÜGER, 1995), e englobam vazões mínimas, moderadas e críticas. As considerações em relação às cargas de poluentes foram realizadas com a discriminação destas em domésticas, industriais e difusas, identificando nome, origem, tipo, vazão do efluente, carga de DBO e eficiência para cada tipo de contribuinte. O último grande grupo compõe os dados de entrada no modelo de qualidade da água em termos de vazões e cargas totais e suas respectivas concentrações de DBO.

Visando a utilização do programa de modelagem da qualidade da água, QUAL2E, da *Environmental Protection Agency* (EPA), a bacia hidrográfica foi dividida em tramos, que correspondem às áreas de contribuição identificadas no Plano de Despoluição Hídrica da Bacia do Alto Iguaçu. Cada tramo apresenta vazões e cargas que, dependendo de sua característica, podem ser distribuídas pontual ou linearmente na sua extensão.

Algumas hipóteses simplificadoras foram adotadas no preenchimento dos dados da matriz de fontes de poluição e são descritas a seguir:

- a) cada tramo é dividido em um número inteiro de elementos computacionais;
- b) cada elemento computacional tem comprimento ( $\Delta x$ ) de 1 km. Sua divisão visa a adequação ao modelo de qualidade da água com base em estudos realizados no Projeto Experimental para Análise de Outorgas (SUDERHSA, 2003);
- c) cada elemento computacional de determinado tramo contém áreas incrementais iguais, considerando a hipótese da linearidade, onde a área total do tramo é dividida pelo número de elementos computacionais deste tramo;
- d) a vazão é distribuída linearmente ao longo do tramo. Valores relativos à captações, reservatórios e lançamentos pontuais de grande porte são alocados no elemento computacional correspondente;
- e) assim como a vazão, a carga é distribuída linearmente ao longo do tramo;
- f) a matriz é alimentada com dados constantes do Plano de Despoluição Hídrica da Bacia do Alto Iguaçu, sem a preocupação com revisões de seus parâmetros definidos.

TABELA 3 - MATRIZ DAS FONTES DE POLUIÇÃO

Tramo	EC (1)	População para o ano de 2005 (hab)			Vazão incremental do rio Q50%	Grandes Usuários Pontuais		Demais Usuários Pontuais		Usuários Difusos								
		Total de Projeto	Não Possui Coleta de Esgoto	Possui Coleta de Esgoto		Com Esgoto Tratado	Vazão (l/s)	Carga DBO (kg/dia)	Vazão (l/s)	Carga DBO (kg/dia)	Urbano de Alta Densidade		Urbano Residencial		Agricultura			
											Uso do solo (%)	Área (km <sup>2</sup> )	Carga DBO (kg/dia)	Uso do solo (%)	Área (km <sup>2</sup> )	Carga DBO (kg/dia)	Uso do solo (%)	Área (km <sup>2</sup> )
1	10,0	110	110	0	0	0,12072	0,00	0,28	4,94	-	-	-	-	-	100	9,96	52,15	
2 e 3	17,4	1650	1619	31	0	0,21125	0,00	3,52	62,70	-	-	20	3,49	65,71	80	13,94	73,01	
4	8,9	6533	2695	3838	2695	0,10775	0,00	8,14	145,09	-	-	-	-	-	100	8,89	46,55	
5	18,7	30596	30596	0	0	0,22804	0,00	64,85	1156,50	25	4,66	53,71	-	-	75	13,99	73,24	
6	16,7	65334	41030	24304	24254	0,20216	79,04	78,08	1552,89	60	10,01	115,28	-	-	40	6,67	34,93	
7	23,7	58539	52393	6146	6146	0,28688	0,00	111,05	1980,45	60	14,20	163,59	-	-	40	9,47	49,57	
Total		162762	128443	34319	33095	1,15479	79,04	265,92	4902,57		28,87	332,58		3,49	65,71		62,92	329,45

FONTE: Plano de Despoluição Hídrica da Bacia do Alto Iguaçu (SUDERHSA, 2000)

NOTA: Dados trabalhados pelo autor.

(1) Elemento Computacional (EC).

As considerações realizadas em relação aos usuários partem de uma divisão em três grupos: Grandes Usuários, Demais Usuários Pontuais e Usuários Difusos. Classificam-se como Grandes Usuários àqueles onde a captação, existência de reservatório ou efluente proporcionado apresentem valores significativos, merecendo, assim, análise individual. Dentro deste grupo se encontra a SANEPAR, com suas captações, reservatórios, lançamentos de efluentes e eficiência de tratamento, a Petróleo Brasileiro S/A – Petrobrás / Repar, a Cocelpa Cia Celulose e Papel do Paraná entre outras, conforme caracterizado no cadastro de usuários da Bacia do Alto Iguaçu, desenvolvido pela SUDERHSA em 2000. Os Demais Usuários correspondem a um grupo com pequena importância individual que apenas quando avaliado em conjunto apresenta valores significativos para análise. São caracterizados por sua descrição, origem de uso (doméstico ou industrial), tipo de uso (captação, lançamento de efluente e reservatório), vazão e carga de contribuição e eficiência do tratamento empregado.

No cálculo das cargas domésticas é feita a seguinte discriminação:

- a) população que não conta com serviço de coleta de esgoto;
- b) população que possui coleta de esgoto, mas não conta com esgoto tratado;
- c) população que conta com coleta e tratamento de esgoto;
- d) índice de retorno para esgoto não coletado;
- e) índice de retorno para esgoto coletado e não tratado;
- f) índice de retorno para esgoto coletado e tratado;
- g) DBO *per capita* e eficiência da estação de tratamento de esgoto (ETE) em relação à remoção da DBO.

A obtenção da carga doméstica se dá com o uso da seguinte expressão:

$$Wd = WdT + WdC + WdT, \quad (5.1)$$

onde:

$Wd$  = carga doméstica;

$Wd\bar{T}$  = carga doméstica coletada, porém não tratada;

$Wd\bar{C}$  = carga doméstica não coletada;

$WdT$  = carga doméstica tratada.

Sendo que a carga doméstica coletada, porém não tratada, é obtida separadamente da seguinte forma:

$$Wd\bar{T} = Ir\bar{T} \cdot (PC - PT) \cdot Wu, \quad (5.2)$$

onde:

$Ir\bar{T}$  = índice de retorno de esgoto coletado e não tratado;

$PC$  = população com esgoto coletado (*hab*);

$PT$  = população com esgoto tratado (*hab*);

$Wu$  = carga unitária *per capita*  $\left( \frac{kgDBO}{hab \cdot dia} \right)$ .

A carga doméstica não coletada é obtida da seguinte forma:

$$Wd\bar{C} = Ir\bar{C} \cdot P\bar{C} \cdot Wu, \quad (5.3)$$

onde:

$Ir\bar{C}$  = índice de retorno de esgoto não coletado;

$P\bar{C}$  = população com esgoto não coletado;

E, finalmente, a carga doméstica tratada é obtida da seguinte forma:

$$WdT = PT \cdot (1 - \eta) \cdot Wu, \quad (5.4)$$

onde:

$\eta$  = eficiência da remoção de DBO.

As cargas produzidas pelos Usuários Difusos são normalmente geradas em áreas extensas o que dificulta a identificação de sua origem. Quando associadas à água da chuva chegam aos corpos hídricos de maneira intermitente. O deflúvio superficial urbano contém geralmente todos os poluentes depositados na superfície do solo e, na ocorrência de chuvas, os materiais acumulados em valas e bueiros são arrastados pelas águas pluviais para os cursos de águas superficiais, e constituem, assim, uma fonte de poluição. Esta fonte de poluição é inversamente proporcional à eficiência dos sistemas de coleta de esgotos e limpeza pública. A poluição por cargas difusas é quantificada com base no tipo de uso do solo e, na construção da matriz de fontes de poluição, seis tipos de uso do solo são considerados: urbano de alta densidade, urbano residencial, agricultura, pastagem, floresta e pântano, e improdutivo.

A área urbana de alta densidade é caracterizada por apresentar alta concentração populacional e os poluentes advindos desta área têm sua origem, via de regra, na poluição concentrada nas vias públicas. A área urbana residencial apresenta a mesma origem de poluentes, porém, com uma concentração populacional bem inferior. A área referente à agricultura é normalmente relacionada à atividade agrícola e seus efeitos dependem das práticas utilizadas em cada região e da época do ano em que se realizam as preparações do terreno para o plantio e, obviamente, do uso intensivo de defensivos agrícolas. A contribuição representada pelo material proveniente da erosão de solos intensifica-se quando da ocorrência de chuvas em áreas rurais. A área referente à pastagem está vinculada à criação intensiva de animais, apresentando foco de contaminação de matéria orgânica e, por vezes, de certos metais utilizados nas rações para alimentação animal. A área de floresta e pântano caracteriza-se pela pouca atividade humana e, por isso, apresenta carga relativamente baixa de poluição. E, por último, tem-se a área improdutivo. Para a quantificação das cargas difusas foi adotada a mesma hipótese considerada no Plano de Despoluição Hídrica. A carga difusa é obtida pelo produto entre a concentração média de DBO em função do uso do solo, a vazão específica e a área correspondente ao tipo de uso do solo em análise, como demonstrado a seguir:

$$W = 86.400 \cdot Q_e \cdot A \cdot c, \quad (5.5)$$

onde:

$W$  = carga diária de DBO (kg/dia);

$Q_e$  = vazão específica  $\left(\frac{l}{s \cdot km^2}\right)$ ;

$A$  = área ( $km^2$ );

$c$  = concentração de DBO (kg/l).

Após a caracterização das fontes de poluição foram quantificados os totais de carga, vazão e concentração de cada elemento computacional que compõem a bacia hidrográfica analisada. A carga total corresponde ao somatório das cargas dos grandes usuários, dos demais usuários pontuais e das cargas difusas proporcionadas pela vazão, para as vazões de 50% e 95% de permanência e para a vazão de estiagem média com 7 (sete) dias consecutivos de duração e 10 (dez) anos de recorrência ( $Q_{7,10}$ ). Lembrando que os dados de entrada no modelo de qualidade de água são caracterizados para cada vazão considerada.

O cálculo das concentrações de DBO, para o caso dos usuários pontuais, levou em consideração a eficiência do tratamento do efluente, sendo realizado através de uma média ponderada como indicado na equação a seguir:

$$c = \left(\frac{1}{86,4}\right) \cdot \frac{[Wg \cdot (1 - \eta g) + Wd \cdot (1 - \eta d)]}{(Qg + Qd)}, \quad (5.6)$$

onde:

$Wg$  = carga diária de DBO dos grandes usuários (kg/dia);

$Wd$  = carga diária de DBO dos demais usuários pontuais (kg/dia);

$\eta g$  = eficiência para os grandes usuários;

$\eta d$  = eficiência para os demais usuários pontuais;

$Qg$  = vazão para os grandes usuários  $\left(\frac{m^3}{s}\right)$ ;

$Q_d = \text{vazão para os demais usuários pontuais} \left( \frac{m^3}{s} \right).$

## 5.5 MEDIDAS DE DESPOLUIÇÃO HÍDRICA

As medidas de despoluição hídrica (MDH) são definidas no Plano de Despoluição Hídrica da Bacia do Alto Iguaçu (PDHBAI), realizado pela Superintendência de Desenvolvimento de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental (SUDERHSA, 2000) como “propostas de ações que têm por objetivo a redução da poluição e a proteção da qualidade das águas podendo ser divididas em dois grupos básicos: as Medidas de Gestão, de caráter não estrutural, que visam propiciar instrumentos necessários à efetiva gestão dos recursos hídricos e as Medidas Estruturais, de caráter corretivo, voltadas ao saneamento e à recuperação e proteção dos recursos hídricos através da implementação de serviços e obras.” Devido ao fato da Bacia do Alto Iguaçu ter como fontes de poluição preponderantes a doméstica, a industrial e a difusa, as medidas descritas a seguir tratam da mitigação da carga de poluentes para essas fontes de poluição.

Os dados a seguir (tabela 4) compõem um resumo do *ANEXO 1 – Principais Medidas de Despoluição Hídrica em termos de remoção de carga característica e custos unitários*, que faz parte da meta física MF 2.1.2 – CONSTRUÇÃO DE MODELO QUE RELACIONA MEDIDAS DE DESPOLUIÇÃO COM A REMOÇÃO DE CARGAS E SEUS EFEITOS SOBRE O CORPO HÍDRICO E SEUS CUSTOS (FERNANDES, 2005). Essa tabela relaciona medidas de despoluição hídrica com suas respectivas descrições e remoções de carga de DBO em função de suas dimensões unitárias características. Estes valores são encontrados, com exceção dos obtidos para a medida Sistema de Tratamento de Esgoto Doméstico, de forma indireta no Plano de Despoluição Hídrica da Bacia do Alto Iguaçu. Cabe destacar a dificuldade de se encontrar os dados para o preenchimento dessa tabela que, segundo descrito na meta física MF – 2.1.2, não são tratados de forma direta em nenhuma literatura.

TABELA 4 - MEDIDAS DE DESPOLUIÇÃO HÍDRICA

Medidas de Despoluição Hídrica de Implementação de Serviços e Obras de Operação e Manutenção				Remoção de Carga (kg/dia/unidade)		Custo (1) (R\$/unidade)	Unidade de Medida	
Código	Medida	Variante	Órgão Executor	Eficiência	Doméstica			Difusa
m1	Implantação, manutenção e operação de Estações de Tratamento de Esgoto	RALF seguido de lagoa aerada ou reator aerado	SANEPAR e população usuária	85%	4.590	-	100 hab	
m2		RALF seguido de lagoa anaeróbia		60%	3.240			4.963,87
m3		Lodos ativados por Oxigênio Puro, aeração prolongada ou lodos ativados convencionais		95%	5.130			9.127,62
m4	Melhoria e ampliação dos serviços de varrição de áreas urbanas	Lagoo aerada seguida por lagoo de decantação e desinfecção	Prefeitura Municipal	87%	4.700	5.556,25	ha	
m5		Manual em áreas altamente urbanizadas		20%	-	0,012		899,94
m6		Manual em áreas residenciais		-	-	0,020		899,94
m7		Mecânica em áreas altamente urbanizadas		50%	-	0,030		1.133,67
m8	Pequena e reduzidas obras de infra-estrutura	Mecânica em áreas residenciais	Prefeitura Municipal, COMEC e SUDERHSA	-	-	0,050	1.133,67	
m9		Mecânica em áreas residenciais		80%	1.587	1,587	238.300,00	
m10	Criação de parques e áreas verdes ao longo de rios	Intervenção Paisagística	Prefeitura Municipal, COMEC e SUDERHSA	80%	1.587	1,587	412.000,00	
								Média com implantação de área de estar, playground, cancha poliesportiva, ciclovia e instalações sanitárias.
m11	Criação de parques e áreas verdes ao longo de rios	Intervenção Paisagística	Prefeitura Municipal, COMEC e SUDERHSA	80%	1.587	1,587	475.000,00	
Alta com implantação das obras da variante acima acrescidas de centros comunitários, culturais, de exposições, convenções, esportes e lazer.								
m12	Criação de parques e áreas verdes ao longo de rios	Intervenção Paisagística	Prefeitura Municipal, COMEC e SUDERHSA	80%	1.587	1,587	605.500,00	
Alta com implantação das obras da variante acima acrescidas de centros comunitários, culturais, de exposições, convenções, esportes e lazer.								

FONTE: Projeto Iguazu (FERNANDES, 2005).

NOTA: Dados trabalhados pelo autor.

(1) Valores em Reais (R\$) referidos a novembro de 2003.

### 5.5.1 Medidas de Gestão

Apesar das medidas não-estruturais constarem no Projeto Iguazu (FERNANDES, 2005) e terem seu benefício determinado em termos da remoção de carga, os valores relativos aos seus custos não são definidos o que inviabiliza o seu uso no modelo proposto. As medidas de gestão apresentadas são as seguintes:

- a) disciplinamento, fiscalização e controle do uso do solo;
- b) controle e fiscalização das fontes de poluição hídrica, despejos industriais e esgoto urbano;
- c) controle das fontes difusas de poluição das águas em áreas rurais;
- d) controle das fontes difusas de poluição das águas em áreas urbanas;
- e) definição das medidas de segurança para reduzir riscos com descargas acidentais;
- f) programa de educação ambiental;
- g) cobertura vegetal;
- h) fiscalização ambiental;
- i) monitoramento ambiental;
- j) ocupação e uso conservacionista do solo rural;
- k) reordenamento territorial;
- l) diluição de esgoto.

### 5.5.2 Medidas de Implementação de Serviços e Obras

#### 5.5.2.1 Identificação e eliminação de ligações irregulares de esgoto

A medida de identificação e eliminação de ligações irregulares de esgoto será considerada uma medida auxiliar, pois, por si só, não elimina diretamente as cargas. Assim, seus custos serão incorporados aos das medidas de implantação, manutenção e operação de estações de tratamento de esgoto.

Investimento:	R\$ 85,62/família.
Custo de Manutenção e Operação:	R\$ 13,51/(ano·família).
Valor Presente:	R\$ 112,58/família.

CUSTO TOTAL: R\$ 198,20/família.

Considerando que cada família é composta por 5 pessoas o custo total será equivalente a 39,64 reais por habitante. Assim, o custo gerado pela implantação da medida auxiliar descrita anteriormente pode ser expresso pela seguinte função:

$$cma = 39,64 \cdot Pa, \quad (5.7)$$

onde:

$cma$  = custo da medida auxiliar (R\$);

$Pa$  = população atendida (*hab*).

#### 5.5.2.2 Implantação, manutenção e operação de coletores tronco e interceptores e de rede de esgoto

As medidas de implantação, manutenção e operação de coletores tronco e interceptores e, caso necessário, estações elevatórias, e implantação, manutenção e operação de rede de esgoto serão consideradas medidas auxiliares, porém seus custos não serão incorporados aos das medidas de implantação, manutenção e operação de estações de tratamento de esgoto, pois são relativos a uma outra unidade de medida.

#### 5.5.2.3 Implantação, manutenção e operação de estações de tratamento de esgoto doméstico

Estas medidas serão efetivamente utilizadas no modelo e denominadas  $m_1$ ,  $m_2$ ,  $m_3$  e  $m_4$ , conforme descrito na tabela 4. A remoção de carga obtida pela implantação e operação de estações de tratamento de esgoto (ETEs), em termos de sua dimensão unitária característica, será quantificada a partir dos seguintes parâmetros:

- a) carga de efluente coletada;
- b) eficiência média do sistema de tratamento de esgoto;

- c) população cujo esgoto é coletada;
- d) vazão média tratada por dia.

Admitiu-se que a dimensão unitária desta remoção de carga será quantificada por habitante através da equação:

$$b_j = Wu \cdot \eta \cdot Pa, \quad (5.8)$$

onde:

$b_j$  = benefício em termos da remoção de DBO  $\left(\frac{kg}{dia}\right)$ , ( $j = 1$  a  $4$ );

$Wu$  = carga unitária diária per capita  $\left(\frac{kg}{hab \cdot dia}\right)$ ;

$\eta$  = eficiência do tratamento (%);

$Pa$  = população atendida (*hab*).

De acordo com o PDHBAI, para o ano de 2005, a carga orgânica será de 91.335 kg por dia e a população de 1.691.388 habitantes, o que resulta numa carga média per capita de 54 g de DBO por dia. Como o Rio Palmital se encontra na Bacia do Alto Iguaçu este valor será adotado como carga unitária no estudo de caso.

O custo total, relativo à medida de implantação, manutenção e operação de ETEs, empregado nos cálculos de otimização do estudo de caso, será acrescido do custo total relativo à medida auxiliar de identificação e eliminação de ligações irregulares de esgoto, cujo valor é de 39,64 reais por habitante.

Medida  $m_1$ :

Investimento: R\$ 6760,61/100hab.

Custo de manutenção e operação: R\$ 23,00/(ano·100hab).

Valor presente: R\$ 191,67/100hab.

CUSTO TOTAL: R\$ 6952,28/100hab.

Assim, o custo gerado pela implantação da medida  $m_1$  será expresso pela seguinte função:

$$c_1 = 109,16 \cdot Pa, \quad (5.9)$$

onde:

$c_1$  = custo da medida  $m_1$  (R\$);

$Pa$  = população atendida (*hab*).

Medida  $m_2$ :

Investimento:	R\$ 4772,20/100hab.
Custo de manutenção e operação:	R\$ 23,00/(ano·100hab).
Valor presente:	R\$ 191,67/100hab.
CUSTO TOTAL:	R\$ 4963,87/100hab

Assim, o custo gerado pela implantação da medida  $m_2$  será expresso pela seguinte função:

$$c_2 = 89,28 \cdot Pa, \quad (5.10)$$

onde:

$c_2$  = custo da medida  $m_2$  (R\$).

Medida  $m_3$ :

Investimento:	R\$ 8935,95/100hab.
Custo de manutenção e operação:	R\$ 23,00/(ano·100hab).
Valor presente:	R\$ 191,67/100hab.
CUSTO TOTAL:	R\$ 9127,62/100hab

Assim, o custo gerado pela implantação da medida  $m_3$  será expresso pela seguinte função:

$$c_3 = 130,92 \cdot Pa , \quad (5.11)$$

onde:

$c_3$  = custo da medida  $m_3$  (R\$).

Medida  $m_4$ :

Investimento:	R\$ 5364,58/100hab.
Custo de manutenção e operação:	R\$ 23,00/(ano·100hab).
Valor presente:	R\$ 191,67/100hab.
CUSTO TOTAL:	R\$ 5556,25/100hab

Assim, o custo gerado pela implantação da medida  $m_4$  será expresso pela seguinte função:

$$c_4 = 95,20 \cdot Pa , \quad (5.12)$$

onde:

$c_4$  = custo da medida  $m_4$  (R\$).

Como as medidas  $m_1$ ,  $m_2$ ,  $m_3$  e  $m_4$  são mutuamente excludentes em cada aplicação, o modelo somente irá levar em consideração a que propiciar maior benefício com o menor custo.

#### 5.5.2.4 Diluição de esgoto e sistemas de tratamento de efluentes industriais

As medidas de regularização da vazão de diluição de esgoto e implantação e melhoria dos sistemas de tratamento de efluentes industriais não apresentam valores para seus custos relativos o que inviabiliza seu uso no modelo proposto.

### 5.5.2.5 Melhoria e ampliação dos serviços de varrição de áreas urbanas

Estas medidas serão efetivamente utilizadas no modelo e denominadas  $m_5$ ,  $m_6$ ,  $m_7$  e  $m_8$ . A remoção de carga obtida pela melhoria e ampliação dos serviços de varrição de áreas urbanas, em termos de sua dimensão unitária característica, será quantificada a partir dos seguintes parâmetros:

- a) tipo de área a ser varrida, em função do uso do solo;
- b) concentrações de DBO, também em função do uso do solo;
- c) vazão de escoamento superficial;
- d) dimensão da área a ser varrida;
- e) eficiência média do serviço de varrição em função do número de varrições mensais.

Determinou-se a quantificação da remoção de carga por hectare, resultando na seguinte expressão:

$$b_j = c \cdot Q \cdot A \cdot \eta \cdot 10^{-6}, \quad (5.13)$$

onde:

$b_j$  = benefício em termos da remoção de DBO  $\left(\frac{kg}{dia}\right)$ , ( $j = 5$  a  $8$ );

$c$  = concentração  $\left(\frac{mg}{l}\right)$ ;

$Q$  = vazão  $\left(\frac{l}{ha \cdot dia}\right)$ ;

$A$  = área ( $ha$ );

$\eta$  = eficiência do serviço (%).

Os cálculos para as áreas urbanas com alta densidade (UAD) e urbanas residenciais (UR) seguem os seguintes parâmetros definidos no PDHBAI:

- a) concentrações de 11 mg/l de DBO para áreas urbanas de alta densidade e 18 mg/l de DBO para áreas urbanas residenciais;

- b) eficiências de 20% para a varrição manual (MA) e 50% para a mecânica (ME), com a realização de 2 varrições semanais, totalizando 8 varrições mensais;

O custo total relativo à melhoria e ampliação dos serviços de varrição de áreas urbanas, empregado nos cálculos de otimização no estudo de caso, será considerado a partir dos seguintes dados encontrados na tabela de Medidas de Despoluição Hídrica:

Medidas  $m_5$  e  $m_6$ :

Investimento:	R\$ 358,27/ha.
Custo de Manutenção e Operação:	R\$ 65,00/(ano·ha).
Valor Presente:	R\$ 541,67/ha.
CUSTO TOTAL:	R\$ 899,94/ha

Assim, o custo gerado pela implantação das medidas  $m_5$  ou  $m_6$  será expresso pela seguinte função:

$$c_5 = c_6 = 899,94 \cdot A, \quad (5.14)$$

onde:

$c_5$  = custo da medida  $m_5$  (R\$);

$c_6$  = custo da medida  $m_6$  (R\$);

$A$  = área (ha).

Medidas  $m_7$  e  $m_8$ :

Investimento:	R\$ 800,34/ha
Custo de Manutenção e Operação:	R\$ 40,00/(ano·ha).
Valor Presente:	R\$ 333,33/ha.
CUSTO TOTAL:	R\$ 1133,67/ha

Assim, o custo gerado pela implantação das medidas  $m_7$  ou  $m_8$  será expresso pela seguinte função:

$$c_7 = c_8 = 1133,67 \cdot A, \quad (5.15)$$

onde:

$c_7$  = custo da medida  $m_7$  (R\$);

$c_8$  = custo da medida  $m_8$  (R\$);

$A$  = área (ha).

#### 5.5.2.6 Remoção de ocupações em áreas irregulares, coleta de lixo, construção de aterro sanitário, compostagem, reciclagem e cobertura vegetal

As medidas de remanejamento de habitações instaladas em áreas de mananciais, coleta de resíduos, construção de aterro sanitário, reciclagem de resíduos orgânicos (compostagem), reciclagem de materiais inorgânicos e recuperação de matas ciliares e plantio em áreas devastadas não apresentam valores para seus custos relativos e por este motivo não serão incorporadas ao modelo proposto.

#### 5.5.2.7 Criação de parques e áreas verdes ao longo de rios

Estas medidas serão efetivamente utilizadas no modelo e denominadas  $m_9$ ,  $m_{10}$ ,  $m_{11}$  e  $m_{12}$ .

As remoções de carga de DBO, em termos de suas dimensões características unitárias, provenientes da criação de parques e áreas verdes ao longo de rios não constam do relatório parcial nº 04/2003 do Projeto Iguaçu e, por este motivo, seus valores estão apresentados a seguir de acordo com a função que se encontra na tabela de medidas de despoeiração hídrica de FERNANDES (2005).

$$b_j = D \cdot \eta \cdot Wu \cdot A, \quad (5.16)$$

onde:

$b_j$  = benefício em termos da remoção de DBO  $\left(\frac{kg}{dia}\right)$ , ( $j = 9$  a  $12$ );

$D$  = densidade demográfica da Bacia do Alto Iguaçu para 2005  $\left(\frac{hab}{ha}\right)$ ;

$\eta$  = eficiência do serviço (%).

$Wu$  = carga unitária diária per capita  $\left(\frac{kg}{hab \cdot dia}\right)$ ;

$A$  = área ( $ha$ ).

O custo total referente à criação de parques e áreas verdes ao longo de rios foi estimado com base no valor investido sem levar em consideração os custos de manutenção e operação, conforme se pode observar a seguir.

Medida  $m_9$ :

CUSTO TOTAL: R\$ 238.300,00/ha.

Assim, o custo gerado pela implantação da medida  $m_9$  será expresso por:

$$c_9 = 238.300 \cdot A, \quad (5.17)$$

onde:

$c_9$  = custo da medida  $m_9$  (R\$);

$A$  = área ( $ha$ ).

Medida  $m_{10}$ :

CUSTO TOTAL: R\$ 412.000,00/ha.

Assim, o custo gerado pela implantação da medida  $m_{10}$  será expresso por:

$$c_{10} = 412.000 \cdot A, \quad (5.18)$$

onde:

$c_{10}$  = custo da medida  $m_{10}$  (R\$).

Medida  $m_{11}$ :

CUSTO TOTAL: R\$ 475.000,00/ha.

Assim, o custo gerado pela implantação da medida  $m_{11}$  será expresso por:

$$c_{11} = 475.000 \cdot A, \quad (5.19)$$

onde:

$c_{11}$  = custo da medida  $m_{11}$  (R\$).

Medida  $m_{12}$ :

CUSTO TOTAL: R\$ 605.500,00/ha.

Assim, o custo gerado pela implantação da medida  $m_{12}$  será expresso por:

$$c_{12} = 605.500 \cdot A, \quad (5.20)$$

onde:

$c_{12}$  = custo da medida  $m_{12}$  (R\$).

Como as medidas  $m_9$ ,  $m_{10}$ ,  $m_{11}$  e  $m_{12}$  são mutuamente excludentes em cada aplicação, o modelo somente irá levar em consideração a que propiciar maior benefício com o menor custo.

## 5.6 SOLUÇÃO DO ESTUDO DE CASO COM O USO DOS PROGRAMAS EVOLVER E ADV\_DIF

O estudo de caso foi resolvido a partir de dados retirados dos relatórios de SUDERHSA (2000) e FERNANDES (2005), compilados nas tabelas 3 – MATRIZ DAS FONTES DE POLUIÇÃO e 4 – MEDIDAS DE DESPOLUIÇÃO HÍDRICA. Esses dados foram utilizados primeiramente como dados de entrada para o *software* Evolver 4.0.8 e, depois de processados e otimizados, serviram como dados de entrada para o programa ADV\_DIF, que trabalhou acoplado àquele *software*. O Evolver encontrou a melhor utilização dos recursos para uma população de 250 cromossomos, durante 30 minutos para cada um dos valores de investimento adotados. Seus resultados de potencial de remoção de DBO foram utilizados pelo ADV\_DIF que determinou a concentração de poluentes em cada elemento computacional, cada tramo e finalmente para toda a bacia.

Os valores ótimos foram determinados para diferentes situações onde o capital a ser investido foi sendo aumentado gradualmente, partindo de um valor inicial de R\$ 2 milhões até atingir o valor máximo de R\$ 16 milhões. Para cada um desses valores investidos foram obtidos os resultados das aplicações das medidas de despoluição com o uso do Evolver e das concentrações de poluente com o uso do programa ADV\_DIF.

As informações e detalhes de funcionamento referentes ao *software* Evolver 4.0.8 se encontram no Apêndice 1. Um exemplo de aplicação deste *software* é descrito no Apêndice 2. A formulação e a listagem do programa ADV\_DIF se encontram nos Apêndices 3 e 4 respectivamente. O valor do coeficiente de *Manning* ( $\eta$ ) adotado foi 0,047, sendo obtido através de calibração em função da CURVA DE DESCARGA DO RIO PALMITAL EM VARGEM GRANDE (fig. 3).

## 5.7 RESULTADOS

Os resultados encontrados refletem uma situação em que o aumento do montante a ser investido determina uma taxa de redução bastante expressiva na concentração do corpo hídrico analisado.

Com o uso do modelo proposto, que tem como base os algoritmos inteligentes, foi possível encontrar os conjuntos de medidas de despoluição capazes de maximizar a remoção de poluentes. Os estudos foram conduzidos para uma série de valores de investimento e propiciaram a obtenção de resultados significativos sobre o manancial investigado, observando-se:

- a) a quantidade de uso de cada medida em cada tramo, em função de sua unidade característica;
- b) os benefícios gerados em termos do potencial de remoção de cargas pontuais e difusas;
- c) os respectivos custos, em reais, acarretados com a aplicação das medidas;
- d) o valor total do capital efetivamente utilizado no processo.

A seguir encontram-se discriminados os resultados otimizados para cada um dos valores investidos, R\$ 2, 4, 7, 11 e 16 milhões (tabelas 5 a 9). O problema foi formulado a partir do modelo proposto e resolvido pelo programa ADV\_DIF acoplado ao *software* Evolver 4.0.8. As planilhas apresentadas, que foram construídas e tiveram seus valores calculados com auxílio do *software* Microsoft Excel, representam os valores ótimos em termos da quantidade e da localização das medidas de despoluição utilizadas.

TABELA 5 - RESULTADOS COM O INVESTIMENTO DE R\$ 2 MILHÕES

Medidas de Despoluição Hídrica	Eficiência (%)	Importância do Uso (%)							Uso de cada Medida (uc)							Custo (R\$) (1)	Benefício (kg/dia)		Unidade Característica (uc)	
		Tramos							Tramos								Total	Pontual		Difusa
		1	2 e 3	4	5	6	7	1	2 e 3	4	5	6	7							
M 1	85	100	100	100	100	100	100	0	0	0	0	0	0	0,00	0,00	-	hab			
M 2	60	100	100	100	100	100	100	0	0	0	0	0	0	0,00	0,00	-	hab			
M 3	95	100	100	100	100	100	100	0	0	0	0	0	0	0,00	0,00	-	hab			
M 4	87	100	100	100	100	100	100	99	1217	71	5269	207	8655	1.477.351,88	729,04	-	hab			
M 5	20	0	0	0	25	60	60	0	0	0	1	5	12	10.200,00	-	0,24	ha			
M 6	20	0	20	0	0	0	0	6	0	0	0	0	0	5.399,62	-	0,05	ha			
M 7	50	0	0	0	25	60	60	0	0	0	33	7	17	20.231,86	-	1,30	ha			
M 8	50	0	20	0	0	0	0	9	0	0	0	0	0	10.203,06	-	0,17	ha			
M 9	80	100	100	100	100	100	100	0	2	0	0	0	0	476.600,00	3,17	3,17	ha			
M 10	80	100	100	100	100	100	100	0	0	0	0	0	0	0,00	0,00	0,00	ha			
M 11	80	100	100	100	100	100	100	0	0	0	0	0	0	0,00	0,00	0,00	ha			
M 12	80	100	100	100	100	100	100	0	0	0	0	0	0	0,00	0,00	0,00	ha			
TOTALS												1.999.986,42	732,21	4,93						
													737,14							

FONTE: O autor

NOTA: (1) Valores em Reais referidos a novembro de 2003.

TABELA 6 - RESULTADOS COM O INVESTIMENTO DE R\$ 4 MILHÕES

Medidas de Despoluição Hídrica	Eficiência (%)	Importância do Uso (%)							Uso de cada Medida (uc)							Custo (R\$) (1)	Benefício (kg/dia)		Unidade Característica (uc)	
		Tramos							Tramos								Total	Pontual		Difusa
		1	2 e 3	4	5	6	7	1	2 e 3	4	5	6	7							
M1	Implantação, manutenção e operação de estações de tratamento de esgoto	95	100	100	100	100	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00	0,00	-	hab	
M2		60	100	100	100	100	100	0	0	0	0	0	0	0	0,00	0,00	-	hab		
M3		95	100	100	100	100	100	0	0	0	0	0	0	0	0,00	0,00	-	hab		
M4		87	100	100	100	100	100	85	1334	3088	3449	2535	29233	3.781.822,79	1866,23	-	-	hab		
M5	Melhoria e ampliação dos serviços de varrição de áreas urbanas	20	0	0	25	60	60	0	0	0	24	25	53	57.800,00	-	-	1,22	ha		
M6		20	0	20	0	0	0	0	10	0	0	0	0	8.999,37	-	-	0,08	ha		
M7		50	0	0	25	60	60	0	0	24	237	67	117.323,13	-	-	10,85	ha			
M8		50	0	20	0	0	0	30	0	0	0	0	0	34.010,20	-	-	0,57	ha		
M9	Criação de parques e áreas verdes ao longo de rios	80	100	100	100	100	100	0	0	0	0	0	0	0,00	0,00	0,00	0,00	ha		
M10		80	100	100	100	100	100	0	0	0	0	0	0	0,00	0,00	0,00	0,00	ha		
M11		80	100	100	100	100	100	0	0	0	0	0	0	0,00	0,00	0,00	0,00	ha		
M12		80	100	100	100	100	100	0	0	0	0	0	0	0,00	0,00	0,00	0,00	ha		
TOTALS												3.999.955,48	1866,23	12,71						
													1878,94							

FONTE: O autor

NOTA: (1) Valores em Reais referidos a novembro de 2003.

TABELA 7 - RESULTADOS COM O INVESTIMENTO DE R\$ 7 MILHÕES

Medidas de Despoluição Hídrica	Eficiência (%)	Importância do Uso (%)							Uso de cada Medida (uc)							Custo (R\$) (1)	Benefício (kg/dia)		Unidade Característica (uc)	
		Tramos							Tramos								Total	Pontual		Difusa
		1	2 e 3	4	5	6	7	1	2 e 3	4	5	6	7							
M 1	85	100	100	100	100	100	100	0	0	0	0	0	0	0,00	0,00	-	hab			
M 2	60	100	100	100	100	100	100	0	0	0	0	0	0	0,00	0,00	-	hab			
M 3	95	100	100	100	100	100	100	0	0	0	0	0	0	0,00	0,00	-	hab			
M 4	87	100	100	100	100	100	100	104	1089	3088	19296	8557	35367	6.426.261,70	3171,20	-	hab			
M 5	20	0	0	0	25	60	60	0	0	0	17	24	39	45.333,33	-	0,97	ha			
M 6	20	0	20	0	0	0	0	0	4	0	0	0	0	3.599,75	-	0,03	ha			
M 7	50	0	0	0	25	60	60	0	0	0	7	75	46	45.857,98	-	4,28	ha			
M 8	50	0	20	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	2.267,35	-	0,04	ha			
M 9	80	100	100	100	100	100	100	0	0	0	0	0	2	476.600,00	3,17	3,17	ha			
M 10	80	100	100	100	100	100	100	0	0	0	0	0	0	0,00	0,00	0,00	ha			
M 11	80	100	100	100	100	100	100	0	0	0	0	0	0	0,00	0,00	0,00	ha			
M 12	80	100	100	100	100	100	100	0	0	0	0	0	0	0,00	0,00	0,00	ha			
TOTALS												6.999.920,11	3174,37	8,49						
													3182,86							

FONTE: O autor

NOTA: (1) Valores em Reais referidos a novembro de 2003.

TABELA 8 - RESULTADOS COM O INVESTIMENTO DE R\$ 11 MILHÕES

Medidas de Despoluição Hídrica	Eficiência (%)	Importância do Uso (%)							Uso de cada Medida (uc)							Custo (R\$) (1)	Benefício (kg/dia)		Unidade Característica (uc)	
		Tramos							Tramos								Total	Pontual		Difusa
		1	2 e 3	4	5	6	7	1	2 e 3	4	5	6	7							
M1	85	100	100	100	100	100	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00	-	hab		
M2	60	100	100	100	100	100	100	0	0	0	0	0	0	0	0,00	-	hab			
M3	95	100	100	100	100	100	100	0	0	0	0	0	0	0	0,00	-	hab			
M4	87	100	100	100	100	100	100	103	1334	3088	24583	30871	42087	9.716.934,96	4795,06	-	ha			
M5	20	0	0	0	25	60	60	0	0	0	58	127	33	123.533,33	-	2,55	ha			
M6	20	0	20	0	0	0	0	0	14	0	0	0	0	12.599,11	-	0,11	ha			
M7	50	0	0	0	25	60	60	0	0	0	44	184	250	171.052,68	-	15,63	ha			
M8	50	0	20	0	0	0	0	0	20	0	0	0	0	22.673,47	-	0,38	ha			
M9	80	100	100	100	100	100	100	0	0	0	1	1	2	953.200,00	6,35	6,35	ha			
M10	80	100	100	100	100	100	100	0	0	0	0	0	0	0,00	0,00	0,00	ha			
M11	80	100	100	100	100	100	100	0	0	0	0	0	0	0,00	0,00	0,00	ha			
M12	80	100	100	100	100	100	100	0	0	0	0	0	0	0,00	0,00	0,00	ha			
TOTAIS													10.999.993,56	4801,41	25,01					
														4826,41						

FONTE: O autor

NOTA: (1) Valores em Reais referidos a novembro de 2003.

TABELA 9 - RESULTADOS COM O INVESTIMENTO DE R\$ 16 MILHÕES

Medidas de Despoluição Hídrica	Eficiência (%)	Importância do Uso (%)							Uso de cada Medida (uc)							Custo (R\$) (1)	Benefício (kg/dia)		Unidade Característica (uc)	
		Tramos							Tramos								Total	Pontual		Difusa
		1	2 e 3	4	5	6	7	1	2 e 3	4	5	6	7							
M1	85	100	100	100	100	100	100	0	0	0	0	0	0	0	0,00	0,00	-	hab		
M2	60	100	100	100	100	100	100	0	0	0	0	0	0	0,00	0,00	-	hab			
M3	95	100	100	100	100	100	100	0	0	0	0	0	0	0,00	0,00	-	hab			
M4	87	100	100	100	100	100	100	70	1300	3088	24583	64029	42155	12.873.753,56	6352,87	-	ha			
M5	20	0	0	0	25	60	60	0	0	0	78	422	61	317.009,84	-	7,13	ha			
M6	20	0	20	0	0	0	0	0	24	0	0	0	0	21.598,48	-	0,18	ha			
M7	50	0	0	0	25	60	60	0	0	0	1753	1656	2326	2.041.985,31	-	162,84	ha			
M8	50	0	20	0	0	0	0	0	27	0	0	0	0	30.609,18	-	0,51	ha			
M9	80	100	100	100	100	100	100	1	1	0	1	0	0	714.900,00	4,76	4,76	ha			
M10	80	100	100	100	100	100	100	0	0	0	0	0	0	0,00	0,00	0,00	ha			
M11	80	100	100	100	100	100	100	0	0	0	0	0	0	0,00	0,00	0,00	ha			
M12	80	100	100	100	100	100	100	0	0	0	0	0	0	0,00	0,00	0,00	ha			
TOTAIS												15.999.856,36	6357,63	175,42						
													6533,05							

FONTE: O autor

NOTA: (1) Valores em Reais referidos a novembro de 2003.

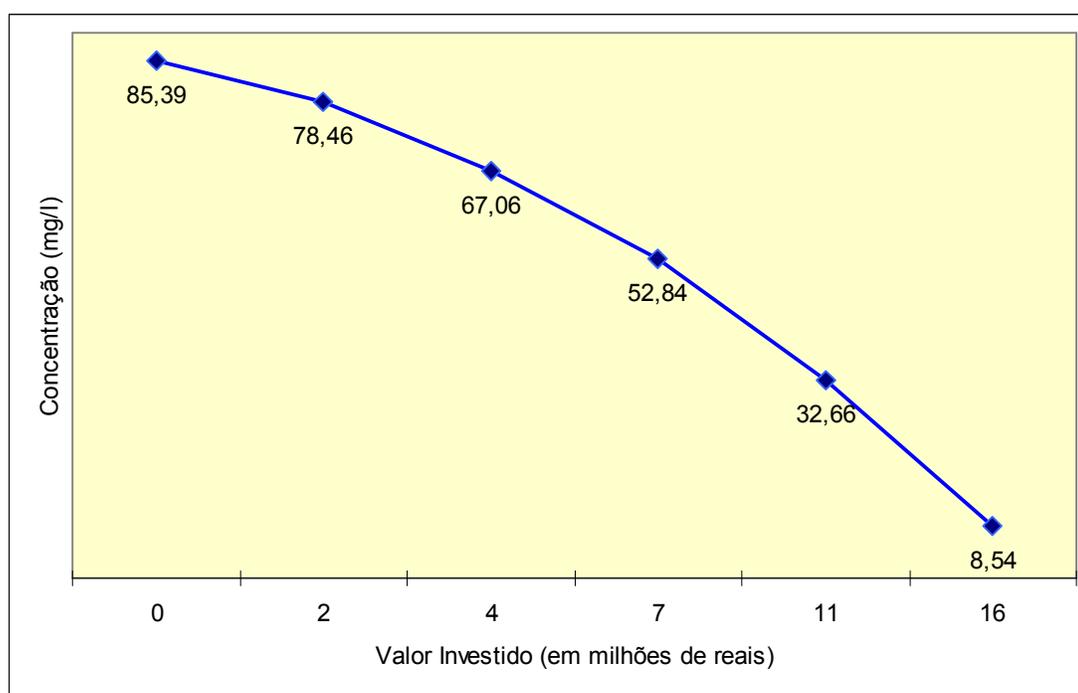
A seguir (tabela 10 e gráfico 1) são apresentados, em termos da concentração de poluentes, os resultados obtidos para todos os valores de investimento aplicados. Estes valores foram calculados para o ponto escolhido como o mais significativo da bacia, localizado no último elemento computacional do sétimo tramo, ou seja, no ponto mais a jusante do Rio Palmital.

TABELA 10 – RESULTADOS FINAIS DE CONCENTRAÇÃO

Valor Investido (em milhões de reais)	0	2	4	7	11	16
Concentração (mg/l)	85,39	78,46	67,06	52,84	32,66	8,54

FONTE: O autor

GRÁFICO 1 – CONCENTRAÇÕES E VALORES INVESTIDOS



FONTE: O autor

Observa-se claramente a significativa diminuição na concentração de poluentes decorrente do aumento do capital investido.

## 6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Este trabalho teve como objetivo desenvolver um ferramental de auxílio à decisão quanto aos investimentos necessários em medidas de despoluição hídrica, mediante o uso de Análise Matemática com base nos Algoritmos Genéticos. Para isso fez-se necessário identificar e analisar os parâmetros de qualidade da água, determinar os custos envolvidos na aplicação das medidas de despoluição, identificar e analisar os métodos de programação matemática aplicáveis ao estudo em questão, identificar as fontes de poluição do objeto de estudo e identificar, analisar e executar um modelo de simulação, de modo a obter resultados para análise.

Pelo que foi apresentado neste texto conclui-se que os propósitos e objetivos foram totalmente atingidos. A seguir apresentam-se as principais conclusões e recomendações para a realização de estudos futuros.

O método proposto pode auxiliar os responsáveis pelos processos de despoluição apontando um caminho na aplicação de medidas de despoluição hídrica e mostrando quais são mais eficientes quanto à remoção da carga de poluentes, porém, devido a fatores externos, não considerados por questões de simplificação, deve-se avaliar a viabilidade técnica de aplicação das MDH nos pontos de aplicação.

Fez-se necessário o desenvolvimento do programa ADV\_DIF para determinação das concentrações ao longo do Rio Palmital, pois o uso de programas mais complexos demandaria um tempo muito maior para possibilitar o seu acoplamento ao *software* Evolver 4.0.8, utilizado na otimização através de um algoritmo genético. O programa ADV\_DIF trabalhou acoplado ao Evolver utilizando os valores otimizados como dados de entrada e retornando os valores da concentração ao longo do rio.

Com os resultados obtidos no estudo de caso foi possível demonstrar toda a potencialidade do método proposto, sendo suficiente para cumprir o objetivo de

indicar a melhor seqüência de medidas a serem aplicadas para a resolução do problema proposto.

Como sugestões para trabalhos futuros, pode-se destacar o levantamento dos valores de custo da aplicação de medidas de despoluição hídrica levando em conta o local de sua aplicação, de maneira a fornecer valores mais apurados para os custos. Além disso, sugere-se que sejam levantados os dados do benefício gerado para todas as MDH utilizadas, conferindo, assim, resultados mais próximos à realidade.

Na avaliação dos resultados, em termos da redução na concentração de poluentes, sugere-se a utilização de modelos de qualidade da água mais complexos como, por exemplo, o QUAL2K da *Environmental Protection Agency* – EPA, dos Estados Unidos. O QUAL2K é uma nova versão do largamente utilizado QUAL2E, que apresenta como implemento a facilidade de ser compatível com todas as versões do programa operacional Windows da Microsoft. A utilização de modelos mais complexos requer, por sua vez, uma investigação da melhor forma de acoplá-los ao *software* de otimização utilizado.

**REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

- 1) AMOUZEGAR, Mahyar A.; MOSHIRVAZIRI, Khosrow. **Strategic Management Decision Support System: An Analysis of the Environmental Policy Issues.** Environmental Modeling and Assessment 6: 297-306. Holanda: Kluwer Academic Publishers, 2001.
- 2) ANDRADE, Eduardo Leopoldino. **Introdução À Pesquisa Operacional: Métodos e Modelos Para Análise de Decisão.** LTC, Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 1998.
- 3) ANDREOLI, Cleverson V.; DALARMI, Osvaldo; LARA, Aderlene I.; RODRIGUES, Eloize M.; ANDREOLI, Fabiana de Nadai. **Os Mananciais de Abastecimento do Sistema Integrado da Região Metropolitana de Curitiba – RMC.** SANARE – Revista Técnica da Sanepar, vol.12, nº12, 1999. Disponível em: <<http://www.sanepar.com.br/sanepar/sanare/V12/Mananciais/mananciais.html>> Acesso em: 07 maio 2004.
- 4) ARBABI, Mansur; ELZINGA, Jack. **A General Linear Approach to Stream Water Quality Modeling.** Water Resources Research, Estados Unidos da América, vol.11, nº2, 1975.
- 5) BALINTFY, Joseph L. **Stochastic Sensitivity Analysis of Linear Programs by Simulation Techniques,** New York, IEEE Press, 1970. Disponível em: <<http://portal.acm.org/citation.cfm?id=800240.807195&dl=GUIDE&dl=ACM&type=series&idx=SERIES459&part=Proceedings&WantType=Proceedings&title=Annual%20Simulation%20Symposium>> Acesso em: 18 abr. 2004.
- 6) BENTLEY, Peter J. **Biologia Digital.** São Paulo: Editora Berkeley, 2002.

- 7) BRANCO, S. Murgel et al., PORTO, Rubem La Laina (org.). **Hidrologia Ambiental**. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, vol.3, 1991.
- 8) BRASIL, PARANÁ. Portaria SUREHMA n° 20, de 12 de maio de 1992. **Enquadrar os cursos d'água da Bacia do Alto Iguaçu de domínio do Estado do Paraná**. Coletânea de Legislação Ambiental, 1995.
- 9) CASAROTTO Filho, Nelson; KOPITCKE, Bruno Hartmut. **Análise de Investimentos**. São Paulo: Vértice, Editora Revista dos Tribunais Ltda., 1987.
- 10) CARDWELL, Hal; ELLIS, Hugh. **Stochastic Dynamic Programming Models for Water Quality Management**. Water Resources Research, Estados Unidos da América, vol.29, n°4, 1993.
- 11) CHAPRA, Steven C. **Surface Water-Quality Modeling**. Estados Unidos da América, McGraw-Hill Companies, Inc., 1997.
- 12) DANTZIG, George B. et al. **The Mathematical Programming Language (MPL)**. New York, ACM (Association for Computing Machinery) Press, 1971. Disponível em: <<http://portal.acm.org/citation.cfm?id=810495&coll=GUIDE&dl=ACM&CFID=24573825&CFTOKEN=96803076>> Acesso em: 25 abr. 2004.
- 13) DAS, Amlan; DATTA, Bithin. **Application of Optimisation Techniques in Groundwater Quantity and Quality Management**. India: Sadhana, vol.26, part.4, 2001.
- 14) DAVIES, Kevin. **Decifrando o Genoma: A Corrida para Desvendar o DNA Humano**. São Paulo: Companhia das Letras, 2001.
- 15) DNOS – Departamento Nacional de Obras e Saneamento. **Canal Palmital**. Datilografado, dez. 1957.

- 16) DUNNE, Thomas; LEOPOLD, L. B. **Water in Environmental Planning**. San Francisco: W. H. Freeman and Company, 1978.
- 17) ELLIS, J. Hugh. **Stochastic Water Quality Optimization Using Imbedded Chance Constraints**. Water Resources Research, Estados Unidos da América, vol.23, nº12, 1987.
- 18) FERNANDES, Cristovão V. S. (Coordenador). **Análise da Sustentabilidade Econômica e Ambiental de Metas de Despoluição Hídrica** – Estudo de Caso: Alto Iguaçu. Projeto Iguaçu. UFPR – FINEP – SUDERHSA – DHS, 2005. Projeto concluído.
- 19) FORREST, Stephanie; MITCHELL, Melanie. **What Makes a Problem Hard for a Genetic Algorithm?** Some Anomalous Results and Their Explanation. Machine Learning, vol.13, 1993. Disponível em: <<http://www.cs.pdx.edu/~mm/Forrest-Mitchell-ML.pdf>> Acesso em: 16 out. 2004.
- 20) HALL, Warren A.; DRACUP, John A. **Ingenieria de Sistemas en los Recursos Hidráulicos**. Compañia Editorial Continental S.A., 1974.
- 21) HENDERSON, F. M. **Open Channel Flow**. New Jersey: Prentice Hall, 1966.
- 22) HILLIER, F.; LIEBERMAN, Gerald J. **Introduction to Mathematical Programming**. 2ª ed. Singapore: McGraw-Hill, 1995.
- 23) HOLLAND, John H. **Adaptation in Natural and Artificial Systems: An Introductory Analysis with Applications to Biology, Control, and Artificial Intelligence**. Ann Arbor, MI: University of Michigan Press, 1975.
- 24) KAUFFMAN, Stuart. **At Home in the Universe: The Search for the Laws of Self-Organization and Complexity**. New York: Oxford University Press, 1995.

- 25) KAVISKI, Eloy; KREMER, Gilberto M. **Transport of Mass and Energy of Polyatomic Gases in Magnetic Fields Computed by a Monte Carlo Algorithm**. Continuum Mechanics and Thermodynamics. Springer-Verlag Heidelberg, vol.16, n°4, 2004.
- 26) KAVISKI, Eloy; KRÜGER, Cláudio M. Projeto HG-77, **Regionalização de Vazões em Pequenas Bacias Hidrográficas do Estado do Paraná**: Relatório Final. CEHPAR – Centro de Hidráulica e Hidrologia Professor Parigot de Souza, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1995.
- 27) KRÜGER, Cláudio M. Projeto HG-78, **Estudos de Simulação do escoamento do Rio Palmital na Região Metropolitana de Curitiba**: Relatório Final. CEHPAR – Centro de Hidráulica e Hidrologia Professor Parigot de Souza, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1997.
- 28) LIEBMAN, Jon C.; LYNN, Walter R. **The Optimal Allocation of Stream Dissolved Oxygen**. Water Resources Research, Estados Unidos da América, vol.2, n°3, 1966.
- 29) LOUCKS, Daniel P.; STENDIGER, Jerry R.; HAITH, Douglas A. **Water Resource Systems Planning and Analysis**. Estados Unidos da América: Prentice-Hall, Inc., 1981.
- 30) MARIN, M. C. F. C. **Análise de Benefício Econômico em Despoluição Hídrica como Instrumento de Suporte à Tomada de Decisões em Gestão de Recursos Hídricos**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Hidráulica – Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2001.
- 31) MURTY, Katta G. **Linear and Combinatorial Programming**. Florida: Robert E. Krieger Publishing Company, 1985.
- 32) PALISADE Co. **Guide to EVOLVER – The Genetic Algorithm Solver for Microsoft Excel**. Windows Version Release 4.0. New York, 2004.

- 33)PIDD, Michael. **Modelagem Empresarial: Ferramentas para Tomada de Decisão**. Porto Alegre: Artes Médicas, 1998.
- 34)PORTER, A. L. et al. **A Guide Book for Technology Assessment an Impact Analysis**. New York/Oxford: Elsevier, 1980.
- 35)RAMOS, F.; MARIN, M. C. F. C. **Metodologia de Avaliação de Benefícios de Medidas de Despoluição Hídrica**. 30p. Relatório técnico. Curitiba, 2000.
- 36)REVELLE, Charles S.; LOUCKS, Daniel P.; LYNN, Walter R. **Linear Programming Aplied to Water Quality Management**. Water Resources Research, Estados Unidos da América, vol.4, nº1, 1968.
- 37)SANT'ANA, Ruy Fernando. **Aproveitamentos Hidrelétricos de Pequeno Porte: Avaliação de Custos e Benefícios, Modelo "Flash"**. Brasília: DNAEE, 1987.
- 38)SIMONOVIC, Slobodan P. **Tools for Water Management: One View of the Future**. IWRA - Water International, vol.25, nº1, 2000. Disponível em: <<http://www.iwra.siu.edu/win/win2000/win03-00/slobodan.pdf>> Acesso em: 13 out. 2004.
- 39)SOBEL, Matthew J. **Water Quality Improvement Programming Problems**. Water Resources Research. Estados Unidos da América, vol.1, nº4, 1965.
- 40)STREETER, H. W.; PHELPS, E. B. **A Study of the Pollution and Natural Purification of the Ohio River**. Public Health Bulletin, vol.3, nº146, United States Public Health Service, 1925.
- 41)SUDERHSA – Superintendência de Desenvolvimento de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental. **Plano de Despoluição Hídrica da Bacia do Alto Iguaçu**. Curitiba, 2000.

- 42)TCHOBANOGLIOUS, G.; SCHROEDER, E. D. **Water Quality**. Reading, Massachusetts, Addison-Wesley Publishing Company, 1987.
- 43)WHITLEY, Darrell. **A Genetic Algorithm Tutorial**. Statistics and Computing, (4):65-85, 1994. Disponível em: <<http://www.cs.colostate.edu/~genitor/MiscPubs/tutorial.pdf>> Acesso em: 15 out. 2004.
- 44)WHITLEY, Darrell. **Genetic Algorithms and Evolutionary Computing**. Van Nostrand's Scientific Encyclopedia, 2002. Disponível em: <<http://www.cs.colostate.edu/~genitor/2002/encyclo.pdf>> Acesso em: 19 out. 2004.
- 45)WHITLEY, Darrell. **Genetic Algorithms and Neural Networks**: Genetic Algorithms in Engineering and Computer Science. Winter, Periaux, Galan and Cuesta, eds. pp: 203-216, John Wiley, 1995. Disponível em: <<http://www.cs.colostate.edu/~genitor/MiscPubs/gann.pdf>> Acesso em: 11 out. 2004.

## APÊNDICE 1 – SOFTWARE EVOLVER 4.0.8

### 1.1 INTRODUÇÃO

No estudo de caso, resolvendo-se o método proposto, a busca da solução ótima foi viabilizada com o uso do *software* Evolver Versão 4.0.8, de outubro de 2004, da Palisade Corporation (PALISADE, 2004). Este *software* trabalha como um módulo de otimização acoplado ao Microsoft Excel. Através da aplicação de poderosas técnicas de otimização, que tem por base o algoritmo genético, esse *software* permite encontrar a melhor solução para problemas que não podem ser resolvidos com o uso de mecanismos padrão de otimização linear e não-linear, fornecendo uma maneira de encontrar soluções ótimas para virtualmente qualquer tipo de problema.

### 1.2 HISTÓRICO

Em 1989, o primeiro produto comercial a usar os algoritmos genéticos, o Evolver v1.0, foi apresentado ao mercado. Cinco anos mais tarde e após cinco atualizações, contando com uma arquitetura modular e interface com o Microsoft Excel, o Evolver estava sendo usado em todos os campos de aplicação.

### 1.3 ATUAÇÃO

O funcionamento do Evolver está ligado ao Microsoft Excel, sendo inicialmente necessário fazer a modelagem do problema no Excel para posteriormente resolvê-lo com o Evolver. O Excel fornece as fórmulas, funções, gráficos e capacidade para macros necessários pela maioria dos usuários na criação de modelos realísticos de seus problemas, e o Evolver, por sua vez, fornece uma interface para descrever o que se busca e a maneira de encontrá-la. Juntos podem encontrar soluções ótimas para praticamente qualquer problema que possa ser modelado.

## 1.4 FUNCIONAMENTO

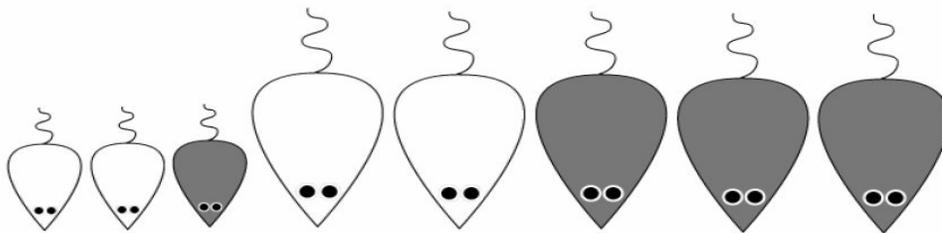
O Evolver usa um conjunto próprio de algoritmos genéticos na busca de soluções ótimas. Os algoritmos genéticos imitam os princípios Darwinianos de seleção natural ao criarem um ambiente onde centenas de soluções possíveis podem competir entre si sendo que a “melhor” solução para um problema sobrevive. Exatamente como uma evolução biológica, cada solução pode transmitir seus genes bons através do processo permitindo que toda a população de soluções continue a desenvolver melhores resultados até que a solução ótima seja encontrada ou que o processo seja interrompido por algum critério de parada como, por exemplo, tempo ou número de tentativas.

## 1.5 EXEMPLO

Um exemplo de evolução no mundo biológico, em pequena escala, extraído do manual de utilização do Evolver é descrito a seguir. Devido à sua fácil compreensão, foi aqui reproduzido para melhor ilustrar o funcionamento dos algoritmos genéticos. Entenda-se como “evolução” qualquer mudança na distribuição de freqüências de genes em uma população, que tenda a conduzir a populações que se adaptem constantemente aos seus ambientes.

Seja uma população de ratos que se apresenta em dois tamanhos, pequeno e grande, e, em duas cores, clara e escura. Essa população é composta pelos oito ratos, ilustrados a seguir (fig. 4):

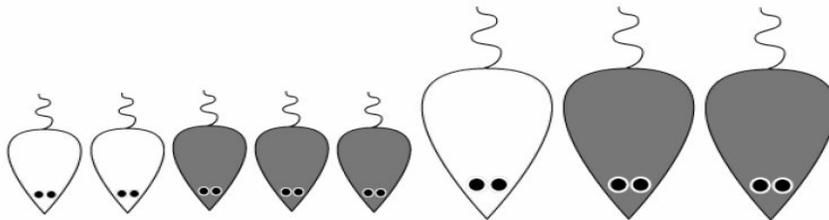
FIGURA 4 – POPULAÇÃO INICIAL DE RATOS



FONTE: PALISADE

Um dia gatos se mudaram para a região e começaram a comer os ratos. Verificou-se que ratos pretos e pequenos eram mais difíceis de serem encontrados pelos gatos. Além disso, ratos diferentes têm formas distintas de evitar os gatos por um tempo suficiente até conseguirem se reproduzir. Isto afeta a nova geração de ratos. Assumindo que ratos velhos morram logo após se reproduzirem, a nova geração é ilustrada a seguir (fig. 5):

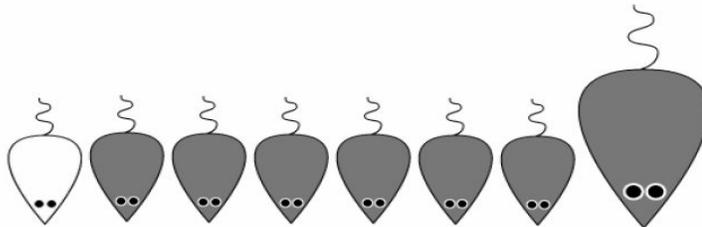
FIGURA 5 – NOVA POPULAÇÃO DE RATOS



FONTE: PALISADE

Sem esquecer que ratos grandes, claros, e, especialmente, grandes e claros, tem tido dificuldade de sobreviver tempo suficiente para se reproduzir, e isto se repete na próxima geração (fig. 6).

FIGURA 6 – POPULAÇÃO FINAL DE RATOS



FONTE: PALISADE

Agora a população consiste na maioria de ratos pequenos e escuros, pois estes ratos se mostraram mais adaptados a sobreviver no ambiente em questão que os outros tipos de ratos. Igualmente, os gatos passaram a sentir mais fome com a diminuição de ratos para comer e tiveram que buscar mecanismos de adaptação para que pudessem sobreviver e perpetuar a sua espécie.

## APÊNDICE 2 – EXEMPLO DE APLICAÇÃO DO EVOLVER 4.0.8

O problema a seguir será resolvido com o uso do *software* de otimização Evolver, utilizado no estudo de caso. Trata-se de um problema simples e de fácil resolução e seu objetivo é demonstrar o funcionamento do Evolver 4.0.8.

Seja uma bacia hidrográfica cujas águas se encontram em condições inferiores ao desejável. Dispõe-se de duas medidas de despoluição, denominadas  $m_1$  e  $m_2$ , que podem ser aplicadas em três pontos,  $X_1$ ,  $X_2$  e  $X_3$ , estrategicamente escolhidos ao longo da bacia. Serão formados três conjuntos de medidas,  $M_1$ ,  $M_2$  e  $M_3$ , a partir das medidas disponíveis, aplicados nos pontos  $X_1$ ,  $X_2$  e  $X_3$ , respectivamente. Deseja-se encontrar o conjunto de medidas capaz de fornecer o maior benefício em termos de redução na concentração de poluentes, fazendo-se uso dos recursos disponíveis para o projeto, levando-se em consideração a importância de uso de cada medida em cada ponto.

Dados:

Capital Disponível: R\$ 200.000,00;

Custo da medida  $m_1$ :  $c_1 = \text{R\$ } 1.000,00/\text{uc}$ ;

Benefício da medida  $m_1$ :  $b_1 = 30 \text{ kg}/(\text{dia}\cdot\text{uc})$ ;

Importância do uso da medida  $m_1$  no ponto  $X_1$ :  $\alpha_{11} = 70\%$ ;

Importância do uso da medida  $m_1$  no ponto  $X_2$ :  $\alpha_{12} = 40\%$ ;

Importância do uso da medida  $m_1$  no ponto  $X_3$ :  $\alpha_{13} = 50\%$ ;

Uso máximo da medida  $m_1$ : 120 uc;

Custo da medida  $m_2$ :  $c_2 = \text{R\$ } 1.300,00/\text{uc}$ ;

Benefício da medida  $m_2$ :  $b_2 = 40 \text{ kg}/(\text{dia}\cdot\text{uc})$ ;

Importância do uso da medida  $m_2$  no ponto  $X_1$ :  $\alpha_{21} = 30\%$ ;

Importância do uso da medida  $m_2$  no ponto  $X_2$ :  $\alpha_{22} = 75\%$ ;

Importância do uso da medida  $m_2$  no ponto  $X_3$ :  $\alpha_{23} = 55\%$ ;

Uso máximo da medida  $m_2$ : 120 uc.

Onde:

uc = unidade característica.

Resolução:

Primeiramente será encontrado o potencial de benefício de cada medida em cada ponto efetuando-se o produto entre o benefício e a importância do uso em cada ponto. Os resultados se encontram a seguir (tabela 11):

TABELA 11 – POTENCIAL DE BENEFÍCIO DAS MEDIDAS

Ponto de Aplicação	Potencial de Benefício (kg/dia/uc)	
	Medida $m_1$	Medida $m_2$
Ponto $X_1$	21	12
Ponto $X_2$	12	30
Ponto $X_3$	15	22

FONTE: O autor

Verifica-se assim, que, para a obtenção do maior benefício com o menor custo, deve-se priorizar a aplicação da medida  $m_1$  no ponto  $X_1$  e da medida  $m_2$  no ponto  $X_2$ .

A solução ótima é encontrada para o uso de 44 uc da medida  $m_1$  no ponto  $X_1$ , gerando um benefício, em termos do potencial de remoção de DBO, de 924 kg/dia a um custo de R\$ 44.000,00, e 120 uc da medida  $m_2$  no ponto  $X_2$ , gerando um benefício, em termos do potencial de remoção de DBO, de 3.600 kg/dia a um custo de R\$ 156.000,00, o que produz um benefício total de 4.524 kg/dia, fazendo uso total do capital disponível.

Os mesmos resultados foram encontrados como uso do *software* Evolver e podem ser observados na planilha a seguir (tabela 12) gerada pelo mesmo *software*.

TABELA 12 – RESULTADOS OBTIDOS COM USO DO SOFTWARE EVOLVER

Medidas de Despoluição	Importância do Uso (%)			Uso das Medidas (uc)			Benefício (kg/dia)	Custo (R\$)
	Pontos			Pontos				
	X1	X2	X3	X1	X2	X3		
<i>m1</i>	70	40	50	44	0	0	924,00	44.000,00
<i>m2</i>	30	75	55	0	120	0	3600,00	156.000,00
TOTALS							4524,00	200.000,00

CAPITAL TOTAL	R\$ 200.000,00
---------------	----------------

FONTE: O autor

### APÊNDICE 3 – FORMULAÇÃO MATEMÁTICA DO PROGRAMA ADV\_DIF

O programa ADV\_DIF tem por objetivo determinar a distribuição de concentração de substância, em canais com seção transversal trapezoidal e declividade constante, em regime estacionário. Um canal natural pode ser avaliado pelo programa considerando-se que é constituído por trechos com diferentes inclinações e seções transversais.

A equação de transporte unidimensional para energia térmica, DBO, OD ou outros constituintes, pode ser expressa em forma diferencial como (CHAPRA, 1997).

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \frac{\partial \left( A \cdot E \frac{\partial c}{\partial x} \right)}{A \partial x} - \frac{\partial (A \cdot U)}{A \partial x} + r \cdot c + s, \quad (\text{A.3.1})$$

onde:

$c$  = concentração de constituinte transportado  $\left( \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right)$ ;

$A$  = área da seção transversal  $(\text{m}^2)$ ;

$E$  = coeficiente de dispersão longitudinal  $\left( \frac{\text{m}^2}{\text{s}} \right)$ ;

$U$  = velocidade de escoamento médio na seção transversal  $\left( \frac{\text{m}}{\text{s}} \right)$ ;

$x$  = distância  $(\text{m})$ ;

$t$  = tempo  $(\text{s})$ ;

$r$  = taxa de decaimento exponencial;

$s$  = taxa de constituintes externos.

Para solucionar a equação A.3.1 em regime estacionário, foi implementado no programa ADV\_DIF um método de diferenças finitas explícito, que deve ser processado até que seja atingido o regime estacionário. Nesta implementação

considera-se a aproximação para determinar o coeficiente de dispersão longitudinal dado por (CHAPRA, 1997):

$$E = 0,011 \cdot \frac{U^2 \cdot B^2}{H \cdot (g \cdot H \cdot m)^{1/2}}, \quad (\text{A.3.2})$$

onde:

$E$  = coeficiente de dispersão longitudinal  $\left(\frac{m^2}{s}\right)$ ;

$U$  = velocidade de escoamento  $\left(\frac{m}{s}\right)$ ;

$B$  = largura da seção ( $m$ );

$H$  = profundidade média ( $m$ );

$g$  = aceleração da gravidade  $\left(\frac{m}{s^2}\right)$ ;

$m$  = declividade do talude (adimensional).

A distribuição de velocidades em regime não-permanente é modelada pelo seguinte sistema de equações (HENDERSON, 1966):

$$\begin{aligned} \frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + g \frac{\partial y}{\partial x} + U \cdot q &= S_o - S_f, \\ \frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} &= q, \end{aligned} \quad (\text{A.3.3})$$

Onde:

$U$  = velocidade de escoamento  $\left(\frac{m}{s}\right)$ ;

$g$  = aceleração da gravidade  $\left(\frac{m}{s^2}\right)$ ;

$y$  = profundidade ( $m$ );

$q$  = escoamento superficial e vazão de lançamento de cargas poluidoras  $\left(\frac{m^3}{s}\right)$ ;

$S_o$  = declividade do fundo do canal (adimensional);

$S_f$  = declividade da linha de energia (adimensional);

$Q$  = vazão  $\left(\frac{m^3}{s}\right)$ ;

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

A declividade da linha de energia pode ser aproximada pela Lei de *Manning*:

$$S_f = \frac{Q^2 \cdot \eta^2}{A^2 \cdot R^{4/3}}, \quad (\text{A.3.4})$$

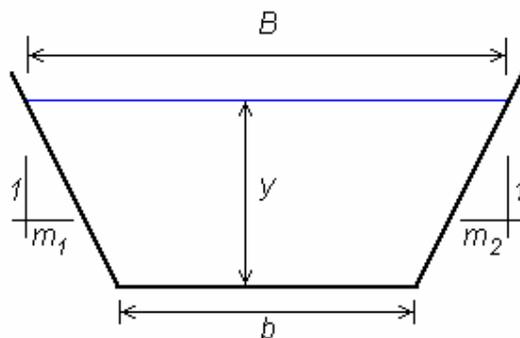
onde:

$\eta$  = coeficiente de *Manning* (adimensional);

$R$  = raio do canal hidráulico ( $m$ ).

Para seções trapezoidais os elementos usados na fórmula de *Manning* são apresentados na figura 7.

FIGURA 7 – SEÇÃO TRANSVERSAL TRAPEZOIDAL



FONTE: O autor

$$\begin{aligned} A &= b \cdot y + (m_1 + m_2) \cdot \frac{y^2}{2}, \\ P &= b + y \cdot (\sqrt{1 + m_1^2} + \sqrt{1 + m_2^2}), \\ B &= b + y \cdot (m_1 + m_2), \end{aligned} \tag{A.3.5}$$

onde:

$A$  = área da seção ( $m^2$ );

$b$  = largura da base inferior da seção trapezoidal ( $m$ );

$m_1$  = declividade do talude esquerdo (adimensional);

$m_2$  = declividade do talude direito (adimensional);

$P$  = perímetro da seção molhada ( $m$ );

$B$  = largura da base superior da seção trapezoidal ( $m$ ).

O sistema de equações A.3.3 também foi solucionado com o método das diferenças finitas explícitas.

## APÊNDICE 4 – LISTAGEM DO PROGRAMA ADV\_DIF

```

program adv_dif;
{
  Transporte de substâncias por advecção e difusão.
  Canais trapezoidais com declividade constante.
  Solução pelo método das diferenças finitas (esquema explícito).

  Análise recomendada para ser processada para elementos computacionais
  (ec) de trechos de canais naturais. Os trechos são definidos por seqüências
  de ec's.
}
uses
  wincrt;

type
  vet1 = array[1..25] of double;
  vet2 = array[-1..5000] of double;

var
  arqe,arqs,
  arq1,arq2 : text;
  narq      : string;
  lec,ard,
  mec1,mec2,
  dm,drqm,
  bec,s0,
  qeb,bp    : ^vet1;
  yx,ax,
  vx,kx,
  mk,nk,
  ok        : array[1..25] of ^vet2;
  cx        : array[0..1,1..25] of ^vet2;
  imp,nx2,
  i,j,k,
  ns,nt     : integer;
  aux,sb,
  bux,cux,
  vol,da,
  xlec,qux,
  nec,kec,x,
  bp1,bp2,bd,
  y0,q0,dx2,
  q1,yc1,yc2,
  s0c1,s0c2,
  c0,c1,bpp,
  dc0,s0c,
  yleq,qlec,
  clec,dclec,
  qsup,qdbo : double;
{
  qsup - contribuição superficial (l/s/km2)
  qdbo - contribuição relacionada com lançamento pontual (l/s/kg/dia)
  bp1  - lançamento pontual grandes usuários (kg/dia)
  bp2  - lançamento pontual demais usuários (kg/dia)
  bd   - lançamento difuso (kg/dia)
  ard  - área de drenagem (km2)
}
}

```

```

const
  dx   : double = 1.0e0;
  nx   : integer = 5000;
  dt   : double = 1.0e-3;
  g    : double = 9.807e0;
  s6   : double = 0.166666666666e0;
  gama : double = -1.4e-6;
  alfa : double = 0.0e0;
  ntem : longint = 100000;
  cte  : double = 1.6247e0;

function area(nt:integer; y:double):double;
begin
  area := y*(bec^[nt] + 0.5e0*dm^[nt]*y);
end;

function larg(nt:integer; y:double):double;
begin
  larg := bec^[nt] + dm^[nt]*y;
end;

procedure sectr(nt:integer; var y,a,b,r:double);
begin
  a := area(nt,y);
  b := larg(nt,y);
  r := a/(bec^[nt] + drqm^[nt]*y);
end;

procedure carga(nt:integer; var bpp,bpd:double);

procedure linha(k:byte);

var
  s   : string;
  i,j : byte;

begin
  readln(arq1,s);

  for j := 1 to length(s) do
  begin
    if ord(s[j]) = 9
    then
      s[j] := ' ';
    end;
  end;
end;

```

```

{   writeln(s,length(s):4); }

if k = 1
  then
    delete(s,1,2);

j := pos('e ',s);
if j > 0
  then
    delete(s,j,4);

delete(s,1,1);

for i := 1 to 2 do
  begin
    j := pos('.',s);
    if j > 0
      then
        delete(s,j,1);
    end;

for i := 1 to 2 do
  begin
    j := pos(',',s);
    if j > 0
      then
        s[j] := '.';
    end;

delete(s,1,1);
{
  writeln(s);
  readln;
}
writeln(arq2,s);

end;

procedure arranج(gr:byte);

var
  i : byte;
  s : string;

begin

  for i := 1 to 2 do
    readln(arq1,s);

  for i := 1 to gr do
    linha(i);

  end;

begin

  if nt <= 1
    then

```

```

begin
  assign(arq1,narq+'.txt');
  reset (arq1);

  assign (arq2,narq+'.$$$');
  rewrite(arq2);

  arranj(5);
  arranj(1);
  arranj(3);
  arranj(1);
  arranj(3);
  arranj(8);

  close(arq1);
  close(arq2);

  reset(arq2);
  end;

  readln(arq2,bpp,bpd);

end;

(*
procedure edo(lec,s0,bec,mec1,mec2,nec,qeb,bp,y0,q0,c0,dc0:double;
              var ylec,qlec,clec,dclec:double);
{
  lec   - comprimento do ec (m)
  s0    - declividade do ec (ad.)
  bec   - base da sec. trapezoidal (m)
  mec1  - inclinação do talude esquerdo da sec. trapezoidal (ad.)
  mec2  - inclinação do talude direito da sec. trapezoidal (ad.)
  nec   - coef. de Manning (s/m**(1/3))
  qeb   - vazão de entrada no canal (superficial + fluxo com a substância)
(m3/s/m)
  bp    - conc. da substância que entra no canal (kg/m3/s)

  y0    - profundidade em x=0 (m)
  q0    - vazão em x=0 (m3/s)
  c0    - concentração em x=0 (kg/m3)
  dc0   - derivada da concentração em x=0 (kg/m4)

  ylec  - profundidade em x=lec (m)
  qlec  - vazão em x=lec (m3/s)
  clec  - concentração em x=lec (kg/m3)
  dclec - derivada da concentração em x=lec (kg/m4)
}
  var
    x,y,xlec,
    c,dc,da,
    dm,drqm,dx2,
    kec,vol      : double;
{
  kec - coef. de dispersão longitudinal (m2/s)
}
  const
    g : double = 9.807e0;
    s6 : double = 0.166666666666e0;

```

```

procedure rk4y(x0,y0:double; var x1,y1:double);
var
  k1,k2,k3,k4,xa : double;
function f(x,y:double):double;
var
  a,r,b,q,
  sf,fr2 : double;
begin
  sectr(y,a,b,r);
  q := q0 + qeb*x;
  sf := sqr(q*nec/(a*exp(0.6666666667e0*ln(r))));
  fr2 := sqr(q)*b/(a*sqr(a)*g);
  f := (s0 - sf)/(1.0e0 - fr2);
end;
begin
  x1 := x0 + dx;
  xa := x0 + dx2;
  k1 := dx*f(x0,y0);
  k2 := dx*f(xa,y0+0.5e0*k1);
  k3 := dx*f(xa,y0+0.5e0*k2);
  k4 := dx*f(x1,y0+ k3);
  y1 := y0 + s6*(k1 + k2 + k2 + k3 + k3 + k4);
end;

procedure rk4c(x0,y0,x1,y1,c0,dc0:double; var c1,dc1:double);
var
  kc1,kc2,kc3,kc4,
  kd1,kd2,kd3,kd4,
  xa,da,aux : double;
function f(x,dc:double):double;
var
  q,y,a,b,v : double;
begin
  q := q0 + x*qeb;
  y := y0 + (y1-y0)*(x-x0)/dx;
  a := area(y);
  b := larg(y);
  v := q/a;
  kec := 0.011*sqr(v*b)/(y*sqrt(g*y*s0));
  f := dc*((v/kec) - (da/a)) - (bp/kec);

```

```

    end;

begin
    da := (area(y1) - area(y0))/dx;
    xa := x0 + dx2;

    kc1 := dx*dc0;
    kd1 := dx*f(x0,dc);

    aux := dc0 + 0.5e0*kd1;
    kc2 := dx*aux;
    kd2 := dx*f(xa,aux);

    aux := dc0 + 0.5e0*kd2;
    kc3 := dx*aux;
    kd3 := dx*f(xa,aux);

    aux := dc0 + kd3;
    kc4 := dx*aux;
    kd4 := dx*f(x1,aux);

    c1 := c0 + s6*(kc1 + kc2 + kc2 + kc3 + kc3 + kc4);
    dc1 := dc0 + s6*(kd1 + kd2 + kd2 + kd3 + kd3 + kd4);

    end;

begin
    dx2 := 0.5e0*dx;
    dm := mec1 + mec2;
    drqm := sqrt(1.0e0 + sqr(mec1)) + sqrt(1.0e0 + sqr(mec2));

    xlec := 0.0;
    ylec := y0;
    vol := 0.5*area(y0);
    repeat
        x := xlec;
        y := ylec;

        rk4y(x,y,xlec,ylec);

        vol := vol + area(ylec);

    until xlec >= lec;

    vol := dx*(vol-0.5*area(ylec));
    bp := bp/vol;

(*
    xlec := 0.0;
    ylec := y0;
    clec := c0;
    dclec := dc0;
    repeat
        x := xlec;

```

```

    y := ylec;
    c := clec;
    dc := dclec;

    writeln(x);

    rk4y(x,y,xlec,ylec);
    rk4c(x,y,xlec,ylec,c,dc,clec,dclec);

    until xlec >= lec;

    qllec := q0 + qeb*lec;

    writeln(ylec,qllec);

end;
*)

procedure prof_unif(nt:integer; var q,n,s0,y:double);

var
    aux,fy,
    y1,fy1,
    y2,fy2 : double;
    it      : integer;

const
    nit : integer = 100;
    err : double  = 1.0e-7;

function f(var y:double):double;

var
    a,b,r : double;

begin

    sectr(nt,y,a,b,r);
    f := s0*sqr(a)*exp(1.3333333333e0*ln(r));

end;

begin

    aux := sqr(q*n);

    y2 := 0.0e0;
    fy2 := 0.0e0;
    it := 0;
    repeat

        y1 := y2;
        fy1 := fy2;
        y2 := y2 + 0.1e0;
        fy2 := f(y2);
        it := it + 1;

        until (fy2 > aux) or (it > nit);

    if it > nit

```

```

    then
      begin
        y := -1.0e0;
        exit;
        end;

it := 0;
repeat

  y := y1 + (y2 - y1)*(aux - fy1)/(fy2 - fy1);
  fy := f(y);
  it := it + 1;

  if fy < aux
    then
      begin
        fy1 := fy;
        y1 := y;
        end
    else
      begin
        fy2 := fy;
        y2 := y;
        end;

    until (abs(fy-aux) < err) or (it > nit);

if it > nit
  then
    begin
      y := -1.0e0;
      exit;
      end;

end;

procedure prof_crit(nt:integer; var qx,q,n,y,s0:double);

var
  a,b,
  r,fy,
  y1,fy1,
  y2,fy2 : double;
  it      : integer;

const
  nit : integer = 100;
  err : double  = 1.0e-7;

function f(var y:double):double;

begin

  sectr(nt,y,a,b,r);
  f := sqr(qx)*b - g*sqr(a)*a;

end;

begin

```

```

y2 := 1.0e-4;
fy2 := f(y2);
it := 0;
repeat

  y1 := y2;
  fy1 := fy2;
  y2 := y2 + 1.0e-2;
  fy2 := f(y2);
  it := it + 1;

until (fy2*fy1 < 0.0) or (it > nit);

if it > nit
then
begin
  y := -1.0e0;
  exit;
end;

it := 0;
repeat

  y := y1 - (y2 - y1)*fy1/(fy2 - fy1);
  fy := f(y);
  it := it + 1;

  if fy*fy1 > 0.0
  then
begin
  fy1 := fy;
  y1 := y;
end
else
begin
  fy2 := fy;
  y2 := y;
end;

until (abs(fy) < err) or (it > nit);

if it > nit
then
begin
  y := -1.0e0;
  exit;
end;

sectr(nt,y,a,b,r);
s0 := sqr(qx*nec/(a*exp(0.6666666667e0*ln(r)))) + 2.0*qx*q/(sqr(a)*g);

end;

procedure rk4y(nt:integer; x0,y0,q0:double; var x1,y1,q1:double);

var
  k1,k2,k3,k4,xa : double;

```

```

function f(x,y:double):double;

var
  a,r,b,q,
  sf,fr2 : double;

begin

  sectr(nt,y,a,b,r);

  q := q0 - qeb^[nt]*(lec^[nt] - x);
  sf := sqr(q*nec/(a*exp(0.6666666667e0*ln(r))));
  fr2 := sqr(q)*b/(a*sqr(a)*g);
  f := (s0^[nt] - sf)/(1.0e0 - fr2);

end;

begin

  x1 := x0 - dx;
  xa := x0 - dx2;

  k1 := dx*f(x0,y0);
  k2 := dx*f(xa,y0+0.5e0*k1);
  k3 := dx*f(xa,y0+0.5e0*k2);
  k4 := dx*f(x1,y0+      k3);

  y1 := y0 - s6*(k1 + k2 + k2 + k3 + k3 + k4);

end;

procedure rk4c(nt:integer; x0,q0,xy0,y0,y1,c0,dc0,da:double; var
x1,c1,dc1:double);

var
  kc1,kc2,kc3,kc4,
  kd1,kd2,kd3,kd4,
  xa,aux,bux      : double;
  q,y,a,b,v       : double;

function f(x,c,dc:double):double;

var
  q,y,a,b,v : double;

begin

  q := q0 + x*qeb^[nt];
  y := y0 + (y1-y0)*(x-xy0);
  a := area(nt,y);
  b := larg(nt,y);
  v := q/a;

  kec := 0.011*sqr(v*b)/(y*sqrt(g*y*s0^[nt]));

  f := dc*((v/kec) - (da/a)) - (bp^[nt]/kec) - gama*c;

end;

```

```

begin
    xa := x0 + dx2;
    x1 := x0 + dx;
    (*
    kc1 := dx*dc0;
    kd1 := dx*f(x0,c0,dc0);

    aux := dc0 + 0.5e0*kd1;
    bux := c0 + 0.5e0*kc1;
    kc2 := dx*aux;
    kd2 := dx*f(xa,bux,aux);

    aux := dc0 + 0.5e0*kd2;
    bux := c0 + 0.5e0*kc2;
    kc3 := dx*aux;
    kd3 := dx*f(xa,bux,aux);

    aux := dc0 + kd3;
    bux := c0 + kc3;
    kc4 := dx*aux;
    kd4 := dx*f(x1,bux,aux);

    c1 := c0 + s6*(kc1 + kc2 + kc2 + kc3 + kc3 + kc4);
    dc1 := dc0 + s6*(kd1 + kd2 + kd2 + kd3 + kd3 + kd4); *)

    q := q0 + xa*qeb^[nt];
    y := y0 + (y1-y0)*(x1-xy0);
    a := area(nt,y);
    b := larg(nt,y);
    v := q/a;

    kec := 0.011*sqr(v*b)/(y*sqrt(g*y*s0^[nt]));
    kec := 2.0e0;

    c1 := (c0 + c0 - dc0)*kec - (gama*c0 + bp^[nt])*qux - dx2*v*dc0;
    c1 := c1/(kec - v*dx2);
    (* writeln(kec,c1);
    readln; *)

end;

procedure conc;

var
    i,j,
    p,q : integer;
    k : longint;
    aux : double;

function cnovo(p,i,j:integer):double;

var
    aux : double;

begin
    (*

```

```

writeln(i:5,j:5,k:10);
writeln(cx[p,i]^[j-1],cx[p,i]^[j],cx[p,i]^[j+1]);
*)
  aux := bp^[i]*dt + mk[i]^[j]*cx[p,i]^[j-1] + nk[i]^[j]*cx[p,i]^[j] +
ok[i]^[j]*cx[p,i]^[j+1];

  if abs(aux) > 1.0
  then
    begin
      writeln(i:5,j:5,k:10,aux);
      writeln(cx[p,i]^[j-1],cx[p,i]^[j],cx[p,i]^[j+1]);
      writeln('Teclar enter...');
      readln;
    end;

  cnovo := aux;

end;

begin

  p := 0;
  q := 1;

  writeln(arqs,'Aprox. inicial');
  writeln(arqs,' 1      0',yx[1]^[0],vx[1]^[0],cx[q,1]^[0]);
  for i := 1 to nt do
    begin
      writeln(arqs,i:3,nx2:5,yx[i]^[nx2],vx[i]^[nx2],cx[q,i]^[nx2]);
      writeln(arqs,i:3,nx:5,yx[i]^[nx],vx[i]^[nx],cx[q,i]^[nx]);
    end;

  writeln(0:10,cx[q,nt]^[nx]);

  aux := cx[1,nt]^[nx];
  for k := 1 to ntem do
    begin

      p := 1 - p;
      q := 1 - q;

      for j := 1 to nx-1 do
        cx[q,1]^[j] := cnovo(p,1,j);

      for i := 2 to nt do
        begin

          for j := 0 to nx-1 do
            cx[q,i]^[j] := cnovo(p,i,j);

          cx[q,i]^[j-1] := cx[q,i-1]^[nx-1];
          cx[q,i-1]^[nx] := cx[q,i]^[0];

          end;

      cx[q,nt]^[nx] := cx[q,nt]^[nx-1];
      if (k mod imp) = 0
      then
        begin

```



```

reset (arqe);
readln (arqe,nec,qsup,qdbo);

i := 0;
sb := 0.0e0;
repeat

    i := i + 1;

readln(arqe,nt,lec^[i],ard^[i],s0^[i],mec1^[i],mec2^[i],bec^[i],bp1,bp2,bd)
;

    sb      := sb + bp1 + bp2 + bd;
    qeb^[i] := 0.001*((bp1+bp2)*qdbo + qsup*ard^[i])/lec^[i];
    bp^[i]  := (bp1 + bp2 + bd)/86400.0;

    dm^[i]  := mec1^[i] + mec2^[i];
    drqm^[i] := sqrt(1.0e0 + sqr(mec1^[i])) + sqrt(1.0e0 +
sqr(mec2^[i]));

    until eof(arqe);

close(arqe);
nt := i;

writeln;
write ('Arquivo: ');
readln(narq);

sb := 0.0e0;
for i := 1 to nt do
begin

    carga(i,bpp,bd);

    sb      := sb + bpp + bd;
    qeb^[i] := 0.001*(bpp*qdbo + qsup*ard^[i])/lec^[i];
    bp^[i]  := (bpp + bd)/86400.0;

end;

assign (arqs,narq+'.lst');
rewrite(arqs);

writeln(arqs,narq);

q0 := 0.0e0;
for i := 1 to nt do
    q0 := q0 + qeb^[i]*lec^[i];
writeln(q0,sb);
(*
q0 := 0.005*qsup;
for i := 1 to nt do { prof. critica }
begin
    x := 0.0;
    q1 := q0;
    prof_crit(i,q1,qeb^[i],nec,ycl,s0c1);

    if i > 1
        then

```

```

        if (s0c1-s0^[i])*(s0c2-s0^[i-1]) < 0.0
        then
            begin
                writeln(i,x,yc1,yc2);
                readln;
            end;

s0c2 := s0c1;
yc2 := yc1;
repeat
    s0c1 := s0c2;
    yc1 := yc2;
    x := x + 1.0;
    q1 := q0 + qeb^[i]*x;
    prof_crit(i,q1,qeb^[i],nec,yc2,s0c2);
    if yc2 < 0.0
    then
        writeln(i,x);
    if (s0c1-s0^[i])*(s0c2-s0^[i]) < 0.0
    then
        begin
            writeln(i,x,yc1,yc2);
            readln;
        end;
    until x >= lec^[i];
    q0 := q0 + lec^[i]*qeb^[i];
end;

*)
nx := trunc((1.0e3/dx)+0.9);
nx2 := nx div 2;
writeln(nx:5,imp:5);
writeln('Teclar enter...');
readln;

q0 := 0.005*qsup; { prof. uniforme }
c0 := 0.0e0;
writeln(q0);
for i := 1 to nt do
begin
    x := 0.0;
    q1 := q0;
    c1 := c0;
    for j := 0 to nx do
        begin
            prof_unif(i,q1,nec,s0^[i],yx[i]^[j]);

            ax[i]^[j] := area(i,yx[i]^[j]);
            bux := larg(i,yx[i]^[j]);
            vx[i]^[j] := q1/ax[i]^[j];
            kx[i]^[j] :=
0.011*sqr(vx[i]^[j]*bux)/(yx[i]^[j]*sqr(g*yx[i]^[j]*s0^[i]));

            cx[1,i]^[j] := cte*c1/q1;
            cx[0,i]^[j] := cx[1,i]^[j];

            if abs(cx[1,i]^[j]) > 0.5
            then
                begin
                    writeln(i:3,j:5);
                    writeln('Teclar enter...');
                end;
        end;
    end;
end;

```

```

        readln;
        end;

        if yx[i]^j < 0.0
        then
            begin
                writeln(i:4,j:5);
            end;

            x := x + dx;
            q1 := q0 + qeb^i*x;
            c1 := c0 + bp^i*x/lec^i;
            end;

        q0 := q0 + lec^i*qeb^i;
        c0 := c0 + bp^i;

        writeln(i);
        writeln(q0,yx[i]^nx);
        writeln(vx[i]^nx,kx[i]^nx);
        writeln(c0,cx[1,i]^nx);
        end;

for i := 2 to nt do
    cx[1,i]^[-1] := cx[1,i-1]^nx-1;

writeln(arqs,'carga vol carga/vol');
q0 := 0.005*qsup;
c0 := bp^1/q0;
for i := 1 to nt do
    begin
        vol := 0.5*(area(i,yx[i]^0) + area(i,yx[i]^nx));
        for j := 1 to nx-1 do
            vol := vol + area(i,yx[i]^j);
        vol := vol*dx;
        aux := bp^i;
        bp^i := bp^i/vol;
        writeln(arqs,i:4,aux,vol,bp^i);
    end;

yx[1]^[-1] := yx[1]^0;
ax[1]^[-1] := ax[1]^0;
vx[1]^[-1] := vx[1]^0;
kx[1]^[-1] := kx[1]^0;
for i := 2 to nt do
    begin
        aux := 0.5e0*(yx[i-1]^nx+yx[i]^0);
        yx[i-1]^nx := aux;
        yx[i]^0 := aux;
        yx[i]^[-1] := yx[i-1]^nx-1;
        aux := 0.5e0*(vx[i-1]^nx+vx[i]^0);
        vx[i-1]^nx := aux;
        vx[i]^0 := aux;
        vx[i]^[-1] := vx[i-1]^nx-1;
        aux := 0.5e0*(kx[i-1]^nx+kx[i]^0);
        kx[i-1]^nx := aux;
        kx[i]^0 := aux;
        kx[i]^[-1] := kx[i-1]^nx-1;
        aux := 0.5e0*(ax[i-1]^nx+ax[i]^0);
        ax[i-1]^nx := aux;
    end;

```

```

ax[i]^0 := aux;
ax[i]^[-1] := ax[i-1]^[nx-1];
end;

writeln(arqs,'m n o:');
for i := 1 to nt do
begin
for j := 0 to nx-1 do
begin
cux := 0.5e0*dt/(sqr(dx)*ax[i]^j);
aux := cux*(ax[i]^j*kx[i]^j + ax[i]^[j+1]*kx[i]^[j+1]);
bux := cux*(ax[i]^j*kx[i]^j + ax[i]^[j-1]*kx[i]^[j-1]);
cux := 0.5e0*dt*vx[i]^j/dx;
mk[i]^j := bux + cux;
nk[i]^j := 1.0e0 - aux - bux + gama*dt;
ok[i]^j := aux - cux;
end;
writeln(arqs,i:4,' 0',mk[i]^0,nk[i]^0,ok[i]^0);
writeln(arqs,i:4, nx2:5,mk[i]^[nx2],nk[i]^[nx2],ok[i]^[nx2]);
writeln(arqs,i:4,(nx-1):5,mk[i]^[nx-1],nk[i]^[nx-1],ok[i]^[nx-1]);
end;

c0 := 0.0;
writeln(q0,c0);

conc;

(*
c0 := 1.0e-5;
dc0 := 0.0e0;
ns := trunc((1.0e0/dx) + 0.9);
writeln(ns);
for i := 1 to nt do
begin
x := 0.0e0;
for j := 1 to 1000 do
begin
da := area(i,yx[i]^j) - area(i,yx[i]^[j-1]);
for k := 1 to ns do
begin
rk4c(i,x,q0,j-1.0e0,yx[i]^[j-
1],yx[i]^j,c0,dc0,da,xlec,clec,dclec);
{
writeln(xlec,clec,dclec);
*readln; }
dc0 := c0;
c0 := clec;
x := xlec;
end;
end;
q0 := q0 + lec^[i]*qeb^[i];
writeln(i,clec,dclec,q0);
end;

(*
y0 := 1.0e-3;
q0 := 0.0e0;
c0 := 0.0e0;
dc0 := 0.0e0;

```

```
repeat
    carga (nt, bpp, bd);

    qeb := 0.001*(bpp*qdbo + qsup*ard)/lec;
    bp  := (bpp + bd)/86400.0;

    qeb := 0.001*((bp1+bp2)*qdbo + qsup*ard)/lec;
    writeln(qeb);
    bp  := (bp1 + bp2 + bd)/86400.0;

edo(lec, s0, bec, mec1, mec2, nec, qeb, bp, y0, q0, c0, dc0, ylec, qlec, clec, dclec);

    writeln(nt);

    writeln(arqs, nt:2, ' ', ylec, qlec, clec, dclec);

    y0 := ylec;
    q0 := qlec;
    c0 := clec;
    dc0 := dclec;

    until eof(arqe);

close(arqe);
*)
close(arqs);

end.
```