



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE SANTA CRUZ  
PRO-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM MODELAGEM COMPUTACIONAL  
EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA

# **MODELAGEM COMPUTACIONAL DA QUALIDADE DA ÁGUA DO RIO CACHOEIRA UTILIZANDO UMA ABORDAGEM FUZZY**

**VALDEX DE JESUS SANTOS**

ILHÉUS-BA  
2015

**VALDEX DE JESUS SANTOS**

**MODELAGEM COMPUTACIONAL DA QUALIDADE DA ÁGUA  
DO RIO CACHOEIRA UTILIZANDO UMA ABORDAGEM  
FUZZY**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Modelagem Computacional em Ciência e Tecnologia da Universidade Estadual de Santa Cruz, como parte das exigências para obtenção do título de Mestre em Modelagem Computacional em Ciência e Tecnologia.

Orientador: Prof. Dr. Francisco Bruno Souza Oliveira

Coorientador: Prof. Dr. Eduardo Silva Palmeira

ILHÉUS-BA  
2015

S237

Santos, Valdex de Jesus.

Modelagem computacional da qualidade da água do rio Cachoeira utilizando uma abordagem Fuzzy / Valdex de Jesus Santos. – Ilhéus, BA: UESC, 2015.

124 f.: il.; anexos.

Orientador: Francisco Bruno Souza Oliveira.

Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Santa Cruz. Programa de Pós-graduação em Modelagem Computacional em Ciência e Tecnologia.

Inclui referências.

1. Lógica difusa. 2. Água – Qualidade. 3. Cachoeira, Rio (BA). I. Título.

CDD 511.3

**VALDEX DE JESUS SANTOS**

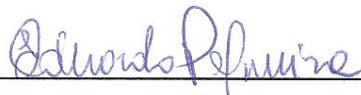
**MODELAGEM COMPUTACIONAL DA QUALIDADE DA ÁGUA  
DO RIO CACHOEIRA UTILIZANDO UMA ABORDAGEM  
FUZZY**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação  
em Modelagem Computacional em Ciência e Tecnologia  
da Universidade Estadual de Santa Cruz, como parte das  
exigências para obtenção do título de Mestre em Modelagem  
Computacional em Ciência e Tecnologia.

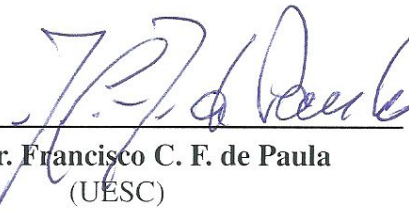
Ilhéus-BA, 05 de fevereiro de 2015



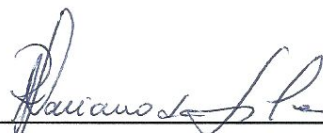
**Prof. Dr. Francisco Bruno Souza Oliveira**  
(UESC-Orientador)



**Prof. Dr. Eduardo Silva Palmeira**  
(UESC-Coorientador)



**Prof. Dr. Francisco C. F. de Paula**  
(UESC)



**Prof. Dr. Robson Mariano da Silva**  
(UFRRJ)

Em memória, a meu querido pai pelo amor que sempre me dedicou. A minha LisLinda princesinha, filha amada.

## **Agradecimentos**

- À Universidade Estadual de Santa Cruz e ao Programa de Pós-graduação em Modelagem Computacional em Ciência e Tecnologia pelo suporte durante esses dois anos.
- À minha esposa, pelo incentivo, dedicação, compreensão, companheirismo e carinho.
- Às minhas tias Ana, Diva e Dade pelo apoio, preocupação e demonstrações constantes de carinho e amor.
- Ao meu orientador prof. Dr. Francisco Bruno Souza Oliveira e coorientador prof. Dr. Eduardo Silva Palmeira.
- Ao Instituto Federal da Bahia, Campus Jequié, pela redução da carga horária para que eu pudesse me dedicar mais aos estudos e entender os momentos em que precisei me ausentar para atividades do mestrado.
- Aos colegas de mestrado pelo companheirismo e momentos de descontração, em especial aos colegas Gislan Silveira, Everton Costa e Silvana Amorim por estarem sempre dispostos a ouvir e dialogar.
- Aos professores do PPGMC por compartilharem conhecimentos e experiências.
- Aos professores Francisco de Paula, Fábio Flores e Daniela Mariano pela colaboração na análise das regras de inferência.
- A minha colega de trabalho Olândia Lopes pelo apoio e palavras de incentivo durante toda essa jornada.
- Aos funcionários do colegiado do PPGMC.
- A todas as outras pessoas que colaboraram direto ou indiretamente para realização desse trabalho.

## Resumo

Índices de qualidade da água - IQA's são bastante difundidos e utilizados como forma de avaliar ambientes aquáticos, possibilitando tomadas de decisão mais fundamentadas. O IQA mais difundido e aceito mundialmente é o proposto pela National Sanitation Foundation - NSF, adotado no Brasil pela Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental - CETESB. Na presente dissertação, apresenta-se novos IQA's, alicerçados na lógica fuzzy, cujos conjuntos não tem fronteiras rigidamente definidas e incluem variáveis linguísticas em sua matriz de decisão. O IQA fuzzy do rio Cachoeira é proposto sobre duas vertentes: com funções triangulares e trapezoidais (Sistema TriTrap) e com funções gaussianas (Sistema gaussiano). O Matlab é utilizado para desenvolvimento de uma aplicação que permite a simulação computacional dos três índices e os resultados são analisados para classificação da qualidade da água do rio Cachoeira sob a ótica da lógica clássica e da lógica fuzzy.

**Palavras-chave:** Lógica Fuzzy; Rio Cachoeira; Qualidade da Água.

## **Abstract**

Water quality index – WQI are quite widespread and used as a way to evaluate aquatic environments, allowing making higher based decision. The most widespread and accepted worldwide WQI is the National Sanitation Foundation – NSF, and adopted in Brazil by CETESB (Environmental Sanitation Technology Company). In this dissertation, it is presented a new WQI, grounded on fuzzy logic, which sets have no hard-defined boundaries and include linguistic variables in their decision matrix. The fuzzy WQI of Cachoeira River is proposed on two side approaches: with triangular and trapezoidal functions (TriTrap System) and as Gaussian functions (Gaussian System). Matlab is used to develop an application that allows computer simulation of the three indices and the results analyzed to classify the Cachoeira river water quality from the perspective of classical and fuzzy logic.

**Keywords:** Fuzzy Logic; Cachoeira River; Water Quality.



## Lista de figuras

Figura 1 – Desenho esquemático das classes de usos estipuladas na resolução CONAMA nº 357/05 para águas doces. . . . .	10
Figura 2 – Curva de variação do parâmetro %OD. . . . .	28
Figura 3 – Curva de variação do parâmetro coliformes termotolerantes. . . . .	28
Figura 4 – Curva de variação do parâmetro pH. . . . .	29
Figura 5 – Curva de variação do parâmetro DBO. . . . .	30
Figura 6 – Curva de variação do parâmetro nitrogênio total. . . . .	30
Figura 7 – Curva de variação do parâmetro fósforo total. . . . .	31
Figura 8 – Curva de variação do parâmetro turbidez. . . . .	32
Figura 9 – Curva de variação do parâmetro sólidos totais. . . . .	32
Figura 10 – Curva de variação da temperatura. . . . .	32
Figura 11 – Curvas médias de variação de qualidade das águas. . . . .	35
Figura 12 – Conjunto fuzzy dos números naturais “pequenos”. . . . .	41
Figura 13 – Operações entre conjuntos fuzzy. . . . .	41
Figura 14 – Representação de um sistema fuzzy. . . . .	44
Figura 15 – Processo de fuzzificação. . . . .	45
Figura 16 – Variável linguística representando o pH. . . . .	45
Figura 17 – Funções de pertinência triangular, trapezoidal e gaussiana. . . . .	46
Figura 18 – Regras de avaliação. . . . .	48
Figura 19 – Método de Mamdani com composição <i>max – min</i> . . . . .	49
Figura 20 – Defuzzificação. . . . .	50
Figura 21 – Exemplo do método de defuzzificação MM. . . . .	50
Figura 22 – Exemplo do método de defuzzificação CA. . . . .	51
Figura 23 – Bacia hidrográfica do rio Cachoeira. . . . .	55
Figura 24 – Bacia hidrográfica do rio Cachoeira com seus principais rios e cidades. . . . .	55
Figura 25 – Imagens comparando o estado do rio Cachoeira a dez anos atrás e atualmente. . . . .	57
Figura 26 – Leito do rio Cachoeira no trecho urbano de Itabuna evidenciando poluição por diferentes dejetos. . . . .	57
Figura 27 – Esgoto sem tratamento desaguando sobre o rio Cachoeira - Itabuna/BA. . . . .	58
Figura 28 – Fotografias dos pontos de coleta. . . . .	60
Figura 29 – Imagens de satélite dos pontos de coleta. . . . .	60
Figura 30 – Gráficos de variação dos parâmetros OD e coliformes. . . . .	62
Figura 31 – Gráficos de variação dos parâmetros pH e temperatura. . . . .	62
Figura 32 – Gráficos de variação dos parâmetros nitrogênio total e fósforo total. . . . .	62
Figura 33 – Gráficos de variação dos parâmetros DBO, turbidez e sólidos totais. . . . .	63
Figura 34 – Fluxograma do sistema de inferência fuzzy. . . . .	68

Figura 35 – Definição das variáveis linguísticas do grupo 1. . . . .	68
Figura 36 – Comparativo entre as funções triangulares versus gaussianas. . . . .	69
Figura 37 – Comparativo entre as funções triangulares e trapezoidais versus gaussianas. . . . .	69
Figura 38 – Funções triangulares e trapezoidais do %OD. . . . .	70
Figura 39 – Funções gaussianas do %OD. . . . .	70
Figura 40 – Funções triangulares e trapezoidais do parâmetro coliformes. . . . .	71
Figura 41 – Funções gaussianas do parâmetro coliformes. . . . .	71
Figura 42 – Funções triangulares e trapezoidais do pH. . . . .	71
Figura 43 – Funções gaussianas do pH. . . . .	71
Figura 44 – Gráficos dos parâmetros %OD e coliformes. . . . .	72
Figura 45 – Gráficos dos parâmetros %OD e pH. . . . .	72
Figura 46 – Gráficos dos parâmetros coliformes e pH. . . . .	73
Figura 47 – Funções triangulares e trapezoidais da temperatura. . . . .	73
Figura 48 – Funções gaussianas da temperatura. . . . .	73
Figura 49 – Funções triangulares e trapezoidais do nitrogênio total. . . . .	74
Figura 50 – Funções gaussianas do nitrogênio total. . . . .	74
Figura 51 – Funções triangulares e trapezoidais do fósforo total. . . . .	74
Figura 52 – Funções gaussianas do fósforo total. . . . .	74
Figura 53 – Funções triangulares e trapezoidais da DBO. . . . .	75
Figura 54 – Funções gaussianas da DBO. . . . .	75
Figura 55 – Gráficos dos parâmetros nitrogênio total e DBO. . . . .	75
Figura 56 – Funções de pertinência da turbidez. . . . .	76
Figura 57 – Funções de pertinência do sólidos totais. . . . .	76
Figura 58 – Gráficos dos parâmetros turbidez e sólidos totais. . . . .	76
Figura 59 – Tela principal do software $IQA_{Fuzzy}$ . . . . .	78
Figura 60 – Tela de entrada de dados no software $IQA_{Fuzzy}$ . . . . .	79
Figura 61 – Contribuição individual de cada parâmetro para o IQA clássico. . . . .	80
Figura 62 – Contribuição de cada grupo para o IQA fuzzy. . . . .	80
Figura 63 – Índice de participação do IQA fuzzy as categorias de classificação de qualidade da água. . . . .	81
Figura 64 – Tela da interface que permite importar dados. . . . .	81
Figura 65 – Comparação dos valores dos IQA's ao longo do período de estudo. . . . .	84
Figura 66 – Contribuição dos parâmetros de peso alto para o IQA. . . . .	85
Figura 67 – Contribuição dos parâmetros de peso médio para o IQA. . . . .	86
Figura 68 – Contribuição dos parâmetros de peso baixo para o IQA. . . . .	87
Figura 69 – Contribuição dos subsistemas triangular/trapezoidal para obtenção do IQA. . . . .	87
Figura 70 – Contribuição dos subsistemas gaussianos para obtenção do IQA. . . . .	88
Figura 71 – Pertinência do IQA fuzzy do ponto 1 a cada classe de classificação - Sistema Tritrap . . . . .	90

Figura 72 – Pertinência do IQA fuzzy do ponto 2 a cada classe de classificação - Sistema	
Tritrap . . . . .	90
Figura 73 – Pertinência do IQA fuzzy do ponto 3 a cada classe de classificação - Sistema	
Tritrap . . . . .	90
Figura 74 – Pertinência do IQA fuzzy do ponto 1 a cada classe de classificação - Sistema	
Gaussiano . . . . .	91
Figura 75 – Pertinência do IQA fuzzy do ponto 2 a cada classe de classificação - Sistema	
Gaussiano . . . . .	91
Figura 76 – Pertinência do IQA fuzzy do ponto 3 a cada classe de classificação - Sistema	
Gaussiano . . . . .	91

## Lista de tabelas

Tabela 1 – Classificação das águas doces em função dos usos preponderantes. . . . .	11
Tabela 2 – Padrões de qualidade para águas doces . . . . .	12
Tabela 3 – Variáveis simuladas no Qual2K. . . . .	24
Tabela 4 – Pesos atribuídos aos parâmetros componentes do IQA. . . . .	26
Tabela 5 – Comparação entre população urbana e rural dos municípios da BHRC. . . .	56
Tabela 6 – Valores dos parâmetros das amostras de coletas no ponto 1 . . . . .	61
Tabela 7 – Valores dos parâmetros das amostras de coletas no ponto 2. . . . .	61
Tabela 8 – Valores dos parâmetros das amostras de coletas no ponto 3. . . . .	61
Tabela 9 – Número de regras do IQA fuzzy do rio Cachoeira. . . . .	69
Tabela 10 – Classificação da qualidade da água do rio Cachoeira. . . . .	82
Tabela 11 – Valores dos IQA's do rio Cachoeira no período de 2010 a 2013. . . . .	83
Tabela 12 – Contribuição dos parâmetros para o valor do IQA clássico. . . . .	85
Tabela 13 – Contribuição dos subsistemas (grupos) para obtenção do IQA fuzzy. . . . .	88
Tabela 14 – Percentuais de pertinência dos IQA's fuzzy as classes de classificação de qualidade da água. . . . .	89
Tabela 15 – Regras dos grupos 1 e 2 (Subíndices peso alto e peso médio). . . . .	104
Tabela 16 – Regras do grupo 3 (Subíndice peso baixo). . . . .	120
Tabela 17 – Regras dos subsistemas para gerar o IQA fuzzy final. . . . .	121

## Lista de quadros

Quadro 1 – Classificação do IQA. . . . .	25
Quadro 2 – Equações que descrevem as curvas médias de variação dos indicadores de qualidade da água. . . . .	34
Quadro 3 – Índices de qualidade da água utilizados pela CETESB, conforme propósitos de usos dos recursos hídricos. . . . .	36
Quadro 4 – Propriedades dos conjuntos fuzzy. . . . .	42
Quadro 5 – Pontos de coleta. . . . .	60

## **Lista de abreviaturas e siglas**

ANA	Agência Nacional de Águas
BHRC	Bacia Hidrográfica do Rio Cachoeira
CETESB	Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental
CT	Coliformes Termotolerantes
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
DBO	Demanda Bioquímica de Oxigênio
DQO	Demanda Química de Oxigênio
ETE	Estação de Tratamento de Esgoto
FT	Fósforo Total
IQA	Índice de Qualidade da Água
INEMA	Instituto do Meio Ambiente e Recursos Hídricos
MMA	Ministério do Meio Ambiente
MS	Ministério da Saúde
NSF	National Sanitation Foundation
NT	Nitrogênio Total
OD	Oxigênio Dissolvido
ONU	Organização das Nações Unidas
pH	Potencial de Hidrogênio
PNRH	Política Nacional de Recursos Hídricos
ST	Sólidos Totais
Tu	Turbidez

# Sumário

<b>1 – Introdução</b>	<b>1</b>
1.1 Motivação e justificativa	1
1.2 Objetivos	3
1.2.1 Objetivo geral	3
1.2.2 Objetivos específicos	3
1.3 Estrutura do trabalho	3
<b>2 – Revisão de Literatura</b>	<b>5</b>
2.1 Qualidade da água	5
2.1.1 Qualidade da água e os efeitos da poluição	6
2.1.2 Leis que regulamentam o uso da água no Brasil	9
2.1.3 Parâmetros de qualidade da água	10
2.2 Modelos de qualidade da água	18
2.2.1 Modelo Streeter-Phelps	19
2.2.2 Modelo Qual2E	20
2.2.3 Modelo Qual2K	23
2.2.4 Modelo QUAL-UFGM	23
2.3 Índice de Qualidade da Água - IQA	24
2.3.1 Curvas médias de variação dos parâmetros do IQA	27
2.3.2 Reestruturação das equações das curvas médias de variação dos parâmetros do IQA	33
2.3.3 Vantagens e limitações do IQA	33
2.4 Lógica e conjuntos fuzzy	36
2.4.1 Lógica Fuzzy	36
2.4.2 Conjuntos Fuzzy	39
2.4.3 Sistemas Fuzzy	43
2.4.4 Algumas aplicações da lógica Fuzzy	51
<b>3 – Área de Estudo: Rio Cachoeira</b>	<b>54</b>
3.1 Localização	54
3.2 Urbanização e poluição	55
3.3 Estudos sobre a qualidade da água do rio Cachoeira	57
3.4 Pontos de coleta e valores dos parâmetros	59
<b>4 – Modelagem da Qualidade da Água do Rio Cachoeira</b>	<b>64</b>
4.1 Cálculo dos fatores do IQA Clássico	64

4.1.1	Oxigênio dissolvido . . . . .	64
4.1.2	Coliformes termotolerantes . . . . .	64
4.1.3	Potencial de hidrogênio . . . . .	65
4.1.4	Demanda bioquímica de oxigênio . . . . .	65
4.1.5	Nitrogênio total . . . . .	65
4.1.6	Fósforo total . . . . .	65
4.1.7	Turbidez . . . . .	66
4.1.8	Sólidos totais . . . . .	66
4.1.9	Variação de temperatura . . . . .	66
4.1.10	Cálculo do IQA do rio Cachoeira . . . . .	66
4.2	Desenvolvimento dos índices fuzzy de qualidade da água do rio Cachoeira . . .	67
4.2.1	Grupo 1: Subíndice Peso Alto . . . . .	70
4.2.2	Grupo 2: Subíndice Peso Médio . . . . .	72
4.2.3	Grupo 3: Subíndice Peso Baixo . . . . .	75
4.2.4	$IQAF_{RC}$ do rio Cachoeira . . . . .	77
4.3	Apresentação do aplicativo desenvolvido em Matlab . . . . .	77
4.3.1	A função de contribuição de cada parâmetro para o IQA Clássico . . . .	78
4.3.2	A função contribuição de cada grupo para o IQA Fuzzy . . . . .	79
4.3.3	A função índice de pertinência . . . . .	79
4.3.4	Leitura de dados em arquivos . . . . .	81
4.4	Cálculo do IQA Fuzzy do rio Cachoeira utilizando o Matlab . . . . .	82
4.4.1	Contribuição individual dos parâmetros para o IQA Clássico . . . . .	84
4.4.2	Contribuição dos subsistemas (grupos) fuzzy para o cálculo do $IQAF_{RC}$ .	86
4.4.3	Pertinência dos IQA's fuzzy às classes de qualidade da água . . . . .	89
<b>5</b>	<b>– Considerações Finais . . . . .</b>	<b>93</b>
5.1	Resultados e discussões . . . . .	93
5.2	Dificuldades encontradas . . . . .	94
5.3	Trabalhos futuros . . . . .	95
	<b>Referências . . . . .</b>	<b>96</b>
	<b>Anexos . . . . .</b>	<b>103</b>
	<b>ANEXO A – Base de Regras . . . . .</b>	<b>104</b>



# 1 Introdução

## 1.1 Motivação e justificativa

A água é um bem inestimável e essencial para a sobrevivência da humanidade, sendo um dos recursos naturais mais intensamente utilizados. Por ser fundamental para a existência e manutenção da vida, deve estar presente não só em quantidade, mas também com qualidade apropriada. Nesse sentido, seu monitoramento, assim como estudos que possibilite diagnosticar seu estado atual, são essenciais para fornecer parâmetros que visem impulsionar políticas públicas de preservação e contenção de elementos causadores de poluição.

O rio Cachoeira, ao cortar vários municípios da região sul da Bahia, entre eles Ilhéus e Itabuna, que abrigam o maior contingente populacional, exerce grande influência nas condições de vida dos cidadãos da região. Muitos dependem dele para a própria subsistência, ora pelo consumo da água, ora pela produção de peixes que alimenta suas famílias. Dessa forma, é necessário um acompanhamento constante das condições do rio, visto que a má qualidade de sua água trará consequências negativas para a saúde dos cidadãos e para a economia dos municípios que estão ao longo do seu curso.

Nota-se a carência de estudos relacionados a qualidade da água do rio Cachoeira, apesar de existirem esforços de alguns pesquisadores, principalmente na Universidade Estadual de Santa Cruz - UESC, em tentar mapear o rio e sua bacia de forma a incentivar políticas públicas de revitalização e preservação do mesmo. No entanto, a maioria dos trabalhos produzidos são baseados em análise de substâncias físico-químicas presentes na água, a exemplo dos estudos de Pinho (2001) e Lucio (2010).

É preciso pensar em metodologias diferenciadas que estudem a qualidade da água desse manancial sobre diferentes pontos de vista. Nesse sentido, este trabalho traz uma abordagem diferenciada e inovadora para o ambiente em questão, baseada na Lógica Fuzzy, a tempo que procura também suprir um pouco da carência de estudos relacionados a qualidade das águas desse rio.

Até o presente momento, inúmeras metodologias têm sido propostas para avaliar a qualidade da água de rios. As metodologias tradicionais, entretanto, não têm se mostrado eficientes para representar o conhecimento de natureza mais subjetiva sobre as variáveis usadas para avaliar a qualidade dos ambientes aquáticos (LERMONTOV et al., 2008).

Através dos índices de qualidade da água é possível avaliar os pontos mais críticos na bacia de um manancial em relação a qualidade da água, servindo, também, para detectar problemas na localização das estações e avaliar as áreas que necessitam de um monitoramento mais intensivo.

Não obstante, a aplicação do Índice de Qualidade da Água - IQA classifica drasticamente a água pertencendo a uma das categorias ótima, boa, regular, ruim ou péssima. Pequenas variações no valor do IQA podem fazer com que a classificação da água em determinado ponto mude abruptamente. Assim, se o resultado do IQA for, por exemplo, 36, a qualidade da água será definida como pertencente a classe “ruim”. Se porventura o IQA for 36,000001, a qualidade da água é considerada como “regular”. Entende-se, dessa forma, que essa mudança abrupta de uma classe para outra é uma forma inadequada de classificação.

A principal crítica a esse índice é a falta de lidar com a incerteza e subjetividade presentes nos complexos problemas ambientais. A lógica fuzzy, por sua vez, consegue incorporar aos modelos essas subjetividades e incertezas modeladas a partir do conhecimento de especialistas.

Nesse sentido, a lógica fuzzy pode ser uma alternativa para modelagem de índices de qualidade de água, pois fornece outra abordagem para lidar com questões em que os objetivos não estão bem definidos e as informações não são precisas (CHAU, 2006). Um sistema baseado na lógica fuzzy permite a mudança de uma classe para outra de forma suave e gradual, atribuindo o grau de pertinência dos corpos analisados em uma classe e outra. Assim, um mesmo resultado permitirá, por exemplo, uma classificação de alta pertinência a categoria ruim e baixa pertinência a categoria regular, ou seja, uma relativização do resultado do IQA, renegando uma forma de julgamento absoluta.

Uma das principais vantagens da lógica fuzzy em relação a outras abordagens matemáticas é a facilidade de sua compreensão por parte de profissionais cuja formação não é necessariamente na área de exatas. A possibilidade de trabalhar com variáveis linguísticas aproxima a linguagem do modelo com a linguagem natural utilizada por esses profissionais, o que faz com que eles se sintam a vontade para expressar o seu conhecimento. Estas características da lógica fuzzy viabilizam a interdisciplinaridade nesses tipos de trabalhos.

Neste trabalho a base metodológica consiste em simulações feitas com base em parâmetros físico-químicos e bacteriológicos provenientes de coletas feitas em três pontos do rio Cachoeira entre os anos de 2010 e 2013. Os dados foram obtidos do banco de dados do INEMA (Instituto do Meio Ambiente e Recursos Hídricos) que monitora a qualidade da água emitindo relatórios a cada campanha de coleta que normalmente acontece duas vezes por ano em cada ponto.

Foram propostos dois índices fuzzy, um baseado em funções triangulares e trapezoidais e, outro com funções de agregação gaussianas. Os resultados obtidos com a simulação desses índices aos valores dos parâmetros provenientes das coletas realizadas foram comparados com a aplicação do IQA clássico.

Para as simulações foi utilizado o Matlab (versão R2013a), que é tanto uma linguagem de programação quanto um ambiente de computação técnica e científica. O MatLab dispõe de vários Toolboxes, cada um constando de uma coleção de arquivos destinados a tratar certas

classes de problemas científicos. Dentre estes, destaca-se o **Fuzzy Logical Toolbox**, que é de interesse desse estudo e onde estão disponibilizados arquivos e funções destinadas ao uso da teoria de conjuntos fuzzy.

## 1.2 Objetivos

### 1.2.1 Objetivo geral

Simular computacionalmente a qualidade da água do rio Cachoeira segundo metodologia tradicional e metodologia fuzzy.

### 1.2.2 Objetivos específicos

- Calcular IQA clássico do rio Cachoeira com base nas equações preconizadas pela NSF (National Sanitation Foundation);
- Desenvolver um índice fuzzy de qualidade da água do rio Cachoeira baseado em funções de pertinência triangulares e trapezoidais;
- Desenvolver um índice fuzzy de qualidade da água do rio Cachoeira baseado em funções de pertinência gaussianas;
- Criar uma aplicação em Matlab para fazer as simulações com base nos índices desenvolvidos;
- Simular e comparar os resultados obtidos, fazendo uma nova classificação da qualidade da água com base nos índices fuzzy.

## 1.3 Estrutura do trabalho

Esta dissertação está dividida em cinco 5 capítulos. No primeiro capítulo, consta a introdução, na qual são apresentados a motivação e justificativa, objetivos e como está organizada, ou seja, sua estrutura.

No segundo capítulo é apresentada a revisão da literatura, considerada necessária para o desenvolvimento da pesquisa. Aborda-se a questão da qualidade da água e os efeitos da poluição nos mananciais, assim como leis que regulamentam o uso e preservação da água no Brasil. São apresentados os modelos de qualidade da água mais presentes na literatura. Também é feita uma abordagem sobre índices de qualidade da água, com destaque para o IQA desenvolvido pela NSF, o qual será referenciado nesse trabalho simplesmente por IQA clássico. Por fim, discute-se um pouco sobre lógica, conjuntos e sistemas fuzzy.

O capítulo 3 trata do rio Cachoeira, sua localização, urbanização e os efeitos da poluição. Também são apresentados estudos desenvolvidos por alguns pesquisadores sobre a qualidade da água do rio e, por fim, apresenta-se os pontos de coleta e os valores dos parâmetros utilizados nas simulações.

O Capítulo 4 explica como foi feita a modelagem dos índices fuzzy de qualidade da água. Primeiramente, mostra-se como é feito o cálculo do IQA clássico passo a passo, evidenciando a dificuldade de se fazer isso manualmente para cada coleta de dados. É explanado o desenvolvimento do IQA fuzzy, como os parâmetros foram divididos em grupos e como cada grupo é utilizado para obter o índice fuzzy final.

Nas duas últimas seções do Capítulo 4 são apresentadas as funcionalidades do software desenvolvido para realizar as simulações dos IQA's e os resultados obtidos utilizando-o. O último capítulo da dissertação é destinado as conclusões, considerações e indicações de trabalhos futuros.

## 2 Revisão de Literatura

### 2.1 Qualidade da água

A água, elemento essencial para garantia da vida nos ecossistemas, é um dos constituintes básicos dos sistemas que compõem o Planeta Terra, cobrindo 77% da sua superfície (SHIKLOMANOV, 1990 apud LIMA, 2001). Desse total, 97,5% se refere aos oceanos e mares (água salgada) e entre os 2,5% do volume restante, há ainda muita água que não é salgada, mas que não é propriamente doce (é a chamada água salobra) (ANA, 2012). De toda água doce disponível no planeta, a maior parcela, cerca de 68,9%, formam as calotas polares, as geleiras e neves que cobrem os cumes das montanhas mais altas da terra e dos 31,1% restantes apenas 0,3% compõem as águas dos rios e lagos, parcela mais facilmente aproveitada para atender as demandas e necessidades sociais e econômicas da humanidade nos diferentes usos (TUNDISI, 2003).

O Brasil é privilegiado em termos de recursos hídricos, dados da National Geographic em 2011 apontam que só na bacia Amazônica os rios, lagos e aquíferos, juntos, concentram mais de 11% de toda a água doce disponível da Terra (SERPA, 2011).

No entanto, tal recurso é mal distribuído entre as regiões do país. Segundo Machado (2003), 70% da água estão na região Norte, onde está situada a bacia amazônica e vivem apenas 7% da população; a região Sudeste, que tem a maior concentração populacional (42,6% do total brasileiro), dispõe de apenas 6% dos recursos hídricos, e a região Nordeste, que abriga 28,9% da população apenas de 3,3%. Portanto, somente 30% dos recursos hídricos brasileiros estão disponíveis para 93% da população. Em média, entre 40% e 60% da água tratada são perdidos no percurso entre a captação e os domicílios, em função de tubulações antigas, vazamentos, desvios clandestinos e tecnologias obsoletas.

Muitas regiões do país sofrem com escassez de água, o que gera dificuldades para muitas famílias na plantação, irrigação, criação de animais e na própria subsistência. Além de ser um recurso cada vez mais limitado na atualidade, a água desempenha importantes papéis de cunho cultural, social, econômico e ecológico.

Sardinha et al. (2008) e Moretto (2011) argumentam que a disponibilidade de água significa que ela estará presente não somente em quantidade, mas também que sua qualidade seja satisfatória para suprir as necessidades dos seres vivos. Água de boa qualidade é de vital importância para subsistência humana, produção de alimentos e conservação da biodiversidade. No seu duplo aspecto, da quantidade e da qualidade, a água é um fator condicionado e condicionante do desenvolvimento econômico e social (MORÃO JR., 2010).

A crescente demanda por recursos hídricos, tanto no meio agrícola, através da irrigação,

quanto no meio urbano, através do aumento da industrialização e dos grandes centros urbanos, faz com que a disponibilidade desse precioso recurso se torne uma preocupação crescente.

Nessa perspectiva, o documento intitulado Declaração Universal dos Direitos da Água, redigido pela ONU, em 1992, propõe nos itens 7 e 8, respectivamente

“A água não deve ser desperdiçada, nem poluída, nem envenenada. De maneira geral, sua utilização deve ser feita com consciência e discernimento para que não se chegue a uma situação de esgotamento ou de deterioração da qualidade das reservas atualmente disponíveis.”

“A utilização da água implica em respeito à lei. Sua proteção constitui uma obrigação jurídica para todo homem ou grupo social que a utiliza. Esta questão não deve ser ignorada nem pelo homem nem pelo Estado.”

Considerando a importância da água para a manutenção da vida no planeta, é preciso que haja uma avaliação da qualidade e acompanhamento sistemático realizado por meio de programas de monitoramento estruturados e capazes de representar a situação atual dos recursos hídricos, produzindo informações necessárias para a sua correta gestão.

### 2.1.1 Qualidade da água e os efeitos da poluição

Água doce não significa água limpa. Sendo assim, estudos de qualidade da água de rios, lagos e represas destinadas ao abastecimento doméstico, atividades humanas em geral e manutenção da vida aquática devem ser incentivados e promovidos constantemente de forma a proporcionarem previsões que possam auxiliar na preservação dos recursos hídricos.

Tais estudos têm como referência as características da água em seu estado natural, ou seja, antes de ser modificada pelas consequências das intervenções do homem. A qualidade da água está diretamente relacionada com a saúde da população e é descrita pelos seus aspectos físicos, químicos e biológicos e para que a mesma seja considerada de boa qualidade é necessário que esteja livre de fontes de contaminação de qualquer natureza (ANA, 2011).

A água deve ser constantemente monitorada com informações sempre atualizadas. Esse monitoramento facilita na tomada de decisões sobre a correta gestão e manuseio desse recurso. Dessa forma, é possível suavizar o efeito do uso indiscriminado da água e tentar estabelecer um equilíbrio entre o desenvolvimento econômico, social e a preservação das bacias hidrográficas.

Nunes et al. (2011) afirmam que a interferência do homem é uma das maiores causas de alteração da qualidade da água, seja através de uma forma concentrada, com a geração de efluentes domésticos ou industriais, ou de uma forma dispersa, com aplicação de defensivos e insumos agrícolas, contribuindo para a incorporação de substâncias químicas nos cursos d'água.

A poluição hídrica é a decorrência de qualquer mudança na qualidade física, química, radiológica ou biológica da água causada diretamente pelo homem ou por suas atividades, e que pode ser prejudicial ao uso presente, futuro ou potencial desse recurso natural (LIMA, 2001).

É um dos maiores problemas ambientais em todo o mundo, causando efeitos negativos para a saúde ambiental e prejudicando a manutenção das condições básicas de qualidade da água para seus diversos usos.

A Lei Federal Brasileira nº 6.938 (BRASIL, 1981) define poluição como a degradação da qualidade ambiental resultante de atividades que direta ou indiretamente: a) prejudiquem a saúde, a segurança e o bem-estar da população; b) criem condições adversas às atividades sociais e econômicas; c) afetem desfavoravelmente a biota; d) afetem as condições estéticas ou sanitárias do meio ambiente; e) lancem matéria ou energia de desacordo com os padrões ambientais estabelecidos. Portanto, o termo “poluição” se refere a uma infinidade de elementos e materiais que venham a causar alterações no meio ambiente a fim de prejudicar a sobrevivência dos ecossistemas.

As fontes (ou cargas) de poluição caracterizam o tipo de impacto no qual está sujeito o sistema hídrico e, conforme explicam Tucci e Mendes (2006) e Araújo (2005), geralmente são classificadas em pontuais ou difusas. As fontes pontuais são introduzidas por lançamentos localizados, como os que ocorrem no despejo de esgotos sanitários ou de efluentes industriais, são mais facilmente identificadas, o que torna seu controle mais eficiente e rápido (BÁRBARA, 2006; BINOTTO, 2012). As fontes difusas são as que se distribuem no espaço e não têm um local definido de contaminação e de entrada no sistema de escoamento, ou seja, a origem não pode ser identificada facilmente (BAUMLE, 2005), os poluentes adentram o corpo d’água e são distribuídos ao longo de parte de sua extensão, como exemplo, tem-se a contaminação agrícola por pesticidas, a contaminação das águas pluviais urbanas e a erosão de áreas agrícolas e urbanas (TUCCI; MENDES, 2006).

Lima (2001) explica que a fonte de poluição pontual pode ser reduzida ou eliminada através de tratamento apropriado para posterior lançamento no corpo de água. Já a fonte de poluição difusa geralmente requer mudanças nas práticas de uso e ocupação do solo e na melhoria de programas de educação ambiental.

Como observado por Ceretta (2009), cursos d’água que cortam áreas menos povoadas apresentam melhor qualidade das águas. Nesses casos, as fontes pontuais de poluição causam menores danos às águas e as maiores contribuições se dão por meio de fontes difusas.

O crescimento populacional acelerado nos grandes centros urbanos, acompanhado do aumento da industrialização, contribui para aumentar cada vez mais a quantidade de dejetos orgânicos e inorgânicos jogados nos rios, gerando volumes exorbitantes de resíduos químicos que se acumulam poluindo a atmosfera, a terra e as águas, transformando os rios em grandes depósitos de lixo, o que acaba repercutindo nos mares e nos oceanos (LEITE, 2004).

Existem muitas enfermidades cujo principal veículo de propagação é a água, as chamadas doenças de veiculação hídrica (ANA, 2012). Assim, a qualidade da água está fortemente ligada a saúde pública e aos serviços públicos de abastecimento de água e de esgotamento sanitário.

A falta desses serviços obriga a população a escolher outras formas de eliminar seu esgoto doméstico (muitas vezes sem tratamento prévio), sendo os rios meios mais propícios. Isso acarreta muitos problemas à própria população como a proliferação de doenças, diminuindo a qualidade de vida.

Moraes e Jordão (2002) estimam que o consumo de água contaminada, nos países em desenvolvimento, é responsável por 80% de todas as moléstias e mais de um terço dos óbitos e, em média, até um décimo do tempo produtivo de cada pessoa é perdido devido a doenças relacionadas à água. No Brasil, cerca de 65% das internações hospitalares de crianças têm como causa principal doenças contraídas devido a ausência ou a ineficiência do saneamento (MMA, 2006). O relatório do Programa do Meio Ambiente das Nações Unidas (Unep), em 2010, revelou que mais pessoas morrem por causa da água contaminada e poluída do que por todas as formas de violência (LEITE, 2004).

A contaminação e escassez das águas ficam mais preocupantes quando se tem em mente que o homem não é o único usuário, pois os ecossistemas também dependem de água para se manterem estáveis. Logo, sem água de qualidade a biodiversidade fica comprometida e todo o ecossistema padece.

Estima-se que, com a continuação e degradação do recursos hídricos, por volta de 2025 1 bilhão e 800 milhões de pessoas estarão vivendo com escassez absoluta de água, e 2/3 da população mundial pode passar a viver sob condições de escassez moderada (ANA, 2012).

Segundo Teixeira e Porto (2008), o grande desafio para os próximos anos, na área de recursos hídricos, é o atendimento das demandas na quantidade necessária e com a qualidade apropriada, como também a preservação das águas, que vêm sofrendo grandes prejuízos em virtude da poluição descontrolada. Mas a forma mais barata, fácil e efetiva de prevenir a poluição e proteger a qualidade das águas é reduzir ou eliminar os contaminantes na fonte antes que possam poluir os recursos hídricos.

Para Gastaldini e Oppa (2011), a busca por alternativas viáveis para a solução dos problemas qualitativos dos recursos hídricos, sem impedir o desenvolvimento econômico de uma região, é a saída para garantir às atuais e futuras gerações o acesso à água com quantidade e qualidade suficientes.

Assim, Gastaldini et al. (2002) salienta que, é cada vez mais urgente a necessidade de se identificar e diagnosticar os fatores que afetam a qualidade da água, bem como prever os impactos futuros decorrentes de determinados eventos ou condições específicas para melhor auxiliar a administração dos recursos hídricos com propostas ou alternativas concretas e realmente eficazes.

Nesse sentido, estudos de qualidade da água são fundamentais para se compreender as relações de causa e efeito de uma determinada atividade poluidora em um corpo d'água de determinada bacia hidrográfica e se tenha condições de promover políticas públicas eficazes de controle a poluição e recuperação das águas poluídas.



### 2.1.2 Leis que regulamentam o uso da água no Brasil

Apesar do Brasil concentrar uma das maiores reservas de água doce do mundo, o uso indiscriminado pode comprometer diversas atividades humanas, assim como gerar sérios impactos ao meio ambiente.

Santos et al. (2012) afirmam que problemas relacionados a distribuição espacial e temporal da água tem representado grandes desafios no tocante a formulação de leis que disciplinem o seu uso e consumo racional. Enfatiza ainda que a ausência de instrumentos eficazes para a gestão dos recursos hídricos pode comprometer, temporária ou definitivamente, os usos múltiplos desses recursos no Brasil.

Existem resoluções e portarias que regulamentam e estabelecem padrões de qualidade indispensáveis para que a água seja utilizada pelo homem com segurança, sem agravos à saúde, a exemplo das resoluções do CONAMA (Conselho Nacional do Meio Ambiente).

Com a finalidade de evitar possíveis conflitos e de proporcionar um gerenciamento mais democrático das águas do Brasil, a lei nº 9.433, de 08 de janeiro de 1997, conhecida como Lei das Águas, instituiu a Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH) e cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos.

A Lei das Águas estabelece como princípios gerais básicos para a gestão de recursos hídricos (BRASIL, 1997):

- A gestão por bacia hidrográfica;
- A observância dos usos múltiplos, mas considerando que em situações de escassez, o uso prioritário dos recursos hídricos é o consumo humano e a dessedentação animal;
- O reconhecimento de que a água é um recurso dotado de valor econômico;
- A gestão descentralizada e participativa;
- O reconhecimento da água como bem finito e vulnerável.

As diretrizes para a avaliação da qualidade das águas brasileiras são estabelecidas pelo Conselho Nacional do Meio Ambiente, através da resolução CONAMA nº 357 de 17 de março de 2005 (BRASIL, 2005). Essa resolução foi alterada pelas resoluções nº 410/2009 (BRASIL, 2009) e nº 430/2011 (BRASIL, 2011), continuando vigente até o momento.

Além de dispor sobre a classificação dos corpos d'água e estabelecer diretrizes ambientais para seu enquadramento, a resolução CONAMA nº 357/05 também estabelece as condições e padrões de lançamentos de efluentes em todo o território nacional, ou seja, procura estabelecer parâmetros para definir os limites aceitáveis de elementos poluentes na água, levando em consideração os diferentes usos.

Segundo a resolução CONAMA 357/05, o enquadramento consiste “no estabelecimento de uma meta ou objetivo de qualidade da água (classe) a ser, obrigatoriamente, alcançado ou mantido em um segmento de corpo d’água, considerando os usos preponderantes pretendidos, ao longo do tempo” (BRASIL, 2005). Em outras palavras, esse enquadramento deve considerar não necessariamente seu estado atual, mas os níveis de qualidade que deveriam possuir para atender às necessidades da comunidade e garantir os usos concebidos para os recursos hídricos.

Através dessa resolução, as águas do território brasileiro foram divididas em três grandes categorias: águas doces (salinidade  $< 0,05\text{‰}$ ), salobras (salinidade entre  $0,05\text{‰}$  e  $30\text{‰}$ ) e salinas (salinidade  $> 30\text{‰}$ ). Em função dos usos preponderantes dessas categorias foram estabelecidas classes para cada uma delas. Essas classes são definidas como um conjunto de condições e padrões de qualidade de água necessários ao atendimento dos usos preponderantes, atuais ou futuros. Elas refletem objetivos de qualidade distintos, que se situam desde o mais nobre (classe especial) ao menos nobre (classe 4), conforme Figura 1.



Figura 1 – Desenho esquemático das classes de usos estipuladas na resolução CONAMA nº 357/05 para águas doces.

A Tabela 1 apresenta um resumo dos usos preponderantes das classes relativas à água doce e, conforme pode ser observado, as classes 1, 2 e 3 podem ser utilizados para abastecimento de água. No caso da classe 1, pressupõe-se apenas um tratamento simplificado, ao passo que nas classes 2 e 3 a água deverá submeter-se a um tratamento convencional.

### 2.1.3 Parâmetros de qualidade da água

Na caracterização da qualidade da água são utilizados alguns parâmetros representantes de suas características físico-químicas e biológicas, que são conhecidos como indicadores de qualidade da água e representam impurezas quando ultrapassam os valores estabelecidos pela legislação vigente (BHARTI; KATYAL, 2011). Dessa forma, os efeitos resultantes de qualquer intervenção se apresentarão sob a forma de modificações nas concentrações de cada parâmetro.

Tabela 1 – Classificação das águas doces em função dos usos preponderantes.

Classes	Usos
Classe especial	a) abastecimento para consumo humano, com desinfecção; b) preservação do equilíbrio natural das comunidades aquáticas; c) preservação dos ambientes aquáticos em unidades de conservação de proteção integral.
Classe 1	a) abastecimento doméstico após tratamento simplificado; b) proteção das comunidades aquáticas; c) recreação de contato primário (natação, esqui aquático e mergulho); d) irrigação de hortaliças que são consumidas cruas e de frutas que se desenvolvam rentes ao solo e que sejam ingeridas cruas sem remoção de película; e) proteção das comunidades aquáticas em terras indígenas.
Classe 2	a) abastecimento doméstico, após tratamento convencional; b) proteção das comunidades aquáticas; c) recreação de contato primário (esqui aquático, natação e mergulho); d) irrigação de hortaliças, plantas frutíferas e de parques, jardins, campos de esporte e lazer, com os quais o público possa vir a ter contato direto; e) aquicultura e atividade de pesca.
Classe 3	a) abastecimento para consumo humano, após tratamento convencional ou avançado; b) irrigação de culturas arbóreas, cerealíferas e forrageiras; c) pesca amadora; d) recreação de contato secundário; e) dessedentação de animais.
Classe 4	a) navegação; b) harmonia paisagística.

Fonte: Resolução CONAMA nº 357/05.

O estudo das variáveis (parâmetros) de qualidade da água possibilita o conhecimento das condições do recurso hídrico e auxilia o processo de tomada de decisões das ações governamentais para regulamentar a utilização deste corpo d'água, identificando sua situação atual e prevendo mudanças que possam vir a ocorrer em sua qualidade.

Como a água tem a capacidade de dissolver um grande número de substâncias, torna-se grande também a quantidade de parâmetros presentes nela. Então, na prática, é viável selecionar aqueles que têm maior importância para o uso a que a água se destina, ou ainda em função dos contaminantes que são lançados nos corpos d'água, ou das atividades de uso e ocupação da terra em uma bacia hidrográfica, argumenta Araújo (2005).

Araújo (2005) e Tucci e Mendes (2006) definem parâmetros físicos, químicos e biológicos de qualidade da água. Os parâmetros físicos são aqueles que afetam os sentidos humanos e envolvem aspectos de ordem estética e psicológica. Normalmente são perceptíveis pelo ser humano independentemente de um exame qualitativo. Alguns exemplos de parâmetros físicos são odor, sabor, temperatura e cor. Parâmetros químicos correspondem à presença em solução

de substâncias químicas dissolvidas, geralmente avaliáveis por meios analíticos, tais como pH, Oxigênio Dissolvido (OD), Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) e Demanda Química de Oxigênio (DQO). Já os parâmetros biológicos são relativos à “parte viva”, ou seja, bactérias, vírus, protozoários, algas, crustáceos, etc. Esses parâmetros são avaliados por meio de exames microbiológicos e hidrobiológicos.

Segundo Bárbara (2006), os parâmetros indicadores de qualidade da água quando monitorados:

- Avaliam a evolução da qualidade da água dos corpos hídricos;
- Identificam os trechos de rios onde a qualidade da água está mais degradada;
- Fornecem subsídios para diagnósticos da qualidade da água visando os usos múltiplos dos recursos hídricos;
- Identificam áreas prioritárias para controle da poluição dos corpos d’água; e
- Fornecem subsídios técnicos para elaboração de relatórios de caracterização dos recursos hídricos de uma determinada região.

Fuzinato (2009) adverte que as análises químicas, envolvendo a determinação dos parâmetros físico-químicos e biológicos são importantes na identificação e determinação da concentração de poluentes, porém não são suficientes para verificar o impacto da poluição sobre a comunidade biótica.

A seguir serão caracterizados os parâmetros ou variáveis de qualidade da água analisadas nesta pesquisa, suas definições, características e consequências da presença nos corpos d’água. A Tabela 2 apresenta os limites estabelecidos para cada um desses parâmetros para rios de água doce, de acordo com a resolução CONAMA nº 357/05.

Tabela 2 – Padrões de qualidade para águas doces

Variáveis de qualidade da água	Unidade	Padrões de qualidade das águas				
		Classe Especial	Classe 1	Classe 2	Classe 3	Classe 4
Turbidez	UNT	-	≤ 40	≤ 100	≤ 100	-
pH	-	-	6 - 9	6 - 9	6 - 9	6 - 9
OD	mg/L	-	≥ 6	≥ 5	≥ 4	> 2
DBO	mg/L	-	≤ 3	≤ 5	≤ 10	-
Nitrato	mg/L - N	-	≤ 10	≤ 10	≤ 10	-
Fósforo Total	mg/L - P	-	≤ 0,1	≤ 0,1	≤ 0,15	-
Sólidos Totais	mg/L	-	≤ 500	≤ 500	≤ 500	-
C. termotolerantes	NMP/100 mL	-	≤ 200	≤ 1000	≤ 4000	-

Fonte: Resolução CONAMA nº 357/05.

### **Oxigênio Dissolvido (OD)**

É o parâmetro mais importante para expressar a qualidade de um ambiente aquático, uma vez que é fundamental para a manutenção dos organismos aquáticos aeróbios, como, por exemplo, peixes que precisam do oxigênio dissolvido na água para a sua sobrevivência (FUZINATTO, 2009; AUGUSTO; BAMIGBOLA, 2007; BINOTTO, 2012). Também é essencial para a manutenção de processos de autodepuração<sup>1</sup> em sistemas aquáticos naturais e estações de tratamento de esgotos (IGAM, 2005a).

São necessários teores mínimos de oxigênio dissolvido nos rios para a existência da biodiversidade do corpo hídrico. Dessa forma, os níveis de OD indicam a capacidade de um corpo d'água natural manter a vida aquática. Com a ausência de oxigênio a água passa a ter condições anaeróbias, gerando maus odores (REIS, 2009). Sendo assim, esse parâmetro pode indicar o grau de degradação da matéria orgânica, sendo que em casos de baixa concentração indica que a matéria orgânica presente na água encontra-se em intensa decomposição, ou seja, é indicio de processos de oxidação de substâncias lançadas nos rios.

Enquanto que, as águas limpas tendem a apresentar concentrações elevadas de oxigênio dissolvido, as águas poluídas apresentam baixas concentrações de oxigênio dissolvido em sua composição (devido ao seu consumo na decomposição de compostos orgânicos). Dessa forma, o oxigênio dissolvido representa um dos principais parâmetros para se avaliar a condição de qualidade de um curso d'água, representando as condições para sobrevivência e até mesmo influenciando diretamente a distribuição espacial das espécies no ambiente (FUZINATTO, 2009; LEITE, 2004).

A resolução CONAMA nº 357 estabelece para rios classe 2 concentração de oxigênio dissolvido maiores ou iguais a 5 mg/L. Reis (2009) coloca que os peixes mais exigentes morrem com OD em torno de 4 a 5 mg/L e praticamente todos morrerão com OD em torno de 2 mg/L.

### **Coliformes Termotolerantes (CT)**

Coliformes termotolerantes não se multiplicam facilmente no ambiente externo e ocorrem constantemente na flora intestinal do homem e de animais de sangue quente, sendo capazes de sobreviver de modo semelhante às bactérias patogênicas, atuando, portanto, como potenciais indicadores de contaminação fecal e de patógenos entéricos em corpos d'água (ZULPO et al., 2006).

Almeida e Schwarzbald (2014) enfatizam que a presença dessas bactérias indica risco da ocorrência de outros microrganismos patogênicos, responsáveis pela transmissão de doenças de veiculação hídrica, tais como febre tifóide, febre paratifoide, desintéria bacilar e cólera.

Uma das grandes vantagens no uso de bactérias coliformes como indicadoras de con-

---

<sup>1</sup>Consiste em um processo natural de recuperação de um curso d'água, após ocorrência de interferências externas (BRAGA et al., 2005).

taminação fecal é sua presença em grandes quantidades nos esgotos domésticos, já que cada pessoa elimina bilhões dessas bactérias diariamente. Dessa forma, havendo contaminação da água por esgotos domésticos, é muito grande a chance de se encontrar coliformes em qualquer parte e em qualquer amostra de água (MS, 2006).

A Resolução CONAMA nº 357 (BRASIL, 2005) estabelece o limite até 1 000 NMP/100 ml de coliformes termotolerantes para águas de classe 2, conforme Tabela 2.

### **Potencial de Hidrogênio - pH**

PH é o termo usado para expressar a intensidade da condição ácida ( $H^+$ ) ou alcalina ( $OH^-$ ) de uma solução, em termos de concentração de íons de hidrogênio  $H^+$ , abrangendo a faixa de 0 a 14. Define o caráter ácido, básico ou neutro de uma solução aquosa. Se abaixo de sete, a água é considerada ácida; se acima, alcalina; e, caso seu valor se mantenha na faixa de sete, é tida como neutra.

O pH é definido como o logaritmo negativo da concentração molar de íons de hidrogênio, ou seja,

$$pH = -\log(H^+)$$

O pH afeta o metabolismo de várias espécies aquáticas, altera a solubilidade e consequente disponibilidade de muitas substâncias e afeta a toxicidade de substâncias como metais e formas disponíveis de nitrogênio (CORADI et al., 2009). A influência do pH sobre os ecossistemas aquáticos naturais dá-se diretamente devido a seus efeitos sobre a fisiologia das diversas espécies, uma vez que valores de pH afastados da neutralidade pode afetar o equilíbrio e a taxa das reações químicas (ARAÚJO; OLIVEIRA, 2013). Sendo assim, a vida aquática depende diretamente do pH.

De acordo com Coradi et al. (2009), corpos hídricos não poluídos geralmente apresentam variações de pH próximo da neutralidade e, segundo Lima (2001), o pH da grande maioria dos corpos d'água varia entre 6 e 8. A resolução CONAMA nº 357 define um pH variando de 6 a 9 para rios de classe 2 (BRASIL, 2005).

Valores de pH fora da faixa recomendada podem alterar o sabor da água, além de resultar na inibição de processos metabólicos, na redução de espécies de organismos e contribuir para a corrosão do sistema de distribuição de água, ocorrendo, assim, uma possível extração de ferro, cobre, chumbo, zinco e cádmio, e dificultar a descontaminação das águas (REIS, 2009; FRANÇA, 2009).

### **Demanda Bioquímica de Oxigênio - DBO**

A Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) é uma medida indireta da quantidade de oxigênio necessária para estabilizar (oxidar) a matéria orgânica contida na água, através de

processos bioquímicos de decomposição (PEREIRA, 2004), ou seja, é um indicador indireto do potencial de consumo do oxigênio dissolvido para a decomposição da matéria orgânica. A ocorrência de altos valores desse parâmetro causa uma diminuição dos valores de oxigênio dissolvido na água, o que pode provocar mortandades de peixes e eliminação de outros organismos aquáticos (ANA, 2009; IGAM, 2005a).

A DBO é uma variável fundamental na caracterização do grau de poluição de um recurso hídrico, podendo ser usada para inferir a qualidade geral da água e seu grau de poluição. Quanto maior for a quantidade de matéria orgânica presente na água, maior será a quantidade de oxigênio necessária para a sua decomposição e ao nível que a matéria orgânica baixar, as bactérias decompositoras necessitarão de pequenas quantidade de oxigênio para decompô-la, então a DBO será baixa (PEREIRA, 2004).

Os maiores aumentos em termos de DBO, em um corpo de água, são provocados por despejos de origem predominantemente orgânica como esgotos domésticos (ANA, 2009; IGAM, 2005a). Por conta disso, Leite (2004) coloca que a DBO é utilizado na avaliação de eficiência de unidades de tratamento de esgoto e na definição de limites de descarte de carga orgânica.

Reis (2009) esclarece que concentrações elevadas de DBO, assim como baixas concentrações de OD são indicativos da presença de grande quantidade de matéria orgânica, podendo interferir no equilíbrio aquático e provocar o desaparecimento de peixes e outras formas de vida, além de produzir sabores e odores desagradáveis. A resolução CONAMA nº 357 (BRASIL, 2005) estabelece DBO até 5 mg/L para rios de classe 2.

### **Temperatura**

A temperatura da água é um fator muito importante, pois afeta diretamente todos os processos físico-químicos e biológicos que ocorrem na água, tais como a tensão superficial e a viscosidade, exercendo forte influência na velocidade das reações químicas, nas atividades metabólicas pela absorção de oxigênio dos organismos e na solubilidade de substâncias através da precipitação de compostos (MS, 2006; IGAM, 2005a).

Segundo Fuzinato (2009), a alteração da temperatura da água pode ser causada por fontes naturais (principalmente energia solar) ou antropogênicas (despejos industriais e águas de resfriamento de máquinas). Os organismos aquáticos são afetados por temperaturas fora de seus limites de tolerância térmica, o que causa impactos sobre seu crescimento e reprodução (ANA, 2009).

O aumento da temperatura também acarreta elevação nas taxas de decomposição e, como consequência, pode ocorrer a diminuição dos teores de oxigênio no meio, o que pode impedir o sucesso reprodutivo e de crescimento, ocasionando diminuições de populações pesqueiras e de outras classes de organismos (ANA, 2011). Além disso, elevações de temperatura em um corpo de água também aumentam a taxa de transferência de gases, ocasionando mau cheiro, no caso da

liberação de gases com odores desagradáveis (FUZINATTO, 2009). Quanto mais quente a água, menor seu conteúdo de oxigênio, o que prejudica funções metabólicas e condições de saúde.

Ambientes aquáticos brasileiros apresentam em geral temperaturas na faixa de 20 °C a 30 °C (MS, 2006). A resolução CONAMA nº 357 (BRASIL, 2005) estabelece que os poluentes só podem ser lançados nos corpos hídricos com temperatura inferior a 40 °C e no caso do corpo receptor a variação de temperatura não deverá exceder a 3 °C.

### **Nitrogênio Total - NT**

A presença de nitrogênio na água pode se dar por fontes naturais (nitrogênio atmosférico, fixação química e matéria orgânica de origem vegetal e natural) ou antropogênica (efluentes domésticos, industriais e agrícolas, águas pluviais dos centros urbanos e outros). Em concentrações elevadas, as principais formas de nitrogênio encontradas nas águas (Nitrito, Nitrato e Amônia) acarretam problemas de intoxicação e morte dos peixes e o aumento do consumo do oxigênio dissolvido na água (BÁRBARA, 2006; LIMA, 2001).

O nitrato, principal forma de nitrogênio encontrada na água, ocorre em águas originárias de esgotos domésticos e industriais ou da drenagem de áreas fertilizadas, podendo ser indicador cronológico da carga poluidora (esgoto), dependendo do estágio em que se encontra (CERETTA, 2009).

Concentrações de nitrato superiores a 10 mg/L, conforme determinado pela Portaria 518/2004 (BRASIL, 2004) do Ministério da Saúde, demonstram condições sanitárias inadequadas, pois as principais fontes de nitrato são dejetos humanos e animais. Esse também é o limite máximo estabelecido pela Resolução CONAMA 357 de 2005. Altas concentrações em seres humanos causa a doença metaemoglobinemia, que afeta principalmente crianças (CETESB, 2008b).

### **Fósforo Total - FT**

O fósforo aparece em águas naturais devido principalmente às descargas de esgotos sanitários. Nestes, os detergentes superfosfatados empregados em larga escala domesticamente constituem a principal fonte de fósforo, além da própria matéria fecal, que é rica em proteínas (CETESB, 2008a).

Alguns efluentes industriais, como os de indústrias de fertilizantes, pesticidas, químicas em geral, conservas alimentícias, abatedouros, frigoríficos e laticínios, apresentam fósforo em quantidades excessivas. As águas drenadas em áreas agrícolas e urbanas também podem provocar a presença excessiva de fósforo em águas naturais (FRANÇA, 2009).

Concentrações de fósforo acima de 0,1 mg/L deverão causar problemas pelo desenvolvimento de lodos e crescimento de algas, os quais afetam o uso das águas para abastecimento público, industrial e de recreação, além de causar também os seguintes efeitos nocivos (CERETTA, 2009):



- eutrofização acelerada, com concomitante aumento de odores e gosto na água;
- toxicidade sobre todos os organismos aquáticos especialmente peixes; e
- prejudica o tratamento da água, interferindo na coagulação, floculação e tratamento.

### **Turbidez - Tu**

É o grau de atenuação de intensidade que um feixe de luz sofre ao atravessar uma amostra de água devido à presença de sólidos em suspensão, tais como partículas inorgânicas (areia, silte, argila), detritos orgânicos, algas e bactérias (ANA, 2009; BRAGA et al., 2005). Assim, medições da turbidez de amostras de águas superficiais são importantes, pois demonstra o quanto à passagem de luz na coluna d'água está sofrendo interferência através da presença de material em suspensão de tamanho variado.

A principal fonte de turbidez é a erosão dos solos, quando na época das chuvas as águas pluviais trazem uma quantidade significativa de material sólido para os corpos d'água. Atividades de mineração, assim como o lançamento de esgotos e de efluentes industriais, também são fontes importantes que causam uma elevação da turbidez das águas (ANA, 2009; CETESB, 2008a).

A alta turbidez reduz a fotossíntese da vegetação enraizada submersa e das algas e, esse desenvolvimento reduzido de plantas pode, por sua vez, suprimir a produtividade de peixes (ANA, 2009; IGAM, 2005a). Logo, a turbidez pode influenciar nas comunidades aquáticas. Além disso, afeta adversamente os usos doméstico, industrial e recreacional da água.

Fuzinatto (2009) esclarece que grande parte das águas dos rios e sub-bacias é naturalmente turva em decorrência das características geológicas da bacia de drenagem, ocorrência de altos índices pluviométricos e uso de práticas agrícolas, muitas vezes, inadequadas. A Resolução do CONAMA nº 357 (BRASIL, 2005) estabelece o limite de até 100 UNT de turbidez para “água bruta” classe 2 antes de receber tratamento convencional.

### **Sólidos Totais - ST**

Sólidos nas águas correspondem a toda matéria que permanece como resíduo, após evaporação, secagem ou calcinação da amostra a uma temperatura preestabelecida durante um tempo fixado (MORETTO, 2011).

Assim como a turbidez, a concentração de sólidos totais é muito utilizada como indicativo do efeito do escoamento superficial proveniente de construções, agricultura, atividades de exploração de madeira e outras fontes de descarga (FUZINATTO, 2009).

Quando os resíduos sólidos se depositam nos leitos dos corpos d'água podem causar seu assoreamento, que gera problemas para a navegação e pode aumentar o risco de enchentes. Além disso podem causar danos à vida aquática, pois ao se depositarem no leito destroem os

organismos que vivem nos sedimentos e servem de alimento para outros organismos, além de danificarem os locais de desova de peixes (ANA, 2009; CETESB, 2008a).

Valores elevados de sólidos totais podem indicar não apenas a contaminação orgânica recente dos rios por efluentes domésticos ou industriais, mas também um excesso de matéria sólida levada aos rios por erosão, movimentação de terra na bacia e a perda da mata ciliar (FUZINATTO, 2009). A Resolução CONAMA nº 357 (BRASIL, 2005) estabelece limite até 500 mg/L de sólidos totais em “água bruta” para rios de classe 2.

## 2.2 Modelos de qualidade da água

Conforme argumentado anteriormente, a poluição dos corpos hídricos é extremamente prejudicial ao meio ambiente e a população de modo geral. Portanto, é preciso construir estratégias de avaliação e contenção dos efeitos das substâncias nocivas jogadas na água. Isso implica em estabelecer a relação existente entre a qualidade da água e a forma como as substâncias afluem aos corpos d'água.

Assim, a previsão dos efeitos poluidores sobre uma bacia hidrográfica é uma constante necessidade para os órgãos de gestão ambiental e para os tomadores de decisão nesse âmbito. Nessa perspectiva, a modelagem matemática de qualidade da água se torna uma importante ferramenta para obtenção de informações sobre os processos e interações que ocorrem nos corpos hídricos.

Um modelo pode ser considerado como uma representação simplificada da realidade, auxiliando no entendimento dos processos que envolve tal realidade. Os modelos matemáticos de qualidade da água podem ser aplicados para a estimativa do potencial de autodepuração dos rios, simulação de cenários futuros, processo de gerenciamento da qualidade da água e análise de alternativas de prevenção e correção da degradação dos recursos hídricos (PEREIRA, 2004).

Leite (2004) destaca que uma das grandes vantagens dos modelos matemáticos de qualidade da água é ter uma resposta rápida do comportamento do curso hídrico para diversas condições e variáveis. Mas vale salientar que os modelos não resolvem por si só problemas da realidade, são apenas facilitadores que permitem representar as alternativas propostas e simular condições reais que poderiam ocorrer. Nenhum deles responderá todas as questões ao mesmo tempo e, por essa razão, existem várias classes de modelos de qualidade da água, cada uma com aplicação específica.

Com o avanço tecnológico modelos cada vez mais aperfeiçoados estão sendo desenvolvidos. Porém, em muitos casos, os objetivos propostos ao utilizar modelos matemáticos não são atingidos. Araújo (2005) esclarece que as principais dificuldades encontradas para o uso desses modelos têm sido na obtenção de dados que os validem, na melhor formulação de determinados parâmetros e na complexidade de certos processos que não são representados matematicamente

de forma adequada. Muitas vezes são necessárias sucessivas simplificações que podem não identificar todos os condicionantes da realidade observada ou medida.

Assim, é evidente a necessidade de estudos constantes na área para que as limitações se transformem em possibilidades de melhoria no processo de execução e interpretação das informações.

A quantidade de modelos disponíveis é muito grande, variando largamente em complexidade e no número de parâmetros modelados. Desse modo, a conceituação e interpretação matemática dos fenômenos modelados podem assumir diversas formas e hipóteses.

Sardinha et al. (2008) observa que, na escolha do modelo a ser aplicado, é necessário verificar qual representa melhor as condições da área em estudo, de modo a atingir os objetivos propostos pelo pesquisador. Também se deve considerar os parâmetros de entrada e resposta de interesse, com enfoque na robustez dos resultados simulados e, principalmente na redução dos custos envolvidos com o processo de modelagem (FLECK et al., 2013b).

A seguir é apresentada uma descrição sucinta dos modelos mais aplicados na modelagem de qualidade da água, a saber: Streeter-Phelps, QUAL2E, QUAL2K e QUAL-UFMG. Dentre estes, o mais conhecido e utilizado é o QUAL2E, desenvolvido pela Tufts University em parceria com a Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (USEPA).

### 2.2.1 Modelo Streeter-Phelps

Esse modelo, desenvolvido por Streeter e Phelps em 1925, foi o pioneiro para os modelos matemáticos atuais de qualidade da água e relaciona a quantidade de oxigênio dissolvido em lagos e rios com as descargas de esgotos domésticos nesses sistemas.

O modelo é aplicável a rios de escoamento uniforme e composto por duas equações diferenciais ordinárias: uma modela a oxidação da parte biodegradável da matéria orgânica e a outra, o fluxo de oxigênio proveniente da dinâmica da reaeração atmosférica. Essas equações são nomeadas de, respectivamente, equações de demanda bioquímica de oxigênio e de reaeração (BEZERRA et al., 2008).

Matematicamente as equações se apresentam como:

$$\frac{dL}{dt} = -K_1 L \quad (1)$$

$$\frac{dD}{dt} = -K_1 L + K_2 D \quad (2)$$

e a concentração de oxigênio no tempo é dada por:

$$C(t) = C_s - D(t) \quad (3)$$

onde,  $C(t)$  é a concentração de OD no tempo (mg/L),  $C_s$  a concentração de saturação de OD (mg/L),  $L$  a Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) última (mg/L),  $D$  é o déficit de oxigênio

(mg/L),  $K_1$  é o coeficiente de desoxigenação, ou ainda, taxa de decaimento da matéria orgânica (1/d),  $K_2$  é o coeficiente de reaeração (1/d) e,  $t$  é o tempo (d).

Considerando  $t = x/v$ , onde  $x$  é a posição em relação ao ponto de descarga do efluente (m) e  $v$  a velocidade média do fluxo da água (m/s), as soluções das equações 1 e 2, introduzidas na equação 3, resultam em

$$C(x) = C_s - \left[ \frac{K_1 L_0}{K_2 - K_1} \left( e^{\frac{-K_1}{v}x} - e^{\frac{-K_2}{v}x} \right) + (C_s - C_0) e^{\frac{-K_2}{v}x} \right] \quad (4)$$

Na literatura existem muitos métodos de estimativas dos coeficientes  $K_1$  e  $K_2$  que fornecem aproximações dentro de limites predefinidos. Mas, conforme argumentam (BEZERRA et al., 2008), devido a não linearidade desses coeficientes, não se conseguiu, ainda, uma formulação para casos genéricos.

Apesar da grande simplicidade, esse é considerado o marco dos modelos de qualidade de água e vêm sendo continuamente aperfeiçoado. Reis (2009) afirma que, no Brasil, a maioria das simulações de oxigênio dissolvido é feita utilizando o modelo Streeter-Phelps, devido à sua simplicidade conceitual e menor necessidade de parâmetros e dados de entrada.

Gonçalves et al. (2012) fizeram simulação do processo de autodepuração na bacia do córrego São Simão - SP fazendo uso do modelo Streeter-Phelps, o qual foi compatível com as amostras experimentais feitas e conseguiu identificar as várias zonas de autodepuração do córrego São Simão, indicando a necessidade de tratamento de esgotos em nível primário, com eficiência de 30% de remoção de DBO para que as águas permaneçam com a concentração de oxigênio dissolvido acima de 2 mg/L.

Bezerra et al. (2008) desenvolveram um programa, na linguagem Object Pascal e Matlab, onde foram adaptadas condições de contorno no modelo Streeter-Phelps, representando anaerobiose e contribuições de múltiplas fontes pontuais de efluentes.

Binotto (2012) utilizou o modelo para avaliar a capacidade de autodepuração do arroio Jacutinga, município de Ivorá-RS, baseada nos usos da água e na situação atual da qualidade da água. Foram analisados parâmetros físicos, químicos e biológicos frente aos padrões de qualidade estabelecidos pela resolução CONAMA nº 357/05. Além disso, foi utilizado curvas de probabilidade das variáveis de qualidade da água.

### 2.2.2 Modelo Qual2E

Esse é um modelo unidimensional de estado permanente, desenvolvido pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (USEPA), que permite simular diferentes cenários de desenvolvimento na bacia, levando em conta tanto fontes pontuais quanto difusas de poluição (FLECK et al., 2013a). É o mais conhecido e utilizado atualmente e, depois de ajustado à bacia, com dados coletados, propicia intervenções em locais onde é importante concentrar esforços no planejamento e na tomada de decisões dentro da bacia, por meio da simulação de cenários.

O modelo Qual2E se baseia em equações diferenciais ordinárias para sistemas unidimensionais e de fluxo constante, ou seja, a concentração do material em estudo é homogênea numa mesma seção transversal (SARDINHA et al., 2008). Pode ser utilizado como uma ferramenta para caracterizar a qualidade da água de uma bacia hidrográfica para vários parâmetros simultaneamente, tanto para o rio principal, como para seus tributários.

Esse modelo é capaz de simular 15 variáveis de qualidade de água, a saber: OD (Oxigênio Dissolvido), DBO (Demanda Bioquímica de Oxigênio), temperatura, algas e clorofila, nitrogênio orgânico, amônia, nitrito, nitrato, fósforo orgânico, fósforo dissolvido, coliformes, três constituintes conservativos e mais um constituinte não conservativo arbitrário.

A equação básica do modelo é a de transporte de massa unidimensional, levando em conta os efeitos de advecção e dispersão, conforme segue abaixo:

$$\underbrace{\frac{\partial M}{\partial t}}_{\text{Variação do constituinte}} = \underbrace{\frac{\partial (A_x D_L \frac{\partial C}{\partial x})}{\partial x}}_{\text{Dispersão}} - \underbrace{\frac{\partial (A_x u C)}{\partial x}}_{\text{Advecção}} + \underbrace{V \frac{dC}{dt}}_{\text{Reações Cinéticas}} + \underbrace{S}_{\text{Fontes externas}} \quad (5)$$

Transporte

Em que:

$M$  é a massa do constituinte,  $V$  é volume,  $t$  é o tempo,  $x$  é a distância,  $C$  é a concentração do constituinte,  $A_x$  é a área da seção transversal de cada elemento computacional,  $D_L$  é coeficiente de dispersão longitudinal,  $U$  é a velocidade média de escoamento e  $S$  refere-se às fontes externas (entradas ou retiradas).

O modelo resolve a equação de balanço de massa por diferenças finitas. Nesse método, as derivadas parciais de uma equação diferencial são substituídas por aproximações de diferenças finitas, baseadas em expansões de séries de Taylor nos pontos de interesse.

Cada componente de qualidade da água é integrada no espaço e no tempo. O primeiro termo da equação representa a variação do constituinte ao longo do tempo; o segundo e o terceiro termos representam o transporte de um constituinte quanto à dispersão e quanto à advecção, respectivamente; o quarto termo corresponde às reações cinéticas, ou melhor, à geração e à extinção do constituinte por meio de reações físicas, químicas ou biológicas com outras grandezas ou com o próprio fluido; e o último termo se refere aos lançamentos e às captações.

O modelo QUAL2E é de domínio público e possui uma interface gráfica que permite ao usuário entrar com diferentes valores dos coeficientes envolvidos no balanço de massa dos constituintes, bem como dados climatológicos, geográficos, fatores de correção de temperatura, entre outros. É de fácil compreensão e manuseio, permitindo que seja utilizado por diversos profissionais ou comitês de bacias hidrográficas, sem maiores dificuldades, minimizando o investimento em programas de modelagem de qualidade da água (REIS, 2009; LEITE, 2004).

Reis (2009) detalha as três etapas básicas para modelagem completa utilizando esse modelo, as quais são: discretização, calibração e validação. Teixeira e Porto (2008) esclarecem

que a calibração é uma das etapas mais trabalhosas, pois é nela que são ajustados os parâmetros das equações matemáticas que representam a realidade física, química e biológica de um corpo d'água ao sistema em estudo. Essa etapa requer do usuário sensibilidade quanto aos processos de autodepuração dos rios e dos processos de qualidade das águas, dependendo de uma combinação de dados hidráulicos, hidrológicos e de qualidade da água, demandando tempo e uma certa estrutura de apoio de campo, laboratorial e computacional.

O QUAL2E pode ser operado em regime permanente ou dinâmico. Ao utilizá-lo, o usuário pode optar por uma dessas duas modalidades. No caso da modalidade dinâmica, os dados climatológicos locais são fornecidos em intervalos regulares, desse modo, o balanço de calor apresenta uma resposta diária do sistema hidráulico no que diz respeito às condições de mudança de temperatura. Já no caso permanente, os dados climatológicos médios são fornecidos pelo usuário apenas uma vez, sendo que os mesmos são utilizados pelo modelo em todas as simulações (BÁRBARA, 2006; LIMA, 2001).

Knapik et al. (2008) e Baumle (2005) calibraram o QUAL2E para os parâmetros OD e DBO em estudo da qualidade da água do rio Iguaçu (bacia do Alto Iguaçu), na região metropolitana de Curitiba. Knapik et al. (2008) fazem uma análise crítica sobre o processo de calibração, destacando como critérios distintos podem produzir resultados absolutamente diferentes para a reprodução da realidade física, química e biológica. A abordagem de Baumle (2005) foi desenvolvida sob a perspectiva da análise de benefícios econômicos de cenários futuros de medidas em despoluição hídrica.

Lima (2001) também o utilizou com o objetivo de avaliar e prognosticar a qualidade da água do rio Cuiabá em função do recebimento das cargas pontuais geradas ao longo dos seus principais tributários e, Reis (2009), para fazer a modelagem matemática da qualidade da água no alto rio das Velhas, localizado na bacia do rio São Francisco, em Minas Gerais, de forma a gerar uma ferramenta de apoio à gestão de recursos hídricos.

Em 2002, Gastaldini et al. utilizaram o modelo QUAL2E com o objetivo de gerar uma ferramenta de apoio ao gerenciamento da qualidade da água na bacia hidrográfica do rio Ibicuí, principal afluente do rio Uruguai no território brasileiro. Foram simulados os parâmetros OD, DBO, nitrato, nitrito, fósforo, ferro, alumínio e coliformes termotolerantes. Como resultado da previsão, as concentrações dos parâmetros indicaram como medida preventiva o tratamento de efluentes nas localidades das sub-bacias do rio.

Lima (2001) e Reis (2009) colocam algumas limitações no uso prático do modelo QUAL2E, tais como: simula apenas períodos de tempo durante os quais tanto a vazão do rio como as cargas poluidoras são essencialmente constantes, não considerando a variação desses parâmetros; utiliza simplificações e aproximações para a simulação dos resultados, as quais se constituem nas maiores fontes de erro entre os dados calculados e observados, acarretando falhas na calibração e não prevê a contribuição de cargas não pontuais presentes em quase todas as bacias a serem modeladas.

Apesar desses problemas o modelo é amplamente utilizado em todo o mundo, havendo vários exemplos de aplicação no Brasil, conforme exposto anteriormente.

### 2.2.3 Modelo Qual2K

O QUAL2K, tal como o QUAL2E, é um modelo unidimensional de simulação de qualidade da água de regime permanente e não uniforme, podendo ser utilizado em rios e tributários. Assim como o QUAL2E, é executado dentro do ambiente Microsoft Windows, utiliza o Excel como interface gráfica e todas as operações são programadas na linguagem “Visual Basic” (SILVINO, 2008).

Sendo assim, o QUAL2K surge como uma versão mais moderna do modelo QUAL2E, contudo, além das variáveis abrangidas pelo QUAL2E, o QUAL2K considera outros parâmetros como condutividade, sólidos inorgânicos suspensos, matéria orgânica particulada, patógenos, alcalinidade, carbono inorgânico total e biomassa, nitrogênio e fósforo de algas de fundo (VALORY, 2013; KNAPIK et al., 2008).

Silvino (2008) fez a calibração desse modelo para as variáveis OD, DBO e *Escherichia coli* na bacia do rio Coxipó, no município de Cuiabá-MT. A partir da simulação de diversos cenários, concluiu-se que o crescimento populacional contribui para a deterioração da qualidade da água e que é preciso investir bastante em melhorias no saneamento básico para amenizar os efeitos da poluição.

O modelo foi utilizado também por Sardinha et al. (2008) para modelar a autodepuração do Ribeirão do Meio (Leme-SP), avaliando possíveis entradas antropogênicas em suas águas superficiais. Foi identificado as zonas de autodepuração e a necessidade de tratamento de esgotos em nível secundário.

Os constituintes da qualidade da água que podem ser determinados através do sistema de modelagem QUAL2K estão representados na Tabela 3.

### 2.2.4 Modelo QUAL-UFMG

O modelo QUAL-UFMG, desenvolvido para o ambiente computacional da planilha Excel, possibilita a modelagem da qualidade da água de rios baseando-se nas características do modelo QUAL2K. Os resultados fornecidos pela simulação do modelo são apresentados na forma de tabelas e gráficos.

Esse modelo permite a simulação de qualidade das águas utilizando os parâmetros: Demanda Bioquímica de Oxigênio, Oxigênio Dissolvido, Nitrogênio Total e suas frações (orgânico, amoniacal, nitrito e nitrato), Fósforo Total e suas frações e coliformes termotolerantes (FLECK et al., 2013a; MORÃO JR., 2010).

Apesar de ser baseado no modelo QUAL2E, apresenta algumas simplificações em relação

a este, tais como a não consideração das interações das algas com os demais constituintes, a exclusão da dispersão longitudinal na equação do balanço de massa e a adoção da integração pelo método de Euler (VALORY, 2013).

Tabela 3 – Variáveis simuladas no Qual2K.

Variável	Unidade
Alcalinidade	$mgCaCO_3L^{-1}$
Algas inferiores - N	$mgNm^{-2}$
Algas inferiores - P	$mgPm^{-2}$
Algas inferiores (na superfície da água), biofilme de bactérias heterotróficas (na zona de sedimentação)	$gDm^{-2}$
Carbono Inorgânico Total	$moleL^{-1}$
Condutividade	$Mmhos$
DBOc lento	$mgO_2L^{-1}$
DBOc rápido	$mgO_2L^{-1}$
Detritos	$mgDL^{-1}$
Elemento “X” (constituente definido pelo usuário)	Variável
Fósforo Inorgânico	$\mu gPL^{-1}$
Fósforo Orgânico	$\mu gPL^{-1}$
Nitrato	$\mu gNL^{-1}$
Nitrogênio Amoniacal	$\mu gNL^{-1}$
Nitrogênio Orgânico	$\mu gNL^{-1}$
Oxigênio Dissolvido	$mgO_2L^{-1}$
Patógenos	$cfu100mL^{-1}$
Fitoplâncton	$\mu gAL^{-1}$
Sólidos Inorgânicos Suspensos	$mgDL^{-1}$

O QUAL-UFMG foi calibrado por Morão Jr. em 2010 para estudo de autodepuração de qualidade das águas na bacia do rio Piracicaba-MG. Foram modelados os parâmetros OD, DBO, serie nitrogenada, fósforo (orgânico e inorgânico) e coliformes termotolerantes.

Valory (2013) reproduziu as formulações matemáticas e estruturas conceitual e computacional do QUAL-UFMG para desenvolver um outro modelo de qualidade da água que contemplou as interações físicas de mistura e as reações biológicas que caracterizam o processo natural de autodepuração do corpo d’água. Estudou o emprego combinado do modelo e uma técnica de otimização - o Algoritmo Genético – como alternativa metodológica para determinação de valores de eficiências mínimas dos sistemas de tratamento de esgotos domésticos.

## 2.3 Índice de Qualidade da Água - IQA

O monitoramento da qualidade da água é um instrumento essencial para a gestão dos recursos hídricos. Ele pode ser feito de várias maneiras e diversas ferramentas matemática podem ser utilizadas para este fim, tais como os indicadores de qualidade ambiental. Estes foram criados



em função da crescente preocupação social com os aspectos ambientais do desenvolvimento, processo que requer um número elevado de informações em graus de complexidade cada vez maiores.

Por outro lado, os indicadores tornaram-se fundamentais no processo decisório das políticas públicas e no acompanhamento de seus efeitos. Com isso, torna-se um desafio permanente gerar indicadores e índices que tratem um número cada vez maior de informações, de forma sistemática e acessível, para os tomadores de decisão (CETESB, 2008c).

Nessa linha estão os indicadores de qualidade da água - IQAs, que possibilitam obter informações sobre o grau de poluição de corpos hídricos. Dentre os vários índices de qualidade de água já propostos, o IQA da National Sanitation Foundation (NSF) é o mais utilizado.

O índice de qualidade da água (IQA) é um número simples que expressa a qualidade geral da água em certo local e tempo, baseado em variáveis de qualidade da água. O objetivo de um índice é transformar dados de qualidade da água em informação que pode facilmente ser entendida e utilizada pela população. Esse número é obtido da agregação de dados físico-químicos, bacteriológicos e químicos por meio de metodologias específicas.

O IQA foi criado em 1970, nos Estados Unidos, pela National Sanitation Foundation. A partir de 1975 começou a ser utilizado pela CETESB (Companhia Ambiental do Estado de São Paulo), porém utilizando uma tabela de classificação diferente da utilizada pela NSF (GRUNITZKI et al., 2014; CETESB, 2008c).

O Quadro 1 expõe a classificação originalmente criada pela NSF e a que é adotada pela CETESB para classificação da água como ótima, boa, regular, ruim ou péssima. Neste trabalho é considerada prioritariamente a classificação da CETESB por ser a utilizada no estado da Bahia.

Quadro 1 – Classificação do IQA.

NSF	CETESB	CATEGORIA
$90 < IQA \leq 100$	$79 < IQA \leq 100$	ÓTIMA
$70 < IQA \leq 90$	$51 < IQA \leq 79$	BOA
$50 < IQA \leq 70$	$36 < IQA \leq 51$	REGULAR
$25 < IQA \leq 50$	$19 < IQA \leq 36$	RUIM
$IQA \leq 25$	$IQA \leq 19$	PÉSSIMO

Segundo relatório da ANA de 2004, alguns estados brasileiro utilizam o índice e a classificação da NSF (Alagoas, Minas Gerais, Mato Grosso, Paraná, Rio de Janeiro, Rio Grande do Norte e Rio Grande do Sul), enquanto outros utilizam a classificação adotada pela CETESB (Bahia, Ceará, Espírito Santo, Goiás, Mato Grosso do Sul, Paraíba, Pernambuco e São Paulo).

A criação do IQA baseou-se numa pesquisa de opinião junto a especialistas em qualidade de águas que indicaram as variáveis a serem avaliadas, o peso relativo e a condição com que se apresenta cada parâmetro, segundo uma escala de valores “rating”. Das 35 variáveis indicadoras

de qualidade da água inicialmente propostas, somente nove foram selecionadas. Para cada uma delas foram traçadas curvas médias da variação de qualidade da água em função das suas respectivas concentrações (CETESB, 2008c; IGAM, 2005b).

Cada um dos nove parâmetros que compõem o IQA (oxigênio dissolvido, coliformes fecais, pH, demanda bioquímica de oxigênio, nitrogênio total, fosfato total, temperatura da água, turbidez e sólidos totais) tem um peso específico ( $w$ ) que foi fixado em função da sua importância para a conformação global da qualidade da água, como apresentado na Tabela 4. Assim definido, o IQA reflete a interferência por esgotos sanitários e outros materiais orgânicos, nutrientes e sólidos.

Tabela 4 – Pesos atribuídos aos parâmetros componentes do IQA.

Parâmetro	Unidade	peso ( $w_i$ )
Oxigênio Dissolvido	%	0,17
Coliformes Termotolerantes	(NMP/100 mL)	0,15
pH	-	0,12
Demanda Bioquímica de Oxigênio	$mgL^{-1}$	0,10
Nitrogênio Total	$mgL^{-1}$	0,10
Fósforo Total	$mgL^{-1}$	0,10
Variação de Temperatura	°C	0,10
Turbidez	UNT	0,08
Sólidos Totais	$mgL^{-1}$	0,08

As informações obtidas pelas técnicas de IQA são transformadas em uma forma mais acessível e de fácil entendimento pelas pessoas envolvidas no gerenciamento dos recursos hídricos, pois várias informações são convertidas num único resultado numérico, por meio do produtório ponderado dos nove parâmetros, segundo a seguinte fórmula:

$$IQA = \prod_{i=1}^n q_i^{w_i} \quad (6)$$

Onde: IQA é o índice de qualidade da água, variando de 0 a 100;  $q_i$  representa a qualidade do  $i$ -ésimo parâmetro (entre 0 e 100), obtido da sua respectiva “curva média de variação de qualidade” em função de sua concentração ou medida; e  $w_i$  é o peso correspondente ao  $i$ -ésimo parâmetro (entre 0 e 1), atribuído em função da sua importância para a conformação global de qualidade, sendo que soma dos pesos dos  $n$  parâmetros igual a 1.

A ponderação desses nove parâmetros resulta em um índice variando entre 0 e 100, que corresponde aos níveis de qualidade, apresentados no Quadro 1. Cada faixa de qualidade da água é representada por uma cor, este é outro recurso que permite uma boa comunicação com o público não técnico.

### 2.3.1 Curvas médias de variação dos parâmetros do IQA

#### Curva do parâmetro Oxigênio Dissolvido (OD)

Para determinar o valor  $q_i$  do parâmetro oxigênio dissolvido é preciso calcular o percentual de oxigênio dissolvido que depende da quantidade de oxigênio dissolvido na água e de sua concentração de saturação, dada pela fórmula:

$$C_s = (14.2 \times e^{-0.0212T} - (0.0016 \times C_{Cl} \times e^{-0.0264T})) \times (0.994 - (0.0001042 \times H)) \quad (7)$$

onde:

$C_s$  – concentração de saturação de oxigênio (mg/L)

$T$  – temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ )

$C_{Cl}$  – concentração de cloreto (mg/L)

$H$  – altitude (m)

Depois se calcula a porcentagem de oxigênio dissolvido, dada pela fórmula:

$$\%OD = (OD/C_s) \quad (8)$$

onde:

$\%OD$  – porcentagem de oxigênio dissolvido

$OD$  – oxigênio dissolvido (mg/L)

$C_s$  – concentração de saturação de oxigênio dissolvido (mg/L)

As equações para o cálculo do  $q_i$  do oxigênio dissolvido são:

- Para  $\%OD$  saturação  $\leq 100$

$$q_s = 100 \times (\sin(y_1))^2 - [(2,5 \times \sin(y_2) - 0,018 \times \%OD + 6,86) \times \sin(y_3)] + \frac{12}{e^{y_4} + e^{y_5}}$$

$$\text{Onde: } y_1 = 0,01396 \times \%DO + 0,0873$$

$$y_2 = \frac{\pi}{56} \times (\%OD - 27)$$

$$y_3 = \frac{\pi}{85} - (\%OD - 15)$$

$$y_4 = \frac{\%OD - 65}{10}$$

- Para  $100 < \%OD$  saturação  $\leq 140$

$$q_s = -0,00777142857142832 \times (\%OD)^2 + 1,27854285714278 \times \%OD + 49,8817148572$$

- Para  $\%OD$  saturação  $> 140$

$$q_s = 47$$

A Figura 2 representa a curva média de variação do parâmetro oxigênio dissolvido (ou equivalentemente  $\%OD$  calculado pela Fórmula 8), sob a condição  $\%OD \leq 140$ .

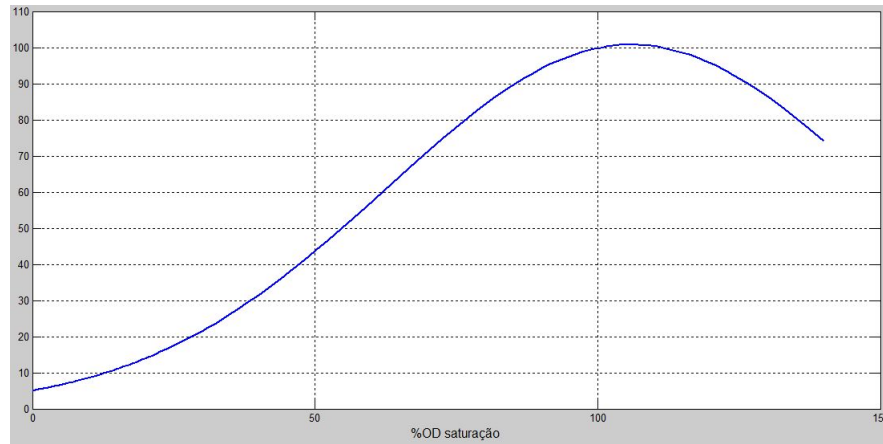


Figura 2 – Curva de variação do parâmetro %OD.

### Curva do parâmetro Coliformes Termotolerantes (CT)

As equações para o Cálculo da  $q_s$  para o parâmetro coliformes termotolerantes são:

- Para  $CT \leq 10^5$  NMP/100 ml  

$$q_s = 98,24034 - 34,7145 \times (\log(CT)) + 2,614267 \times (\log(CT))^2 + 0,107821 \times (\log(CT))^3$$
- Para  $CT > 10^5$  NMP/100 ml  

$$q_s = 3,0$$

A Figura 3 representa a curva média de variação desse parâmetro para  $CT < 10^5$ .

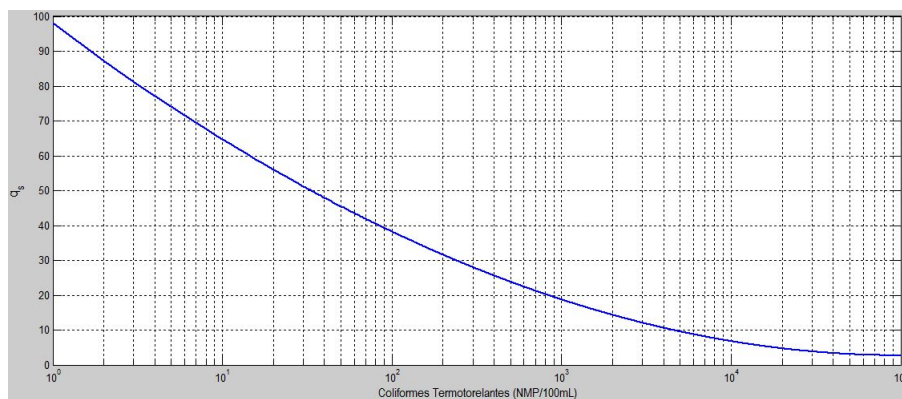


Figura 3 – Curva de variação do parâmetro coliformes termotolerantes.

### Curva do parâmetro Potencial de Hidrogênio (pH)

As equações para o cálculo da  $q_s$  do parâmetro potencial hidrogênico são:

- Para  $pH \leq 2$   

$$q_s = 2,0$$

- Para  $2 < pH \leq 6,9$

$$q_s = -37,1085 + 41,91277 \times pH - 15,7043 \times (pH)^2 + 2,417486 \times (pH)^3 - 0,091252 \times (pH)^4$$

- Para  $6,9 < pH \leq 7,1$

$$q_s = -4,69365 + 21,4593 \times pH - 68,4561 \times (pH)^2 + 21,638886 \times (pH)^3 - 1,59165 \times (pH)^4$$

- Para  $7,1 < pH \leq 12$

$$q_s = -7698,19 + 3262,031 \times pH - 499,494 \times (pH)^2 + 33,1551 \times (pH)^3 - 0,810613 \times (pH)^4$$

- $pH > 12,0$

$$q_s = 3,0$$

A Figura 4 representa a curva média de variação do parâmetro potencial de hidrogênio, no intervalo de 2 a 12.

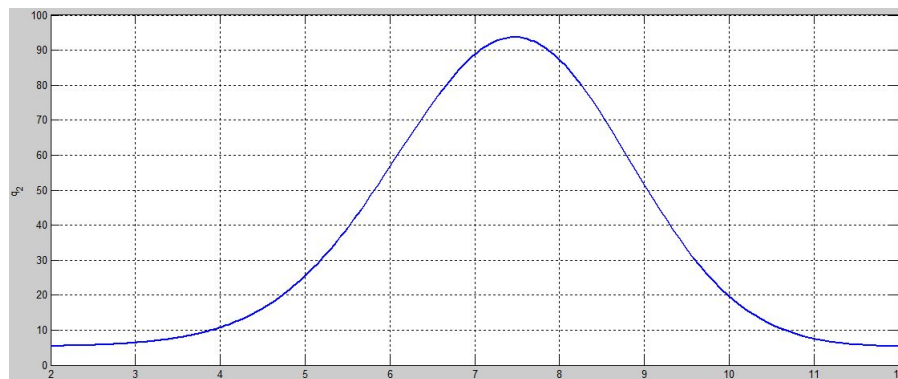


Figura 4 – Curva de variação do parâmetro pH.

### Curva do parâmetro Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO)

As equações para o cálculo da  $q_s$  para o parâmetro DBO são:

- Para  $DBO \leq 30 \text{ mg/L}$

$$q_s = 100,9571 - 10,7121 \times DBO + 0,49544 \times DBO^2 - 0,011167 \times DBO^3 + 0,0001 \times DBO^4$$

- Para  $DBO > 30,0 \text{ mg/L}$

$$q_s = 2,0$$

A Figura 5 representa a curva média de variação do parâmetro DBO, no intervalo  $0 < DBO \leq 30$ .

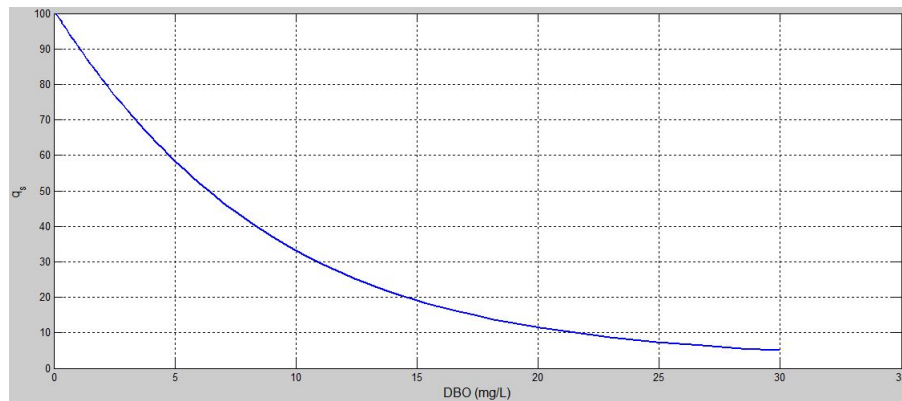


Figura 5 – Curva de variação do parâmetro DBO.

### Curva do parâmetro Nitrogênio Total (NT)

Para o parâmetro nitrogênio total tem-se as seguintes equações:

- Para  $NT \leq 10$  mg/L  
 $q_s = -5,1 \times NT + 100,17$
- Para  $10 < NT \leq 60$   
 $q_s = -22,853 \times \ln(NT) + 101,18$
- Para  $60 < NT \leq 90$   
 $q_s = 10000000000 \times (NT)^{-5,1161}$
- Para  $NT > 90$   
 $q_s = 1$

A Figura 6 representa a curva média de variação do nitrogênio total para valores inferiores a 90 mg/L.

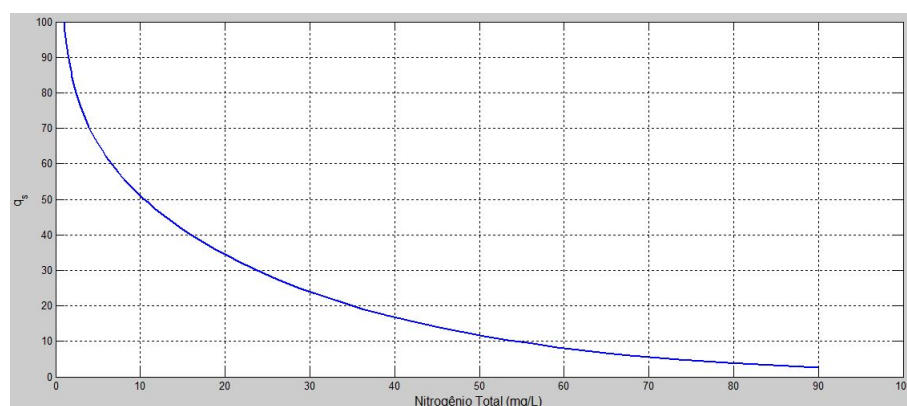


Figura 6 – Curva de variação do parâmetro nitrogênio total.

### Curva do parâmetro Fósforo Total (FT)

As equações para o cálculo da  $q_s$  para o parâmetro fósforo total são apresentadas abaixo:

- Para  $FT \leq 10$  mg/L

$$q_s = 79,7 \times (FT + 0,821)^{-1,15}$$

- Para  $FT > 10$  mg/L

$$q_s = 1,0$$

A curva média de variação do fósforo total, para valores menores ou iguais a 10, está representada na Figura 7.

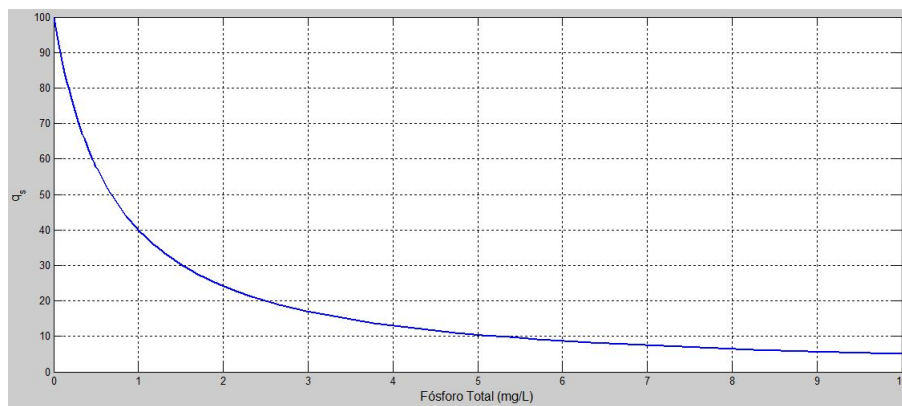


Figura 7 – Curva de variação do parâmetro fósforo total.

### Curva do parâmetro Turbidez (Tu)

As equações para o cálculo da  $q_s$  para o parâmetro turbidez são:

- Para  $Tu \leq 100$

$$q_s = 90,37 \times e^{(-0,0169 \times Tu)} - 15 \cos(0,0571 \times (Tu - 30)) + 10,22 \times e^{(-0,231 \times Tu)} - 0,8$$

- Para  $Tu > 100$

$$q_s = 5,0$$

A Figura 8 representa a curva média de variação do parâmetro turbidez para valores inferiores a 100 NTU.

### Curva do parâmetro Sólidos Totais (ST)

As equações para o cálculo da  $q_s$  para o parâmetro sólidos totais são:

- Para  $ST \leq 500$

$$q_s = 133,17 \times e^{(-0,0027 \times ST)} - 53,17 \times e^{(-0,0141 \times ST)} + [(-6,2e^{(-0,00462 \times ST)}) \sin(0,0146 \times ST)]$$

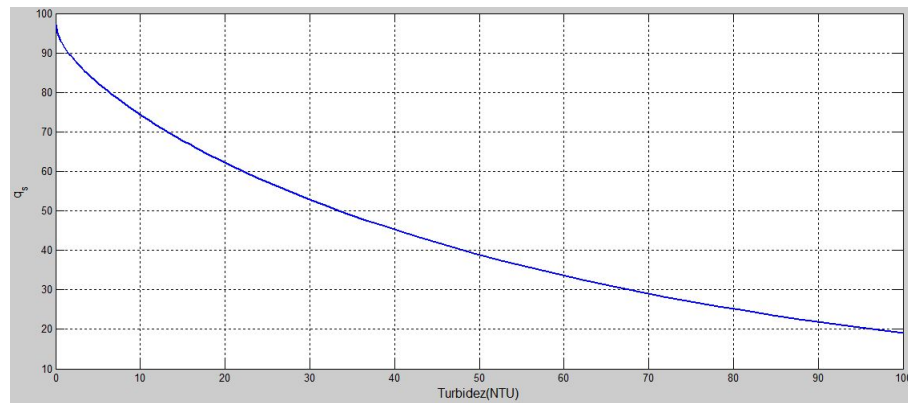


Figura 8 – Curva de variação do parâmetro turbidez.

- Para  $ST > 500$

$$q_s = 30$$

A Figura 9 representa a curva média de variação do parâmetro sólidos totais para valores até 500 mg/L.

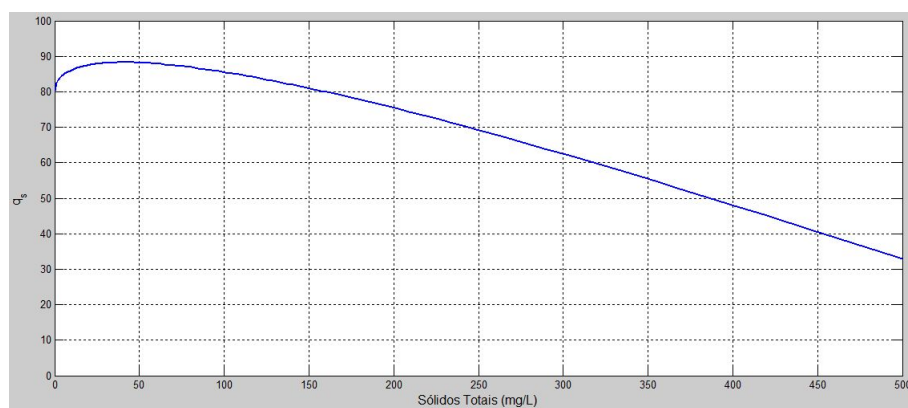


Figura 9 – Curva de variação do parâmetro sólidos totais.

### Curva do parâmetro Variação de Temperatura ( $\Delta T$ )

A Figura 10 representa a curva média da variação de temperatura entre  $-5^{\circ}C$  e  $15^{\circ}C$ .

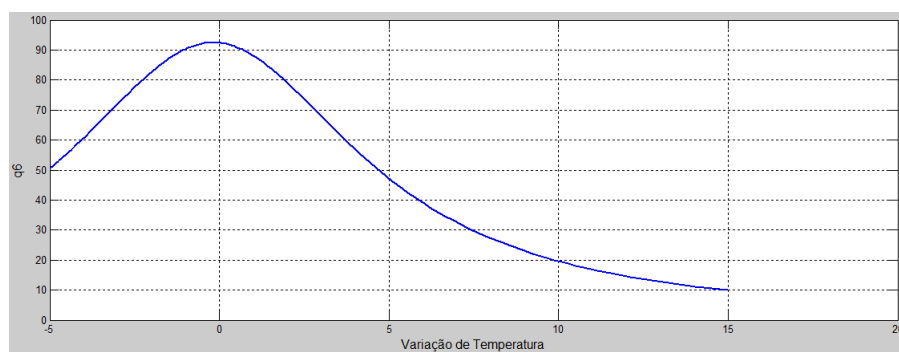


Figura 10 – Curva de variação da temperatura.



No entanto, as equações e curvas desenvolvidas pela NSF levam em consideração as características dos corpos de água e variações climáticas dos EUA, sendo a variação de temperatura de equilíbrio o principal parâmetro afetado. Como no nosso caso, os ambientes não recebem cargas térmicas elevadas, as equações não condizem com a realidade brasileira, pois a variação da temperatura de equilíbrio é próxima de zero, então tem-se (IGAM, 2005b):

$$\Delta T \cong 0$$

- Para  $-0,625 < \Delta T \leq 0,625$

$$q_s = 4,8 \times \Delta T + 93$$

$$q_s = 4,8 \times 0 + 93$$

$$q_s = 93$$

Então, o  $q_s$  utilizado para variação de temperatura neste estudo é um valor constante igual a 93.

### 2.3.2 Reestruturação das equações das curvas médias de variação dos parâmetros do IQA

Grunitzki et al. (2014) realizaram a reestruturação das equações que descrevem as curvas médias dos indicadores de qualidade que compõem o IQA, no intuito de tornar os cálculos mais simples e dinâmicos. As equações reestruturadas das curvas para cada um dos nove parâmetros são descritas no Quadro 2. Estas foram comparadas e validadas com as curvas desenvolvidas pela NSF. A Figura 11 apresenta a curva dos nove parâmetros já abordados anteriormente utilizando as equações propostas por Grunitzki et al. (2014).

### 2.3.3 Vantagens e limitações do IQA

As principais vantagens desse índice são a facilidade de comunicação com o público leigo e o fato de representar uma média de diversas variáveis em um único número, combinando unidades de medidas diferentes em uma única unidade, o que favorece a interpretação, compreensão e divulgação dos resultados. Funciona como uma boa ferramenta de avaliação da qualidade da água de uma bacia hidrográfica, principalmente, quando o principal problema é contaminação por esgoto doméstico sem tratamento.

O IQA pode ser utilizado para diversos fins, tais como evidencia (NUNES et al., 2011) :

- Informar sobre a qualidade da água ao público e aos gestores públicos;
- Identificar problemas de qualidade da água que demandem estudos especiais em trechos de rios;
- Comparar condições ambientais em diferentes áreas geográficas;

Quadro 2 – Equações que descrevem as curvas médias de variação dos indicadores de qualidade da água.

Variável	Equação ajustada à curva	Parâmetros
CT	$q_1 = A + B * \log(CT) + C * \log(CT)^2 + D * \log(CT)^3$	$A = 98,03$ $B = -36,45$ $C = 3,138$ $D = 0,06776$
PH	$q_2 = A * PH^{(B*PH+C*PH^2)} + 5,213$	$A = 0,05421$ $B = 1,23$ $C = -0,09873$
DBO	$q_3 = A * \exp(B * DBO)$	$A = 102,6$ $B = -0,01101$
NT	$q_4 = A * NT^{(B+C*NT)}$	$A = 98,96$ $B = -0,2232$ $C = -0,006457$
FT	$q_5 = A * \exp(B * FT^C)$	$A = 213,7$ $B = -1,680$ $C = 0,3325$
$\Delta T$	$q_6 = \frac{1}{A*(\Delta T+B)^2+C}$	$A = 0,0003869$ $B = 0,1815$ $C = 0,01081$
Tu	$q_7 = A * \exp(B * TU + C * \sqrt{TU})$	$A = 97,34$ $B = -0,01139$ $C = -0,04917$
ST	$q_8 = A * \exp(B * ST + C * \sqrt{ST}) + D * ST$	$A = 80,26$ $B = -0,00107$ $C = 0,03009$ $D = -0,1185$
%OD	$q_9 = A * \exp\left(\frac{(\%OD+B)^2}{C}\right)$	$A = 100,8$ $B = -106$ $C = -3745$

Fonte: (GRUNITZKI et al., 2014; IGAM, 2005b).

Nota: CT - Coliformes Termotolerantes; PH - Potencial de Hidrogênio; DBO - Demanda Bioquímica de Oxigênio; NT - Nítrógeno Total; FT - Fósforo Total;  $\Delta T$  - Variação de Temperatura; Tu - Turbidez; ST - Sólidos Totais; %OD - Percentual de Oxigênio Dissolvido;  $q_n$  - valor de qualidade de água do n-ésimo parâmetro.

- Análise de tendências, avaliação de mudanças na qualidade ambiental, em determinado período de tempo e acompanhamento da qualidade dos recursos hídricos superficiais;
- Avaliar o desempenho de programas de controle da poluição e fiscalização, o que pode ajudar na determinação do cumprimento da legislação ambiental;
- Servir de instrumentos para a gestão dos recursos hídricos, auxiliando no processo de decisão de distribuição de recursos e determinação de prioridades;
- Pesquisa científica.

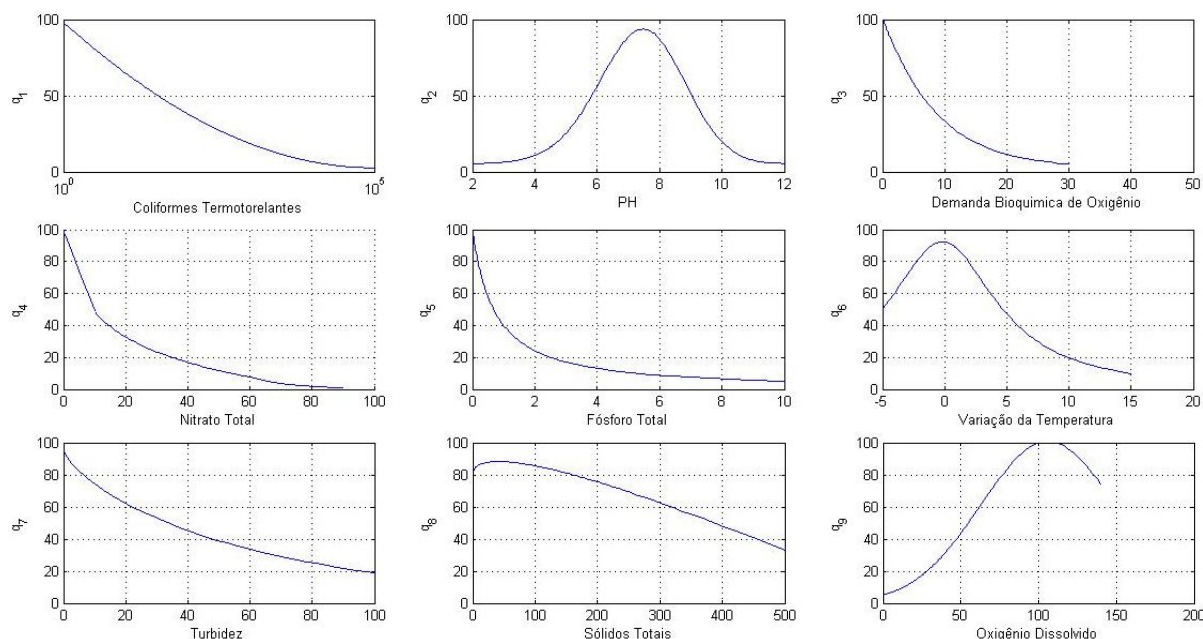


Figura 11 – Curvas médias de variação de qualidade das águas.

No entanto, sua principal desvantagem consiste na perda de informações das variáveis individuais. Além disso, os efeitos originários de outras fontes de poluentes não são representados, tendo em vista que o índice foi desenvolvido para avaliar o impacto dos esgotos domésticos nas águas de abastecimento público (IGAM, 2005a; CETESB, 2008c).

Outro problema com o processo de indexação, conforme evidenciado por Moretto (2011), é a possibilidade de alguns parâmetros terem uma influência desproporcional sobre o resultado final, produzindo um índice induzido. Parâmetros como pH, OD e coliformes que apresentam os maiores pesos podem influenciar muito no índice final em detrimento de outros que possuem menor peso. Além disso, no caso de não se dispor do valor de alguma das nove variáveis, o cálculo do IQA é inviabilizado.

As atividades agrícolas e industriais, entre outras, geram um elevado número de poluentes, entre eles, metais pesados, pesticidas e compostos orgânicos. Estes poluentes não são analisados no cálculo do IQA, e sabe-se que a presença desses compostos no ambiente afeta de forma negativa a qualidade da água.

Sendo assim, o índice, apesar de fornecer uma avaliação integrada, jamais substituirá uma avaliação detalhada da qualidade das águas de uma determinada bacia hidrográfica. Em função das limitações do IQA, a CETESB desenvolveu outros índices de qualidade da água, conforme apresentado no Quadro 3.

Os parâmetros de qualidade que fazem parte do cálculo do IQA foram escolhidos em função do potencial de refletir principalmente a contaminação dos corpos hídricos ocasionada pelo lançamento de esgotos domésticos. Hoje em dia, existem preocupações ambientais mais amplas. A revisão e criação de novos indicadores podem favorecer uma visão mais precisa sob

vários outros aspectos. Entretanto, diante do fato do saneamento ser ainda um dos principais problemas de depreciação dos corpos hídricos no Brasil, esse índice continua com importância relevante (MIDAGLIA, 2011).

Quadro 3 – Índices de qualidade da água utilizados pela CETESB, conforme propósitos de usos dos recursos hídricos.

Índices	Variáveis
ISTO - Índice de substâncias tóxicas e organolépticas	Variáveis indicadoras de substâncias tóxicas: Teste de Ames – genotoxicidade, potencial de formação de trihalometanos, número de cianobactérias, cádmio, chumbo, cromo, mercúrio e níquel. Variáveis da qualidade organoléptica: ferro, manganês, alumínio, cobre e zinco.
IAP - Índice da qualidade de água bruta para fins de abastecimento público	IQA e ISTO
IB - Índice de balneabilidade	Coliformes termotolerantes e Escherichia coli
IET - Índice de estado trófico	Transparência, clorofila e fósforo total
IPMCA – Índice de parâmetros mínimos para a preservação da vida aquática	Substâncias tóxicas: chumbo, cobre, zinco, cromo, mercúrio, níquel, cádmio, surfactantes e fenóis. Parâmetros essenciais: oxigênio dissolvido, pH e toxicidade.
IQA - Índice de qualidade da água	Temperatura, pH, oxigênio dissolvido, demanda química de oxigênio, coliformes termotolerantes, nitrogênio total, fósforo total, resíduo total e turbidez.
IVA - Índice de qualidade da água para a proteção da vida aquática	IPMCA e IET

Fonte: (CETESB, 2008c).

Apesar das críticas ao IQA, ele é um instrumento muito útil para avaliar o desempenho de programas de controle da poluição, servindo como indicador para auxiliar a alocação de recursos nas diferentes áreas geográficas a fim de determinar prioridades. Além disso, são úteis na transmissão de informações a respeito da qualidade da água, podendo dar uma ideia geral da tendência de evolução da qualidade ao longo do tempo.

## 2.4 Lógica e conjuntos fuzzy

### 2.4.1 Lógica Fuzzy

Quando se fala em lógica, num contexto de ciência, normalmente a associação feita é com a “Lógica Formal”, também chamada lógica clássica, booleana ou Aristotélica. Nela, as afirmações consideradas e estudadas - as proposições - são restritas àquelas passíveis de receber um, e apenas um, entre dois valores lógicos: falso ou verdadeiro. Trata-se, assim, de um sistema bivalente, embasado, primordialmente, em dois princípios: o da não-contradição (“Uma

proposição não pode ser falsa e verdadeira, simultaneamente.”) e o do terceiro excluído (“Uma proposição ou é falsa, ou é verdadeira, não havendo uma terceira possibilidade.”) (CUNHA, 2004).

No entanto, muitas das experiências humanas não podem ser classificadas simplesmente como verdadeiras ou falsas, sim ou não, branco ou preto. Um sim ou um não como resposta a essas questões é, na maioria das vezes, incompleto. Lidar com fatores como ambiguidade, incerteza e informações vagas para a resolução de problemas é uma característica do pensamento humano, articulado por meio de conhecimentos prévios e experiências.

A maioria dos problemas do mundo real possuem algum grau de incerteza e subjetividade, sejam em termos dos parâmetros envolvidos ou nas próprias definições intrínsecas ao problema. Nesses casos, modelos determinísticos não dão conta de captar e modelar todas as informações.

A lógica fuzzy, também chamada de lógica nebulosa ou difusa, foi concebida exatamente para lidar com situações e problemas sujeitos a subjetividades e incertezas, contradizendo os dois principais princípios da lógica clássica (não-contradição e terceiro excluído). Assim, a lógica fuzzy permite representar valores lógicos intermediários entre verdadeiro e falso, possibilitando o tratamento de atributos imprecisos, como altura (alto, baixo e médio), velocidade (rápido, lento e normal), tamanho (pequeno, médio, grande e extra grande), quantidade (muito, razoável e pouco) etc. Ela combina lógica polivalente, teoria das probabilidades, inteligência artificial e redes neurais, visando representar o modo humano de pensar e se expressar (CUNHA, 2004).

Quando um determinado problema apresenta um grande grau de incerteza, para solucioná-lo é necessário que se utilize um modelo matemático que contemple essa especificidade e não desconsidere aspectos que possam ser ignorados na aplicação de lógicas tradicionais. Cox (1994) afirma que para esses casos a lógica fuzzy é amplamente recomendada pois apresenta um modelo capaz de combinar a imprecisão associada aos eventos naturais e o poder computacional das máquinas, produzindo sistemas de respostas inteligentes.

Introduzida oficialmente no meio científico e acadêmico pelo professor Lotfi Zadeh em 1965 com a publicação do artigo “Fuzzy Sets” no jornal “Information and Control”, a lógica fuzzy proporciona novos parâmetros conceituais relacionados à teoria dos conjuntos matemáticos (JANÉ, 2004).

A principal intenção de Zadeh era a de dar um tratamento matemático a certos termos linguísticos subjetivos, como “aproximadamente”, “em torno de”, dentre outros. Esse seria um primeiro passo no sentido de se programar e armazenar conceitos vagos em computadores, tornando possível a produção de cálculos com informações imprecisas, a exemplo do que faz o ser humano (JAFELICE et al., 2005; BARROS; BASSANEZI, 2010).

Uma das grandes vantagens do uso da lógica fuzzy é a possibilidade de traduzir expressões verbais, vagas, imprecisas e qualitativas, comuns na comunicação humana, em valores numéricos, permitindo a manipulação computacional.

Ao contrário da lógica booleana, a lógica fuzzy é multi-valorada - ao invés de um elemento ser 100% pertencente a um conjunto ou outro, ou uma proposição ser inteiramente verdadeira ou falsa, a lógica fuzzy trata com graus de pertinência e graus de veracidade, isto é, coisas podem ser parcialmente verdadeiras e parcialmente falsas ao mesmo tempo. Nesse contexto, a lógica booleana passa a ser um caso particular da lógica fuzzy (BARBALHO, 2001).

Em resumo, segue algumas características da lógica fuzzy, Malutta (2004):

- Está baseada em palavras e não em números, ou seja, os valores verdade podem ser expressos linguisticamente. Por exemplo: quente, muito frio, verdade, longe, perto, rápido, vagaroso, médio etc.;
- Processam informações imprecisas, vagas, nebulosas, incompletas;
- possui vários modificadores de predicado, como por exemplo: muito, mais ou menos, pouco, bastante, médio etc.;
- possui também um amplo conjunto de quantificadores, como por exemplo: poucos, vários, em torno de, usualmente;
- faz uso das probabilidades linguísticas, como por exemplo: provável, improvável, que são interpretadas como números fuzzy e manipuladas pela sua aritmética;
- manuseia todos os valores entre 0 e 1, tomando estes um limite, apenas;
- Sistemas difusos adaptativos podem ser construídos e associados a outras técnicas de busca ou classificação como redes neuronais e algoritmos genéticos, por exemplo.

A força e versatilidade da Lógica Fuzzy deriva da sua habilidade em inferir conclusões e gerar respostas baseadas em informações vagas, ambíguas e qualitativamente incompletas e imprecisas (NGUYEN et al., 2003; ROSS, 2004). Nesse aspecto, os sistemas de base fuzzy têm habilidade de raciocinar de forma semelhante a dos humanos e seu comportamento é representado de maneira muito simples e natural, levando à construção de sistemas compreensíveis e de fácil manutenção (PIMENTEIRA, 2010).

Simões e Shaw (2007) evidencia as seguintes vantagens da utilização da lógica fuzzy:

- mecanismo de raciocínio similar ao do ser humano por meio do uso de termos linguísticos;
- modelagem de conhecimento de senso comum;
- conhecimento ambíguo e conhecimento impreciso, mas racional;
- técnica de aproximação universal;
- robustez e tolerância à falha;

- baixo custo de desenvolvimento e de manutenção.

A lógica fuzzy se fundamenta na existência de conjuntos, chamados conjuntos nebulosos, cuja definição, propriedades e operações são obtidas da generalização da teoria de conjuntos clássicos, recaindo esta em um caso particular da teoria de conjuntos fuzzy (ORTEGA, 2001). A seguir é feita uma abordagem dos conjuntos fuzzy, fazendo um paralelo com a teoria dos conjuntos clássicos.

### 2.4.2 Conjuntos Fuzzy

Para levar em conta as infinitas graduações entre verdadeiro e falso, Zadeh expandiu a ideia de conjunto clássico para o que chamou de conjunto difuso (ZADEH, 1965). Assim como os conjuntos clássicos (ou ordinários), os conjuntos difusos também são definidos sobre um domínio (Universo de Discurso), mas diferem por não possuírem uma fronteira claramente definida. Nesses conjuntos, os elementos podem ter pertinência parcial, e a transição entre um elemento pertencente ao conjunto e um não-pertencente é gradual.

Para obter a formalização matemática de um conjunto fuzzy, Zadeh baseou-se no fato de que qualquer conjunto clássico pode ser caracterizado por uma função: sua *função característica*, cuja definição segue abaixo.

Seja  $U$  um conjunto e  $C$  um subconjunto de  $U$ . A função característica de  $C$  é dada por

$$\chi_C(x) = \begin{cases} 1, & \text{se } x \in C \\ 0, & \text{se } x \notin C \end{cases} \quad (9)$$

Desta forma,  $\chi_C$  é uma função cujo domínio é  $U$  e a imagem está contida no conjunto  $\{0, 1\}$ , com  $\chi_C(x) = 1$  indicando que o elemento  $x$  está em  $C$ , enquanto  $\chi_C(x) = 0$  indica que  $x$  não é elemento de  $C$ . Assim, a função característica descreve completamente o conjunto  $C$  já que indica quais elementos do conjunto universo  $U$  são elementos também de  $C$ .

Um subconjunto fuzzy  $A$  de um conjunto clássico  $U$  é caracterizado por uma função  $\mu : U \rightarrow [0, 1]$ , chamada *função de pertinência* do conjunto fuzzy  $A$ . O valor  $\mu(x) \in [0, 1]$  indica o grau com que o elemento  $x$  de  $U$  está no conjunto fuzzy  $A$ , com  $\mu(x) = 0$  e  $\mu(x) = 1$  indicando, respectivamente, a não pertinência e a pertinência completa de  $x$  a  $A$ .

O conjunto  $U$  é chamado de *Universo de Discurso* e cada valor da função é chamado grau de pertinência. Pode-se representar também a função pertinência do elemento  $x$  da seguinte maneira:

$$\mu(x) = \begin{cases} 1 & \text{se, e somente se } x \in A \\ 0 & \text{se, e somente se } x \notin A \\ 0 < \mu(x) < 1 & \text{se } x \text{ pertence parcialmente a } A \end{cases} \quad (10)$$

O conceito central na teoria de conjuntos difusos, portanto, é o da função de pertinência, que representa, numericamente, o grau de certeza com que um elemento pertence a um conjunto (BARBALHO, 2001). A definição de um subconjunto fuzzy foi obtida simplesmente ampliando-se o contradomínio da função característica, que é o conjunto  $\{0, 1\}$ , para o intervalo  $[0, 1]$ . Neste sentido, a função de pertinência é uma generalização da função característica e um conjunto clássico é um caso particular de conjunto fuzzy (KASABOV, 1998).

Barros e Bassanezi (2010) apresentam dois exemplos que distinguem bem esses conjuntos. O primeiro é o exemplo dos conjuntos dos números pares e ímpares, em que o conjunto  $P$ , dos números pares, tem função característica  $\chi_P(n) = 1$  se  $n$  é par e  $\chi_P(n) = 0$  se  $n$  é ímpar. Portanto o conjunto dos números pares é um particular conjunto fuzzy já que  $\chi_P(n) \in [0, 1]$ . Nesse caso foi possível descrever todos os elementos de  $P$  a partir da função característica porque todo número natural ou é par ou é ímpar.

O outro exemplo apresenta um conjunto cuja fronteira não está muito bem definida. Considere o subconjunto fuzzy  $F$  dos números naturais pequenos (ou próximos de zero):

$$F = \{n \in \mathbb{N} : n \text{ é pequeno}\}$$

O número 0 (zero) pertence a esse conjunto? E o número 1000? Considerando a teoria fuzzy, pode-se dizer que ambos pertencem a  $F$  porém com diferentes graus de pertinência, de acordo com a propriedade que o caracteriza. Ou seja, a função de pertinência de  $F$  deve ser “construída” de forma coerente com o termo “pequeno” que caracteriza seus elementos no conjunto universo dos números naturais. Uma possibilidade para a função de pertinência de  $F$  apresentada por Barros e Bassanezi (2010) é

$$\mu(n) = \frac{1}{n+1}$$

Nesse caso, pode-se dizer que o número 0 pertence a  $F$  com grau de pertinência  $\mu(0) = 1$ , enquanto 1000 pertence a  $F$  com grau de pertinência  $\mu(1000) = 0,0011$  (veja representação gráfica na Figura 12). Existem infinitas funções de pertinência que poderia descrever um “número pequeno”, tais como  $\mu(n) = \frac{1}{n^2+1}$  e  $\mu(n) = \frac{n+1}{n^4+1}$ , cada uma destas produz conjuntos fuzzy distintos.

Assim, além de um conjunto fuzzy ser caracterizado por uma função de pertinência, o grau de pertinência pode ser considerado como uma medida que expressa a possibilidade de que um dado elemento seja membro do conjunto. A escolha de qual das funções deve ser adotada para representar o conjunto fuzzy em questão depende de fatores que estão relacionados com o contexto do problema a ser estudado.

Como a teoria dos conjuntos fuzzy pode ser considerada uma extensão da teoria dos conjuntos clássicos, as operações entre conjuntos da teoria clássica também se estendem a teoria fuzzy, assim como as propriedades.

Dessa forma, sendo  $A$  e  $B$  conjuntos fuzzy, as funções de pertinência que representam os conjuntos fuzzy união, interseção e complementar desses conjuntos são dadas por,  $\forall x \in U$ ,



União:  $\mu_{A \cup B} = \max\{\mu_A(x), \mu_B(x)\}$

Interseção:  $\mu_{A \cap B} = \min\{\mu_A(x), \mu_B(x)\}$

Complementar:  $\mu_{A'} = 1 - \mu_A(x)$

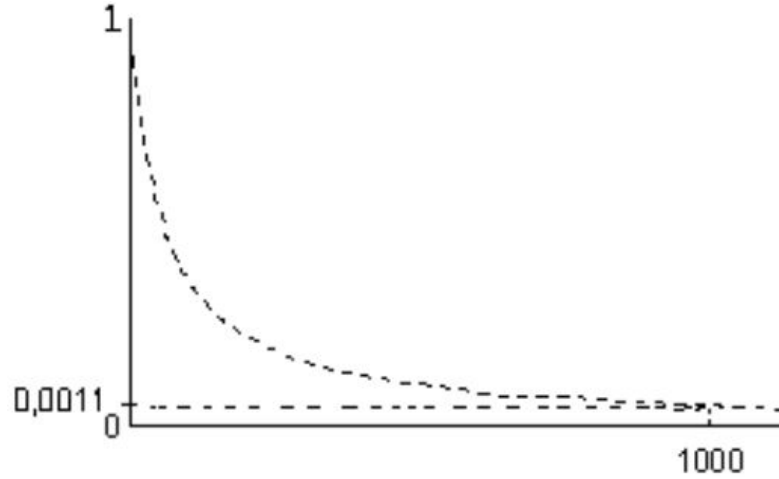


Figura 12 – Conjunto fuzzy dos números naturais “pequenos”.

Fonte: Adaptado de Jafelice et al. (2005)

Os gráficos da Figura 13 representam essas operações com conjuntos fuzzy e o Quadro 4 suas propriedades. Observe que todas as propriedades aplicáveis aos conjuntos booleanos são também aplicáveis aos conjuntos fuzzy, exceto as propriedades relativas ao conjunto fuzzy e seu complemento, marcadas no quadro com asterisco. Isso porque a lógica fuzzy não obedece as leis da contradição ( $A \cap A' = \emptyset$ ) e do terceiro excluído ( $A \cup A' = U$ ), conforme já argumentado.

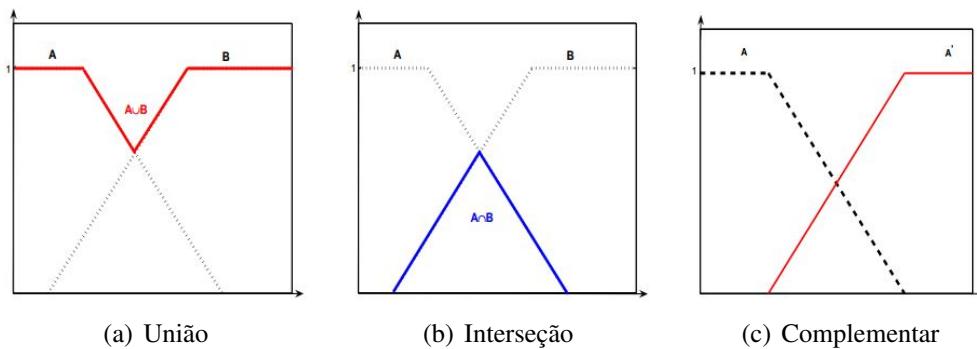


Figura 13 – Operações entre conjuntos fuzzy.

A combinação entre conjuntos fuzzy é feita através de operações especiais como as t-normas e as t-conormas (que definem as conjunções e as disjunções, respectivamente). Essas são generalizações dos operadores interseção e união.

**T-normas** triangular é uma operação binária  $T : [0, 1] \times [0, 1] \rightarrow [0, 1]$  satisfazendo as seguintes condições:

- Comutatividade:  $T(x, y) = T(y, x)$ ;

- Associatividade:  $T(x, T(y, z)) = T(T(x, y), z)$ ;
- Monotonicidade: Se  $x \leq y$  e  $w \leq z$  então  $T(x, w) \leq T(y, z)$ ;
- Condições de fronteira:  $T(0, x) = 0$ ,  $T(1, x) = x$ .

Quadro 4 – Propriedades dos conjuntos fuzzy.

Propriedade comutativa	$A \cap B = B \cap A$ $A \cup B = B \cup A$
Propriedade associativa	$(A \cap B) \cap C = A \cap (B \cap C)$ $(A \cup B) \cup C = A \cup (B \cup C)$
Idempotência	$A \cap A = A$ $A \cup A = A$
Distributividade em relação à interseção	$A \cap (B \cup C) = (A \cap B) \cup (A \cap C)$
Distributividade em relação à união	$A \cup (B \cap C) = (A \cup B) \cap (A \cup C)$
Conjunto fuzzy e o seu complemento*	$A \cap A' \neq \emptyset$ $A \cup A' \neq U$
Conjunto fuzzy e o conjunto nulo	$A \cap \emptyset = \emptyset$ $A \cup \emptyset = A$
Conjunto fuzzy e o conjunto universal	$A \cap U = A$ $A \cup U = U$
Involução	$(A')' = A$
Teorema de Morgan	$(A \cap B)' = A' \cup B'$ $(A \cup B)' = A' \cap B'$

Fonte: Adaptado de Simões e Shaw (2007).

Uma t-norma que satisfaz  $T(x, x) = x$  para todo  $x$  é chamada idempotente. A t-norma do mínimo é única idempotente (NGUYEN et al., 2003).

Segue abaixo alguns exemplos de t-normas:

1. Intersecção Padrão:  $T : [0, 1] \times [0, 1] \rightarrow [0, 1]$  com  $T(x, y) = \min(x, y)$
2. Produto Algébrico:  $T : [0, 1] \times [0, 1] \rightarrow [0, 1]$  com  $T(x, y) = xy$ ,
3. Diferença Limitada:  $T : [0, 1] \times [0, 1] \rightarrow [0, 1]$  com  $T(x, y) = \max(0, x + y - 1)$
4. Interseção Drástica:  $T : [0, 1] \times [0, 1] \rightarrow [0, 1]$  com  $T(x, y) = \begin{cases} x, & \text{se } y = 1 \\ y, & \text{se } x = 1 \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$

As funções que obedecem a  $T$  podem ser utilizadas como operador de interseção entre os conjuntos fuzzy. A interseção equivale ao operador AND.

**Co-norma** triangular (s-norma) é uma operação binária  $S : [0, 1] \times [0, 1] \rightarrow [0, 1]$  satisfazendo as seguintes condições:

- Comutatividade:  $S(x, y) = S(y, x)$ ;
- Associatividade:  $S(x, S(y, z)) = S(S(x, y), z)$ ;
- Monotonicidade: Se  $x \leq y$  e  $w \leq z$  então  $S(x, w) \leq S(y, z)$ ;
- Condições de fronteira:  $S(0, x) = x$ ,  $S(1, x) = 1$ .

Segue abaixo alguns exemplos de s-normas:

1. União Padrão:  $S : [0, 1] \times [0, 1] \rightarrow [0, 1]$  com  $S(x, y) = \max(x, y)$
2. Soma Algébrica:  $S : [0, 1] \times [0, 1] \rightarrow [0, 1]$  com  $S(x, y) = x + y - xy$ ,
3. Soma Limitada:  $S : [0, 1] \times [0, 1] \rightarrow [0, 1]$  com  $S(x, y) = \min(1, x + y)$
4. União Drástica:  $S : [0, 1] \times [0, 1] \rightarrow [0, 1]$  com  $S(x, y) = \begin{cases} x, & \text{se } y = 0 \\ y, & \text{se } x = 0 \\ 1, & \text{caso contrário} \end{cases}$

Assim, as funções que obedecem a  $S$  podem ser utilizadas como um operador de união entre conjuntos fuzzy. A união representa o operador OR.

### 2.4.3 Sistemas Fuzzy

Sistemas baseados em lógica fuzzy vêm sendo amplamente adotados em diversas áreas do conhecimento. Em termos de aplicação, os japoneses sempre se destacaram, inaugurando em 1987 o primeiro trem controlado por lógica fuzzy, no sistema de metrô de Sendai, no Japão. Neste mesmo ano, a Yamaha desenvolveu um helicóptero não tripulado, o Yamaha-50, totalmente controlado por um controlador fuzzy (RIBEIRO; MELO, 2013).

Um sistema lógico fuzzy é composto por três etapas básicas: fuzzificação, inferência e defuzzificação (veja ilustração na Figura 14).

A primeira etapa é a de fuzzificação, onde as variáveis do problema são transformadas em valores fuzzy (valores de entrada). Para cada parâmetro de entrada associa-se uma função de pertinência, que permite obter o grau de possibilidade da proposição. As entradas são modeladas por meio de conhecimento de especialistas ou por meio de uma base de dados. A etapa seguinte é a inferência, onde as proposições (regras) são definidas, examinadas, gerando uma saída fuzzy. Por fim, no processo de defuzzificação, a saída fuzzy obtida na etapa anterior, é convertida em saída crisp (ou seja, saída clássica).

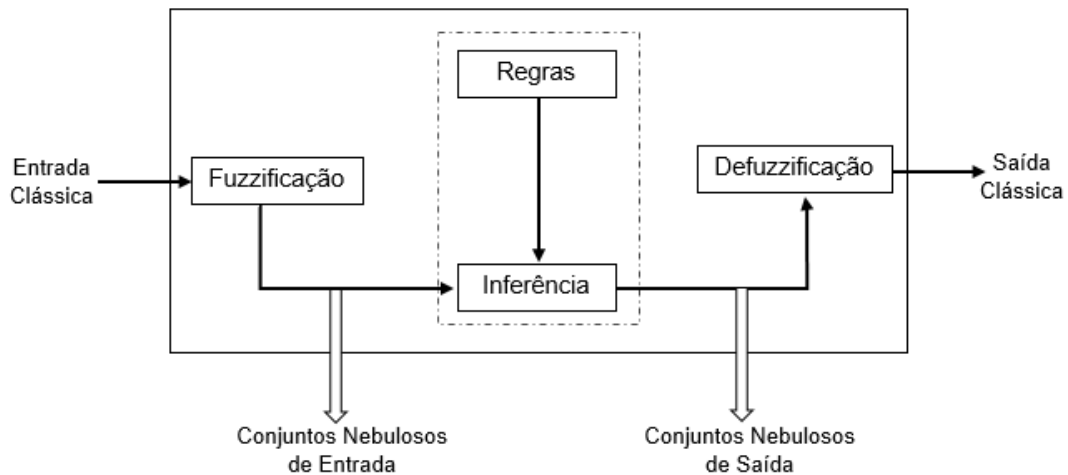


Figura 14 – Representação de um sistema fuzzy.

Em resumo, o sistema fuzzy ao receber uma entrada crisp (clássica), transforma esta em uma entrada fuzzy (fuzzificação), que por sua vez é submetida a um sistema de inferência (regras fuzzy) que devolve uma saída fuzzy para este sistema e por fim esta saída é submetida a um processo de defuzzificação para se obter uma saída crisp precisa.

### Fuzzificação

Conforme descrito anteriormente, a fuzzificação é um processo de transformação em que entradas abruptas são transformadas em entradas fuzzy, ou seja, é o processo pelos quais os valores de entrada do sistema são convertidos para conjuntos fuzzy, com as respectivas faixas de valores onde estão definidos.

Primeiramente, são determinadas as funções de pertinência para cada entrada do sistema e os termos linguísticos associados a cada uma dessas funções. Definidas as funções, o processo recebe valores de entrada que são comparados as funções de pertinência armazenadas, dando origem a entradas fuzzy. Uma variável linguística  $u$  é associada a um conjunto de termos linguísticos por uma função  $T(u)$ , sendo que tais termos podem ser números fuzzy sobre um conjunto universo  $U$ . O universo de discurso  $U$  pode ser descrito como a faixa de valores associados a uma variável fuzzy, onde seriam definidos vários conjuntos fuzzy.

A Figura 15 ilustra o processo de fuzzificação em que as entradas crisp são convertidas em entradas fuzzy.

### Variáveis Linguísticas

As variáveis linguísticas cumprem na lógica fuzzy o mesmo papel que as variáveis numéricas nos modelos matemáticos convencionais, com a diferença de que os valores que podem assumir são conceitos expressos em linguagem natural, tais como “alto”, “quente”, “forte” etc (BARBALHO, 2001).

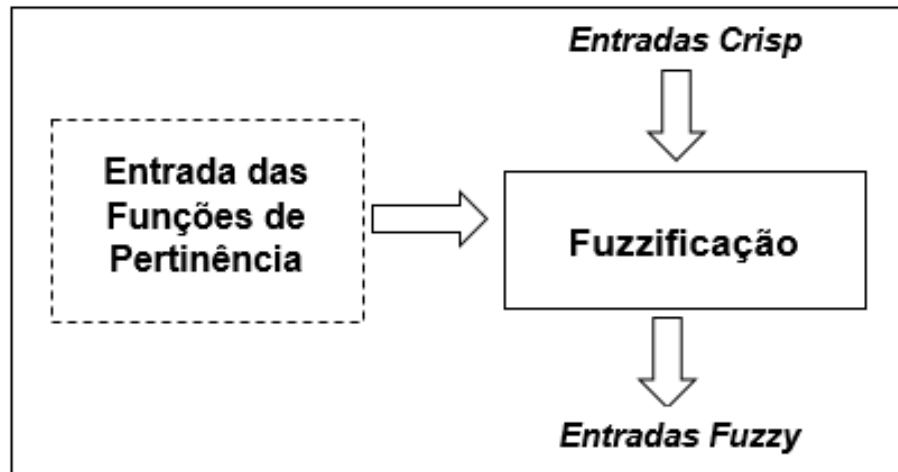


Figura 15 – Processo de fuzzificação.

Uma variável linguística é uma variável cujo valor é expresso qualitativamente por termos linguísticos (que fornece um conceito à variável) e quantitativamente por uma função de pertinência (BEDE, 2013). É caracterizada por um conjunto do tipo  $\{n, T(n), U, M(n)\}$ , onde  $n$  é o nome da variável (por exemplo pH),  $T(n)$  é o conjunto de termos linguísticos de  $n$  (por exemplo: baixo, neutro, elevado),  $U$  é o domínio de valores de  $n$  (universo de discurso) sobre o qual o significado do termo linguístico é determinado (o pH estar, por exemplo, entre 0 e 14), e  $M(n)$  é a função de pertinência que representa o termo linguístico  $n$  (JAFELICE et al., 2005).

A Figura 16 mostra um exemplo de uma variável linguística. O nome da variável linguística é pH, descrita por cinco termos linguísticos: “muito baixo”, “baixo”, “médio”, “alto” e “muito alto”. O domínio ( $U$ ) da variável é o intervalo  $[0, 14]$ . Cada termo linguístico tem a ele associado um conjunto fuzzy  $M(n)$  que o caracteriza. Note que o pH pode ser representada por mais de um valor linguístico. Dessa forma, uma variável linguística pode ser vista como uma função que mapeia o domínio de valores da variável convencional que está representando no seu domínio de valores linguísticos.

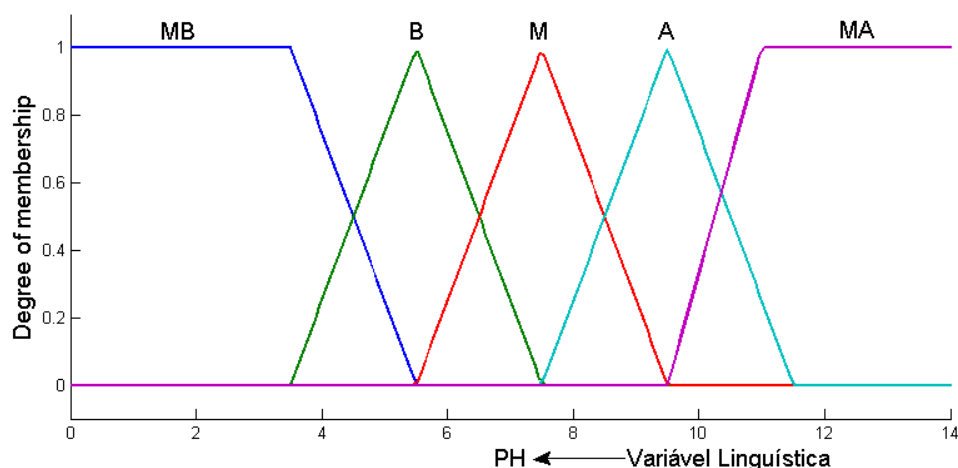


Figura 16 – Variável linguística representando o pH.

Ela é, portanto, o instrumento da lógica fuzzy que permite quantificar e manipular conceitos qualitativos, sendo especialmente úteis para caracterizar incertezas em problemas em que as variáveis ou as relações funcionais não são bem definidas (GANOULIS, 1994). É expressa dentro de certo domínio de valores e, nesse sentido, o especialista naquela área ou assunto é quem define esse domínio e realiza sua partição fuzzy. Nesse contexto, o papel do especialista torna-se fundamental na modelagem fuzzy.

### Funções de Pertinência

É uma função que mapeia cada elemento no universo de discurso em um valor entre 0 e 1, representando o grau de pertinência do elemento no conjunto. Nos conjuntos clássicos, essa função assume o valor 1 para os elementos pertencentes ao conjunto e 0 para os elementos não-pertencentes.

Segundo Barbalho (2001), qualquer função que mapeie o domínio  $U$  no intervalo  $[0, 1]$  pode ser utilizada como função de pertinência. Na prática, entretanto, as formas triangular, trapezoidal e gaussianas apresentadas na Figura 17, pela simplicidade de representação, são as mais utilizadas.

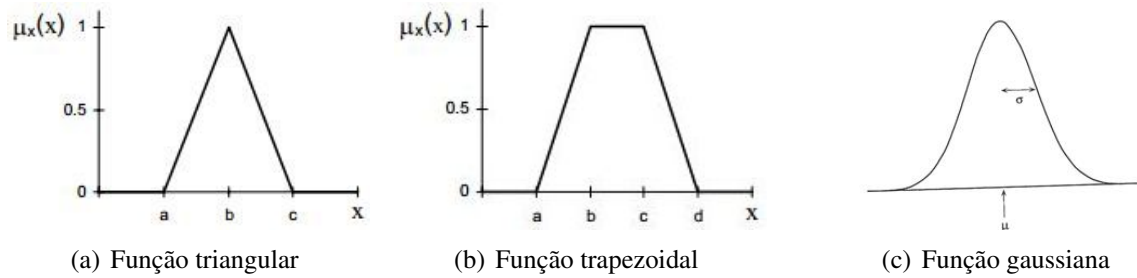


Figura 17 – Funções de pertinência triangular, trapezoidal e gaussiana.

As funções de pertinência trapezoidais são caracterizadas por um conjunto de quatro valores  $a, b, c$  e  $d$ , onde  $a$  e  $d$  determinam o intervalo dentro do qual a função de pertinência assume valores diferentes de zero, e  $b$  e  $c$  determinam o intervalo dentro do qual ela é máxima e igual a 1. Pode ser representada como

$$f(x, a, b, c) = \begin{cases} 0, & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a < x \leq b \\ 1, & b < x \leq c \\ \frac{d-x}{d-c}, & c < x \leq d \\ 0, & x > d \end{cases} \quad (11)$$

Ou da forma,

$$f(x, a, b, c) = \max \left( \min \left( \frac{x-a}{b-a}, 1, \frac{d-x}{d-c} \right), 0 \right) \quad (12)$$

Já as funções de pertinência triangulares são caracterizadas por uma terna  $a, b$  e  $c$ , onde  $a$  e  $c$  determinam o intervalo dentro do qual a função de pertinência assume valores diferentes de zero, e  $b$  é o ponto onde ela é máxima. Esse tipo de função assume a forma

$$f(x, a, b, c) = \begin{cases} 0, & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a < x \leq b \\ \frac{c-x}{c-b}, & b < x \leq c \\ 0, & x > c \end{cases} \quad (13)$$

Ou também pode ser representada na forma

$$f(x, a, b, c) = \max \left( \min \left( \frac{x-a}{b-a}, \frac{c-x}{c-b} \right) \right) \quad (14)$$

Por sua vez, a função de pertinência gaussiana é definida pela equação (15), onde  $\mu$  e  $\sigma$  são o centro ou valor médio e o desvio padrão, respectivamente.

$$\mu_A(x) = e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (15)$$

### Inferência Fuzzy

Considerando que na etapa de fuzzificação os dados de entrada já foram transformados em variáveis linguísticas, as funções de pertinência definidas e os termos linguísticos já foram associados a estas, nesta etapa é o momento em que são criadas as regras ou proposições através da associação das variáveis já criadas.

Regras fuzzy são um conjunto de entradas do sistema que geram um conjunto de saídas e descrevem situações específicas que possivelmente foram definidas por especialistas, e cuja inferência nos conduz a algum resultado desejado (NOGUEIRA, 2010).

Cada regra fuzzy é composta por uma parte antecedente (a parte *Se*) e uma parte consequente (a parte *então*), resultando em uma estrutura do tipo:

SE <antecedente> ENTÃO <consequente>

Pode-se pensar no seguinte exemplo de regra:

Se “pressão é alta” então “volume é pequeno”. Onde pressão e volume são variáveis linguísticas, e alta e pequeno são termos linguísticos.

Os antecedentes descrevem uma condição (premissas), enquanto a parte consequente descreve uma conclusão ou uma ação que pode ser esboçada quando as premissas se verificam. Assim, a partir de valores conhecidos das variáveis de entrada, pode realizar inferências sobre esses dados e obter os valores das variáveis de saída.

O conjunto de regras fuzzy pode ter vários antecedentes, os quais podem ser combinados através dos operadores lógicos “E”, “OU” e “NÃO” (utiliza-se com mais frequência os dois

primeiros). O operador lógico “E” usa o peso mínimo para todos os antecedentes, enquanto “OU” usa os valores máximos. No caso do operador NÃO, subtrai-se uma função consecutiva de 1, obtendo a função complementar. A Figura 18 evidencia esse processo, onde entradas fuzzy produz saídas fuzzy.

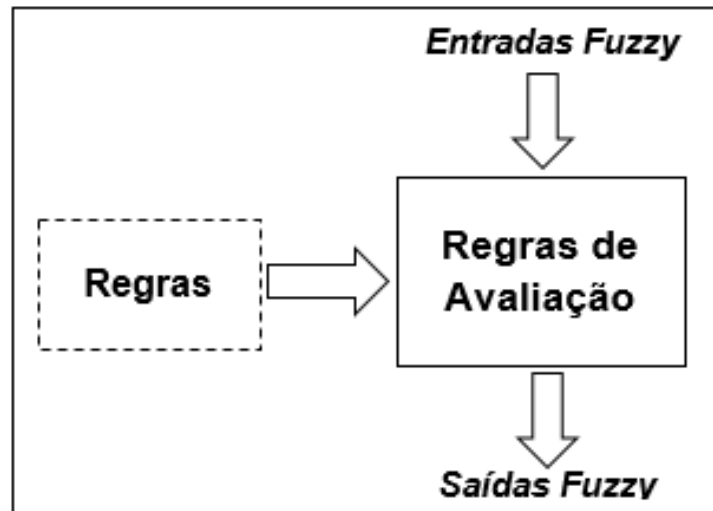


Figura 18 – Regras de avaliação.

Nesse processo, as regras são inferidas paralelamente, não importando a ordem em que estas são realizadas, ou seja, todas as regras (circunstâncias) são consideradas ao mesmo tempo, e ao final obtêm-se uma resposta que pode ser tanto um valor numérico clássico, quanto um conjunto fuzzy, dependendo do tipo de consequente utilizado (NOGUEIRA, 2010).

Existem vários métodos de inferência possíveis, sendo que os mais utilizados são os métodos de Mamdani e Sugeno. Jang (1993) coloca que, regras do tipo Sugeno, embora mais eficientes computacionalmente, são mais complexas e menos intuitivas do que as regras do tipo Mamdani. Este trabalho se restringirá a abordar o método de Mamdani, por ser o mais utilizado na maioria dos problemas tratados com lógica fuzzy.

O Método de Mamdani agrega as regras por meio do operador lógico OU, modelado pelo operador matemático  $\vee$  e, em cada regra, os operadores lógicos E e ENTÃO são modelados pelo operador mínimo  $\wedge$  (PEDRYCZ; GOMIDE, 1998). Segue dois exemplos de combinação de regras:

Regra 1: Se  $(x \text{ é } A_1 \text{ e } y \text{ é } B_1)$  então  $(z \text{ é } C_1)$ .

Regra 2: Se  $(x \text{ é } A_2 \text{ e } y \text{ é } B_2)$  então  $(z \text{ é } C_2)$ .

A Figura 19 ilustra como uma saída real  $z$  de um sistema de inferência do tipo Mamdani é gerada a partir das entradas  $x$  e  $y$  reais e a regra de composição *max – min*. A saída  $z \in \mathbb{R}$  é obtida pela defuzzificação do conjunto fuzzy de saída  $C = C'_1 \cup C'_2$  da Figura 19.

O número total de regras em um sistema fuzzy depende da quantidade de variáveis linguística modeladas e do número de termos linguísticos associados a cada uma. Se num sistema tem-se  $n$  variáveis linguísticas e  $p$  termos linguísticos associados a cada uma delas, então o



número total de regras  $r$  é dado por (ROSS, 2004):

$$r = p^n \quad (16)$$

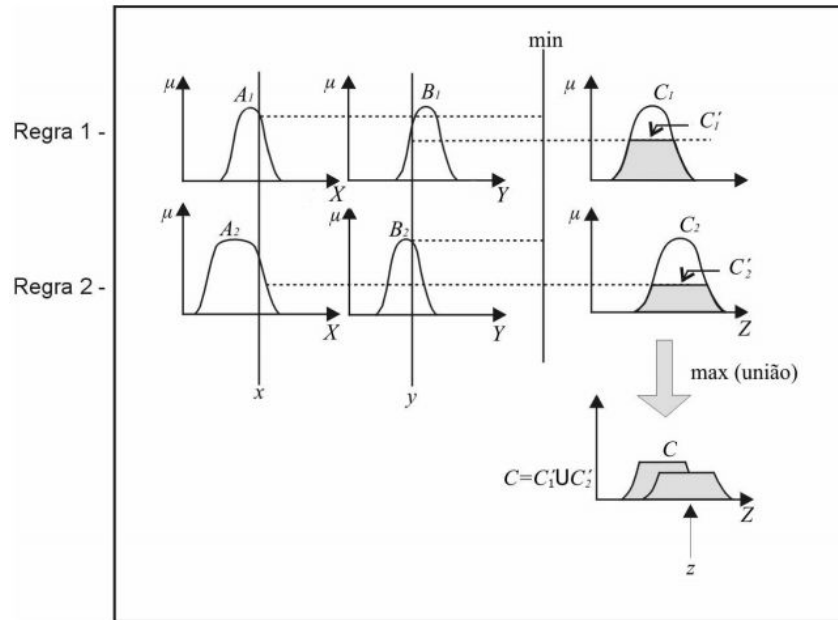


Figura 19 – Método de Mamdani com composição *max – min*.

Fonte: Jafelice (2003)

Portanto, se um sistema tem duas variáveis de entrada e cada uma delas tem três termos linguísticos associados, a quantidade de combinações de entrada é de nove ( $3^2 = 9$ ) regras.

### Defuzzificação

Após o processo de inferência fuzzy, obtém-se um conjunto fuzzy como resposta. Porém, muitas vezes esse conjunto não é suficiente como resposta do sistema, sendo necessário uma representação numérica mais adequada da resposta, ou seja, é preciso converter os valores de saída fuzzy para valores de saída crisp (clássica). Assim, realiza-se o processo de defuzzificação que nos fornece um valor numérico a partir da resposta fuzzy obtida (ver Figura 20).

Existem muitas técnicas de defuzzificação e entre as mais utilizadas estão: Média dos Máximos e Centro de Área ou Centro de Gravidade (Centroide).

O método de defuzzificação Média dos Máximos (MM) calcula a média de todos os valores de saída que tenham os maiores graus de pertinência. Pode ser expresso da seguinte forma (KLIR; YUAN, 1995):

$$d_{MM}(\mu) = \sum_{j=1}^i \frac{w_j}{l} \quad (17)$$

onde:  $w_j$  é o valor do suporte no qual a função de pertinência alcança o seu valor máximo e  $l$  representa o número de suportes. A Figura 21 ilustra esse método.

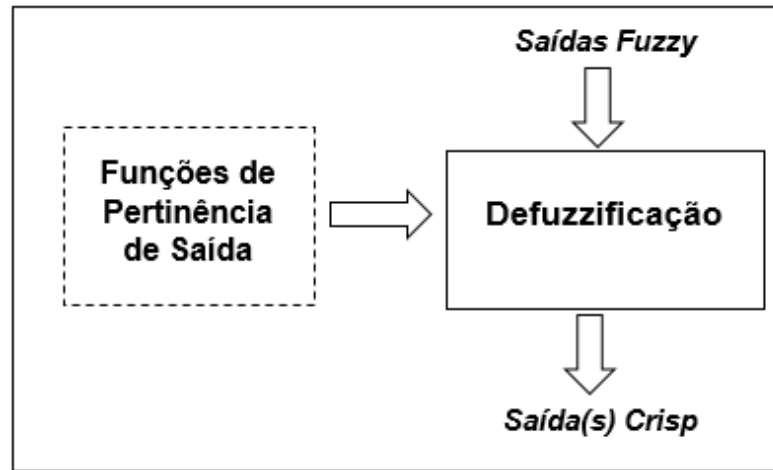


Figura 20 – Defuzzificação.

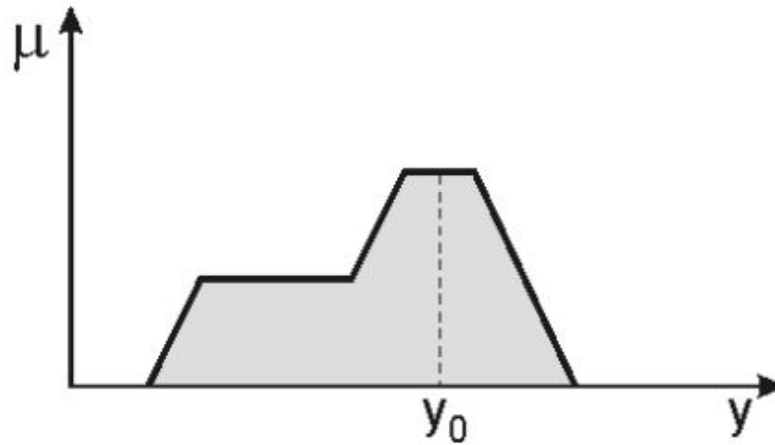


Figura 21 – Exemplo do método de defuzzificação MM.

Fonte: Ortega (2001)

O método do Centro de Área (CA) é a técnica de defuzzificação mais utilizada, conhecida na literatura como método do centro de gravidade ou método da centroide (KLIR; YUAN, 1995) e, diferentemente do MM, para calcular o valor clássico representativo, considera toda a distribuição de possibilidade de saída do modelo (ORTEGA, 2001). O procedimento é similar ao usado para calcular o centro de gravidade em Física, desde que se considere a função de pertinência  $\mu_A(x)$  como a densidade da massa de  $x$ .

Se  $x$  é discreto, então a defuzzificação por esse método é dada por

$$d_{AC}(\mu) = \frac{\sum_{j=0}^n x_j \mu_A(x_j)}{\sum_{j=0}^n \mu_A(x_j)} \quad (18)$$

Por outro lado, se  $x$  é contínuo, então

$$d_{AC}(\mu) = \frac{\int_R x \mu_A(x) dx}{\int_R \mu_A(x) dx} \quad (19)$$

onde  $R$  é a região de integração. A Figura 22 ilustra esse método.

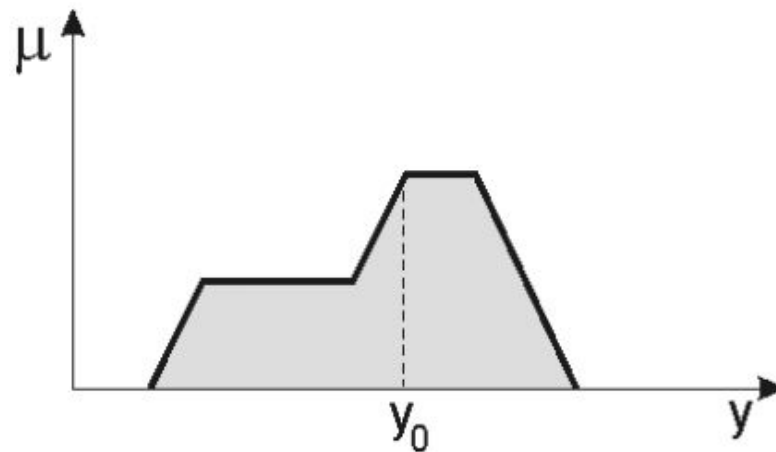


Figura 22 – Exemplo do método de defuzzificação CA.

Fonte: Ortega (2001)

Uma clara desvantagem desse método é que, no caso contínuo, tem-se a necessidade de se calcular constantemente através da integração numérica as áreas analisadas (JANÉ, 2004), o que pode acarretar em um grande esforço computacional.

#### 2.4.4 Algumas aplicações da lógica Fuzzy

A diversificação de tecnologias advinda da lógica fuzzy tem permitido sua aplicação em diversas áreas de conhecimento. Uma das mais aprofundadas é a de controle fuzzy, que tem possibilitado a automação de muitos processos, que vão de tarefas domésticas até o controle de sofisticados processos industriais (SIMÕES; SHAW, 2007).

Segundo Nogueira (2010), o Japão foi o pioneiro a explorar o potencial da lógica fuzzy, ainda na década de 80. O país demonstrou seu interesse com aplicação de Sistemas Fuzzy na estrada de ferro de Sendai, usados para controle de aceleração, frenagem, e parada quando a linha foi inaugurada em 1987.

É possível encontrar, principalmente no Japão, muitos eletrodomésticos e bens de consumo cujo sistema é baseado em controles fuzzy. Segue alguns exemplos (ORTEGA, 2001; PEREIRA, 2010):

- Aspiradores de pó Matsushita rodando algoritmos fuzzy que utilizam sensores de pó e ajustam o poder de sucção;
- Máquinas de lavar usam controladores fuzzy para controle de peso, verificação de tipo de tecido, e sensores de sujeira e automaticamente selecionam os ciclos de lavagem para o uso otimizado de potência, água e detergente;
- Ar condicionado industrial projetado pela Mitsubishi usa 25 regras de resfriamento e 25 regras de aquecimento. Um sensor de temperatura fornece a entrada, com controle de saída alimentado por um inversor, uma válvula compressora e um ventilador. Comparado com

o projeto anterior, o ar condicionado com controlador fuzzy aquece 5 vezes mais rápido, reduz o consumo de potência em 24%, incrementa a estabilidade da temperatura por um fator de 2, e usa menos sensores;

- Uma máquina de lavar pratos “inteligente” baseado em um controlador fuzzy e um “one stop sensing module” que combina um teristor (para medida de temperatura), um sensor de turvação que difunde a medida e transmite luz para medir a sujeira na lavagem e um sensor magnético para ler a taxa de giro. O sistema determina uma otimização no ciclo de lavagem para qualquer carga obter os melhores resultados com o mínimo de energia, detergente e água;
- Usa-se lógica fuzzy na determinação de parâmetros de controle de altitude e guiamento de aeronaves não tripuladas, onde existem uma série de regras baseadas em variáveis e valores linguísticos.
- Câmeras de vídeo com autofoco que, através da lógica fuzzy, controla a luminosidade da cena a ser filmada, controla velocidade e movimento do que esta filmando, reduzindo falhas de gravação e má qualidade de vídeos.

No Brasil a lógica fuzzy é aplicada em diversas áreas do conhecimento, entre essas aplicações, destacamos alguns modelos e sistemas desenvolvidos pelo Laboratório de Lógica Fuzzy da COPPE (Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia) que é ligado ao Programa de Engenharia de Produção da UFRJ (Universidade Federal do Rio de Janeiro):

- **Modelo de Localização COPPE-COSENZA:** tem por finalidade trabalhar gestão de marketing para estratégias de precificação de produtos e serviços. O modelo foi desenvolvido para ajustar o entendimento de comportamento de consumo em mercados em crescimento e em transformação, nos quais o volume de incertezas em tomada de decisão é crescente. Uma aplicação prática no mercado de soft drinks analisou atributos considerados para a ampliação de mercado, em determinados extratos econômicos. Preço, embalagem, sabor, campanhas promocionais, qualidade percebida, hábitos saudáveis e, finalmente, branding, são avaliados.
- **Modelo de Atratividade entre Produtos/Serviços e Consumidores:** relaciona Oferta e Demanda por produtos e serviços através de pesquisa orientada para diagnosticar o desejo de grupos consumidores, por meio de uma adaptação dos atributos de Lógica Fuzzy explorados no modelo COPPE-COSENZA. Diante da base de dados coletados por sistemas especificamente criados para o processamento de informações de campo, são possíveis análises de zonas potenciais, oportunidades logísticas, apoio a dimensionamento da produção, comparação entre as diversas regiões e respectivos graus de atratividade.

- **Sistema GesPlan – Gestão do Plano Mestre:** consiste de uma ferramenta inteligente de apoio ao processo de decisão voltado para a atividade de definição de planos mestre de produção alternativos. O sistema GesPlan permite ao gestor definir com mais facilidade e flexibilidade planos mestre que atendam satisfatoriamente aos objetivos estabelecidos pela empresa. A partir do emprego de uma abordagem baseada nos Sistemas de Inferência Fuzzy, a ferramenta possibilita incorporar no processo de tomada de decisão os aspectos subjetivos, conflitantes e carregados de imprecisão, característicos do problema tratado. O aplicativo funciona em plataforma web, foi totalmente desenvolvido em Java e é distribuído como software livre sob licença GPL.

### 3 Área de Estudo: Rio Cachoeira

Os rios têm importância histórica fundamental para o desenvolvimento da humanidade, pois foram as suas margens que se fixaram as primeiras civilizações que deram origens as primeiras cidades. Impulsionados por melhores condições de habitação e de sobrevivência, diferentes povos da antiguidade buscaram regiões férteis e úmidas, ou seja, próximas aos rios, para desenvolverem as suas civilizações, como o antigo Egito, que floresceu às margens do Nilo e a Mesopotâmia que surgiu entre os rios Tigre e Eufrates. Essas civilizações milenares, dentre tantas outras, tiveram as suas estruturas culturais, sociais, históricas, políticas e econômicas subordinadas aos regimes de seus respectivos rios (SOUSA, 2005).

A cidade de Itabuna, por exemplo, surgiu as margens do rio Cachoeira. Surgiu como um povoado chamado Arraial de Tabocas na região cortada pelo rio Cachoeira. De acordo com dados do IBGE<sup>1</sup>, o povoamento começou quando a região servia como principal ponto de passagem de tropeiros que se dirigiam a Vitória da Conquista. O povoado foi elevado à categoria de vila com a denominação de Itabuna, pela Lei Estadual nº 692, de 13 de setembro de 1906. Em 28 de julho de 1910 a vila foi elevada à condição de cidade, pela Lei Estadual nº 807.

Além de sua importância socioambiental, histórico-cultural, turística e econômica, o rio Cachoeira é fonte de subsistência de muitas famílias ribeirinhas (famílias que residem à margem do rio), que utilizam a água como fonte de alimentação e renda através da pesca e também para o lazer, a água ainda alimenta indústrias e irriga plantações e é do seu leito que resulta o comércio da areia lavada que garante o sustento de muitas famílias da região.

#### 3.1 Localização

A Bacia Hidrográfica do Rio Cachoeira (BHRC) situa-se entre as coordenadas 14° 42' 00"/15° 20' 00" S e 39° 01' 00"/40° 09' 00" W (Figuras 23 e 24), abrangendo 12 municípios: Firmino Alves, Floresta Azul, Santa Cruz da Vitória, Itajú do Colônia, Ibicaraí, Itapé, Buerarema, Jussari, Itabuna, Ilhéus, Itororó e Itapetinga. Está limitada ao norte pelas bacias dos rios de Contas e Almada; ao sul pelas bacias dos rios Pardo e Una; a oeste pela bacia do rio Pardo; e a leste pelo Oceano Atlântico (NACIF et al., 2003; HARUM et al., 2008).

Esta bacia origina-se nas nascentes do rio Colônia, numa altitude de 800 metros, na Serra da Ouricana (município de Itororó), e atinge seu patamar mais baixo na superfície litorânea do município de Ilhéus. O rio Colônia, após estender-se por 100 km, banhando os municípios de Itororó, Itapetinga e Itaju do Colônia, tem sua confluência com o rio Salgado no município de Itapé, passando a receber o nome de rio Cachoeira (NACIF et al., 2003).

---

<sup>1</sup>Dados obtidos em <http://biblioteca.ibge.gov.br/>



Figura 23 – Bacia hidrográfica do rio Cachoeira.

Fonte: Nacif et al. (2003)

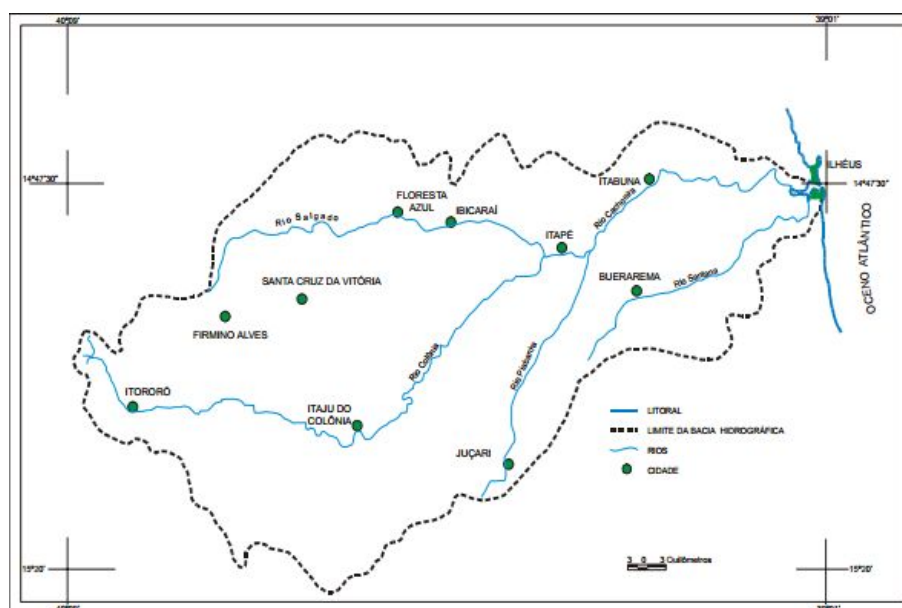


Figura 24 – Bacia hidrográfica do rio Cachoeira com seus principais rios e cidades.

Fonte: Nacif et al. (2003)

### 3.2 Urbanização e poluição

“Durante as últimas décadas, vem ocorrendo nesta região uma mudança nos padrões de urbanização devido ao rápido crescimento da população e incremento das atividades industriais, agrícolas e turísticas” (SANTOS et al., 2013).

Na Tabela 5 consta o contingente populacional urbano e rural dos municípios da BHRC, onde se pode notar que a população urbana supera em muito a rural, 89 % do contingente populacional é urbano, nos dois municípios mais populosos, Itabuna e Ilhéus, as populações urbanas superam as rurais em 95% e 68%, respectivamente<sup>2</sup>.

Tabela 5 – Comparação entre população urbana e rural dos municípios da BHRC.

Municípios	Urbana	Rural	Total
Ilhéus	155.281	28.955	184.236
Itabuna	199.643	5.024	204.667
Itapetinga	66.276	1.997	68.273
Ibicaraí	17.885	6.387	24.272
Itapé	7.180	3.815	10.995
Itaju do Colônia	5.860	1.449	7.309
Jussari	4.876	1.598	6.474
Buerarema	15.277	3.328	18.605
Santa Cruz da Vitória	5.076	1.597	6.673
Floresta Azul	7.343	3.317	10.660
Firmino Alves	4.337	1.047	5.384
Itororó	18.100	1.814	19.914

Fonte: IBGE, censo de 2010.

A população rural migra para os centros urbanos e esse crescimento demográfico cada vez mais acelerado aumenta também a quantidade de dejetos orgânicos, uma vez que as cidades passam a devolver um volume cada vez maior de águas usadas ou incompletamente depuradas através dos esgotos e de usos industriais.

Estudos apontam muitos pontos do rio Cachoeira em total estado de degradação decorrente da intensa poluição de suas águas. Dejetos orgânicos e inorgânicos espalhados ao longo do rio, provenientes do lixão são arrastados na época das grandes chuvas (PINHO, 2001). Assim suas águas tornam-se inviáveis para o consumo humano e industrial, colocando em risco a saúde da população e comprometendo a biodiversidade aquática.

A Figura 25 (a) mostra um dos pontos do rio Cachoeira a dez anos, já a Figura 25 (b) mostra uma imagem mais atual com nuvens de espumas flutuando sobre as águas do rio na cidade de Itabuna. Nota-se uma diferença gritante no estado da água do Cachoeira que atualmente exala mau cheiro insuportável de esgoto sanitário que contamina a parte central de Itabuna.

As imagens da Figura 26 evidenciam dejetos jogados em um dos seus trechos do rio. Na Figura 26 (a) é perceptível que os dejetos impedem o fluxo d'água, já a Figura 26 (b) evidencia uma dura realidade: a poluição do rio também é fruto do descaso e irresponsabilidade de moradores das cidades banhadas por ele, pois até mesmo pneus são encontrados ao longo dos canais do rio.

<sup>2</sup>Os dados da tabela são do censo IBGE de 2010, infelizmente não conseguimos dados populacionais mais atuais de todos os municípios, então preferimos manter todos de um mesmo ano para fins de comparação.





(a) Imagem do rio Cachoeira a dez anos atrás

(b) Imagem do rio Cachoeira atual

Figura 25 – Imagens comparando o estado do rio Cachoeira a dez anos atrás e atualmente.

Fonte: Pimenta Blog.BR, no endereço em <<http://www.pimenta.blog.br/>>



(a) Dejetos jogados no rio impedem o fluxo d'água.

(b) Pneus e outros dejetos jogados no rio.

Figura 26 – Leito do rio Cachoeira no trecho urbano de Itabuna evidenciando poluição por diferentes dejetos.

Fonte: Pimenta Blog.BR, no endereço em <<http://www.pimenta.blog.br/>>

Além disso, esgotos urbanos e industriais também são despejados no rio sem qualquer tratamento, sobretudo nos municípios de Itabuna e de Ilhéus (veja Figura 27), os quais possuem maior contingente populacional. Só no município de Itabuna estima-se que 90% do esgoto é lançado sem tratamento (OLIVEIRA, 2013). Através da presença de coliformes totais e fecais, constata-se a poluição da água e, conseqüentemente, a possibilidade da existência de organismos causadores de doenças na população (PINHO, 2001).

### 3.3 Estudos sobre a qualidade da água do rio Cachoeira

Nesta seção são apresentados algumas referências sobre estudos da qualidade da água do rio Cachoeira, principalmente de pesquisadores vinculados a Universidade Estadual de Santa Cruz - UESC.

Correia (2013) avaliou a qualidade ambiental do rio Cachoeira por meio da análise físico-química da água, assim como análise histopatológica e ultraestrutural do fígado de *Tilapia*

rendalli. Conclui que o trecho de pior qualidade ambiental fica entre as cidades de Itapé e Itabuna.



Figura 27 – Esgoto sem tratamento desaguando sobre o rio Cachoeira - Itabuna/BA.

Fonte: Sousa (2005).

Estudo semelhante já tinha sido feito por Paulo et al. (2012) que realizam um monitoramento em cinco pontos do rio, entre Itapé e Ilhéus, utilizando-se análise histopatológica do fígado da espécie *Poecilia vivipara* (que segundo eles é a espécie mais abundante naquele habitat) e constataram elevada presença de alterações patológicas graves no fígado da espécie *Poecilia vivipara*, o que pode indicar que agentes ambientais como pesticidas, metais pesados, esgoto e outros devem estar agindo sobre essas populações de peixes.

Santos et al. (2013) fizeram análises de seis metais (Zn, Pb, Ni, Cu, Mn e Fe) em uma parte do curso do rio Cachoeira englobando o perímetro urbano e rural da cidade de Itabuna e chegando até as proximidades do perímetro urbano da cidade de Ilhéus. Os resultados obtidos mostraram que as concentrações mais elevadas de Zn, Pb e Cu foram detectadas nos sedimentos oriundos de áreas que sofrem influência das atividades industriais e urbanas. A presença desses metais pode ser indicativo de poluição provocada pelo deflúvio urbano e pela drenagem de efluentes industriais, provenientes de atividades agrícolas. Níveis acima do permitido pode ser extremamente prejudicial a saúde populacional.

Uma água de consumo contendo elevados teores de Cu pode provocar nos indivíduos irritação e corrosão da mucosa, danos capilares generalizados, problemas hepáticos e renais e irritação do sistema nervoso central seguido de depressão. Uma intoxicação crônica por chumbo pode levar a uma doença denominada saturnismo, sendo altamente prejudicial ao desenvolvimento infantil (SANTOS et al., 2013).

Pinho (2001) avaliou a qualidade da água do rio Cachoeira no período de janeiro a dezembro de 1999, usando variáveis físico-químicas e biológicas (pH, temperatura, condutividade elétrica, OD e coliformes termotolerantes). Pelos números apresentados na pesquisa, pode-se ver que o rio apresenta pioras significativas de níveis de poluição a partir do momento em que passa por Itabuna.

Lucio (2010) fez um estudo objetivando avaliar as variações espaço temporais da química das águas superficiais do rio Cachoeira a fim de estabelecer os impactos das atividades antropogênicas na qualidade da água. Indicadores como condutividade das águas (quanto maior a presença de dejetos maior é a condutividade da água), a presença de coliformes termotolerantes (que representam grupos de bactérias totais ou as provenientes do intestino de animais de sangue quente que indicam presença de organismos causadores de doenças) e o nível de oxigênio dissolvido (este dado representa a quantidade de oxigênio disponível na água, elemento essencial para a presença de vida) estavam fora do padrão aceitável de acordo com o estabelecido pelo CONAMA.

Souza et al. (2009) analisaram nutrientes inorgânicos dissolvidos, nitrogênio total, fósforo total, clorofila-a e salinidade no estuário do rio Cachoeira antes e depois da operação de uma Estação de Tratamento de Esgoto (ETE), no município de Ilhéus. Essa estação entrou em operação em setembro de 2000 para fazer tratamento primário de parte do esgoto da cidade, porém seu efluente é despejado na porção superior do estuário do Cachoeira.

Os estudos de Fontes et al. (2009) constataram altas concentrações de alumínio, chumbo, ferro, zinco e urânio próximos a estação, em índices superiores aos permitidos pelas resoluções do CONAMA. Os esgotos apresentaram em sua composição variadas quantidades de matéria orgânica, microrganismos patogênicos e substâncias químicas tóxicas, que quando não tratadas adequadamente, na estação de tratamento, lançarão no corpo receptor poluentes prejudiciais à saúde populacional e ao meio ambiente.

### 3.4 Pontos de coleta e valores dos parâmetros

A proposta inicial do projeto de dissertação era utilizar dados de coletas feitas por grupos de pesquisa da Universidade Estadual de Santa Cruz, porém os bancos de dados conseguidos se apresentavam incompletos ou inconsistentes. Então optamos por utilizar dados de coletas conseguidos junto ao Instituto do Meio Ambiente e Recursos Hídricos - INEMA.

O INEMA foi criado através da lei nº 12.212 de 4 de maio de 2011 e tem por finalidade executar as ações e programas relacionados à Política Estadual de Meio Ambiente e de Proteção à Biodiversidade, a Política Estadual de Recursos Hídricos e a Política Estadual sobre Mudança do Clima. Tem sede na cidade de Salvador e unidades em nove cidades baianas (Barreiras, Eunápolis, Feira de Santana, Itabuna, Juazeiro, Santa Maria da Vitória, Seabra, Senhor do Bonfim e Vitória da Conquista), além de postos avançados nas cidades de Alagoinhas, Caetité, Guanambi, Ilhéus, Itaberaba, Irecê, Jequié, Paulo Afonso e Teixeira de Freitas.

O ponto 1 está localizado no pontilhão situado na área urbana do município de Itapé. O ponto 2 sob a 2ª ponte à montante do barramento, sentido Ilhéus/Itabuna, na zona urbana de Itabuna. Já o terceiro ponto à jusante da localidade Salobrinho, acesso pela BR-415 rodovia Itabuna/Ilhéus, 8,4 km após a entrada da CEPLAC, estrada que dá acesso ao Japú, na ponte sob



o rio Cachoeira, a cerca de 150 m da BR-415.

O Quadro 5 exibe o código adotado pelo INEMA, latitude e longitude de cada ponto de coleta. As Figuras 28 e 29 mostram, respectivamente, fotos e imagens de satélite dos três pontos.

Quadro 5 – Pontos de coleta.

	PONTO 1	PONTO 2	PONTO 3
<b>Código</b>	LES-RCH-500	LES-RCH-700	LES-RCH-800
<b>Latitude</b>	14°53'52,8''	14°47'18,2''	14°48'9,6''
<b>Longitude</b>	39°25'39,5''	39°16'12,1''	39°9'10,4''



(a) Ponto de coleta 1.



(b) Ponto de coleta 2.



(c) Ponto de coleta 3.

Figura 28 – Fotografias dos pontos de coleta.

Fonte: Instituto do Meio Ambiente e Recursos Hídricos - INEMA.



(a) Ponto de coleta 1.



(b) Ponto de coleta 2.



(c) Ponto de coleta 3.

Figura 29 – Imagens de satélite dos pontos de coleta.

Fonte: Instituto do Meio Ambiente e Recursos Hídricos - INEMA.

As Tabelas 6, 7 e 8 mostram os valores dos nove parâmetros analisados pelo INEMA em cada coleta nos pontos 1, 2 e 3, respectivamente, assim como os respectivos coeficientes de variação. Esses valores foram utilizados para as simulações tanto no sistema clássico quanto nos sistemas fuzzy.

O coeficiente de variação (CV) fornece a variação dos dados obtidos em relação à média. Quanto menor for o seu valor, mais homogêneos serão os dados, ou seja, menor será a dispersão em torno da média. Observa-se que o parâmetro coliformes termotolerantes ficou fora dos padrões em todas as coletas no ponto 2 e na maioria das coletas no ponto 1, apresentando coeficientes de variação altos em todos os pontos, indicando dados pouco homogêneos.

Além desse, o fósforo também apresentou valores médios fora dos padrões em todos os pontos, com maior coeficiente de variação no ponto 1. Em 2001, Pinho já havia encontrado altas concentrações de fósforo no rio Cachoeira em diferentes pontos, sendo as maiores concentrações nos trechos mais urbanos de Itabuna.

Tabela 6 – Valores dos parâmetros das amostras de coletas no ponto 1

Ano/campanha	OD	CT	pH	DBO	NT	FT	Temperatura	Tu	ST
2010.1	5,80	4.800	7,85	1,00	0,80	0,11	31,52	4,72	167
2010.2	7,30	540	9,40	1,10	2,10	0,09	24,30	9,31	261
2011.1	8,92	5.400	8,11	2,00	1,00	4,30	27,70	3,40	294
2011.2	7,61	17.000	8,34	2,00	1,00	0,24	29,40	3,20	354
2012.1	5,74	1.500	7,72	2,00	1,00	0,06	25,90	1,50	298
2012.2	6,10	2.400	7,70	2,00	4,00	0,78	30,10	22,80	298
2013.1	8,72	5.400	7,40	2,00	1,00	0,31	27,30	15,60	244
2013.2	7,51	4.300	6,99	2,00	1,00	0,12	25,50	3,00	196
<b>CV</b>	<b>17%</b>	<b>99%</b>	<b>9%</b>	<b>25%</b>	<b>73%</b>	<b>193%</b>	<b>9%</b>	<b>95%</b>	<b>23%</b>

Tabela 7 – Valores dos parâmetros das amostras de coletas no ponto 2.

Ano/campanha	OD	CT	pH	DBO	NT	FT	Temperatura	Tu	ST
2010.1	3,51	3.5000	7,37	15,00	8,30	0,95	30,30	28,40	355
2010.2	1,20	150.000	7,80	10,5	12,30	0,51	25,50	10,50	388
2011.1	4,95	16.000	7,39	4,00	3,00	0,48	25,7	10,40	252
2011.2	4,67	17.000	7,75	4,00	3,00	0,43	27,10	7,80	360
2012.1	0,10	54.000	7,40	5,00	1,00	0,51	26,50	3,50	352
2012.2	1,31	16.000	6,89	3,00	4,00	0,55	29,70	34,20	352
2013.1	2,52	16.000	6,90	4,00	3,90	0,56	27,90	4,00	284
2013.2	5,93	9.200	6,77	2,00	2,00	0,25	26,10	4,40	244
<b>CV</b>	<b>69%</b>	<b>120%</b>	<b>5%</b>	<b>75%</b>	<b>80%</b>	<b>37%</b>	<b>7%</b>	<b>91%</b>	<b>17%</b>

Tabela 8 – Valores dos parâmetros das amostras de coletas no ponto 3.

Ano/campanha	OD	CT	pH	DBO	NT	FT	Temperatura	Tu	ST
2010.1	4,81	330	7,43	2,80	2,10	0,89	30,30	8,67	348
2010.2	5,20	140	8,00	2,70	7,60	0,46	25,00	7,21	404
2011.1	7,35	490	7,03	2,00	4,00	0,50	26,30	9,30	222
2011.2	6,21	1.300	7,44	2,00	1,00	0,41	29,10	9,70	346
2012.1	3,57	130	7,61	2,00	1,00	0,42	24,10	1,00	318
2012.2	5,06	330	6,79	2,00	3,00	0,51	30,10	31,40	318
2013.1	4,06	110	6,80	2,00	3,90	0,52	26,70	2,30	344
2013.2	6,50	110	6,46	2,00	2,00	0,28	25,40	2,00	222
<b>CV</b>	<b>24%</b>	<b>109%</b>	<b>7%</b>	<b>16%</b>	<b>70%</b>	<b>35%</b>	<b>9%</b>	<b>109%</b>	<b>20%</b>

Os gráficos das Figuras 30, 31, 32 e 33 exibem a variação dos valores desses parâmetros nos pontos correspondentes. As linhas pontilhadas indica os limites mínimo/máximo recomen-

dados pela resolução do CONAMA 357/05 (BRASIL, 2005) para o enquadramento de rios de classe 2.

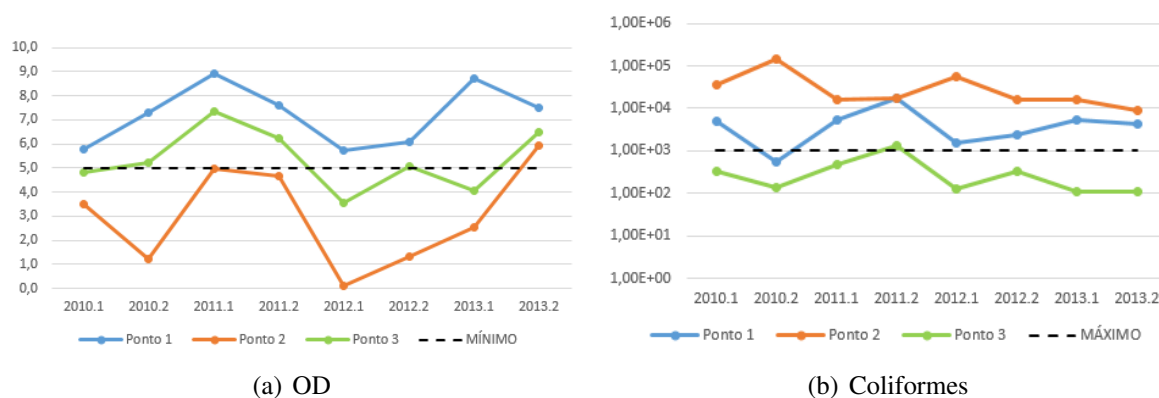


Figura 30 – Gráficos de variação dos parâmetros OD e coliformes.

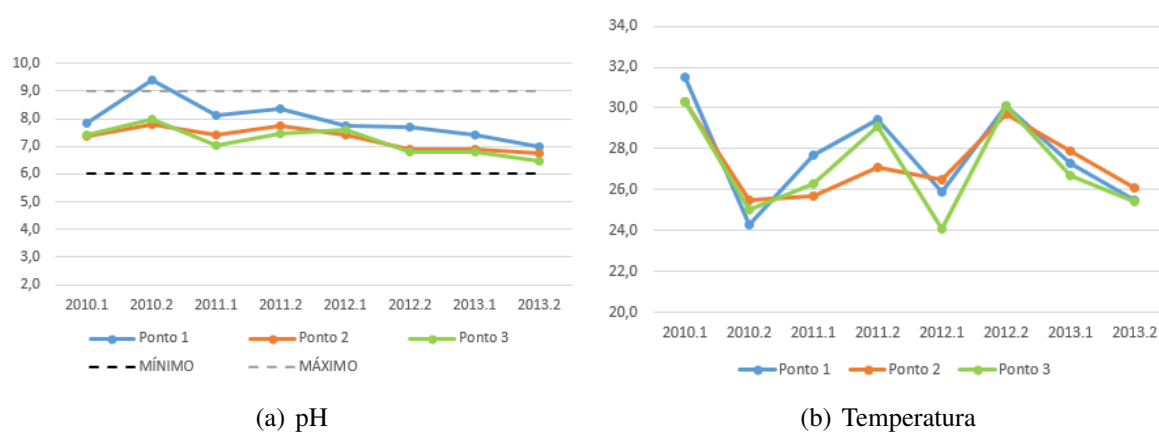


Figura 31 – Gráficos de variação dos parâmetros pH e temperatura.

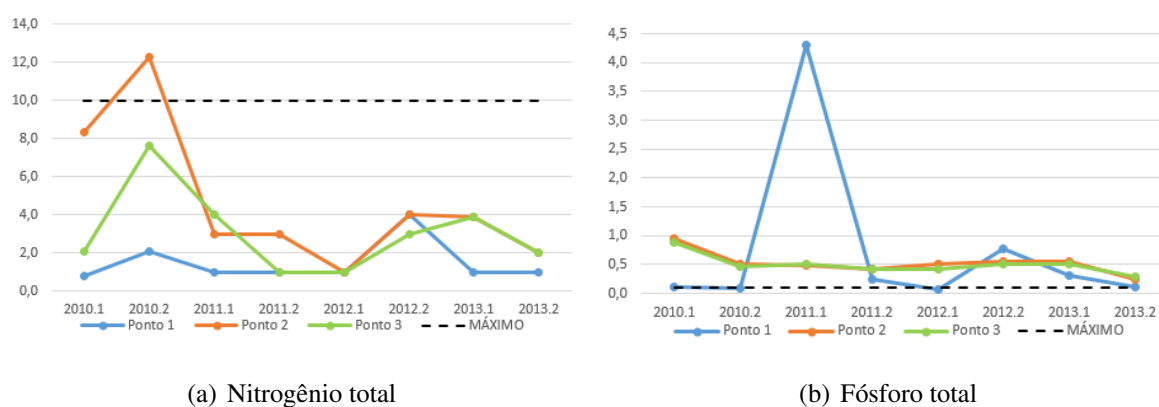


Figura 32 – Gráficos de variação dos parâmetros nitrogênio total e fósforo total.

Os parâmetros pH, nitrogênio total, temperatura, turbidez e sólidos totais ficaram dentro dos padrões estabelecidos em todos os pontos de coleta. A DBO ficou fora dos padrões em

apenas duas coletas no ponto 2, nos demais pontos não houve violação ao que é estabelecido pelo CONAMA.

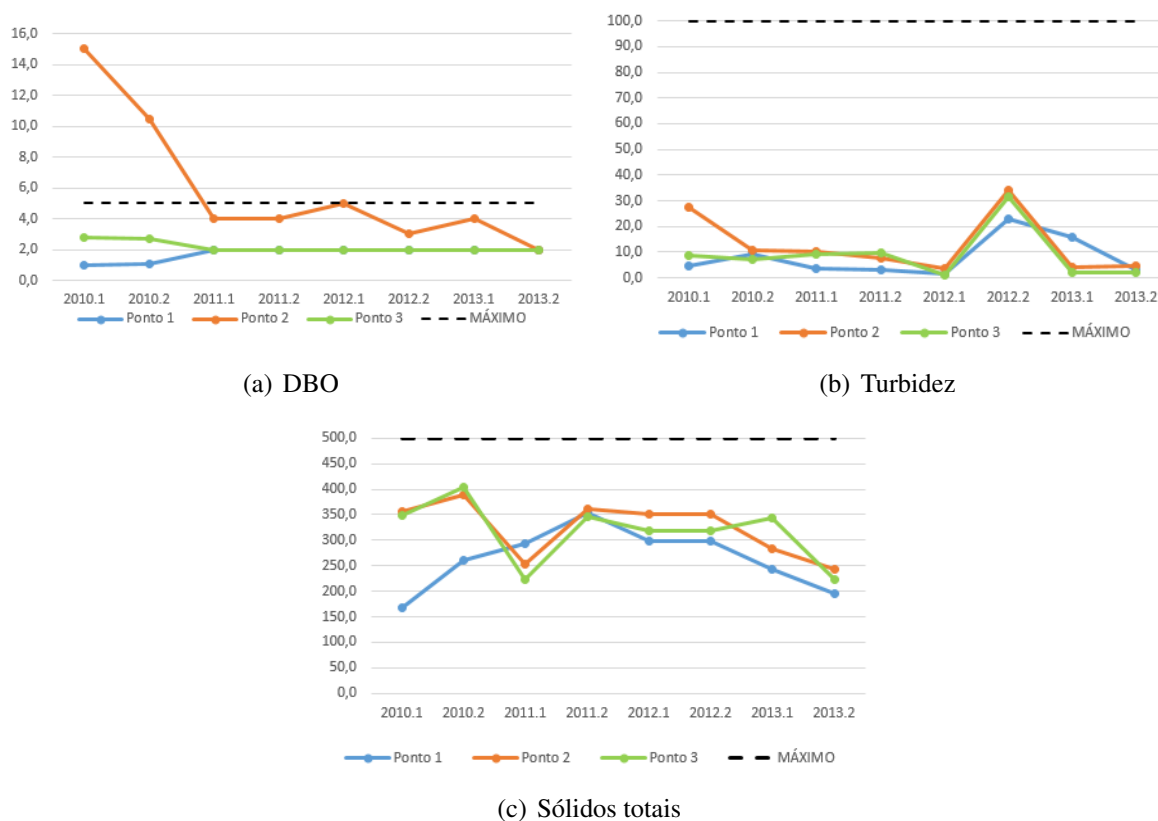


Figura 33 – Gráficos de variação dos parâmetros DBO, turbidez e sólidos totais.

Conforme pode ser observado na Tabela 7 e nos gráficos da Figura 30, os dois parâmetros com maior peso no IQA (OD e coliformes) ficaram fora dos padrões de portabilidade da água em praticamente todas as coletas. Pouco oxigênio dissolvido e altas concentrações de coliformes indicam grande quantidade de matéria orgânica e despejos de esgotos domésticos em grande quantidade na água. Lucio (2010) também constatou concentrações de coliformes e OD no rio Cachoeira totalmente fora do padrão aceitável de acordo com o estabelecido pelo CONAMA.

## 4 Modelagem da Qualidade da Água do Rio Cachoeira

### 4.1 Cálculo dos fatores do IQA Clássico

Nesta seção, são apresentados os cálculos relacionados a cada um dos parâmetros na composição do IQA, utilizando como exemplo os valores das coletas da primeira campanha do ponto de amostragem 2, no ano de 2013. Tais cálculos são realizados de acordo as equações apresentadas nos itens 2.3.1 e 2.3.2 e pesos na Tabela 4 do Capítulo 2, correspondentes a cada um dos parâmetros.

O objetivo é mostrar como o IQA é calculado e a complexidade envolvida para encontrar seu valor. Manualmente se torna demasiadamente trabalhoso fazê-los, então para realização dos cálculos para todas as amostras entre os anos de 2010 e 2013 foi utilizado o aplicativo desenvolvido em Matlab, apresentado na Seção 4.3.

#### 4.1.1 Oxigênio dissolvido

Este parâmetro apresentou um valor de 2,52 mg/L e uma concentração de saturação de 7,69 mg/L, calculada através da Fórmula 7 apresentada no Capítulo 2.

Para o cálculo do % de OD é necessária a aplicação da fórmula da equação seguinte:

$$\begin{aligned}\%OD &= \left( \frac{OD}{C_s} \right) \times 100 \\ \%OD &= \left( \frac{2,52}{7,69} \right) \times 100 \\ \%OD &= 32,76\end{aligned}$$

Como o valor encontrado obedece a condição  $\%OD < 140$ , deve-se usar a equação:

$$q_{\%OD} = 100,8e^{\frac{(\%OD-106)^2}{-3745}}$$

Ao calcular o valor dessa equação no ponto  $\%OD = 32,76$ , chega-se ao  $q_{\%OD} = 24,05$  que elevado ao peso correspondente de 0,17, resulta em 1,7171, sendo esse valor um dos fatores que irá compor o IQA.

#### 4.1.2 Coliformes termotolerantes

O valor desse parâmetro na amostra em estudo foi de 16.000 NMP/100 ml. Assim, a equação que se obriga a utilizar nos casos em que  $CT \leq 10^5$  NMP/100 ml é:

$$Q_{CT} = 98,24034 - 34,7145 \times (\log(CT)) + 2,614267 \times (\log(CT))^2 + 0,107821 \times (\log(CT))^3$$



Ao calcular sua raiz no ponto  $CT = 16000$ , encontra-se  $q_{CT} = 6,51$ . Tal número, ponderado ao peso de 0,15, ou seja,  $(6,51)^{0,15}$  resulta em 1,3245, sendo este mais um dos fatores componentes do cálculo do IQA.

#### 4.1.3 Potencial de hidrogênio

O pH das amostras do rio Cachoeira apresentou um valor de 6,9. Para os casos em que  $2 < pH \leq 12$ , utiliza-se a equação

$$q_{pH} = 0,05421 \times pH^{(1,23 \times pH - 0,09873 \times pH^2)} + 5,213$$

Ao substituir a variável pH pelo valor 6,9, encontra-se um  $q_{pH}$  de 86,56 que elevado ao peso 0,12, produz um resultado de 1,7080, que também é um fator do cálculo do IQA do rio Cachoeira.

#### 4.1.4 Demanda bioquímica de oxigênio

Este parâmetro apresentou um valor de 4,0 mg/L. Com a  $DBO \leq 30$  mg/L a equação utilizada é:

$$q_{DBO} = 100,9571 - 10,7121 \times DBO + 0,49544 \times DBO^2 - 0,011167 \times DBO^3 + 0,0001 \times DBO^4$$

Substituindo-se o valor da DBO por 4,0, chega-se ao valor de 65,35, que elevado ao peso de 0,10, correspondente ao parâmetro DBO, resulta no valor 1,5189.

#### 4.1.5 Nitrogênio total

O valor do nitrogênio total foi na ordem de 3,9 mg/L. Quando  $NT \leq 10$  mg/L, utiliza-se a equação:

$$Q_{NT} = -5,1 \times NT + 100,17$$

Ao calcular esta equação no ponto  $NT = 3,9$ , obtém-se o valor 80,28, que ponderado ao peso de 0,10, resulta em 1,5505, sendo este também, um dos fatores que permitirá calcular o IQA.

#### 4.1.6 Fósforo total

Sabendo que o valor desse parâmetro para a coleta foi de 0,56 mg/L, para  $FT \leq 10$  mg/L, utiliza-se a equação

$$q_{FT} = 79,7 \times (FT + 0,821)^{-1,15}$$

Utilizando  $FT = 0,41$  na equação, obtém-se o valor 54,98, este valor ponderado a 0,10, resulta em 1,4929.

#### 4.1.7 Turbidez

Quando o valor do parâmetro  $Tu \leq 100$  NTU, utiliza-se a equação:

$$q_7 = 97,34e^{(-0,01139 \times Tu - 0,04917 \times \sqrt{Tu})}$$

No caso da amostra em questão o valor da turbidez é menor que 100, mais precisamente 4,0 NTU, calculou-se o valor da equação nesse ponto e obteve-se como resultado  $q_{Tu} = 84,29$ , que ponderado ao peso correspondente de 0,08 resultou em 1,4258, que é o fator correspondente ao parâmetro turbidez para cálculo do IQA.

#### 4.1.8 Sólidos totais

A quantidade de sólidos totais na amostra considerada foi de 284 mg/L. Sendo assim, a equação a ser utilizada é:

$$q_8 = 80,26e^{(-0,00107 \times ST + 0,03009 \times \sqrt{ST})} - 0,1185 \times ST$$

Substituindo  $ST$  pelo valor 284 mg/L nesta equação, obtêm-se o valor 64,69, que elevado ao peso 0,08 nos fornece 1,3959, a ser substituído na equação do IQA.

#### 4.1.9 Variação de temperatura

Para este parâmetro foi definido anteriormente  $q_{\Delta T} = 93$  e esse valor ao ser elevado a 0,10, resulta no valor 1,5734.

#### 4.1.10 Cálculo do IQA do rio Cachoeira

Após o cálculo de todos os fatores, utiliza-se a equação do IQA, que é um produtório desses fatores. Ou seja, substitui-se os fatores na equação:

$$IQA = \prod_{i=1}^9 q_i^{w_i}$$

Assim, tem-se:

$$IQA = q_1^{w_1} \times q_2^{w_2} \times q_3^{w_3} \times q_4^{w_4} \times q_5^{w_5} \times q_6^{w_6} \times q_7^{w_7} \times q_8^{w_8} \times q_9^{w_9}$$

$$IQA = q_{OD}^{0,17} \times q_{CT}^{0,15} \times q_{pH}^{0,12} \times q_{DBO}^{0,10} \times q_{NT}^{0,10} \times q_{FT}^{0,10} \times q_{\Delta T}^{0,10} \times q_{Tu}^{0,08} \times q_{ST}^{0,08}$$

$$IQA = 24,05^{0,17} \times 6,51^{0,15} \times 86,56^{0,12} \times 65,35^{0,10} \times 80,28^{0,10} \times 64,98^{0,10} \times 93^{0,10} \times 84,29^{0,08} \times 64,69^{0,08}$$

$$IQA = 1,7171 \times 1,3245 \times 1,7080 \times 1,5189 \times 1,5505 \times 1,4929 \times 1,5734 \times 1,4258 \times 1,3959$$

$$IQA = 42,70$$

Como  $36 < 42,70 \leq 51$  pode-se afirmar que a classificação da água nesse caso é REGULAR, de acordo com a tabela de classificação adotada pela CETESB (Quadro 1).

## 4.2 Desenvolvimento dos índices fuzzy de qualidade da água do rio Cachoeira

Para o desenvolvimento do Índice de Qualidade da Água Fuzzy do Rio Cachoeira ( $IQA_{FRC}$ ) foram utilizados os mesmos nove parâmetros que compõem o IQA clássico, os quais foram considerados como variáveis linguísticas de entrada para o sistema fuzzy e a cada uma delas atribuídos cinco termos linguísticos, a saber: Muito Baixo (MB), Baixo (B), Médio (M), Alto (A) e Muito Alto (MA).

Num sistema fuzzy o número de regras linguísticas cresce exponencialmente, conforme argumentado na Seção 2.4. Considerando as nove variáveis e os cinco termos linguísticos referidos, ter-se-ia  $5^9 = 1.953.125$  regras linguísticas o que, além de exigir muito tempo do pesquisador e especialistas envolvidos, gera um grande esforço computacional.

Para contornar essa limitação optou-se por dividir as variáveis de entrada em sistemas fuzzy intermediários e usar a saída desses sistemas como entrada para o sistema final. Assim, consegue-se reduzir substancialmente o número de regras em cada etapa do processo de modelagem.

Dessa forma, as nove variáveis foram divididas em três grupos de acordo com o peso do IQA, Figura 34. No grupo 1, denominado peso alto, estão as três parâmetros com maior peso no IQA: Oxigênio Dissolvido (OD), Coliformes Termotolerantes (CT) e Potencial de Hidrogênio (pH). No segundo grupo, o qual foi chamado de peso médio, estão as quatro variáveis que têm peso intermediário e iguais no IQA: Temperatura, Nitrogênio Total (NT), Fósforo Total (FT) e Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO). Já no grupo 3 estão as duas variáveis com menor peso: Turbidez (Tu) e Sólidos Totais (ST). Esses três grupos são usados novamente no sistema realimentando-o para gerar o índice final de qualidade da água do rio Cachoeira.

A primeira etapa consistiu na divisão das nove variáveis em três grupos, conforme explicado acima. A Figura 35 mostra a janela do Matlab onde são definidas as variáveis de entrada, o conjunto universo de cada uma delas e os métodos de fuzzificação, inferência e defuzzificação do sistema fuzzy.

A segunda etapa foi a definição das funções de pertinência para cada uma das variáveis, associando-as aos termos linguísticos Péssimo (PE), Ruim (RU), Regular (RE), Bom (BO) e Excelente (EX) que representam a influência do parâmetro correspondente no índice final de qualidade da água do rio Cachoeira num universo de discurso de 0 a 100, onde 0 representa a pior qualidade e 100 a melhor.

A terceira etapa do processo de modelagem fuzzy foi a composição das regras linguísticas que teve como premissa para sua definição os pesos de cada um dos parâmetros na Tabela 4 e o somatório em cada um dos três grupos, levando-se em consideração também as curvas de variação média do IQA clássico. Todo esse trabalho com a supervisão de especialistas da

Universidade Estadual de Santa Cruz, com alto conhecimento e publicações na área de qualidade da água.

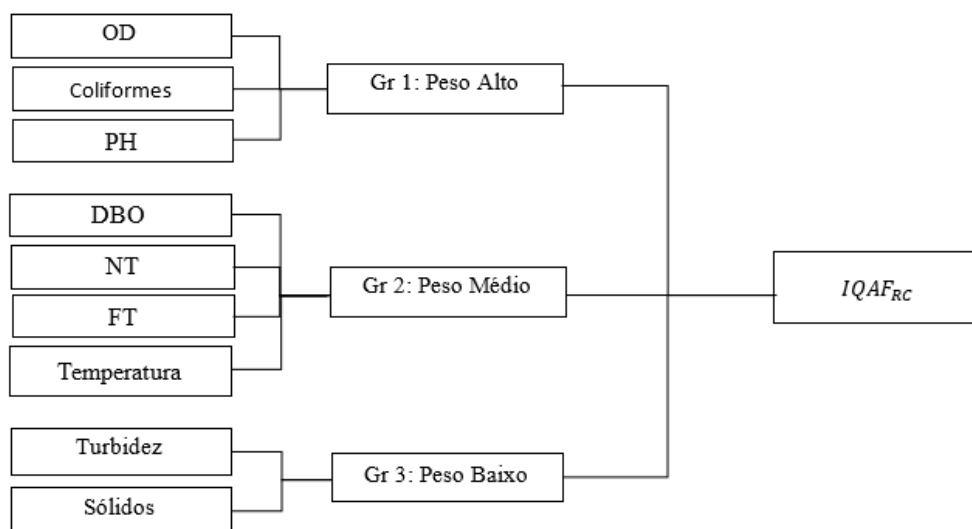


Figura 34 – Fluxograma do sistema de inferência fuzzy.

Nota: OD: Oxigênio Dissolvido, PH: Potencial de Hidrogênio, DBO: Demanda Bioquímica de Oxigênio, NT: Nitrogênio Total, FT: Fósforo Total,  $IQAF_{RC}$ : Índice de Qualidade da Água Fuzzy do Rio Cachoeira.

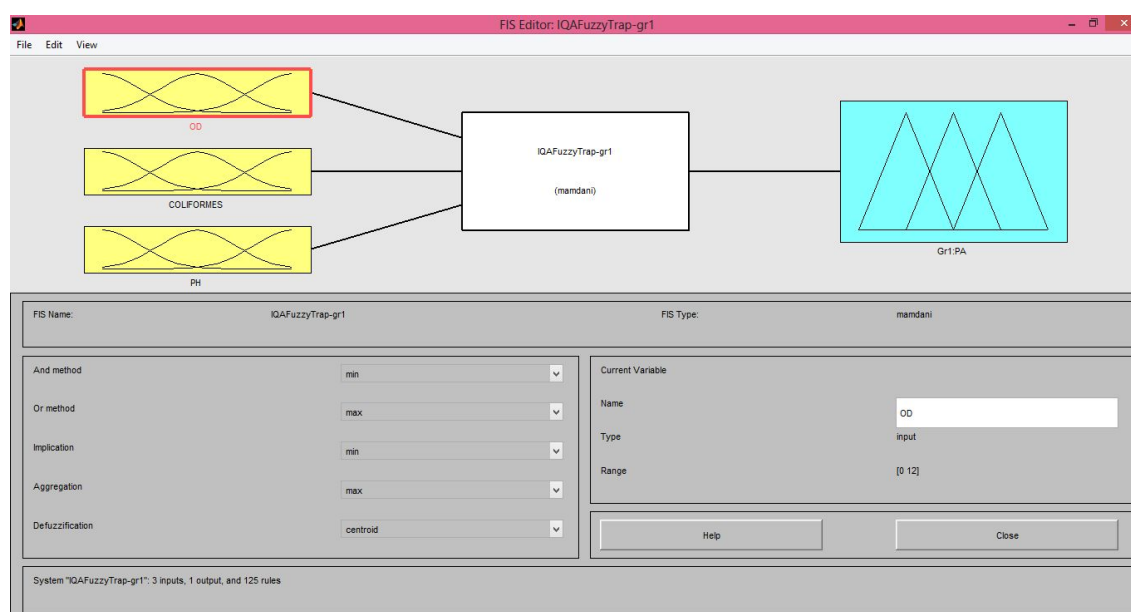


Figura 35 – Definição das variáveis linguísticas do grupo 1.

A Tabela 9 exibe a quantidade de regras de cada um dos três grupos e do grupo final para obter o  $IQAF_{RC}$ . Percebe-se na tabela que o grupo 1, por exemplo, como tem três variáveis linguísticas e cinco termos linguísticos (quantidade comum a todos os grupos), tem  $5^3 = 125$  regras linguísticas. Analogamente os grupos 2 e 3 possuem, respectivamente, 625 e 25 regras cada. Como esses três grupos formam novas entradas no sistema, geram mais 125 regras. Assim, tem-se um total de 900 regras linguísticas para o sistema fuzzy.

Tabela 9 – Número de regras do IQA fuzzy do rio Cachoeira.

Grupo	N. de variáveis linguísticas	N. de termos linguísticos	N. de regras
Grupo 1: Peso alto	3	5	$5^3 = 125$
Grupo 2: Peso médio	4	5	$5^4 = 625$
Grupo 3: Peso baixo	2	5	$5^2 = 25$
$IQA_{RC}$	3	5	$5^3 = 125$
<b>Total</b>			<b>900</b>

Foram feitas simulações com funções triangulares e trapezoidais e depois com funções gaussianas. As Figuras 36 e 37 permitem fazer um comparativo entre esses tipos de funções.

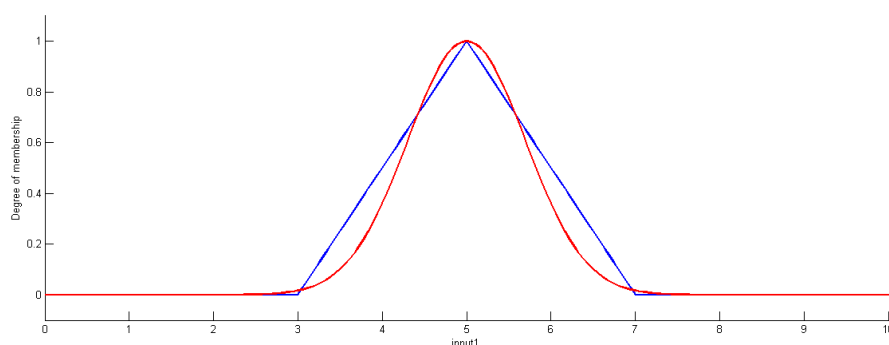


Figura 36 – Comparativo entre as funções triangulares versus gaussianas.

Observando a Figura 36, constata-se que o sistema com funções gaussianas resulta em maiores valores quando o parâmetro está mais perto de 5 (que teoricamente seria o valor central, ideal), mas na medida em que o parâmetro se afasta de 5 a função triangular começa a ser maior. Isso quer dizer que o sistema gaussiano é mais “exigente” que o triangular, que ele fornece saídas mais altas quando o parâmetro está próximo do ideal e saídas menores, quando mais longe do valor ideal. Isso pode ser considerado uma vantagem em relação ao sistema triangular.

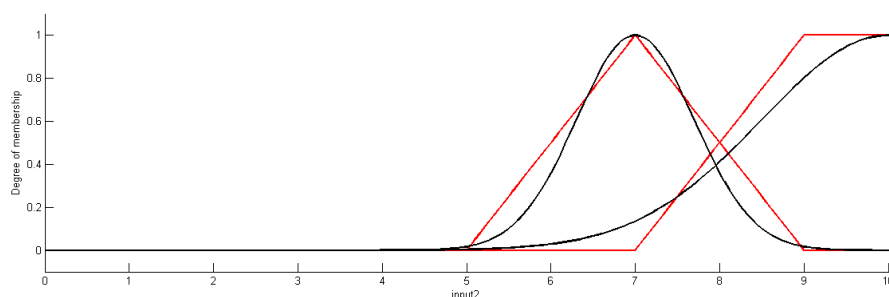


Figura 37 – Comparativo entre as funções triangulares e trapezoidais versus gaussianas.

Por outro lado, admitindo que a Figura 37 represente os estados bom (esquerda) e excelente (direita) para o sistema triangular/trapezoidal (em vermelho) e o gaussiano (em preto), o estado excelente tende para valores maiores que 8. Assim, para cobrir esta faixa inteira com a função gaussiana, foi necessário “abrir” muito a função, e como ela decai mais lentamente,

acaba influenciando muito também no estado bom. Com isso, conclui-se que esse tipo de queda para faixas amplas é melhor representado pela função trapezoidal.

Foi utilizado o método de Mamdani para inferência e o da centroide (centro de área) para defuzzificação. Para implicação e agregação foram utilizadas as regras do mínimo e máximo, respectivamente. A seguir caracteriza-se cada um dos grupos em que se subdividiu o sistema fuzzy.

#### 4.2.1 Grupo 1: Subíndice Peso Alto

Esse grupo é formado pelos parâmetros Oxigênio Dissolvido (OD), Coliformes Termotolerantes (CT) e Potencial de Hidrogênio (pH). Os valores obtidos de OD foram convertidos em porcentagem de saturação de oxigênio dissolvido na água (%OD), conforme Fórmula 8 apresentada no Capítulo 2.

As Figuras 38 e 39 exibem as funções de pertinência triangulares/trapezoidais e gaussianas, respectivamente, para o parâmetro percentual de OD. Já as Figuras 40 e 41 mostram as funções triangulares/trapezoidais e gaussianas, respectivamente, para o parâmetro coliformes e as Figuras 42 e 43 para o parâmetro pH.

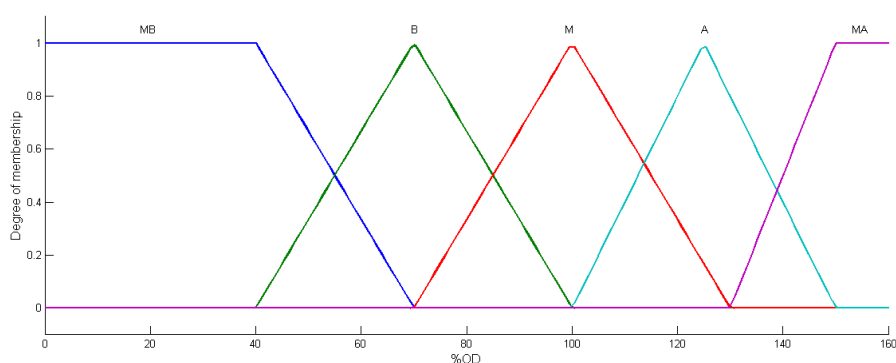


Figura 38 – Funções triangulares e trapezoidais do %OD.

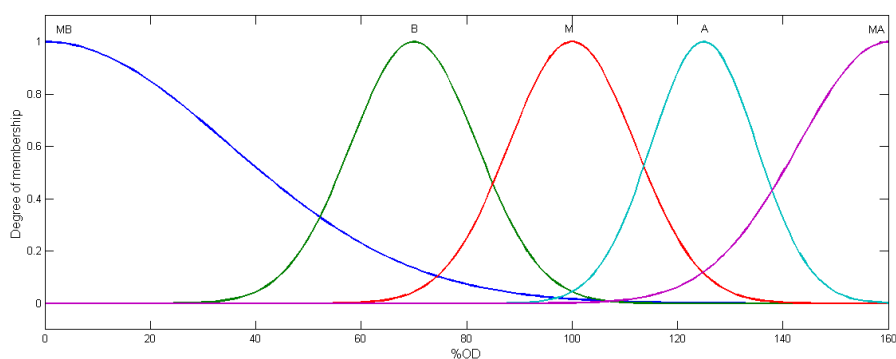


Figura 39 – Funções gaussianas do %OD.

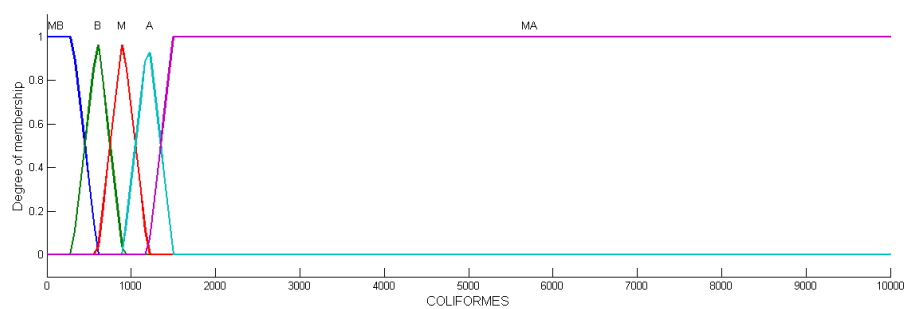


Figura 40 – Funções triangulares e trapezoidais do parâmetro coliformes.

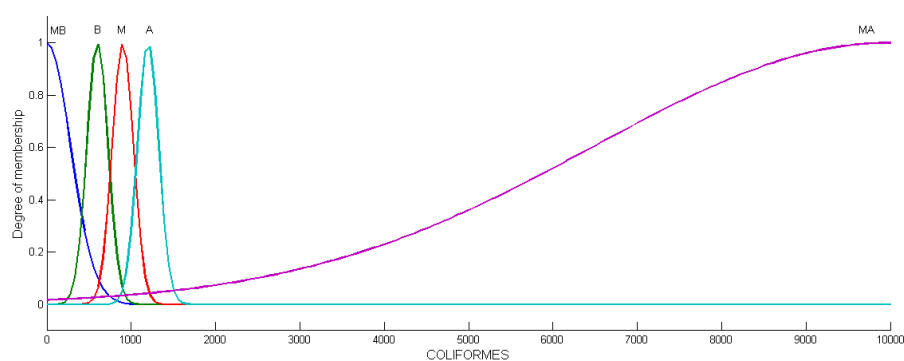


Figura 41 – Funções gaussianas do parâmetro coliformes.

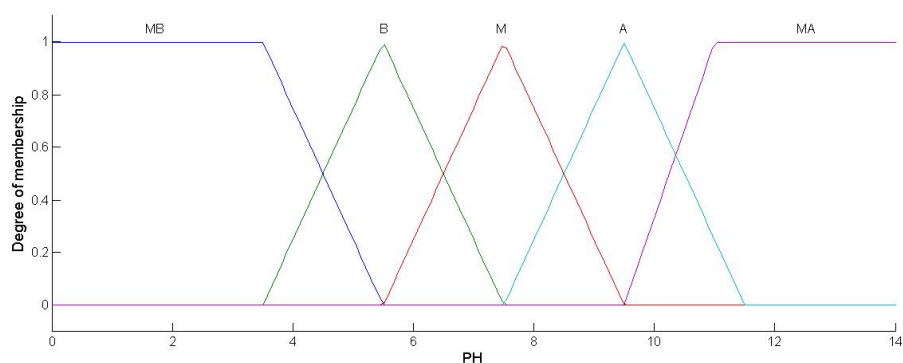


Figura 42 – Funções triangulares e trapezoidais do pH.

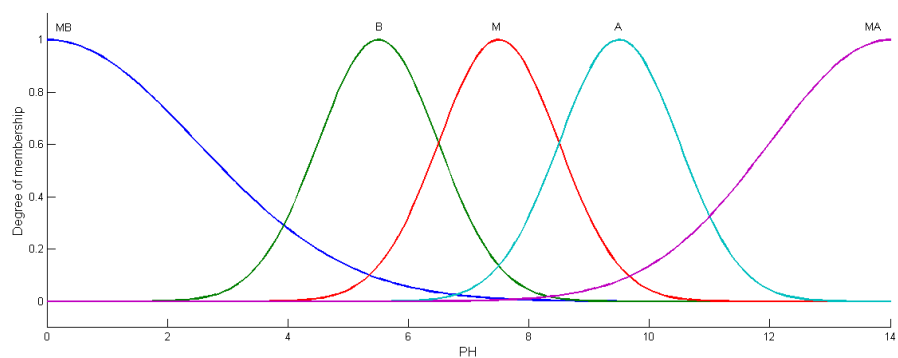


Figura 43 – Funções gaussianas do pH.

Na Figura 44 podem ser visualizados respectivamente os gráficos de superfície e o plano de fase para %OD e coliformes. Pode-se observar que o valor do subíndice Peso Alto é maior

para valores de %OD entre 70 e 130 e coliformes abaixo de 1.000 NMP/100 ml.

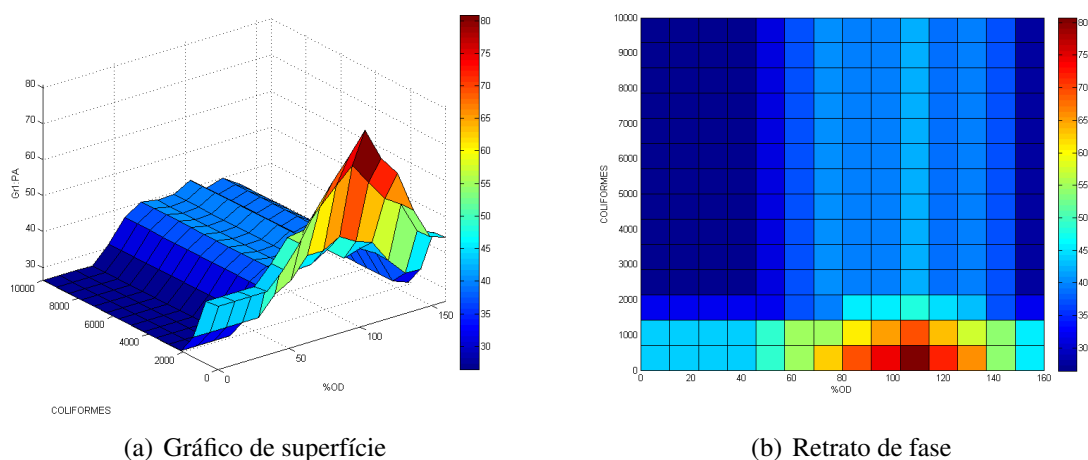


Figura 44 – Gráficos dos parâmetros %OD e coliformes.

A Figura 45 mostra os gráficos de superfície e o plano de fase para %OD e pH que representam a influência desses parâmetros no grupo peso alto e, conseqüentemente, para a qualidade da água. Pode-se observar que valores de pH entre 6 e 9 e %OD entre 70 e 130 influenciam ainda mais para o aumento do subíndice correspondente.

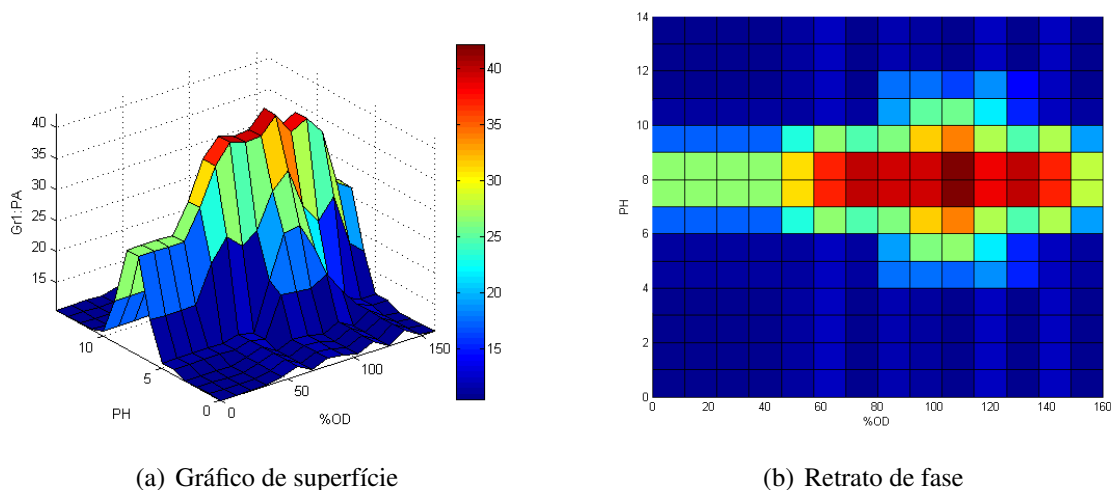


Figura 45 – Gráficos dos parâmetros %OD e pH.

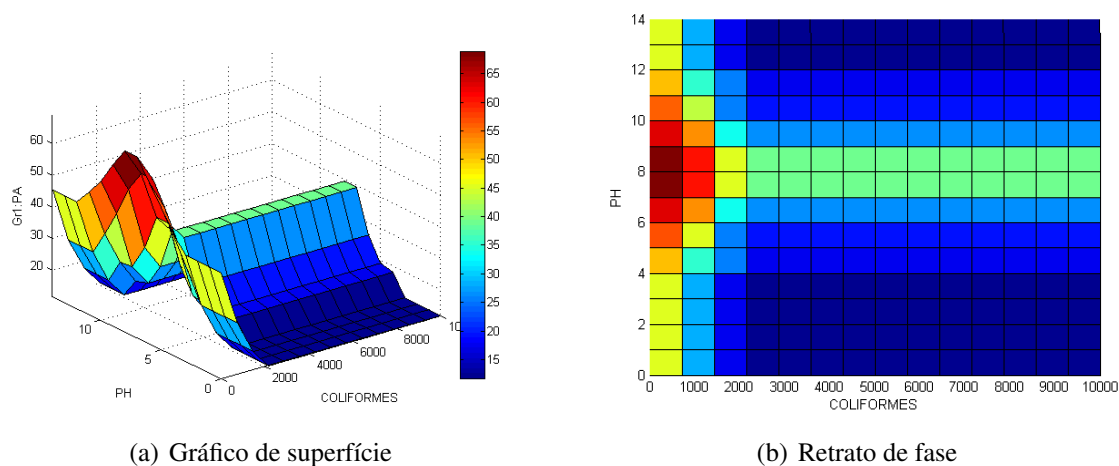
Os gráficos de superfície e plano de fase para os parâmetros coliformes e pH estão na Figura 46. Fixando o valor de %OD, quanto mais baixo os valores de coliformes e mais próximo de 7,5 os valores do pH, maior é o valor do subíndice peso alto.

#### 4.2.2 Grupo 2: Subíndice Peso Médio

É formado pelos parâmetros que têm o mesmo peso no IQA: Temperatura, Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO), Nitrogênio Total (NT) e Fósforo Total (FT). As Figuras 47



e 48 mostram as funções de pertinência do parâmetro temperatura para ambos os sistemas e as Figuras 49 e 50 do nitrogênio total. As Figuras 51 e 52 exibem as funções triangulares e trapezoidais e gaussianas para o fósforo total, respectivamente. No caso da DBO tais funções são mostradas nas Figuras 53 e 54.



(a) Gráfico de superfície

(b) Retrato de fase

Figura 46 – Gráficos dos parâmetros coliformes e pH.

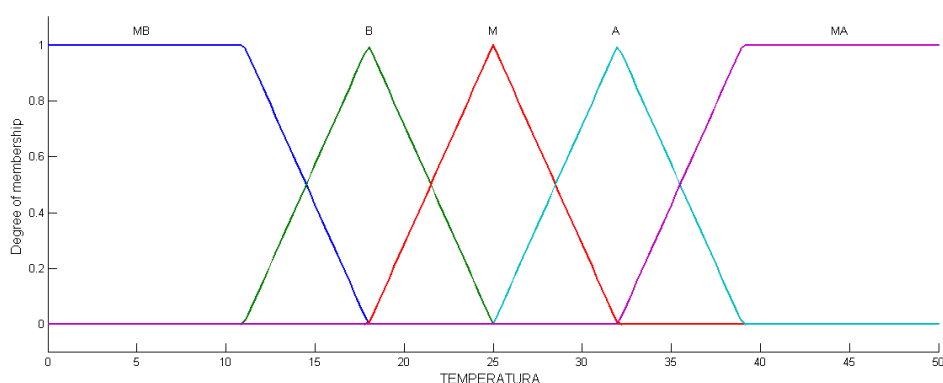


Figura 47 – Funções triangulares e trapezoidais da temperatura.

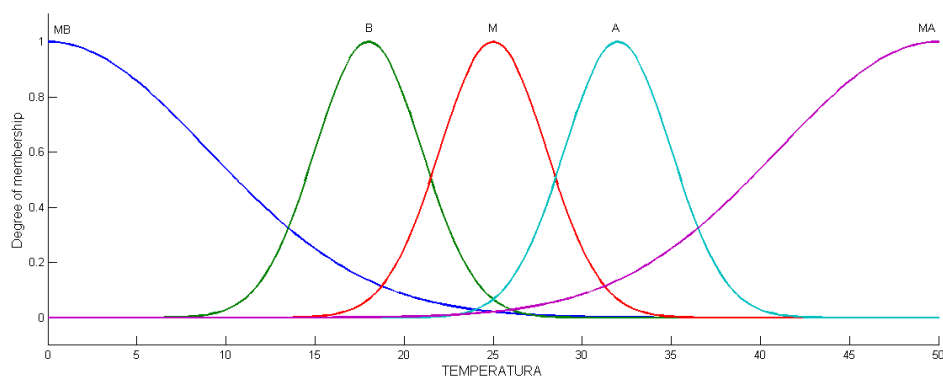


Figura 48 – Funções gaussianas da temperatura.

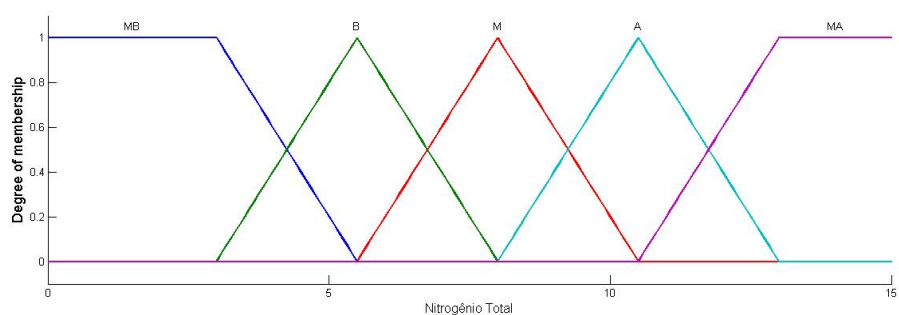


Figura 49 – Funções triangulares e trapezoidais do nitrogênio total.

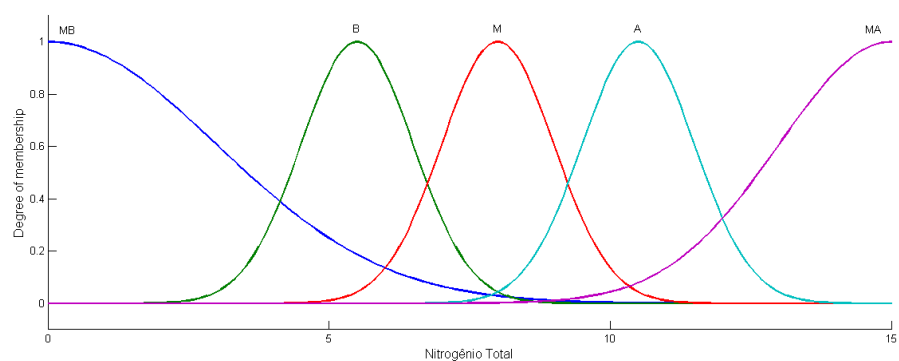


Figura 50 – Funções gaussianas do nitrogênio total.

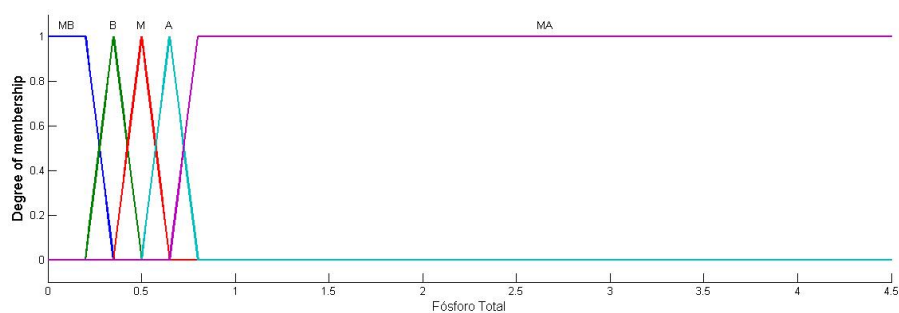


Figura 51 – Funções triangulares e trapezoidais do fósforo total.

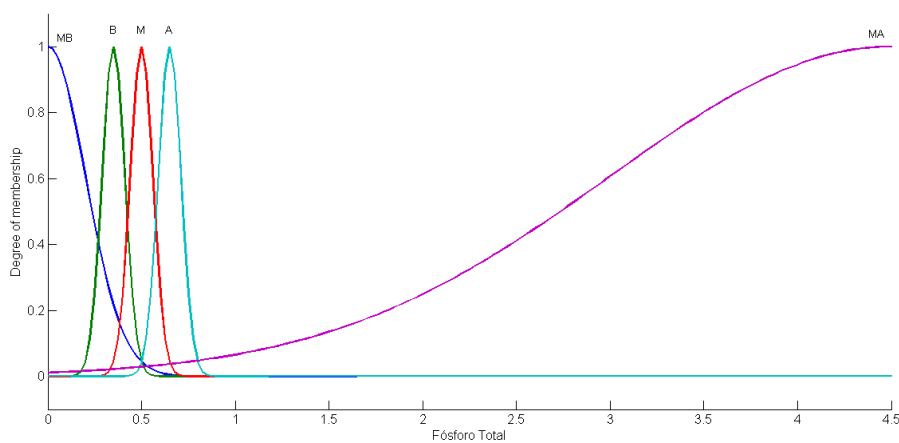


Figura 52 – Funções gaussianas do fósforo total.

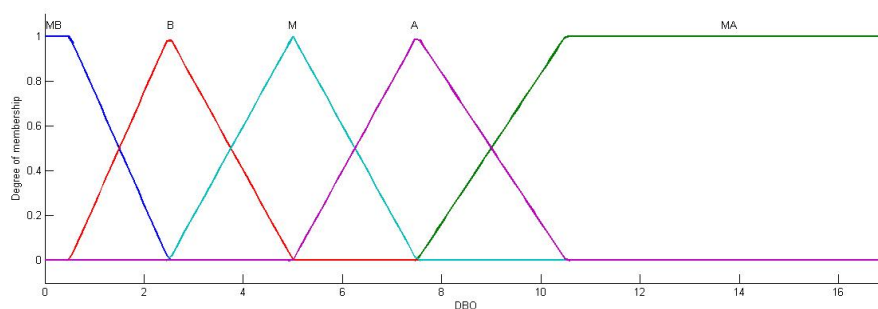


Figura 53 – Funções triangulares e trapezoidais da DBO.

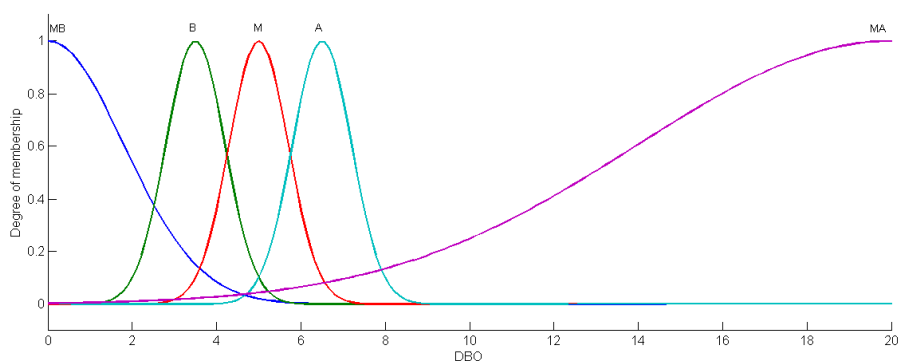
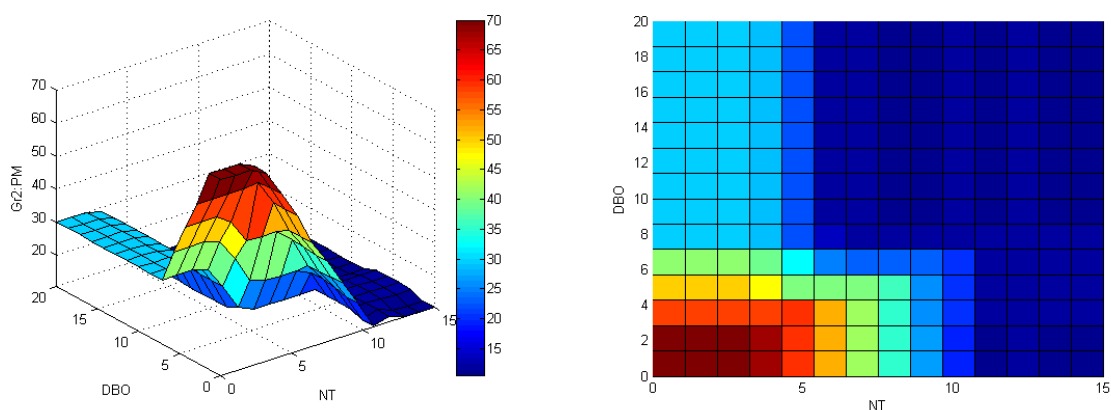


Figura 54 – Funções gaussianas da DBO.

Os gráficos de superfície e o retrato de fase dos parâmetros nitrogênio total e DBO estão representados na Figura 55. Optou-se por não colocar os gráficos de todas as combinações possíveis desse grupo (seis combinações e doze gráficos) para não sobrecarregar demasiadamente o texto de imagens.



(a) Gráfico de superfície

(b) Retrato de fase

Figura 55 – Gráficos dos parâmetros nitrogênio total e DBO.

#### 4.2.3 Grupo 3: Subíndice Peso Baixo

Esse grupo é formado pelos parâmetros que têm menor peso no IQA: Turbidez (Tu) e Sólidos Totais (ST). As Figuras 56 e 57 mostram as funções de pertinência triangulares e

trapezoidais construídas para essas variáveis.

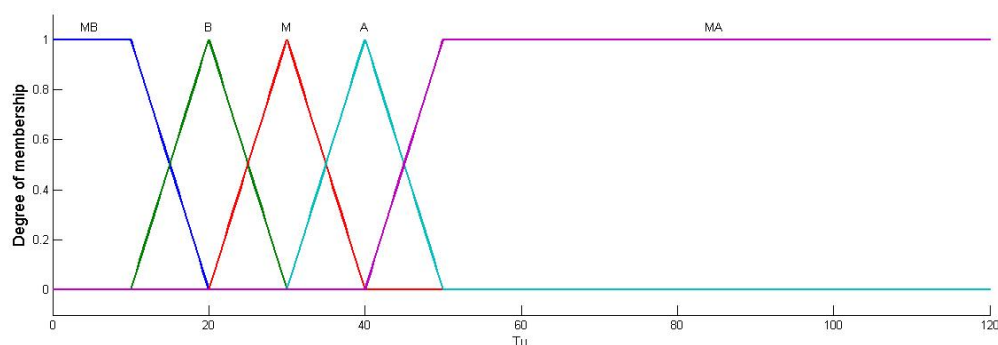


Figura 56 – Funções de pertinência da turbidez.

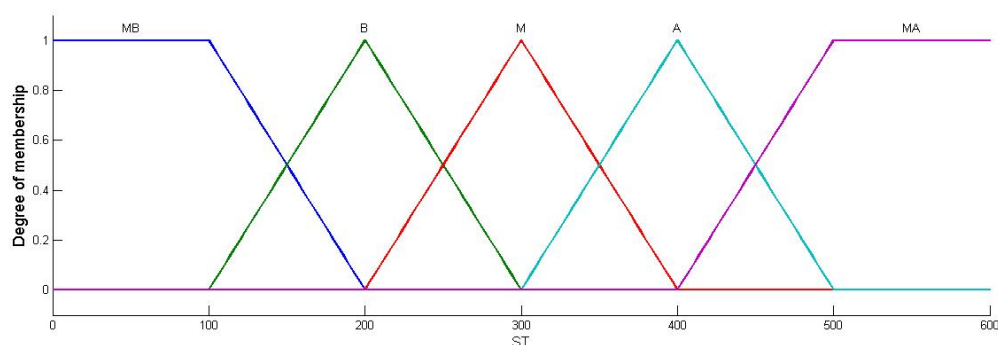
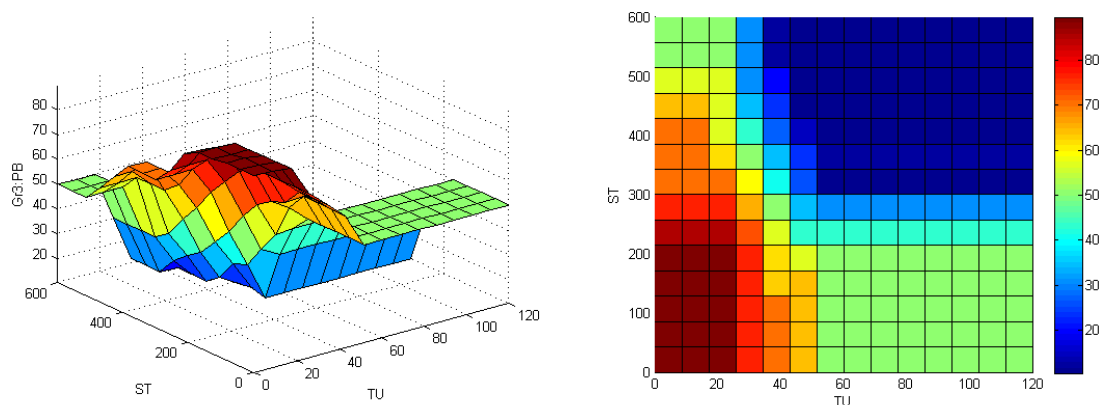


Figura 57 – Funções de pertinência dos sólidos totais.

A Figura 58 exibe os gráficos de superfície e retrato de fase correspondentes. Nota-se que quanto menor os valores desses parâmetros maior é o valor desse subíndice, isso significa que melhor é a qualidade da água (fixando os outros parâmetros em valores aceitáveis).



(a) Gráfico de Superfície

(b) Retrato de fase

Figura 58 – Gráficos dos parâmetros turbidez e sólidos totais.

#### 4.2.4 $IQAF_{RC}$ do rio Cachoeira

Finalmente, realimentando o sistema com os resultados do grupo 1 (subíndice Peso Alto), grupo 2 (subíndice Peso Médio) e do grupo 3 (subíndice Peso Baixo) como variáveis de entrada, obtêm-se o Índice de Qualidade da Água Fuzzy do Rio Cachoeira ( $IQAF_{RC}$ ). Os resultados do novo IQA fuzzy proposto foram utilizados para fazer uma nova classificação da qualidade da água das mesmas amostras aplicadas ao IQA clássico, no entanto, sob a ótica de um novo modelo baseado na lógica fuzzy, que rompe com o princípio da dualidade da lógica clássica utilizada na classificação da qualidade da água.

A classificação da água pela aplicação direta dos resultados do cálculo do IQA na tabela da CETESB promove uma mudança abrupta de uma classe para outra baseado nos parâmetros da lógica clássica vigente, mediante pequenas variações nos resultados do IQA. Esses resultados deverão ser diferentes dos resultados do IQA fuzzy obtidos por meio do sistema de inferência, cuja principal característica é a flexibilização e a aceitação de uma pertinência relativa de um elemento a um conjunto, garantindo uma passagem suave e gradual de uma categoria (excelente, boa, regular, ruim e péssima) para outra. Na Seção 4.4 são exibidos os resultados obtidos pela metodologia clássica e a nova abordagem fuzzy.

Para testar e validar a funcionalidade do  $IQAF_{RC}$  foram feitas simulações alterando os dados de entrada e observando o comportamento dos dados de saída, verificando se ele garante resultados diferentes dos obtidos com o IQA clássico, que foi tomado como IQA de referência (já que este é resultado de vários estudos e pesquisas no âmbito de gerenciamento de recursos hídricos), porém as médias dos tipos de IQA's não devem ser significativamente diferentes, tendo como referência as curvas de cada parâmetro estabelecidas pela NSF e a Resolução nº 357/2005 do CONAMA (BRASIL, 2005).

### 4.3 Apresentação do aplicativo desenvolvido em Matlab

Para as simulações e cálculos dos IQA's com os valores dos parâmetros em todas as coletas foi desenvolvido um software em Matlab. Os dados são inseridos numa interface gráfica e a partir dessas mesmas entradas é possível fazer três tipos de avaliações simultâneas, produzindo três resultados diferentes. O primeiro deles é a partir da implementação das equações preconizadas pela NSF e adotadas pela CETESB, ou seja, é o IQA tradicional, mundialmente utilizado. O segundo resultado deriva de uma inferência fuzzy, que se utiliza de funções de agregação triangulares e trapezoidais, convenientemente combinadas, de modo a fornecer um resultado numérico do IQA fuzzy. O terceiro e último oferece um resultado pautado pela aplicação das funções gaussianas de agregação fuzzy.

Abaixo, faz-se uma breve descrição da aplicação desenvolvida em Matlab e uma resumida explicação de suas funções. Inicialmente, apresenta-se a interface da Figura 59.

**Calculador de IQA**

Arquivo Exibir Ajuda Sobre Fechar

Gr1: Peso Alto

OD 5.8 mg/L Ccl 110.2

%OD 81.777 Altitude 93

Coliformes 4800 MNP/100

PH 7.9

Gr2: Peso Médio

Temperatura 31.5 °C

NT 0.8 mg/L

FT 0.11 mg/L

DBO 1 mg/L

Gr3: Peso Baixo

Turbidez 4.7 NTU

Sólidos 167 mg/L

Calcular

IQA NSF/CETESB 64.70

IQA Fuzzy Triangular 68.02

IQA Fuzzy Gaussiano 61.95

**Pesos e qi's**

VOLTAR

Parâmetros	qi	Peso
OD	86.18	0.17
Coliformes	11.25	0.15
PH	89.43	0.12
DBO	90.73	0.10
NT	96.09	0.10
FT	86.53	0.10
Temperatura	93.00	0.10
Turbidez	82.94	0.08
Sólidos	79.24	0.08

**SubÍndices**

VOLTAR

Sistema	Ótima	Boa	Regular	Ruim	Péssima
Triang.-Trap	0.00	0.90	0.10	0.00	0.00
Gaussiano	0.09	0.44	0.47	0.10	0.02

**Peso Alto Triang/trap** 40.50

**Peso Alto Gaussiana** 40.73

**Peso Médio Triang/trap** 70.20

**Peso Médio Gaussiana** 66.05

**Peso Baixo Triang/trap** 88.29

**Peso Baixo Gaussiana** 86.54

Figura 59 – Tela principal do software  $IQA_{Fuzzy}$ .

Para gerar os resultados é necessário entrar com os valores dos parâmetros nos campos respectivos na tela da Figura 60. Após entrar com os valores de todos os parâmetros, basta acionar o botão calcular que o sistema retornará os três valores do IQA, sendo o IQA clássico de acordo com as equações convencionais apresentadas no Capítulo 2, o IQA com funções triangulares e trapezoidais e o IQA com funções gaussianas.

Como é necessário todos os parâmetros para cálculo do IQA, caso algum campo esteja vazio, uma caixa de advertência informará ao usuário que todos os campos devem ser preenchidos.

Observe na Figura 60 que foram implementados os itens de menu: arquivo, exibir, ajuda, sobre e fechar. O menu arquivo apresenta as opções/submenus *salvar* (permite salvar os dados e resultados em arquivo de texto), *novo* (para processar um novo cálculo) e *importar dados* que abre outra interface que permite importar dados armazenados em arquivo. O menu exibir permite acessar as opções de mostrar os valores *qi's* de cada parâmetro, a contribuição de cada grupo para o IQA fuzzy e o percentual de pertinência do resultado fuzzy a cada uma das classes de classificação adotadas pela CETESB. Tais funcionalidades serão detalhadas nos tópicos a seguir.

#### 4.3.1 A função de contribuição de cada parâmetro para o IQA Clássico

Tendo em vista possibilitar ao usuário verificar qual é a contribuição individual de cada parâmetro para o valor final do IQA clássico, habilitou-se a função *pesos e qi's*, que levando em

consideração o peso de cada parâmetro estabelecido pela NSF, permite visualizar as contribuições, sejam elas favoráveis ou desfavoráveis, para o valor do IQA final.

Figura 60 – Tela de entrada de dados no software  $IQA_{Fuzzy}$ .

Na Figura 61, observa-se a configuração da tela que corresponde a esta função. Os valores usados foram os mesmos utilizados para o cálculo manual na Seção 4.1, obtendo o mesmo resultado. O parâmetro que menos contribuiu favoravelmente para um IQA elevado foi coliformes termotolerantes com  $q_i = 6,51$ , cujo valor de entrada foi 16000 MNP/100 ml, muito além do limite admitido pela resolução do CONAMA.

#### 4.3.2 A função contribuição de cada grupo para o IQA Fuzzy

Lembrando que para o cálculo do IQA fuzzy os parâmetros foram divididos em três grupos distintos: grupo de peso mais elevado (peso alto), de peso intermediário (peso médio) e peso baixo. A interface da Figura 62 tem a função de fornecer ao usuário a contribuição de cada grupo para o valor do IQA fuzzy final, tanto no sistema de funções triangulares e trapezoidais quanto no sistema de funções gaussianas.

#### 4.3.3 A função índice de pertinência

A essência de toda a teoria da lógica fuzzy está no fato de que um mesmo elemento pode ter diferentes níveis de pertencimento a diferentes conjuntos. Sendo assim, o resultado do IQA fuzzy pode pertencer a diferentes classes de classificação da tabela da CETESB. Objetivando

permitir a observação do pertencimento desse IQA a cada um desses níveis, foi implementada a função *Índices Percentuais* (Figura 63) que oferece o grau percentual de pertencimento de cada IQA fuzzy as diferentes classes de classificação da qualidade da água exibidas na referida tabela.

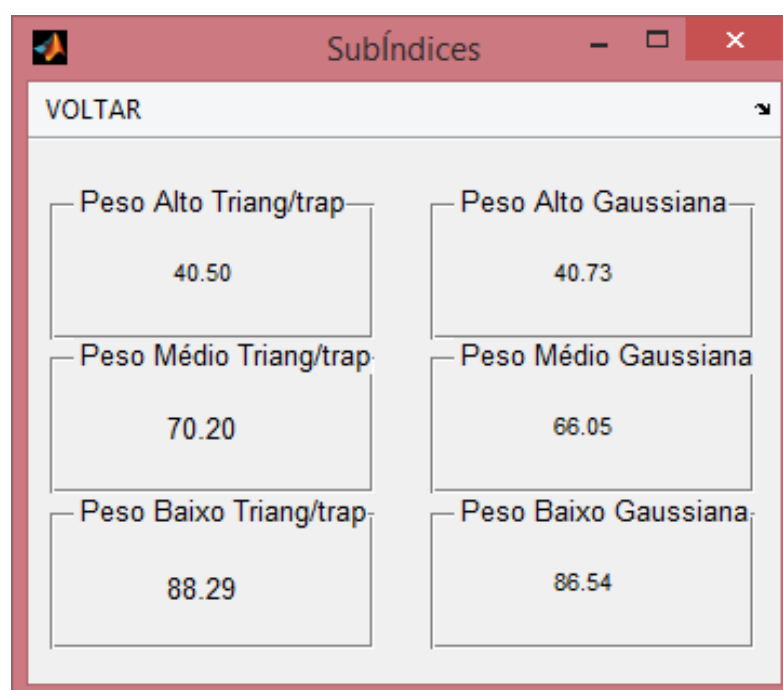


**Pesos e qi's**

VOLTAR

Parâmetros	qi	Peso
OD	23.81	0.17
Coliformes	6.51	0.15
PH	86.56	0.12
DBO	65.35	0.10
NT	80.28	0.10
FT	54.98	0.10
Temperatura	93.00	0.10
Turbidez	84.29	0.08
Sólidos	64.69	0.08

Figura 61 – Contribuição individual de cada parâmetro para o IQA clássico.



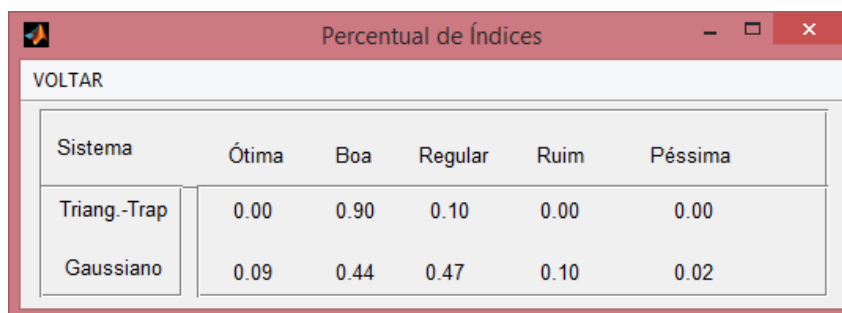
**SubÍndices**

VOLTAR

Peso Alto Triang/trap	Peso Alto Gaussiana
40.50	40.73
Peso Médio Triang/trap	Peso Médio Gaussiana
70.20	66.05
Peso Baixo Triang/trap	Peso Baixo Gaussiana
88.29	86.54

Figura 62 – Contribuição de cada grupo para o IQA fuzzy.



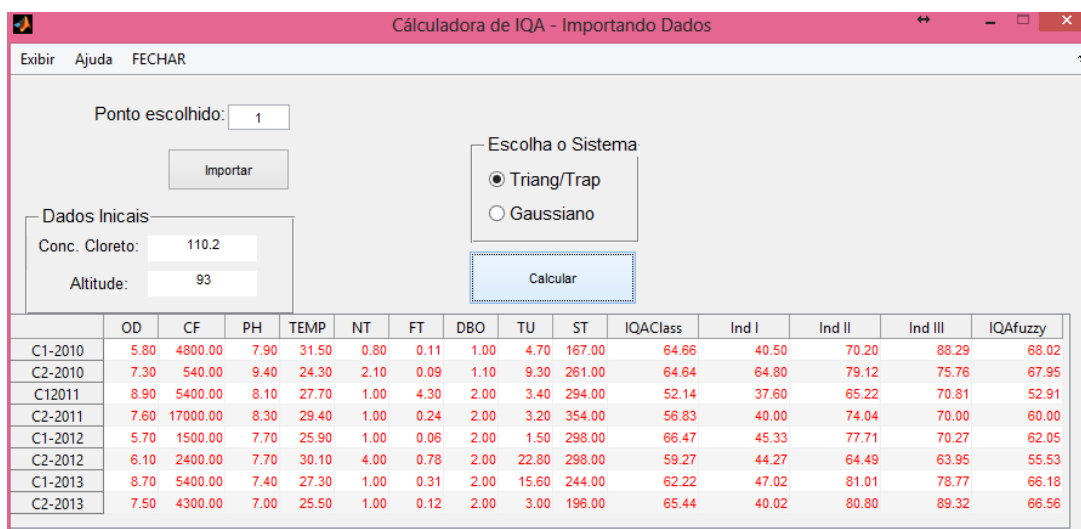


Sistema	Ótima	Boa	Regular	Ruim	Péssima
Triang.-Trap	0.00	0.90	0.10	0.00	0.00
Gaussiano	0.09	0.44	0.47	0.10	0.02

Figura 63 – Índice de participação do IQA fuzzy as categorias de classificação de qualidade da água.

#### 4.3.4 Leitura de dados em arquivos

Com a finalidade de otimizar as simulações das várias coletas, poupando o usuário de digitar os valores de cada parâmetro referente a cada coleta, o que constitui um trabalho laborioso, foi elaborada uma função apresentada na interface da Figura 64 que lê os dados dos parâmetros em arquivo e permite calcular o IQA clássico e o IQA fuzzy correspondente a cada coleta.



	OD	CF	PH	TEMP	NT	FT	DBO	TU	ST	IQAClass	Ind I	Ind II	Ind III	IQAfuzzy
C1-2010	5.80	4800.00	7.90	31.50	0.80	0.11	1.00	4.70	167.00	64.66	40.50	70.20	88.29	68.02
C2-2010	7.30	540.00	9.40	24.30	2.10	0.09	1.10	9.30	261.00	64.64	64.80	79.12	75.76	67.95
C12011	8.90	5400.00	8.10	27.70	1.00	4.30	2.00	3.40	294.00	52.14	37.60	65.22	70.81	52.91
C2-2011	7.60	17000.00	8.30	29.40	1.00	0.24	2.00	3.20	354.00	56.83	40.00	74.04	70.00	60.00
C1-2012	5.70	1500.00	7.70	25.90	1.00	0.06	2.00	1.50	298.00	66.47	45.33	77.71	70.27	62.05
C2-2012	6.10	2400.00	7.70	30.10	4.00	0.78	2.00	22.80	298.00	59.27	44.27	64.49	63.95	55.53
C1-2013	8.70	5400.00	7.40	27.30	1.00	0.31	2.00	15.60	244.00	62.22	47.02	81.01	78.77	66.18
C2-2013	7.50	4300.00	7.00	25.50	1.00	0.12	2.00	3.00	196.00	65.44	40.02	80.80	89.32	66.56

Figura 64 – Tela da interface que permite importar dados.

No campo ponto escolhido, o usuário insere o número do ponto de coleta que quer calcular os IQA's e depois clica no botão importar. O programa lê os dados armazenados previamente em arquivo e armazena numa matriz com dimensões iguais a quantidade de coletas (linhas) e ao número de parâmetros (colunas), exibindo-os na tela. Também exibe a concentração de cloreto e altitude (os quais também podem ser digitados pelo usuário), necessários para o cálculo da concentração de saturação de oxigênio dissolvido que é utilizada para o cálculo do percentual de oxigênio dissolvido.

No exemplo da Figura 64 nas nove primeiras colunas estão os dados importados dos parâmetros que compõem os IQA's das coletas entre 2010 e 2013. Na décima coluna aparece os

resultados do IQA clássico calculado para cada coleta segundo as equações das curvas médias de variação da NSF. As três colunas seguintes exibem os resultados dos subíndices fuzzy de cada coleta, enquanto a última coluna mostra o índice final fuzzy calculado. Nesse exemplo, trabalhou-se com o sistema de funções trapezoidais e triangulares, o que também pode ser feito com funções gaussianas, selecionando-se a opção correspondente na interface.

#### 4.4 Cálculo do IQA Fuzzy do rio Cachoeira utilizando o Matlab

Na Tabela 10 é mostrada a classificação da água do rio Cachoeira de acordo com os resultados do IQA clássico. Uma nova classificação com base na abordagem fuzzy será discutida na Subseção 4.4.3.

Tabela 10 – Classificação da qualidade da água do rio Cachoeira.

		Coletas	IQA	Classificação
Ponto 1	2010	Campanha 1	64,70	BOA
		Campanha 2	64,68	BOA
	2011	Campanha 1	52,17	BOA
		Campanha 2	56,87	BOA
	2012	Campanha 1	66,51	BOA
		Campanha 2	59,31	BOA
	2013	Campanha 1	62,26	BOA
		Campanha 2	65,48	BOA
Ponto 2	2010	Campanha 1	35,51	RUIM
		Campanha 2	28,52	RUIM
	2011	Campanha 1	50,80	REGULAR
		Campanha 2	49,47	REGULAR
	2012	Campanha 1	29,75	RUIM
		Campanha 2	36,6	REGULAR
	2013	Campanha 1	42,70	REGULAR
		Campanha 2	58,04	BOA
Ponto 3	2010	Campanha 1	62,68	BOA
		Campanha 2	63,03	BOA
	2011	Campanha 1	68,59	BOA
		Campanha 2	64,91	BOA
	2012	Campanha 1	62,99	BOA
		Campanha 2	63,15	BOA
	2013	Campanha 1	63,38	BOA
		Campanha 2	73,19	BOA

Na maioria das coletas a água ficou classificada como boa, classificação esta predominante nos pontos de coleta 1 e 3. No ponto 2, a classificação da água ficou entre regular e ruim, sendo classificada como boa apenas na última coleta de 2013.

A Tabela 11 e os gráficos da Figura 65 permite comparar os três IQA's (IQA clássico, IQA fuzzy baseado em funções triangulares e trapezoidais e o IQA com funções gaussianas), cujos valores não se distanciam substancialmente, o que pode ser percebido pelo comportamento das curvas dos gráficos da referida figura.

Tabela 11 – Valores dos IQA's do rio Cachoeira no período de 2010 a 2013.

			IQA Clássico	IQA TripTrap	IQA Gauss
Ponto 1	2010	Campanha 1	64,70	68,02	61,95
		Campanha 2	64,68	67,95	70,24
	2011	Campanha 1	52,17	52,91	52,86
		Campanha 2	56,87	60,00	58,75
	2012	Campanha 1	66,51	62,05	68,94
		Campanha 2	59,31	55,53	44,68
	2013	Campanha 1	62,26	66,18	58,30
		Campanha 2	65,48	66,56	64,26
Ponto 2	2010	Campanha 1	35,51	28,06	31,37
		Campanha 2	28,52	28,60	27,44
	2011	Campanha 1	50,80	58,19	48,46
		Campanha 2	49,47	49,13	48,40
	2012	Campanha 1	29,75	30,00	27,61
		Campanha 2	36,60	36,58	28,45
	2013	Campanha 1	42,70	40,05	42,34
		Campanha 2	58,04	64,11	62,21
Ponto 3	2010	Campanha 1	62,68	63,49	56,01
		Campanha 2	63,03	61,39	62,76
	2011	Campanha 1	68,59	74,32	73,69
		Campanha 2	64,91	63,16	59,52
	2012	Campanha 1	62,99	64,66	58,65
		Campanha 2	63,15	61,25	56,27
	2013	Campanha 1	63,38	63,97	61,47
		Campanha 2	73,19	74,17	70,83
		<b>IQA médio</b>	<b>56,05</b>	<b>56,68</b>	<b>53,98</b>

Nota: IQA TripTra - IQA baseado em funções triangulares e trapezoidais; IQA Gauss - IQA baseado em funções gaussianas.

Pereira (2010) salienta que, sendo resultado de um produtório, o IQA clássico apresenta o inconveniente de que em situações em que todos os parâmetros apresentam valores satisfatórios, exceto um deles, o resultado final é pouco influenciado negativamente. Ou seja, nesse sistema um parâmetro que esteja totalmente fora do padrão desejado, combinado com valores dos outros parâmetros satisfatórios pode gerar um IQA que classifique a água como excelente. Isso se deve as próprias características das operações matemáticas baseadas em produtórios, em que multiplicações potencializam o resultado, desconsiderando ou neutralizando um único valor negativo.



Figura 65 – Comparação dos valores dos IQA's ao longo do período de estudo.

Pode-se observar, por exemplo, no cálculo do IQA do ponto 1 na primeira campanha de 2013, conforme Tabela 12, que a contribuição do parâmetro coliformes foi bastante baixa em relação aos demais parâmetros e, mesmo assim, o IQA foi relativamente alto, sendo a água classificada como BOA.

O IQA gaussiano é mais sensível as mudanças nos valores individuais dos parâmetros do que os outros dois IQA's. O resultado da avaliação baseada em funções gaussianas é mais rigoroso em sua avaliação, ou seja, para um mesmo conjunto de valores o resultado do IQA gaussiano é normalmente um valor menor que os demais.

#### 4.4.1 Contribuição individual dos parâmetros para o IQA Clássico

A inserção dos valores dos parâmetros de cada coleta na ferramenta desenvolvida em Matlab, conforme apresentada na Seção 4.3, possibilita a geração do valor numérico da contribuição individual de cada um dos parâmetros para o valor final do IQA. É possível verificar então, em determinada coleta, qual parâmetro influenciou de maneira mais desfavorável para obtenção do IQA baixo, por exemplo. As informações de tais contribuições individuais dos parâmetros para todas as simulações feitas constam na Tabela 12.

A Figura 66 apresenta o comportamento dos parâmetros de peso alto (%OD, coliformes e pH). Pode-se observar que o parâmetro que menos contribui para obtenção de um IQA mais elevado foi coliformes termotolerantes, o que leva a entender que para melhorar o IQA nesse manancial é necessário dar maior atenção ao despejo de substâncias que tenham grande concentração de coliformes, pois conforme pode também ser constatado nas Tabelas 6, 7 e 8 esse é um parâmetro que apresenta valores superiores ao estabelecido pelo CONAMA em todos os pontos de coleta.

O oxigênio dissolvido também apresentou  $q_i$  baixo para o grupo em boa parte do período

Tabela 12 – Contribuição dos parâmetros para o valor do IQA clássico.

		%OD	CT	pH	DBO	NT	FT	Temp.	Tu	ST	
Ponto 1	2010	Campanha 1	86,18	11,25	89,43	90,73	96,09	86,53	93,00	82,94	79,24
		Campanha 2	92,79	25,10	36,55	89,76	89,46	88,72	93,00	75,36	67,77
	2011	Campanha 1	98,25	10,70	84,73	81,43	95,07	12,18	93,00	85,53	63,32
		Campanha 2	99,3	6,33	78,64	81,43	95,07	74,45	93,00	85,95	54,85
	2012	Campanha 1	73,21	17,81	92,47	81,43	95,07	92,20	93,00	90,10	62,77
		Campanha 2	88,05	14,93	92,47	81,43	79,77	46,39	93,00	59,37	62,77
	2013	Campanha 1	99,76	10,70	93,60	81,43	95,07	69,18	93,00	67,11	70,00
		Campanha 2	96,45	11,79	88,77	81,43	95,07	85,47	93,00	86,39	75,94
Ponto 2	2010	Campanha 1	40,87	4,59	93,60	19,12	57,84	41,31	93,00	54,20	54,70
		Campanha 2	10,95	3,00	91,17	31,39	43,83	57,37	93,00	73,65	49,87
	2011	Campanha 1	60,14	6,51	93,60	65,35	84,87	58,89	93,00	73,79	68,96
		Campanha 2	57,36	6,33	91,17	65,35	84,87	61,60	93,00	77,64	53,98
	2012	Campanha 1	5,39	3,00	93,60	58,45	95,07	57,7	93,00	85,32	55,14
		Campanha 2	12,48	6,51	86,56	72,99	79,77	55,45	93,00	49,46	55,14
	2013	Campanha 1	23,81	6,51	86,56	65,35	80,28	54,98	93,00	84,29	64,69
		Campanha 2	76,43	8,43	84,02	81,43	89,97	73,65	93,00	83,51	74,99
Ponto 3	2010	Campanha 1	64,91	29,12	93,60	74,61	89,46	42,98	93,00	76,26	55,72
		Campanha 2	62,00	36,85	87,27	75,43	61,41	59,95	93,00	78,59	47,50
	2011	Campanha 1	96,12	25,87	88,77	81,43	79,77	57,87	93,00	75,36	72,79
		Campanha 2	86,83	18,75	93,60	81,43	95,07	62,76	93,00	74,78	56,00
	2012	Campanha 1	34,96	37,56	93,31	81,43	95,07	62,18	93,00	91,62	59,99
		Campanha 2	70,21	29,12	84,02	81,43	84,87	57,37	93,00	51,68	59,99
	2013	Campanha 1	45,96	39,19	84,02	81,43	80,28	56,87	93,00	88,01	56,29
		Campanha 2	83,98	39,19	74,78	81,43	89,97	71,35	93,00	88,73	72,79
Média		65,32	17,05	86,51	73,63	84,71	61,98	93,00	75,40	62,30	

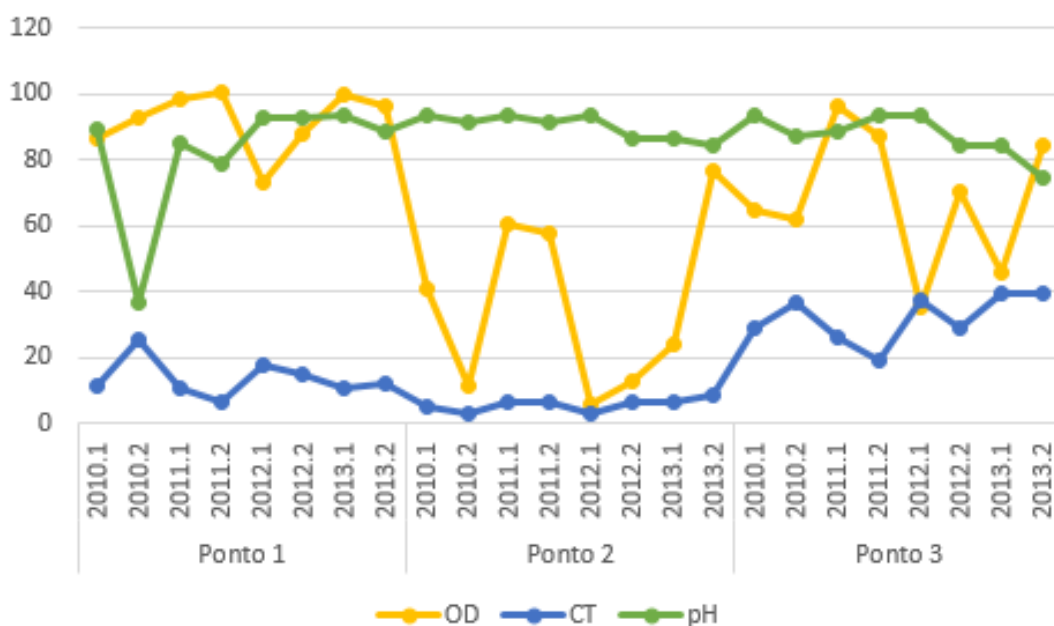


Figura 66 – Contribuição dos parâmetros de peso alto para o IQA.

avaliado, sendo que sua menor contribuição foi no ponto 2. Isso se explica pelo fato que nesse ponto o parâmetro apresenta quase todos os valores fora dos padrões de portabilidade definidos pelo CONAMA.

Sobre o grupo dos parâmetros peso médio, observa-se que o fósforo total foi o que menos contribuiu para um IQA mais elevado (Figura 67), pois apresenta valores elevados na maioria das coletas. Percebe-se pelo gráfico que a contribuição mais baixa é na primeira campanha de 2011 (ponto 1), onde pode ser observado na Tabela 6 que é o maior valor comparando com todas as campanhas de coleta, muito além dos padrões. Como já explicado anteriormente, a temperatura foi considerada como constante igual a  $25^{\circ}\text{C}$  cuja contribuição será sempre igual a 93 para obtenção do IQA final.

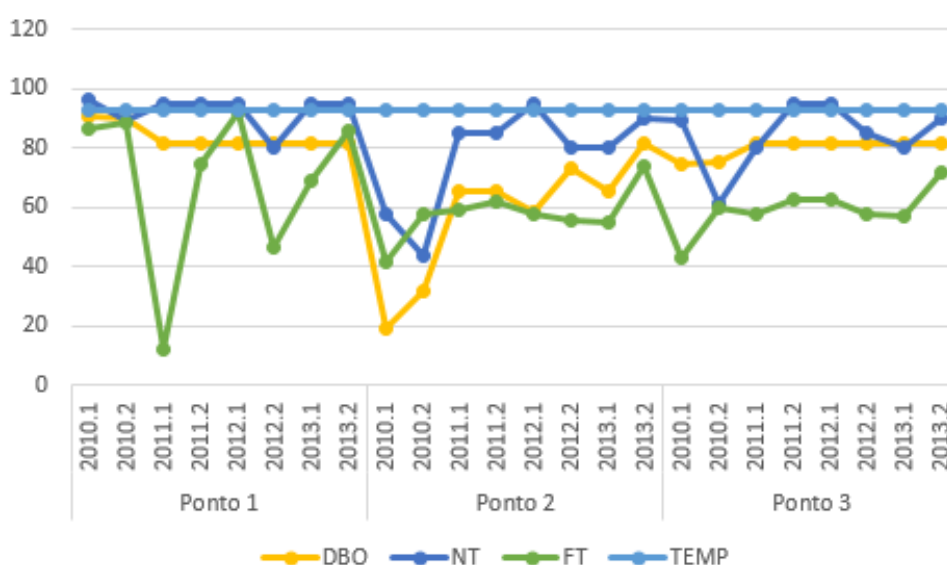


Figura 67 – Contribuição dos parâmetros de peso médio para o IQA.

No grupo dos parâmetros de peso baixo o que menos contribuiu para um IQA mais elevado foi sólidos totais (Figura 68).

#### 4.4.2 Contribuição dos subsistemas (grupos) fuzzy para o cálculo do $IQA_{RC}$

Na Subseção 4.3.2 foi apresentada uma interface do programa construído em Matlab que exibe a contribuição de cada subsistema (peso alto, pelo médio e peso baixo) nos dois sistemas fuzzy (triangular/trapezoidal e gaussiano). Tal possibilidade é útil para saber qual dos subsistemas e consequentemente os parâmetros a ele pertencentes estão se tornando o gargalo para se obter um IQA fuzzy mais ou, menos elevado.

Observa-se a partir dos dados da Tabela 13, cuja representação gráfica encontra-se na Figura 69, que no caso do IQA triangular/trapezoidal o subsistema ou grupo que mais contribuiu para obtenção de um IQA mais elevado foi o grupo peso baixo, seguido pelo grupo peso médio e por último o grupo de peso alto. Tal comportamento se explica porque para o caso do grupo peso

alto, por exemplo, qualquer pequena inadequação aos padrões esperados tem forte influência nos resultados, devido ao alto peso que cada um dos parâmetros desse grupo carrega sobre si.

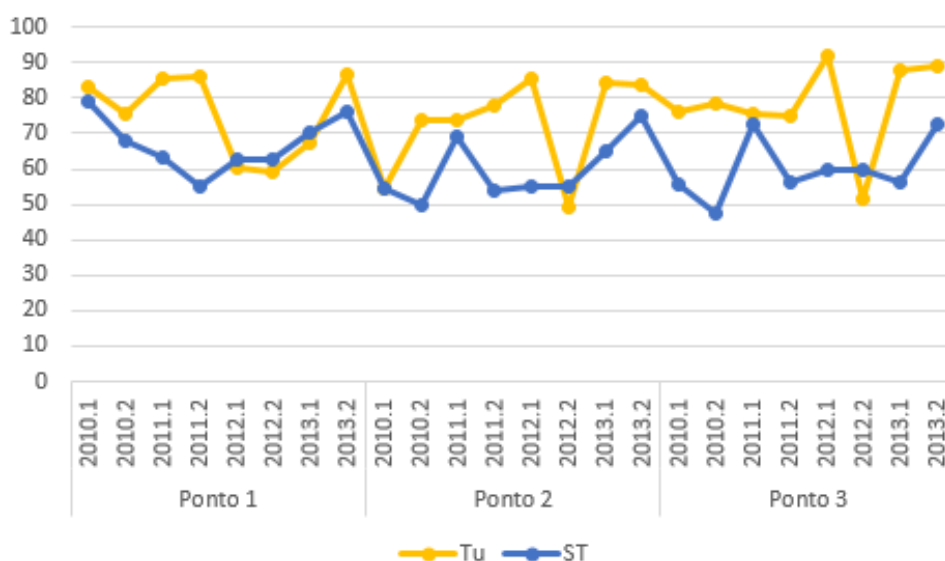


Figura 68 – Contribuição dos parâmetros de peso baixo para o IQA.

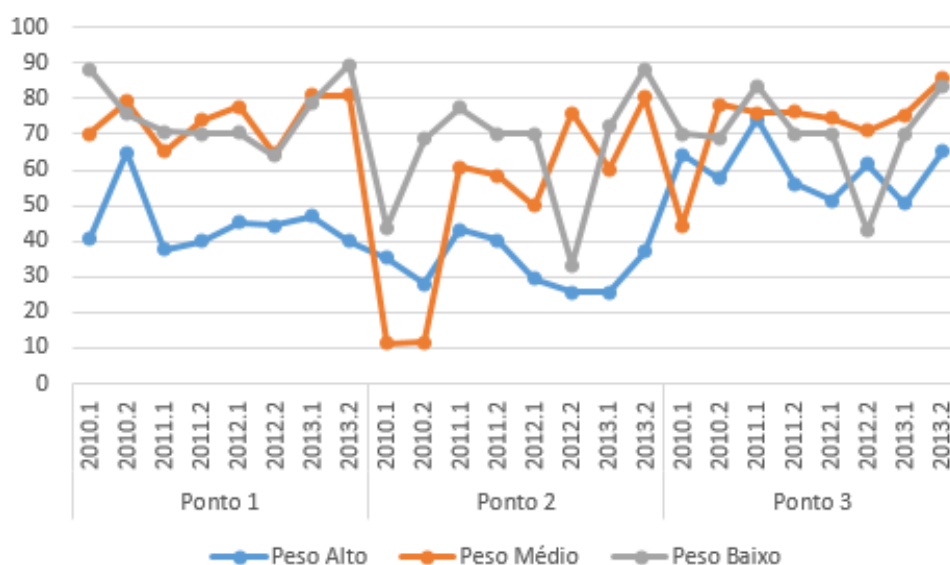


Figura 69 – Contribuição dos subsistemas triangular/trapezoidal para obtenção do IQA.

Os subsistemas do IQA gaussiano seguem o mesmo padrão de comportamento, em que em ordem decrescente, mais contribuem positivamente para o resultado são os grupos peso baixo, médio e peso alto, conforme pode ser confirmado na Tabela 13 e também no comportamento dos gráficos da Figura 70.

Observa-se uma queda acentuada na curva que representa a contribuição do grupo peso médio na primeira e segunda campanhas de 2010, no ponto 2, tanto no sistema com funções

Tabela 13 – Contribuição dos subsistemas (grupos) para obtenção do IQA fuzzy.

			Funções Triang. e trapezoidais			Funções Gaussianas		
			Peso Alto	Peso Médio	Peso Baixo	Peso Alto	Peso Médio	Peso Baixo
Ponto 1	2010	Campanha 1	40,50	70,20	88,29	40,73	66,05	86,54
		Campanha 2	64,8	79,12	75,76	61,30	68,23	74,60
	2011	Campanha 1	37,60	65,22	70,81	33,28	71,32	70,30
		Campanha 2	40,00	74,04	70,00	40,42	65,07	68,58
	2012	Campanha 1	45,33	77,71	70,27	45,84	67,81	70,17
		Campanha 2	44,27	64,49	63,95	39,80	55,70	63,68
	2013	Campanha 1	47,02	81,01	78,77	39,92	65,24	78,09
		Campanha 2	40,02	80,80	89,32	39,72	68,08	87,06
Ponto 2	2010	Campanha 1	35,31	11,38	43,65	36,46	34,03	42,07
		Campanha 2	27,94	11,52	68,57	29,96	16,01	66,45
	2011	Campanha 1	43,04	60,74	77,31	44,82	50,71	76,73
		Campanha 2	40,20	58,41	70,00	44,15	52,51	68,37
	2012	Campanha 1	29,33	50,00	70,00	29,93	50,00	68,57
		Campanha 2	25,70	75,87	33,21	29,82	62,53	33,59
	2013	Campanha 1	25,70	60,06	72,21	30,13	57,50	70,97
		Campanha 2	36,99	80,34	88,21	41,87	64,32	86,27
Ponto 3	2010	Campanha 1	64,21	44,39	70,00	59,14	53,32	68,45
		Campanha 2	57,60	78,27	68,86	58,98	62,64	66,60
	2011	Campanha 1	74,17	75,92	83,43	72,87	63,90	81,44
		Campanha 2	56,02	76,16	70,00	52,15	61,17	67,71
	2012	Campanha 1	51,27	74,52	70,00	47,49	61,25	69,61
		Campanha 2	61,55	70,97	42,86	60,09	61,43	45,61
	2013	Campanha 1	50,60	75,26	70,00	49,34	62,34	68,91
		Campanha 2	65,13	85,61	83,43	67,19	65,93	84,64
Média			46,01	65,92	70,37	45,64	58,63	69,38

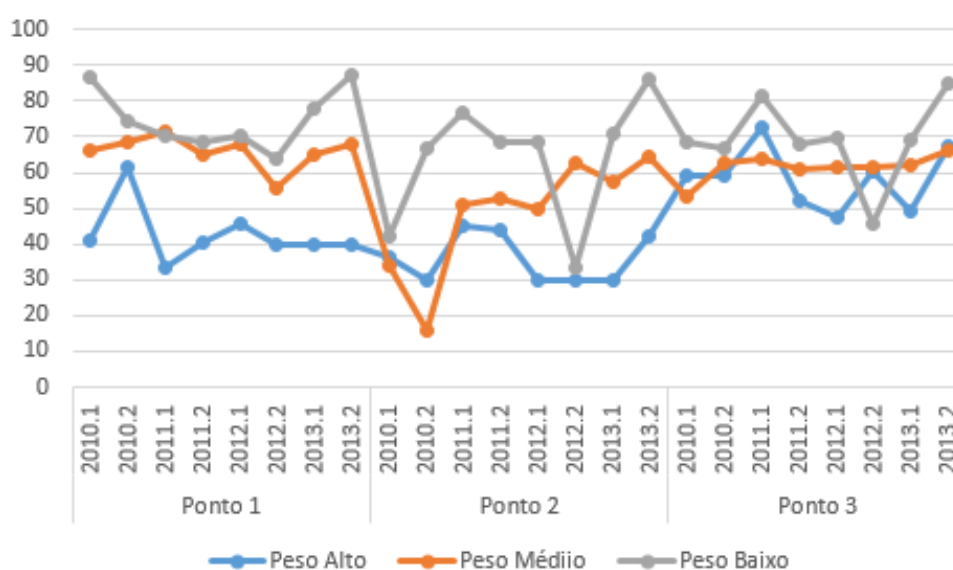


Figura 70 – Contribuição dos subsistemas gaussianos para obtenção do IQA



triangulares e trapezoidais (Figura 69) quanto no sistema com funções gaussianas (Figura 70). Tal comportamento se explica pelo fato de que nessas campanhas de coleta a maioria dos parâmetros desse grupo tiveram seus valores significativamente elevados em relação aos padrões estabelecido pelo CONAMA.

#### 4.4.3 Pertinência dos IQA's fuzzy às classes de qualidade da água

Ao se utilizar a lógica fuzzy como estratégia de modelagem tem-se em mente que um mesmo elemento pode pertencer a mais de um conjunto simultaneamente. Essa característica inerente a lógica fuzzy permite que o resultado do IQA pertença a mais de uma das classes de classificação.

Na Tabela 14 foram colocados os respectivos graus de pertinência dos IQA's fuzzy a cada uma dessas classes de classificação, tanto no caso do sistema triangular/trapezoidal quanto o sistema gaussiano. As Figuras 71, 72 e 73 exibem a representação do grau de pertinência do IQA fuzzy baseado em funções triangulares e trapezoidais a cada categoria de classificação (ótima, boa, regular, ruim e péssima) para cada um dos pontos de coleta.

Tabela 14 – Percentuais de pertinência dos IQA's fuzzy as classes de classificação de qualidade da água.

			IQA Tritrap					IQA Gaussiano				
			PE	RU	RE	BO	OT	PE	RU	RE	BO	OT
Ponto 1	2010	Campanha 1	0,00	0,00	0,10	0,90	0,00	0,02	0,10	0,47	0,44	0,09
		Campanha 2	0,00	0,00	0,10	0,90	0,00	0,01	0,06	0,28	0,74	0,16
	2011	Campanha 1	0,00	0,00	0,85	0,15	0,00	0,04	0,18	0,84	0,25	0,05
		Campanha 2	0,00	0,00	0,50	0,50	0,00	0,03	0,12	0,58	0,36	0,08
	2012	Campanha 1	0,00	0,00	0,40	0,60	0,00	0,01	0,06	0,31	0,68	0,14
		Campanha 2	0,00	0,00	0,72	0,28	0,00	0,06	0,29	0,72	0,15	0,03
	2013	Campanha 1	0,00	0,00	0,19	0,81	0,00	0,03	0,12	0,60	0,35	0,07
		Campanha 2	0,00	0,00	0,17	0,83	0,00	0,02	0,09	0,41	0,51	0,11
Ponto 2	2010	Campanha 1	0,10	0,90	0,00	0,00	0,00	0,14	0,67	0,31	0,07	0,01
		Campanha 2	0,07	0,93	0,00	0,00	0,00	0,18	0,86	0,24	0,05	0,01
	2011	Campanha 1	0,00	0,00	0,59	0,41	0,00	0,05	0,23	0,91	0,19	0,04
		Campanha 2	0,00	0,04	0,96	0,00	0,00	0,05	0,23	0,90	0,19	0,04
	2012	Campanha 1	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,18	0,85	0,25	0,05	0,01
		Campanha 2	0,00	0,67	0,33	0,00	0,00	0,17	0,81	0,26	0,05	0,01
	2013	Campanha 1	0,00	0,50	0,50	0,00	0,00	0,07	0,34	0,62	0,13	0,03
		Campanha 2	0,00	0,00	0,29	0,71	0,00	0,02	0,10	0,47	0,45	0,09
Ponto 3	2010	Campanha 1	0,00	0,00	0,33	0,67	0,00	0,03	0,14	0,69	0,31	0,06
		Campanha 2	0,00	0,00	0,43	0,57	0,00	0,02	0,09	0,45	0,47	0,10
	2011	Campanha 1	0,00	0,00	0,00	0,78	0,22	0,01	0,05	0,23	0,92	0,19
		Campanha 2	0,00	0,00	0,34	0,66	0,00	0,02	0,12	0,55	0,38	0,08
	2012	Campanha 1	0,00	0,00	0,27	0,73	0,00	0,03	0,12	0,58	0,36	0,08
		Campanha 2	0,00	0,00	0,44	0,56	0,00	0,03	0,14	0,68	0,31	0,07
	2013	Campanha 1	0,00	0,00	0,30	0,70	0,00	0,02	0,10	0,49	0,43	0,09
		Campanha 2	0,00	0,00	0,00	0,79	0,21	0,01	0,06	0,27	0,77	0,16

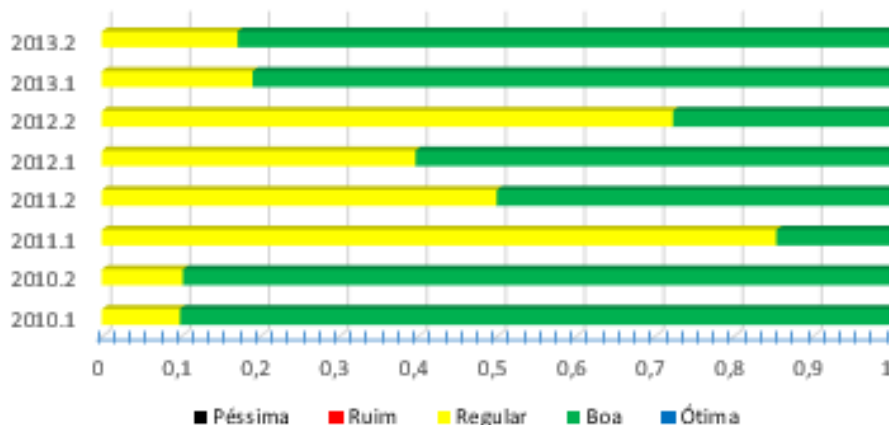


Figura 71 – Pertinência do IQA fuzzy do ponto 1 a cada classe de classificação - Sistema Tritrap

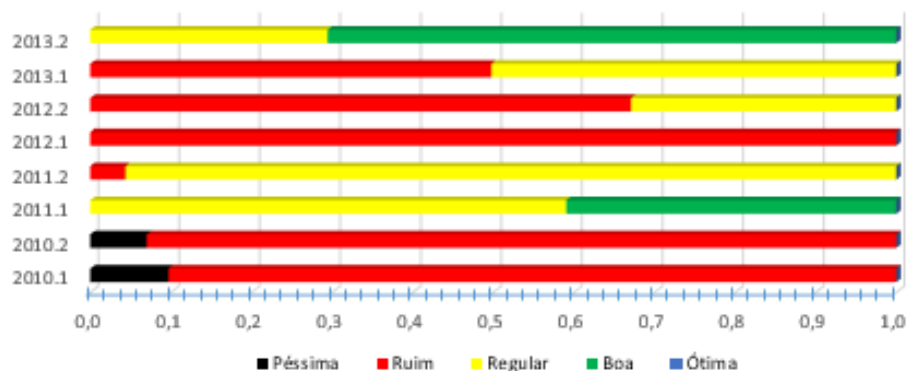


Figura 72 – Pertinência do IQA fuzzy do ponto 2 a cada classe de classificação - Sistema Tritrap

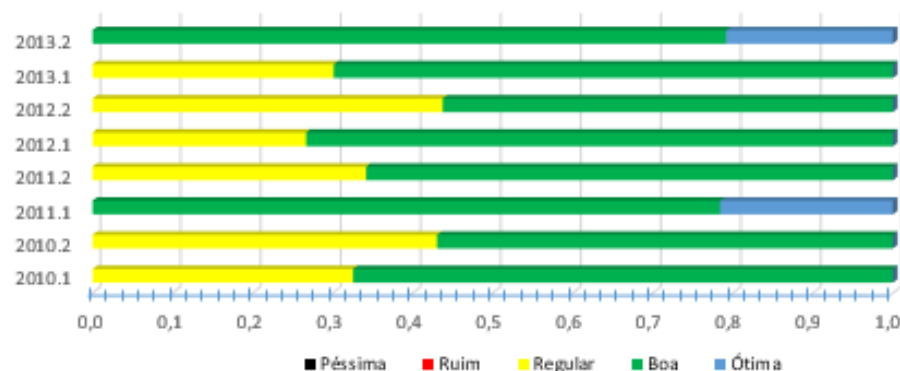


Figura 73 – Pertinência do IQA fuzzy do ponto 3 a cada classe de classificação - Sistema Tritrap

No ponto 1 a classificação da água ficou entre as categorias boa e regular, tendo grau de pertinência maior na categoria boa em cinco das oito coletas. As três coletas em que o maior grau de pertinência é na categoria regular são também os que apresentaram os valores do IQA clássico mais baixos. No ponto 2, em apenas duas coletas a água ficou classificada como boa e regular. Nas demais foi classificada em ruim e regular, ruim e péssima, com maior grau de pertinência a categoria ruim. Já no ponto 3, a classificação da água ficou entre boa e regular, boa e ótima (em duas coletas).

Já as Figuras 74, 75 e 76 mostram a representação gráfica para o IQA fuzzy baseado em funções gaussianas. Nesse caso, em que o resultado do IQA pertence simultaneamente a todas as classificações com diferentes graus de pertinência, no ponto 1 a maior pertinência do IQA se deu as categorias boa e regular, sendo esta última predominante em cinco coletas.

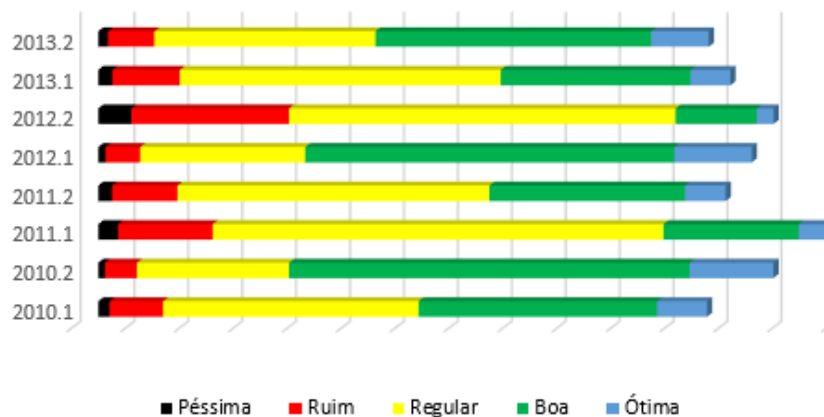


Figura 74 – Pertinência do IQA fuzzy do ponto 1 a cada classe de classificação - Sistema Gaussiano

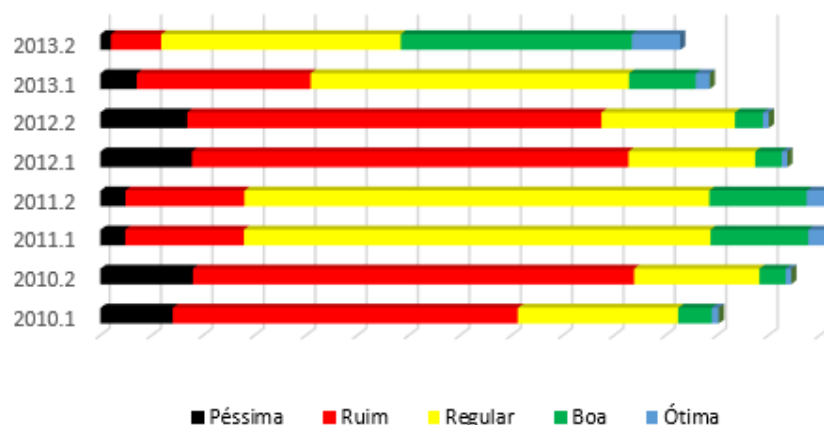


Figura 75 – Pertinência do IQA fuzzy do ponto 2 a cada classe de classificação - Sistema Gaussiano

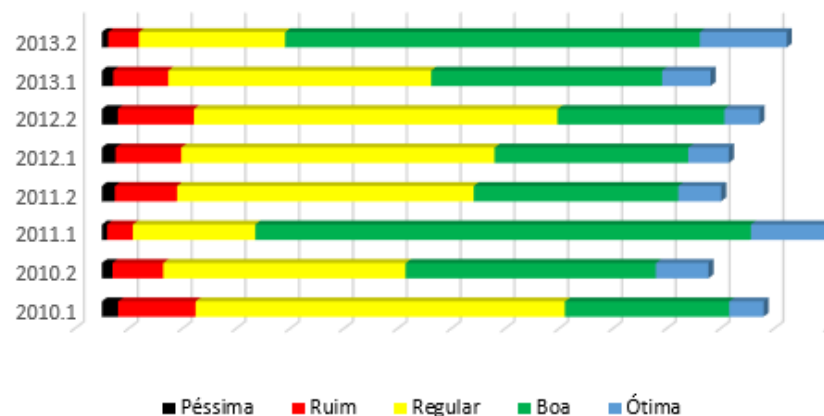


Figura 76 – Pertinência do IQA fuzzy do ponto 3 a cada classe de classificação - Sistema Gaussiano

Na região do ponto 2, a água é classificada predominantemente como ruim em quatro coletas e regular nas outras quatro. Assim como no ponto 1, o ponto 3 tem classificação da água com maior grau de pertinência às classificações boa e regular, conforme pode ser observado nos gráficos das Figuras 74-76.

Analisando esses resultados, percebe-se claramente que no ponto de coleta 2 é que a água se apresentou mais ambientalmente degradada e, conseqüentemente, merece maior atenção dos programas de monitoramento.

## 5 Considerações Finais

A bacia hidrográfica do rio Cachoeira vem sofrendo degradação visível em função das atividades humanas desenvolvidas na região e, em particular, o próprio rio Cachoeira sofre com os efeitos nocivos da poluição, o que prejudica a fauna, flora e a própria população. Nesse sentido, este estudo traz uma nova metodologia para análise da qualidade da água desse manancial, apontando o(s) ponto(s) mais críticos de acordo com as coletas realizadas pelo órgão ambiental da região.

Foram feitas simulações de índices de qualidade da água de acordo com a metodologia clássica com base nas equações desenvolvidas pela NSF e aplicação da lógica fuzzy. No caso da modelagem fuzzy foram desenvolvidos dois índices de qualidade da água, um com funções triangulares e trapezoidais, outro com funções gaussianas. A criação das funções de pertinência e regras linguísticas levou em consideração a opinião de especialistas e pode ser adaptado a diferentes realidades.

A tempo foi desenvolvido um software em linguagem Matlab para fazer as simulações com os dados das coletas, cuja funcionalidade foi explicada no capítulo anterior, e que pode receber dados de mais campanhas e pontos de coletas além das simuladas.

### 5.1 Resultados e discussões

Os resultados dos três índices de qualidade da água se apresentaram não muito distantes, sendo os índices fuzzy mais confiáveis para classificação da qualidade da água, conseguindo distribuir melhor a influência dos parâmetros para obter um IQA mais coerente com o conjunto de parâmetros e não com seus valores individuais. Nesse sentido, o IQA gaussiano é mais criterioso, ou seja, pouco é influenciado negativamente, por exemplo, se apenas um valor de parâmetro estiver muito discrepante em relação aos outros. Para que esse IQA seja muito alto ou muito baixo é preciso que todos os parâmetros tenham seus valores próximos do ideal ou muito discrepantes.

Com os dados simulados, observou-se que o ponto 2 apresenta os piores índices, tanto do ponto de vista da metodologia tradicional quanto da abordagem fuzzy. Esse ponto é localizado na zona urbana de Itabuna e recebe grandes quantidades de despejos orgânicos, apresentando concentrações de oxigênio dissolvido e coliformes termotolerantes fora dos padrões em quase todas as coletas, o que justifica os resultados.

Nesse ponto a qualidade da água, na maioria das coletas, foi classificada como ruim. No caso da modelagem com funções triangulares e trapezoidais, o IQA pertenceu mais a classe ruim em cinco das oito coletas, chegando a pertencer também a classe péssima em duas delas,

conforme pode ser observado na Figura 72. No caso da modelagem com funções gaussianas, apesar do IQA pertencer a todas as categorias com diferentes graus de pertinência, o maior percentual de pertencimento na maioria das coletas também ficou na classe ruim, evidenciado na Figura 75.

Os pontos 1 e 3 apresentaram os melhores resultados em termos de qualidade da água. Nestes a classificação foi predominantemente boa segundo a metodologia clássica e, na abordagem fuzzy ficou com maior grau de pertinência entre as categorias regular e boa.

Investimento em projetos de pesquisa que visem a recuperação do rio Cachoeira, principalmente nos lugares mais afetados pela poluição, torna-se imprescindível de forma a garantir a manutenção da biodiversidade aquática, assim como manter a qualidade da água a ser utilizada pela população.

Acredita-se que este trabalho traga contribuições importantes e possa agregar conhecimentos na área de modelagem de qualidade da água utilizando estratégia baseada em lógica fuzzy, sinalizando uma alternativa interessante com a qual outros estudos em qualidade dos recursos hídricos das bacias da região poderão ser desenvolvidos, considerando os aspectos subjetivos tão comuns nessa área.

Com isso esperamos incentivar o desenvolvimento de estudo de monitoramento da qualidade destas águas que poderão proporcionar uma resposta adequada para as dúvidas atuais e auxiliar no planejamento de ações futuras.

## 5.2 Dificuldades encontradas

Duas foram as principais dificuldades encontradas para realização desse estudo: a primeira delas diz respeito ao levantamento dos dados para serem utilizados na pesquisa, haja vista que a proposta inicial era utilizar dados coletados por pesquisadores da própria UESC, mas estes se apresentavam incompletos. A alternativa foi conseguir dados de três pontos de coleta junto ao INEMA (Instituto do Meio Ambiente e Recursos Hídricos).

A segunda dificuldade está relacionada a obrigatoriedade que acaba existindo em se agrupar os parâmetros em subgrupos, formando os subsistemas para processarem as informações. O desejo inicial era inserir todas as informações em uma única máquina de inferência para gerar o resultado do IQA fuzzy, no entanto, devido ao número muito grande de regras (quase dois milhões) que demoraria muito tempo para serem processadas e analisadas pelos especialistas consultados, este caminho se tornou inviabilizado.

### 5.3 Trabalhos futuros

Esta é apenas uma etapa e, dessa forma, pretende-se continuar em trabalhos futuros, pois um trabalho de pesquisa nunca se esgota em si mesmo e sempre permite a abertura para novos estudos.

Assim, sobre o tema modelagem de qualidade da água utilizando lógica fuzzy, acredita-se existir várias possibilidades de continuação para esta pesquisa, das quais podem ser destacadas: análise estatística dos resultados, inclusão de metais e de índices de diversidade biológica como variáveis de entrada no sistema fuzzy.

Outra proposta de trabalho futuro é a modelagem das equações dos modelos apresentados no Capítulo 2 utilizando equações diferenciais fuzzy e a inclusão de algoritmos genéticos nesses modelos.

## Referências

- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (BRASIL). **Índice de Qualidade das Águas**. 2009. Disponível em: <<http://pnqa.ana.gov.br/IndicadoresQA/IndiceQA.aspx>>. Acesso em: 10 abr. 2014.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (BRASIL). **Cuidando das águas**: soluções para melhorar a qualidade dos recursos hídricos. Brasília, 2011. 160 p.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (BRASIL). **Água na medida certa**: a hidrometria no Brasil. Brasília, 2012. 72 p.
- ALMEIDA, M. A. B.; SCHWARZBOLD, A. Coliformes termotolerantes e escherichia coli. CETESB, 2014. Disponível em: <<http://www.webartigos.com/articles/28006/1/Coliformes-Termotolerantes-e-EscherichiaColi/pagina1.html#ixzz1Pw6J1Nr4>>. Acesso em: 10 de maio de 2014.
- ARAÚJO, M. C. de; OLIVEIRA, M. B. M. de. Monitoramento da qualidade das águas de um riacho da Universidade Federal de Pernambuco, Brasil. **Rev. Ambient. Água**, v. 8, n. 3, p. 247–257, 2013.
- ARAÚJO, S. C. de S. **Modelos de simulação baseados em raciocínio qualitativo para avaliação da qualidade da água em bacias hidrográficas**. Tese (Doutorado em Ecologia) — Universidade de Brasília, Brasília, DF, Brasil, 2005.
- AUGUSTO, F. B.; BAMIGBOLA, O. M. Numerical treatment of the mathematical models for water pollution. **Journal of Mathematics and Statistics**, v. 3, n. 4, p. 172–180, 2007.
- BARBALHO, V. M. de S. **Sistemas baseados em conhecimento e lógica difusa para simulação do processo de chuva-vazão**. Tese (Doutorado Engenharia Civil) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 2001.
- BÁRBARA, V. F. **Uso do modelo QUAL2E no estudo da qualidade da água e da capacidade de autodepuração do rio Araguari - AP (Amazônia)**. Dissertação (Mestrado em Engenharia do Meio Ambiente) — Universidade Federal de Goiás, Goiânia, GO, 2006.
- BARROS, L. C. de; BASSANEZI, R. C. **Tópicos de Lógica Fuzzy e Biomatemática**. 2. ed. Campinas, SP: UNICAMP/IMECC, 2010.
- BAUMLE, A. M. B. **Avaliação de benefícios econômicos da despoluição hídrica**: efeitos de erros de calibração de modelos de qualidade da água. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental) — Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR, 2005.
- BEDE, B. **Mathematics of Fuzzy Sets and Fuzzy Logic**. New York: Springer, 2013.
- BEZERRA, I. S. de O.; MENDONÇA, L. A. R.; FRISCHKORN, H. Autodepuração de cursos d'água: um programa de modelagem Streeter-Phelps com calibração automática e correção de anaerobiose. **Revista Escola de Minas**, v. 61, n. 2, p. 249–255, 2008.
- BHARTI, N.; KATYAL, D. Water quality indices used for surface water vulnerability assessment. **International Journal of Environmental Sciences**, v. 2, n. 1, p. 154–173, 2011.



BINOTTO, D. **Proposta de enquadramento para a bacia hidrográfica do Arroio Jacutinga, município de Ivorá-RS**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) — Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2012.

BRAGA, B.; HESPANHOL, I.; CONEJO, J. G. L.; MIERZWA, J. C.; BARROS, M. T. L. de; SPENCER, M.; PORTO, M.; NUCCI, N.; JULIANO, N.; EIGER, S. **Introdução à Engenharia Ambiental: o desafio do desenvolvimento sustentável**. 2. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2005.

BRASIL. Lei federal nº 6.938, de 31 de agosto de 1981. Dispõe sobre a política nacional do meio ambiente, seus fins e mecanismos de formulação e aplicação, e dá outras providências. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Brasília, 1981.

BRASIL. Lei federal nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997. Institui a política nacional de recursos hídricos, cria o sistema nacional de gerenciamento de recursos hídricos, regulamenta o inciso XIX do art. 21 da constituição federal e altera o art. 1º da lei nº 8.001, de 13 de março de 1990, que modificou a lei nº 7.990, de 28 de dezembro de 1989. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Brasília, 1997.

BRASIL. Ministério da Saúde. Portaria nº 518 de 25 de março de 2004. Estabelece os procedimentos e responsabilidades relativas ao controle e vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade, e dá outras providências. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Brasília, 2004.

BRASIL. Resolução CONAMA nº 357. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Brasília, 2005.

BRASIL. Resolução CONAMA nº 410. Prorroga o prazo para complementação das condições e padrões de lançamento de efluentes, previsto no art. 44 da resolução nº 357, de 17 de março de 2005, e no art. 3 da resolução nº 397, de 3 de abril de 2008. **Diário Oficial da União**, Brasília, 2009.

BRASIL. Resolução CONAMA nº 430. Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a resolução nº 357, de 17 de março de 2005. **Diário Oficial da União**, Brasília, 2011.

CERETTA, M. C. **Avaliação dos aspectos de qualidade da água na sub-bacia hidrográfica do Arroio Cadena - município de Santa Maria- RS**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) — Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2009.

CHAU, K. A review on the integration of artificial intelligence into coastal modeling. **Journal of Environmental Management**, v. 80, n. 1, p. 47–57, 2006.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO - CETESB. **Relatório de Qualidade das Águas Interiores do Estado de São Paulo: Apêndice A - significado ambiental e sanitário das variáveis de qualidade das águas e dos sedimentos e metodologias analíticas e de amostragem**. São Paulo, 2008. Disponível em: <<http://www.cetesb.sp.gov.br/agua/aguas-superficiais/49-publicacoes-e-relatorios>>. Acesso em: 10 de fevereiro de 2014.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO - CETESB. **Relatório de Qualidade das Águas Superficiais do Estado de São Paulo: Variáveis de qualidade das**

águas. São Paulo, 2008. Disponível em: <<http://www.cetesb.sp.gov.br/agua/aguas-superficiais/49-publicacoes-e-relatorios>>. Acesso em: 10 de fevereiro de 2014.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO - CETESB. **Relatório de Qualidade das Águas Superficiais do Estado de São Paulo: Apendice D - índice de qualidade das águas**. São Paulo, 2008. Disponível em: <<http://www.cetesb.sp.gov.br/agua/aguas-superficiais/49-publicacoes-e-relatorios>>. Acesso em: 10 de maio de 2014.

CORADI, P. C.; FIA, R.; PEREIRA-RAMIREZ, O. Avaliação da qualidade da água superficial dos cursos de água do município de Pelotas-RS, Brasil. **Ambi-Agua**, v. 4, n. 2, p. 46–56, 2009.

CORREIA, M. A. **Análise histológica e ultraestrutural em Tilapia Rendalli como instrumento de avaliação ambiental do rio Cachoeira, Bahia**. Dissertação (Mestrado em Zoologia) — Universidade Estadual de Santa Cruz, 2013.

COX, E. **The fuzzy systems handbook: a practitioner's guide to building, using, and maintaining fuzzy systems**. New York: AP Professional, 1994.

CUNHA, M. O. da. Lógica, lógicas: uma visão panorâmica. **Caderno Dá Licença**, v. 6, n. 5, p. 32–40, 2004.

FLECK, L.; TAVARES, M. H. F.; EYNG, E. Conceitos e importância da modelagem matemática de qualidade da água para gestão dos recursos hídricos. **Revista Ambientia**, v. 9, n. 3, p. 487–503, 2013.

FLECK, L.; TAVARES, M. H. F.; EYNG, E. Principais modelos matemáticos de qualidade da água e suas aplicações: uma revisão. **Revista Eletrônica Científica Inovação e Tecnologia**, v. 1, n. 7, p. 47–62, 2013.

FONTES, I. B. de M.; ARAUJO, Q. R. de; SEVERO, M. I. G.; OLIVEIRA, A. H. de. Avaliação dos micropoluentes inorgânicos da estação de tratamento de esgoto de Ilhéus (Bahia). **Geografia**, v. 18, n. 1, p. 33–44, 2009.

FRANÇA, M. S. **Análise estatística multivariada dos dados de monitoramento de qualidade de água da Bacia do Alto Iguaçu: uma ferramenta para a gestão de recursos hídricos**. Dissertação (Mestrado Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental) — Universidade Federal do Paraná, CURITIBA, SC, 2009.

FUZINATTO, C. F. **Avaliação da qualidade da água de rios localizados na Ilha de Santa Catarina utilizando parâmetros toxicológicos e o índice de qualidade de água**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) — Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2009.

GANOULIS, J. G. **Engineering risk analysis of water pollution: probability and fuzzy sets**. Weinheim: VCH, 1994.

GASTALDINI, M. do C. C.; OPPA, L. F. Análise de alternativas de enquadramento do rio Vacacaí Mirim utilizando modelo matemático de qualidade da água. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 16, n. 1, p. 17–27, 2011.

GASTALDINI, M. do C. C.; SEFFRIN, G. F. F.; PAZ, M. F. Diagnóstico atual e previsão futura da qualidade das águas do rio Ibicuí utilizando o modelo QUAL2E. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 7, n. 4, p. 129–138, 2002.

GONÇALVES, J. C. de S. I.; SARDINHA, D. de S.; SOUZA, A. D. G. de; DIBIAZI, A. L. B.; GODOY, L. H.; CONCEIÇÃO, F. T. da. Avaliação espaço-temporal da qualidade da água e simulação de autodepuração na bacia hidrográfica do Córrego São Simão, SP. **Ambi-Água**, v. 7, n. 3, p. 141–154, 2012.

GRUNITZKI, R.; FERRARI, J. C.; SILVA, A. C. da; ZAMBÃO, P. H.; NECKEL, E. V. P. **Ferramenta Web para Determinação do Índice de Qualidade de Água a partir da Reestruturação das Equações que Descrevem as Curvas dos Indicadores de Qualidade**. [S.l.], 2014. Disponível em: <[http://www.abrh.org.br/SGCv3/UserFiles/Sumarios/389fd4d85ad4ebbd09affba6bb4b0443\\_58521a35054135ab18138a8f37b809a6.pdf](http://www.abrh.org.br/SGCv3/UserFiles/Sumarios/389fd4d85ad4ebbd09affba6bb4b0443_58521a35054135ab18138a8f37b809a6.pdf)>. Acesso em: 10 de abril de 2014.

HARUM, T.; SACCON, P.; REGO, N. A. C.; PAULA, F. C. F. de; SANTOS, J. W. B. dos. Modelos de vulnerabilidade hidrológica para a bacia hidrográfica do rio Cachoeira (Bahia) utilizando sistemas de informações geográficas. **Gaia Scientia**, v. 1, n. 2, p. 89–95, 2008.

INSTITUTO MINEIRO DE GESTÃO DAS ÁGUAS - IGAM. **Relatório de monitoramento das águas superficiais da bacia do rio Grande em 2004**. Belo Horizonte: IGAM, 2005. 165 p. Disponível em: <[http://www.ufjf.br/baccan/files/2012/11/Rel\\_Jequitinhonha\\_04.pdf](http://www.ufjf.br/baccan/files/2012/11/Rel_Jequitinhonha_04.pdf)>. Acesso em: 10 de fevereiro de 2014.

INSTITUTO MINEIRO DE GESTÃO DAS ÁGUAS - IGAM. **Sistema de Cálculo da Qualidade da Água (SCQA)**: estabelecimento das equações do Índice de Qualidade das Águas (IQA). Secretaria de Estado do Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável de MG, 2005. 19 p. Disponível em: <[www.engenhariaambiental.unir.br/admin/prof/arq/calculo-IQA.pdf](http://www.engenhariaambiental.unir.br/admin/prof/arq/calculo-IQA.pdf)>. Acesso em: 10 de fevereiro de 2014.

JAFELICE, R. S. da M. **Modelagem Fuzzy para Dinâmica de Transferência de Soropositivos para HIV em Doença Plenamente Manifesta**. Tese (Doutorado Engenharia Elétrica) — Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, 2003.

JAFELICE, R. S. da M.; BARROS, L. C. de; BASSANEZI, R. C. **Teoria dos Conjuntos Fuzzy com Aplicações**. Notas em Matemática Aplicada. São Carlos, SP: SBMAC, 2005.

JANÉ, D. de A. Uma introdução ao estudo da lógica fuzzy. **Hórus – Revista de Humanidades e Ciências Sociais Aplicadas**, n. 2, p. 338–353, 2004.

JANG, J. S. R. Anfis: adaptive-network-based fuzzy inference system. **IEEE Trans. on Systems, Man and Cybernetic**, v. 3, n. 23, p. 665–685, 1993.

KASABOV, N. K. **Foundations of Neural Networks, Fuzzy Systems, and Knowledge Engineering**. London: A Bradford book, 1998.

KLIR, G. J.; YUAN, B. **Fuzzy Sets and Fuzzy Logic: Theory and applications**. New Jersey: Prentice Hall, 1995.

KNAPIK, H. G.; FRANÇA, M. S.; FERNANDES, C. V. S.; MASINI, L. S.; MARIN, M. C. F. C.; PORTO, M. F. do A. Análise crítica da calibração do modelo de qualidade de água QUAL2E - estudo de caso da bacia do Alto Iguaçu. **REGA**, v. 5, n. 2, p. 25–37, 2008.

LEITE, A. E. de B. **Simulação do lançamento de esgotos domésticos em rios usando um modelo de qualidade d'água, SisBAHIA**. Dissertação (Mestrado em Saúde Pública) — Escola Nacional de Saúde Pública, Fiocruz, Rio de Janeiro, RJ, 2004.

- LERMONTOV, A.; YOKOYAMA, L.; LERMONTOV, M.; MACHADO, M. A. S. Aplicação da lógica nebulosa na parametrização de um novo Índice de qualidade das Águas. **Engevista**, v. 10, n. 2, p. 106–125, 2008.
- LIMA, E. B. N. R. **Modelação integrada para a gestão da qualidade da água na bacia do rio Cuiabá**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 2001.
- LUCIO, M. Z. T. P. de Q. L. **Biogeoquímica do rio Cachoeira (Bahia, Brasil)**. Dissertação (Mestrado em Sistemas Aquáticos Tropicais) — Universidade Estadual de Santa Cruz, Ilhéus, BA, 2010.
- MACHADO, C. J. S. Recursos hídricos e cidadania no Brasil: limites, alternativas e desafios. **Ambiente & Sociedade**, v. 6, n. 2, p. 121–136, 2003.
- MALUTTA, C. **Método de apoio à tomada de decisão sobre a adequação de aterros sanitários utilizando a Lógica Fuzzy**. Tese (Doutorado Engenharia de Produção) — Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2004.
- MIDAGLIA, C. L. V. **Proposta de Implantação do Índice de Abrigência Espacial de Monitoramento - IAEM por meio da Análise da Evolução da Rede de Qualidade das Águas Superficiais do Estado de São Paulo**. Tese (Doutorado em Geografia) — Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 2011.
- MINISTÉRIO DA SAÚDE. SECRETARIA DE VIGILÂNCIA EM SAÚDE. **Vigilância e controle da qualidade da água para o consumo humano**. Brasília, 2006. 212 p.
- MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. SECRETARIA DE RECURSOS HÍDRICOS. **Plano Nacional de Recursos Hídricos**. Brasília: MMA, 2006. 135 p.
- MORAES, D. S. de L.; JORDÃO, B. Q. Degradação de recursos hídricos e seus efeitos sobre a saúde humana. **Revista Saúde Pública**, v. 36, n. 3, p. 370–374, 2002.
- MORÃO JR., P. R. **Aplicação do Modelo de autodepuração de qualidade das águas QUAL-UFMG: estudo de caso sub-bacia do rio Piracicaba**. Dissertação (Mestrado em Sustentabilidade Sócioeconômica e Ambiental) — Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG, 2010.
- MORETTO, D. L. **Calibração do Índice de Qualidade da Água (IQA) para Bacia Hidrográfica do rio Pardo, RS, Brasil**. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Ambiental) — Universidade de Santa Cruz do Sul, Santa Cruz do Sul, RS, 2011.
- NACIF, P. G. S.; COSTA, L. M.; SAADI, A.; FILHO, E. I. F.; KER, J. C.; COSTA, O. V.; MOREAU, M. S. Ambientes naturais da bacia hidrográfica do rio Cachoeira. **Artigo extraído da tese do primeiro autor (Departamento de Solos da UFV)**, Cruz das Almas, 2003.
- NGUYEN, H. T.; PRASAD, N. R.; WALKER, C. L.; WALKER, E. A. **A First Course in FUZZY and NEURAL CONTROL**. New York: CHAPMAN & HALL/CRC, 2003.
- NOGUEIRA, M. A. C. S. **Metodologia de avaliação da qualidade do ruído nos postos de trabalhos industriais baseada em lógica fuzzy**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) — Universidade Federal do Pará, Belém, PA, 2010.
- NUNES, D. G.; SILVA, D. D. da; MATOS, A. T. de. Índice de qualidade da água em trechos do rio Turvo Sujo, Viçosa - MG. **REVENG**, v. 19, n. 5, p. 459–468, 2011.

OLIVEIRA, F. V. E. C. **O que viu o rio**: Reportagem sobre a relação entre o rio Cachoeira e a cidade de Itabuna (BA). Viçosa, MG, 2013. 34 p.

ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DAS NAÇÕES UNIDAS - ONU. **Declaração Universal dos Direitos da Água**. [S.l.], 1992. Disponível em: <<http://www.direitoshumanos.usp.br/>>. Acesso em: 10 de fevereiro de 2014.

ORTEGA, N. R. S. **Aplicação da Teoria de Conjuntos Fuzzy a Problemas da Biomedicina**. Tese (Doutorado Ciências) — Universidade São Paulo, São Paulo, SP, 2001.

PAULO, D. V.; FONTES, F. M.; FLORES-LOPES, F. Histopathological alterations observed in the liver of *Poecilia Vivipara* (Cyprinodontiformes: Poeciliidae) as a tool for the environmental quality assessment of the Cachoeira river, BA. **Braz. J. Biol.**, v. 72, n. 1, p. 131–140, 2012.

PEDRYCZ, W.; GOMIDE, F. **An Introduction to Fuzzy Sets**: Analysis and design. London: The MIT Press, 1998.

PEREIRA, A. A. **Avaliação da qualidade da água**: Proposta de um novo índice alicerçado na lógica fuzzy. Tese (Doutorado em Ciências da Saúde) — Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2010.

PEREIRA, R. S. Modelos de qualidade de água. **Revista Eletrônica de Recursos Hídricos**, v. 1, n. 1, p. 37–48, 2004.

PIMENTEIRA, C. A. P. **Gestão integrada de resíduos sólidos no Rio de Janeiro**: Impactos das decisões dos gestores nas políticas públicas. Tese (Doutorado em Planejamento Energético) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Rio de Janeiro, RJ, 2010.

PINHO, A. G. **Estudo da qualidade das águas do rio Cachoeira - região sul da Bahia**. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento e Meio Ambiente) — Universidade Estadual de Santa Cruz, Ilhéus, BA, 2001.

REIS, J. S. A. dos. **Modelagem matemática da qualidade da água para o alto rio das Velhas/MG**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) — Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG, 2009.

RIBEIRO, D.; MELO, D. T. de. **Sistemas Especialistas e Lógica Fuzzy**: Análise de risco cardíaco. Rio de Janeiro: Campus, 2013.

ROSS, T. J. **Fuzzy logic with engineering applications**. New Mexico: John Wiley & Sons, 2004.

SANTOS, A. A.; GOMES, R. L.; REGO, N. A. C. Avaliação da aplicação de cobrança pelo uso da água na bacia hidrográfica do rio Cachoeira, sul da Bahia. **REGA**, v. 8, n. 2, p. 5–18, 2012.

SANTOS, J. S. dos; SOUZA, F. M. de; SANTOS, M. L. P. dos. Distribuição de Zn, Pb, Ni, Cu, Mn e Fe nas frações do sedimento superficial do rio Cachoeira na região sul da Bahia, Brasil. **Química Nova**, v. 36, n. 2, p. 230–236, 2013.

SARDINHA, D. de S.; CONCEIÇÃO, F. T. da; SOUZA, A. D. G. de; SILVEIRA, A.; JULIO, M. de; GONÇALVES, J. C. de S. I. Avaliação da qualidade da água e autodepuração do Ribeirão do Meio, Leme(SP). **Eng. sanit. ambient.**, v. 13, n. 3, p. 329–338, 2008.

- SERPA, F. de C. Terra das águas. **National Geographic Brasil**, PARIS, UNESCO, v. 133, p. 53–66, 2011.
- SHIKLOMANOV, L. A. Global water resouces. **Nature and Resouces**, PARIS, UNESCO, v. 26, p. 34–43, 1990.
- SILVINO, A. N. de O. **Avaliação e modelagem da qualidade da água do rio Coxipó no município de Cuiabá - MT**. Dissertação (Mestrado em Física e Meio Ambiente) — Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá, MT, 2008.
- SIMÕES, M. G.; SHAW, I. S. **Controle e Modelagem Fuzzy**. 2. ed. São Paulo: Blucher: FAPESP, 2007.
- SOUSA, M. G. **O rio Cachoeira aquém de sua poesia**: Imaginário das águas e sustentabilidade ambiental através do turismo litorâneo de Ilhéus - BA. Dissertação (Mestrado em Cultura e Turismo) — Universidade Estadual de Santa Cruz, Ilhéus, BA, 2005.
- SOUZA, M. F. L. de; EÇA, G. F.; SILVA, M. A. M.; AMORIN, F. A. C.; LOBO, I. P. Distribuição de nutrientes dissolvidos e clorofila-a no estuário do rio Cachoeira, Nordeste do Brasil. **Atlântica**, Rio Grande, 2009.
- TEIXEIRA, C. A.; PORTO, R. L. L. Modelo matemático para gerenciamento de quantidade e qualidade da água em rios. Um estudo de caso: bacia do rio Piracicaba. **Revista de Ciências Ambientais**, v. 2, n. 2, p. 79–104, 2008.
- TUCCI, C. E. M.; MENDES, C. A. **Avaliação ambiental integrada de bacia hidrográfica**. Brasília: MMA, 2006. 302 p.
- TUNDISI, J. G. **Água no século XXI São Paulo**: Enfrentando a escassez. 2. ed. São Paulo: Rima, 2003. 247 p.
- VALORY, J. P. L. **Aplicação combinada de técnica de otimização e modelo de qualidade de água na determinação de eficiências de sistemas de tratamento de efluentes domésticos**: uma abordagem para gerenciamento de bacias hidrográficas. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) — Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, ES, 2013.
- ZADEH, L. A. Fuzzy sets. **Information and Control**, n. 8, p. 338–353, 1965.
- ZULPO, D. L.; PERETTI, J.; ONO, L. M.; GARCIA, J. L. Avaliação microbiológica da água consumida nos bebedouros da Universidade Estadual do Centro-Oeste, Guarapuava, Paraná, Brasil. **Ciências Agrárias**, v. 27, n. 1, p. 107–110, 2006.

## Anexos

## ANEXO A – Base de Regras

Tabela 15 – Regras dos grupos 1 e 2 (Subíndices peso alto e peso médio).

Nº Regras	Grupo 1				Grupo 2				
	OD	CF	PH	SUB. IND. I	TEMP	NO3	PO4	DBO	SUB. IND. II
1	MB	MB	MB	<b>PE</b>	MB	MB	MB	MB	<b>RE</b>
2	MB	MB	B	<b>RU</b>	MB	MB	MB	B	<b>RE</b>
3	MB	MB	M	<b>RE</b>	MB	MB	MB	M	<b>RE</b>
4	MB	MB	A	<b>RU</b>	MB	MB	MB	A	<b>RE</b>
5	MB	MB	MA	<b>PE</b>	MB	MB	MB	MA	<b>RE</b>
6	MB	B	MB	<b>PE</b>	MB	MB	B	MB	<b>RE</b>
7	MB	B	B	<b>RU</b>	MB	MB	B	B	<b>RE</b>
8	MB	B	M	<b>RE</b>	MB	MB	B	M	<b>RE</b>
9	MB	B	A	<b>RU</b>	MB	MB	B	A	<b>RE</b>
10	MB	B	MA	<b>PE</b>	MB	MB	B	MA	<b>RE</b>
11	MB	M	MB	<b>PE</b>	MB	MB	M	MB	<b>RE</b>
12	MB	M	B	<b>RU</b>	MB	MB	M	B	<b>RE</b>
13	MB	M	M	<b>RE</b>	MB	MB	M	M	<b>RE</b>
14	MB	M	A	<b>RU</b>	MB	MB	M	A	<b>RU</b>
15	MB	M	MA	<b>PE</b>	MB	MB	M	MA	<b>RU</b>
16	MB	A	MB	<b>PE</b>	MB	MB	A	MB	<b>RE</b>
17	MB	A	B	<b>PE</b>	MB	MB	A	B	<b>RE</b>
18	MB	A	M	<b>RE</b>	MB	MB	A	M	<b>RU</b>
19	MB	A	A	<b>PE</b>	MB	MB	A	A	<b>RU</b>
20	MB	A	MA	<b>PE</b>	MB	MB	A	MA	<b>RU</b>
21	MB	MA	MB	<b>PE</b>	MB	MB	MA	MB	<b>RE</b>
22	MB	MA	B	<b>PE</b>	MB	MB	MA	B	<b>RE</b>
23	MB	MA	M	<b>RU</b>	MB	MB	MA	M	<b>RU</b>
24	MB	MA	A	<b>PE</b>	MB	MB	MA	A	<b>RU</b>
25	MB	MA	MA	<b>PE</b>	MB	MB	MA	MA	<b>RU</b>
26	B	MB	MB	<b>RU</b>	MB	B	MB	MB	<b>RE</b>
27	B	MB	B	<b>RE</b>	MB	B	MB	B	<b>RE</b>
28	B	MB	M	<b>BO</b>	MB	B	MB	M	<b>RE</b>
29	B	MB	A	<b>RE</b>	MB	B	MB	A	<b>RE</b>
30	B	MB	MA	<b>RU</b>	MB	B	MB	MA	<b>RE</b>
31	B	B	MB	<b>PE</b>	MB	B	B	MB	<b>RE</b>



32	B	B	B	<b>RE</b>	MB	B	B	B	<b>RE</b>
33	B	B	M	<b>BO</b>	MB	B	B	M	<b>RE</b>
34	B	B	A	<b>RE</b>	MB	B	B	A	<b>RE</b>
35	B	B	MA	<b>PE</b>	MB	B	B	MA	<b>RE</b>
36	B	M	MB	<b>PE</b>	MB	B	M	MB	<b>RE</b>
37	B	M	B	<b>RU</b>	MB	B	M	B	<b>RE</b>
38	B	M	M	<b>RE</b>	MB	B	M	M	<b>RE</b>
39	B	M	A	<b>RU</b>	MB	B	M	A	<b>RU</b>
40	B	M	MA	<b>PE</b>	MB	B	M	MA	<b>RU</b>
41	B	A	MB	<b>PE</b>	MB	B	A	MB	<b>RE</b>
42	B	A	B	<b>RU</b>	MB	B	A	B	<b>RE</b>
43	B	A	M	<b>RE</b>	MB	B	A	M	<b>RU</b>
44	B	A	A	<b>RU</b>	MB	B	A	A	<b>RU</b>
45	B	A	MA	<b>PE</b>	MB	B	A	MA	<b>RU</b>
46	B	MA	MB	<b>PE</b>	MB	B	MA	MB	<b>RE</b>
47	B	MA	B	<b>PE</b>	MB	B	MA	B	<b>RE</b>
48	B	MA	M	<b>PE</b>	MB	B	MA	M	<b>RU</b>
49	B	MA	A	<b>PE</b>	MB	B	MA	A	<b>RU</b>
50	B	MA	MA	<b>PE</b>	MB	B	MA	MA	<b>RU</b>
51	M	MB	MB	<b>BO</b>	MB	M	MB	MB	<b>RE</b>
52	M	MB	B	<b>OT</b>	MB	M	MB	B	<b>RE</b>
53	M	MB	M	<b>OT</b>	MB	M	MB	M	<b>RE</b>
54	M	MB	A	<b>OT</b>	MB	M	MB	A	<b>RE</b>
55	M	MB	MA	<b>BO</b>	MB	M	MB	MA	<b>RE</b>
56	M	B	MB	<b>RE</b>	MB	M	B	MB	<b>RE</b>
57	M	B	B	<b>BO</b>	MB	M	B	B	<b>RE</b>
58	M	B	M	<b>OT</b>	MB	M	B	M	<b>RE</b>
59	M	B	A	<b>BO</b>	MB	M	B	A	<b>RE</b>
60	M	B	MA	<b>RE</b>	MB	M	B	MA	<b>RE</b>
61	M	M	MB	<b>RE</b>	MB	M	M	MB	<b>RE</b>
62	M	M	B	<b>RE</b>	MB	M	M	B	<b>RE</b>
63	M	M	M	<b>BO</b>	MB	M	M	M	<b>RE</b>
64	M	M	A	<b>RE</b>	MB	M	M	A	<b>PE</b>
65	M	M	MA	<b>RE</b>	MB	M	M	MA	<b>PE</b>
66	M	A	MB	<b>RU</b>	MB	M	A	MB	<b>RE</b>
67	M	A	B	<b>RE</b>	MB	M	A	B	<b>RE</b>
68	M	A	M	<b>BO</b>	MB	M	A	M	<b>PE</b>
69	M	A	A	<b>RE</b>	MB	M	A	A	<b>PE</b>
70	M	A	MA	<b>RU</b>	MB	M	A	MA	<b>PE</b>

71	M	MA	MB	<b>PE</b>	MB	M	MA	MB	<b>RE</b>
72	M	MA	B	<b>RU</b>	MB	M	MA	B	<b>RE</b>
73	M	MA	M	<b>RE</b>	MB	M	MA	M	<b>PE</b>
74	M	MA	A	<b>RU</b>	MB	M	MA	A	<b>PE</b>
75	M	MA	MA	<b>PE</b>	MB	M	MA	MA	<b>PE</b>
76	A	MB	MB	<b>RU</b>	MB	A	MB	MB	<b>RU</b>
77	A	MB	B	<b>RE</b>	MB	A	MB	B	<b>RU</b>
78	A	MB	M	<b>BO</b>	MB	A	MB	M	<b>RU</b>
79	A	MB	A	<b>RE</b>	MB	A	MB	A	<b>PE</b>
80	A	MB	MA	<b>RU</b>	MB	A	MB	MA	<b>PE</b>
81	A	B	MB	<b>PE</b>	MB	A	B	MB	<b>RU</b>
82	A	B	B	<b>RE</b>	MB	A	B	B	<b>RU</b>
83	A	B	M	<b>BO</b>	MB	A	B	M	<b>RU</b>
84	A	B	A	<b>RE</b>	MB	A	B	A	<b>PE</b>
85	A	B	MA	<b>PE</b>	MB	A	B	MA	<b>PE</b>
86	A	M	MB	<b>PE</b>	MB	A	M	MB	<b>RU</b>
87	A	M	B	<b>RU</b>	MB	A	M	B	<b>RU</b>
88	A	M	M	<b>RE</b>	MB	A	M	M	<b>RU</b>
89	A	M	A	<b>RU</b>	MB	A	M	A	<b>PE</b>
90	A	M	MA	<b>PE</b>	MB	A	M	MA	<b>PE</b>
91	A	A	MB	<b>PE</b>	MB	A	A	MB	<b>PE</b>
92	A	A	B	<b>RU</b>	MB	A	A	B	<b>PE</b>
93	A	A	M	<b>RE</b>	MB	A	A	M	<b>PE</b>
94	A	A	A	<b>RU</b>	MB	A	A	A	<b>PE</b>
95	A	A	MA	<b>PE</b>	MB	A	A	MA	<b>PE</b>
96	A	MA	MB	<b>PE</b>	MB	A	MA	MB	<b>PE</b>
97	A	MA	B	<b>PE</b>	MB	A	MA	B	<b>PE</b>
98	A	MA	M	<b>RE</b>	MB	A	MA	M	<b>PE</b>
99	A	MA	A	<b>PE</b>	MB	A	MA	A	<b>PE</b>
100	A	MA	MA	<b>PE</b>	MB	A	MA	MA	<b>PE</b>
101	MA	MB	MB	<b>PE</b>	MB	MA	MB	MB	<b>RU</b>
102	MA	MB	B	<b>RU</b>	MB	MA	MB	B	<b>RU</b>
103	MA	MB	M	<b>RE</b>	MB	MA	MB	M	<b>RU</b>
104	MA	MB	A	<b>RU</b>	MB	MA	MB	A	<b>PE</b>
105	MA	MB	MA	<b>PE</b>	MB	MA	MB	MA	<b>PE</b>
106	MA	B	MB	<b>PE</b>	MB	MA	B	MB	<b>RU</b>
107	MA	B	B	<b>RU</b>	MB	MA	B	B	<b>RU</b>
108	MA	B	M	<b>RE</b>	MB	MA	B	M	<b>RU</b>
109	MA	B	A	<b>RU</b>	MB	MA	B	A	<b>PE</b>

110	MA	B	MA	<b>PE</b>	MB	MA	B	MA	<b>PE</b>
111	MA	M	MB	<b>PE</b>	MB	MA	M	MB	<b>RU</b>
112	MA	M	B	<b>RU</b>	MB	MA	M	B	<b>RU</b>
113	MA	M	M	<b>RE</b>	MB	MA	M	M	<b>RU</b>
114	MA	M	A	<b>RU</b>	MB	MA	M	A	<b>PE</b>
115	MA	M	MA	<b>PE</b>	MB	MA	M	MA	<b>PE</b>
116	MA	A	MB	<b>PE</b>	MB	MA	A	MB	<b>PE</b>
117	MA	A	B	<b>PE</b>	MB	MA	A	B	<b>PE</b>
118	MA	A	M	<b>RE</b>	MB	MA	A	M	<b>PE</b>
119	MA	A	A	<b>PE</b>	MB	MA	A	A	<b>PE</b>
120	MA	A	MA	<b>PE</b>	MB	MA	A	MA	<b>PE</b>
121	MA	MA	MB	<b>PE</b>	MB	MA	MA	MB	<b>PE</b>
122	MA	MA	B	<b>PE</b>	MB	MA	MA	B	<b>PE</b>
123	MA	MA	M	<b>RU</b>	MB	MA	MA	M	<b>PE</b>
124	MA	MA	A	<b>PE</b>	MB	MA	MA	A	<b>PE</b>
125	MA	MA	MA	<b>PE</b>	MB	MA	MA	MA	<b>PE</b>
126					B	MB	MB	MB	<b>BO</b>
127					B	MB	MB	B	<b>BO</b>
128					B	MB	MB	M	<b>BO</b>
129					B	MB	MB	A	<b>BO</b>
130					B	MB	MB	MA	<b>BO</b>
131					B	MB	B	MB	<b>BO</b>
132					B	MB	B	B	<b>BO</b>
133					B	MB	B	M	<b>BO</b>
134					B	MB	B	A	<b>BO</b>
135					B	MB	B	MA	<b>BO</b>
136					B	MB	M	MB	<b>BO</b>
137					B	MB	M	B	<b>BO</b>
138					B	MB	M	M	<b>BO</b>
139					B	MB	M	A	<b>RU</b>
140					B	MB	M	MA	<b>RU</b>
141					B	MB	A	MB	<b>BO</b>
142					B	MB	A	B	<b>BO</b>
143					B	MB	A	M	<b>RU</b>
144					B	MB	A	A	<b>RU</b>
145					B	MB	A	MA	<b>RU</b>
146					B	MB	MA	MB	<b>BO</b>
147					B	MB	MA	B	<b>BO</b>
148					B	MB	MA	M	<b>RU</b>

149	B	MB	MA	A	<b>RU</b>
150	B	MB	MA	MA	<b>RU</b>
151	B	B	MB	MB	<b>BO</b>
152	B	B	MB	B	<b>BO</b>
153	B	B	MB	M	<b>BO</b>
154	B	B	MB	A	<b>BO</b>
155	B	B	MB	MA	<b>BO</b>
156	B	B	B	MB	<b>BO</b>
157	B	B	B	B	<b>BO</b>
158	B	B	B	M	<b>BO</b>
159	B	B	B	A	<b>BO</b>
160	B	B	B	MA	<b>BO</b>
161	B	B	M	MB	<b>BO</b>
162	B	B	M	B	<b>BO</b>
163	B	B	M	M	<b>BO</b>
164	B	B	M	A	<b>RU</b>
165	B	B	M	MA	<b>RU</b>
166	B	B	A	MB	<b>BO</b>
167	B	B	A	B	<b>BO</b>
168	B	B	A	M	<b>RU</b>
169	B	B	A	A	<b>RU</b>
170	B	B	A	MA	<b>RU</b>
171	B	B	MA	MB	<b>BO</b>
172	B	B	MA	B	<b>BO</b>
173	B	B	MA	M	<b>RU</b>
174	B	B	MA	A	<b>RU</b>
175	B	B	MA	MA	<b>RU</b>
176	B	M	MB	MB	<b>BO</b>
177	B	M	MB	B	<b>BO</b>
178	B	M	MB	M	<b>BO</b>
179	B	M	MB	A	<b>RE</b>
180	B	M	MB	MA	<b>RE</b>
181	B	M	B	MB	<b>BO</b>
182	B	M	B	B	<b>BO</b>
183	B	M	B	M	<b>BO</b>
184	B	M	B	A	<b>RE</b>
185	B	M	B	MA	<b>RE</b>
186	B	M	M	MB	<b>BO</b>
187	B	M	M	B	<b>BO</b>

188	B	M	M	M	<b>BO</b>
189	B	M	M	A	<b>PE</b>
190	B	M	M	MA	<b>PE</b>
191	B	M	A	MB	<b>RE</b>
192	B	M	A	B	<b>RE</b>
193	B	M	A	M	<b>PE</b>
194	B	M	A	A	<b>PE</b>
195	B	M	A	MA	<b>PE</b>
196	B	M	MA	MB	<b>RE</b>
197	B	M	MA	B	<b>RE</b>
198	B	M	MA	M	<b>PE</b>
199	B	M	MA	A	<b>PE</b>
200	B	M	MA	MA	<b>PE</b>
201	B	A	MB	MB	<b>RU</b>
202	B	A	MB	B	<b>RU</b>
203	B	A	MB	M	<b>RU</b>
204	B	A	MB	A	<b>PE</b>
205	B	A	MB	MA	<b>PE</b>
206	B	A	B	MB	<b>PE</b>
207	B	A	B	B	<b>RU</b>
208	B	A	B	M	<b>RU</b>
209	B	A	B	A	<b>PE</b>
210	B	A	B	MA	<b>PE</b>
211	B	A	M	MB	<b>RU</b>
212	B	A	M	B	<b>RU</b>
213	B	A	M	M	<b>RU</b>
214	B	A	M	A	<b>PE</b>
215	B	A	M	MA	<b>PE</b>
216	B	A	A	MB	<b>PE</b>
217	B	A	A	B	<b>PE</b>
218	B	A	A	M	<b>PE</b>
219	B	A	A	A	<b>PE</b>
220	B	A	A	MA	<b>PE</b>
221	B	A	MA	MB	<b>PE</b>
222	B	A	MA	B	<b>PE</b>
223	B	A	MA	M	<b>PE</b>
224	B	A	MA	A	<b>PE</b>
225	B	A	MA	MA	<b>PE</b>
226	B	MA	MB	MB	<b>RU</b>

227	B	MA	MB	B	<b>RU</b>
228	B	MA	MB	M	<b>RU</b>
229	B	MA	MB	A	<b>PE</b>
230	B	MA	MB	MA	<b>PE</b>
231	B	MA	B	MB	<b>RU</b>
232	B	MA	B	B	<b>RU</b>
233	B	MA	B	M	<b>RU</b>
234	B	MA	B	A	<b>PE</b>
235	B	MA	B	MA	<b>PE</b>
236	B	MA	M	MB	<b>RU</b>
237	B	MA	M	B	<b>RU</b>
238	B	MA	M	M	<b>RU</b>
239	B	MA	M	A	<b>PE</b>
240	B	MA	M	MA	<b>PE</b>
241	B	MA	A	MB	<b>PE</b>
242	B	MA	A	B	<b>PE</b>
243	B	MA	A	M	<b>PE</b>
244	B	MA	A	A	<b>PE</b>
245	B	MA	A	MA	<b>PE</b>
246	B	MA	MA	MB	<b>PE</b>
247	B	MA	MA	B	<b>PE</b>
248	B	MA	MA	M	<b>PE</b>
249	B	MA	MA	A	<b>PE</b>
250	B	MA	MA	MA	<b>PE</b>
251	M	MB	MB	MB	<b>OT</b>
252	M	MB	MB	B	<b>OT</b>
253	M	MB	MB	M	<b>OT</b>
254	M	MB	MB	A	<b>OT</b>
255	M	MB	MB	MA	<b>OT</b>
256	M	MB	B	MB	<b>OT</b>
257	M	MB	B	B	<b>OT</b>
258	M	MB	B	M	<b>OT</b>
259	M	MB	B	A	<b>OT</b>
260	M	MB	B	MA	<b>OT</b>
261	M	MB	M	MB	<b>OT</b>
262	M	MB	M	B	<b>OT</b>
263	M	MB	M	M	<b>OT</b>
264	M	MB	M	A	<b>OT</b>
265	M	MB	M	MA	<b>OT</b>

266	M	MB	A	MB	OT
267	M	MB	A	B	OT
268	M	MB	A	M	OT
269	M	MB	A	A	OT
270	M	MB	A	MA	BO
271	M	MB	MA	MB	BO
272	M	MB	MA	B	BO
273	M	MB	MA	M	BO
274	M	MB	MA	A	BO
275	M	MB	MA	MA	BO
276	M	B	MB	MB	OT
277	M	B	MB	B	OT
278	M	B	MB	M	OT
279	M	B	MB	A	OT
280	M	B	MB	MA	OT
281	M	B	B	MB	OT
282	M	B	B	B	OT
283	M	B	B	M	OT
284	M	B	B	A	OT
285	M	B	B	MA	OT
286	M	B	M	MB	OT
287	M	B	M	B	OT
288	M	B	M	M	OT
289	M	B	M	A	OT
290	M	B	M	MA	OT
291	M	B	A	MB	OT
292	M	B	A	B	OT
293	M	B	A	M	OT
294	M	B	A	A	OT
295	M	B	A	MA	OT
296	M	B	MA	MB	OT
297	M	B	MA	B	OT
298	M	B	MA	M	OT
299	M	B	MA	A	OT
300	M	B	MA	MA	OT
301	M	M	MB	MB	OT
302	M	M	MB	B	OT
303	M	M	MB	M	OT
304	M	M	MB	A	OT

305	M	M	MB	MA	<b>OT</b>
306	M	M	B	MB	<b>OT</b>
307	M	M	B	B	<b>OT</b>
308	M	M	B	M	<b>OT</b>
309	M	M	B	A	<b>OT</b>
310	M	M	B	MA	<b>OT</b>
311	M	M	M	MB	<b>OT</b>
312	M	M	M	B	<b>OT</b>
313	M	M	M	M	<b>OT</b>
314	M	M	M	A	<b>BO</b>
315	M	M	M	MA	<b>BO</b>
316	M	M	A	MB	<b>OT</b>
317	M	M	A	B	<b>OT</b>
318	M	M	A	M	<b>BO</b>
319	M	M	A	A	<b>BO</b>
320	M	M	A	MA	<b>BO</b>
321	M	M	MA	MB	<b>OT</b>
322	M	M	MA	B	<b>OT</b>
323	M	M	MA	M	<b>BO</b>
324	M	M	MA	A	<b>BO</b>
325	M	M	MA	MA	<b>BO</b>
326	M	A	MB	MB	<b>OT</b>
327	M	A	MB	B	<b>OT</b>
328	M	A	MB	M	<b>OT</b>
329	M	A	MB	A	<b>BO</b>
330	M	A	MB	MA	<b>BO</b>
331	M	A	B	MB	<b>OT</b>
332	M	A	B	B	<b>OT</b>
333	M	A	B	M	<b>OT</b>
334	M	A	B	A	<b>BO</b>
335	M	A	B	MA	<b>BO</b>
336	M	A	M	MB	<b>OT</b>
337	M	A	M	B	<b>OT</b>
338	M	A	M	M	<b>OT</b>
339	M	A	M	A	<b>BO</b>
340	M	A	M	MA	<b>BO</b>
341	M	A	A	MB	<b>BO</b>
342	M	A	A	B	<b>BO</b>
343	M	A	A	M	<b>BO</b>



344	M	A	A	A	<b>BO</b>
345	M	A	A	MA	<b>BO</b>
346	M	A	MA	MB	<b>BO</b>
347	M	A	MA	B	<b>BO</b>
348	M	A	MA	M	<b>BO</b>
349	M	A	MA	A	<b>BO</b>
350	M	A	MA	MA	<b>BO</b>
351	M	MA	MB	MB	<b>OT</b>
352	M	MA	MB	B	<b>OT</b>
353	M	MA	MB	M	<b>OT</b>
354	M	MA	MB	A	<b>BO</b>
355	M	MA	MB	MA	<b>BO</b>
356	M	MA	B	MB	<b>OT</b>
357	M	MA	B	B	<b>OT</b>
358	M	MA	B	M	<b>OT</b>
359	M	MA	B	A	<b>BO</b>
360	M	MA	B	MA	<b>BO</b>
361	M	MA	M	MB	<b>OT</b>
362	M	MA	M	B	<b>OT</b>
363	M	MA	M	M	<b>OT</b>
364	M	MA	M	A	<b>BO</b>
365	M	MA	M	MA	<b>BO</b>
366	M	MA	A	MB	<b>BO</b>
367	M	MA	A	B	<b>BO</b>
368	M	MA	A	M	<b>BO</b>
369	M	MA	A	A	<b>BO</b>
370	M	MA	A	MA	<b>BO</b>
371	M	MA	MA	MB	<b>BO</b>
372	M	MA	MA	B	<b>BO</b>
373	M	MA	MA	M	<b>BO</b>
374	M	MA	MA	A	<b>BO</b>
375	M	MA	MA	MA	<b>BO</b>
376	A	MB	MB	MB	<b>BO</b>
377	A	MB	MB	B	<b>BO</b>
378	A	MB	MB	M	<b>BO</b>
379	A	MB	MB	A	<b>BO</b>
380	A	MB	MB	MA	<b>BO</b>
381	A	MB	B	MB	<b>BO</b>
382	A	MB	B	B	<b>BO</b>

383	A	MB	B	M	<b>BO</b>
384	A	MB	B	A	<b>BO</b>
385	A	MB	B	MA	<b>BO</b>
386	A	MB	M	MB	<b>BO</b>
387	A	MB	M	B	<b>BO</b>
388	A	MB	M	M	<b>BO</b>
389	A	MB	M	A	<b>RU</b>
390	A	MB	M	MA	<b>RU</b>
391	A	MB	A	MB	<b>BO</b>
392	A	MB	A	B	<b>BO</b>
393	A	MB	A	M	<b>RU</b>
394	A	MB	A	A	<b>RU</b>
395	A	MB	A	MA	<b>RU</b>
396	A	MB	MA	MB	<b>RE</b>
397	A	MB	MA	B	<b>RE</b>
398	A	MB	MA	M	<b>RU</b>
399	A	MB	MA	A	<b>RU</b>
400	A	MB	MA	MA	<b>RU</b>
401	A	B	MB	MB	<b>BO</b>
402	A	B	MB	B	<b>BO</b>
403	A	B	MB	M	<b>BO</b>
404	A	B	MB	A	<b>BO</b>
405	A	B	MB	MA	<b>BO</b>
406	A	B	B	MB	<b>BO</b>
407	A	B	B	B	<b>BO</b>
408	A	B	B	M	<b>BO</b>
409	A	B	B	A	<b>BO</b>
410	A	B	B	MA	<b>BO</b>
411	A	B	M	MB	<b>BO</b>
412	A	B	M	B	<b>BO</b>
413	A	B	M	M	<b>BO</b>
414	A	B	M	A	<b>RU</b>
415	A	B	M	MA	<b>RU</b>
416	A	B	A	MB	<b>BO</b>
417	A	B	A	B	<b>BO</b>
418	A	B	A	M	<b>RU</b>
419	A	B	A	A	<b>RU</b>
420	A	B	A	MA	<b>RU</b>
421	A	B	MA	MB	<b>BO</b>

422	A	B	MA	B	<b>BO</b>
423	A	B	MA	M	<b>RU</b>
424	A	B	MA	A	<b>RU</b>
425	A	B	MA	MA	<b>RU</b>
426	A	M	MB	MB	<b>BO</b>
427	A	M	MB	B	<b>BO</b>
428	A	M	MB	M	<b>BO</b>
429	A	M	MB	A	<b>RE</b>
430	A	M	MB	MA	<b>RE</b>
431	A	M	B	MB	<b>BO</b>
432	A	M	B	B	<b>BO</b>
433	A	M	B	M	<b>BO</b>
434	A	M	B	A	<b>RE</b>
435	A	M	B	MA	<b>RE</b>
436	A	M	M	MB	<b>BO</b>
437	A	M	M	B	<b>BO</b>
438	A	M	M	M	<b>BO</b>
439	A	M	M	A	<b>PE</b>
440	A	M	M	MA	<b>PE</b>
441	A	M	A	MB	<b>RE</b>
442	A	M	A	B	<b>RE</b>
443	A	M	A	M	<b>PE</b>
444	A	M	A	A	<b>PE</b>
445	A	M	A	MA	<b>PE</b>
446	A	M	MA	MB	<b>RE</b>
447	A	M	MA	B	<b>RE</b>
448	A	M	MA	M	<b>PE</b>
449	A	M	MA	A	<b>PE</b>
450	A	M	MA	MA	<b>PE</b>
451	A	A	MB	MB	<b>RU</b>
452	A	A	MB	B	<b>RU</b>
453	A	A	MB	M	<b>RU</b>
454	A	A	MB	A	<b>PE</b>
455	A	A	MB	MA	<b>PE</b>
456	A	A	B	MB	<b>RU</b>
457	A	A	B	B	<b>RU</b>
458	A	A	B	M	<b>RU</b>
459	A	A	B	A	<b>PE</b>
460	A	A	B	MA	<b>PE</b>

461	A	A	M	MB	<b>RU</b>
462	A	A	M	B	<b>RU</b>
463	A	A	M	M	<b>RU</b>
464	A	A	M	A	<b>PE</b>
465	A	A	M	MA	<b>PE</b>
466	A	A	A	MB	<b>PE</b>
467	A	A	A	B	<b>PE</b>
468	A	A	A	M	<b>PE</b>
469	A	A	A	A	<b>PE</b>
470	A	A	A	MA	<b>PE</b>
471	A	A	MA	MB	<b>PE</b>
472	A	A	MA	B	<b>PE</b>
473	A	A	MA	M	<b>PE</b>
474	A	A	MA	A	<b>PE</b>
475	A	A	MA	MA	<b>PE</b>
476	A	MA	MB	MB	<b>RU</b>
477	A	MA	MB	B	<b>RU</b>
478	A	MA	MB	M	<b>RU</b>
479	A	MA	MB	A	<b>PE</b>
480	A	MA	MB	MA	<b>PE</b>
481	A	MA	B	MB	<b>RU</b>
482	A	MA	B	B	<b>RU</b>
483	A	MA	B	M	<b>RU</b>
484	A	MA	B	A	<b>PE</b>
485	A	MA	B	MA	<b>PE</b>
486	A	MA	M	MB	<b>RU</b>
487	A	MA	M	B	<b>RU</b>
488	A	MA	M	M	<b>RU</b>
489	A	MA	M	A	<b>PE</b>
490	A	MA	M	MA	<b>PE</b>
491	A	MA	A	MB	<b>PE</b>
492	A	MA	A	B	<b>PE</b>
493	A	MA	A	M	<b>PE</b>
494	A	MA	A	A	<b>PE</b>
495	A	MA	A	MA	<b>PE</b>
496	A	MA	MA	MB	<b>PE</b>
497	A	MA	MA	B	<b>PE</b>
498	A	MA	MA	M	<b>PE</b>
499	A	MA	MA	A	<b>PE</b>

500	A	MA	MA	MA	<b>PE</b>
501	MA	MB	MB	MB	<b>RE</b>
502	MA	MB	MB	B	<b>RE</b>
503	MA	MB	MB	M	<b>RE</b>
504	MA	MB	MB	A	<b>RE</b>
505	MA	MB	MB	MA	<b>RE</b>
506	MA	MB	B	MB	<b>RE</b>
507	MA	MB	B	B	<b>RE</b>
508	MA	MB	B	M	<b>RE</b>
509	MA	MB	B	A	<b>RE</b>
510	MA	MB	B	MA	<b>RE</b>
511	MA	MB	M	MB	<b>RE</b>
512	MA	MB	M	B	<b>RE</b>
513	MA	MB	M	M	<b>RE</b>
514	MA	MB	M	A	<b>RU</b>
515	MA	MB	M	MA	<b>RU</b>
516	MA	MB	A	MB	<b>RE</b>
517	MA	MB	A	B	<b>RE</b>
518	MA	MB	A	M	<b>RU</b>
519	MA	MB	A	A	<b>RU</b>
520	MA	MB	A	MA	<b>RU</b>
521	MA	MB	MA	MB	<b>RE</b>
522	MA	MB	MA	B	<b>RE</b>
523	MA	MB	MA	M	<b>RU</b>
524	MA	MB	MA	A	<b>RU</b>
525	MA	MB	MA	MA	<b>RU</b>
526	MA	B	MB	MB	<b>RE</b>
527	MA	B	MB	B	<b>RE</b>
528	MA	B	MB	M	<b>RE</b>
529	MA	B	MB	A	<b>RE</b>
530	MA	B	MB	MA	<b>RE</b>
531	MA	B	B	MB	<b>RE</b>
532	MA	B	B	B	<b>RE</b>
533	MA	B	B	M	<b>RE</b>
534	MA	B	B	A	<b>RE</b>
535	MA	B	B	MA	<b>RE</b>
536	MA	B	M	MB	<b>RE</b>
537	MA	B	M	B	<b>RE</b>
538	MA	B	M	M	<b>RE</b>

539	MA	B	M	A	<b>RU</b>
540	MA	B	M	MA	<b>RU</b>
541	MA	B	A	MB	<b>RE</b>
542	MA	B	A	B	<b>RE</b>
543	MA	B	A	M	<b>RU</b>
544	MA	B	A	A	<b>RU</b>
545	MA	B	A	MA	<b>RU</b>
546	MA	B	MA	MB	<b>RE</b>
547	MA	B	MA	B	<b>RE</b>
548	MA	B	MA	M	<b>RU</b>
549	MA	B	MA	A	<b>RU</b>
550	MA	B	MA	MA	<b>RU</b>
551	MA	M	MB	MB	<b>RE</b>
552	MA	M	MB	B	<b>RE</b>
553	MA	M	MB	M	<b>RE</b>
554	MA	M	MB	A	<b>RE</b>
555	MA	M	MB	MA	<b>RE</b>
556	MA	M	B	MB	<b>RE</b>
557	MA	M	B	B	<b>RE</b>
558	MA	M	B	M	<b>RE</b>
559	MA	M	B	A	<b>RE</b>
560	MA	M	B	MA	<b>RE</b>
561	MA	M	M	MB	<b>RE</b>
562	MA	M	M	B	<b>RE</b>
563	MA	M	M	M	<b>RE</b>
564	MA	M	M	A	<b>PE</b>
565	MA	M	M	MA	<b>PE</b>
566	MA	M	A	MB	<b>RE</b>
567	MA	M	A	B	<b>RE</b>
568	MA	M	A	M	<b>PE</b>
569	MA	M	A	A	<b>PE</b>
570	MA	M	A	MA	<b>PE</b>
571	MA	M	MA	MB	<b>RE</b>
572	MA	M	MA	B	<b>RE</b>
573	MA	M	MA	M	<b>PE</b>
574	MA	M	MA	A	<b>PE</b>
575	MA	M	MA	MA	<b>PE</b>
576	MA	A	MB	MB	<b>RU</b>
577	MA	A	MB	B	<b>RU</b>

578	MA	A	MB	M	<b>RU</b>
579	MA	A	MB	A	<b>PE</b>
580	MA	A	MB	MA	<b>PE</b>
581	MA	A	B	MB	<b>RU</b>
582	MA	A	B	B	<b>RU</b>
583	MA	A	B	M	<b>RU</b>
584	MA	A	B	A	<b>PE</b>
585	MA	A	B	MA	<b>PE</b>
586	MA	A	M	MB	<b>RU</b>
587	MA	A	M	B	<b>RU</b>
588	MA	A	M	M	<b>RU</b>
589	MA	A	M	A	<b>PE</b>
590	MA	A	M	MA	<b>PE</b>
591	MA	A	A	MB	<b>PE</b>
592	MA	A	A	B	<b>PE</b>
593	MA	A	A	M	<b>PE</b>
594	MA	A	A	A	<b>PE</b>
595	MA	A	A	MA	<b>PE</b>
596	MA	A	MA	MB	<b>PE</b>
597	MA	A	MA	B	<b>PE</b>
598	MA	A	MA	M	<b>PE</b>
599	MA	A	MA	A	<b>PE</b>
600	MA	A	MA	MA	<b>PE</b>
601	MA	MA	MB	MB	<b>RU</b>
602	MA	MA	MB	B	<b>RU</b>
603	MA	MA	MB	M	<b>RU</b>
604	MA	MA	MB	A	<b>PE</b>
605	MA	MA	MB	MA	<b>PE</b>
606	MA	MA	B	MB	<b>RU</b>
607	MA	MA	B	B	<b>RU</b>
608	MA	MA	B	M	<b>RU</b>
609	MA	MA	B	A	<b>PE</b>
610	MA	MA	B	MA	<b>PE</b>
611	MA	MA	M	MB	<b>RU</b>
612	MA	MA	M	B	<b>RU</b>
613	MA	MA	M	M	<b>RU</b>
614	MA	MA	M	A	<b>PE</b>
615	MA	MA	M	MA	<b>PE</b>
616	MA	MA	A	MB	<b>PE</b>

617		MA	MA	A	B	<b>PE</b>
618		MA	MA	A	M	<b>PE</b>
619		MA	MA	A	A	<b>PE</b>
620		MA	MA	A	MA	<b>PE</b>
621		MA	MA	MA	MB	<b>PE</b>
622		MA	MA	MA	B	<b>PE</b>
623		MA	MA	MA	M	<b>PE</b>
624		MA	MA	MA	A	<b>PE</b>
625		MA	MA	MA	MA	<b>PE</b>

Tabela 16 – Regras do grupo 3 (Subíndice peso baixo).

Nº Regras	<b>Tu</b>	ST	Grupo 3
1	MB	MB	<b>OT</b>
2	MB	B	<b>OT</b>
3	MB	M	<b>BO</b>
4	MB	A	<b>BO</b>
5	MB	MA	<b>RE</b>
6	B	MB	<b>OT</b>
7	B	B	<b>OT</b>
8	B	M	<b>BO</b>
9	B	A	<b>RE</b>
10	B	MA	<b>RE</b>
11	M	MB	<b>BO</b>
12	M	B	<b>BO</b>
13	M	M	<b>RE</b>
14	M	A	<b>RU</b>
15	M	MA	<b>PE</b>
16	A	MB	<b>BO</b>
17	A	B	<b>RE</b>
18	A	M	<b>RU</b>
19	A	A	<b>PE</b>
20	A	MA	<b>PE</b>
21	MA	MB	<b>RE</b>
22	MA	B	<b>RE</b>
23	MA	M	<b>PE</b>
24	MA	A	<b>PE</b>
25	MA	MA	<b>PE</b>



Tabela 17 – Regras dos subsistemas para gerar o IQA fuzzy final.

Nº regras	Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3	<b>IQA FUZZY</b>
1	PE	PE	PE	<b>PE</b>
2	PE	PE	RU	<b>PE</b>
3	PE	PE	RE	<b>PE</b>
4	PE	PE	BO	<b>PE</b>
5	PE	PE	OT	<b>RU</b>
6	PE	RU	PE	<b>PE</b>
7	PE	RU	RU	<b>PE</b>
8	PE	RU	RE	<b>PE</b>
9	PE	RU	BO	<b>RU</b>
10	PE	RU	OT	<b>RU</b>
11	PE	RE	PE	<b>PE</b>
12	PE	RE	RU	<b>PE</b>
13	PE	RE	RE	<b>RU</b>
14	PE	RE	BO	<b>RU</b>
15	PE	RE	OT	<b>RU</b>
16	PE	BO	PE	<b>RU</b>
17	PE	BO	RU	<b>RU</b>
18	PE	BO	RE	<b>RU</b>
19	PE	BO	BO	<b>RE</b>
20	PE	BO	OT	<b>RE</b>
21	PE	OT	PE	<b>RU</b>
22	PE	OT	RU	<b>RE</b>
23	PE	OT	RE	<b>RE</b>
24	PE	OT	BO	<b>RE</b>
25	PE	OT	OT	<b>RE</b>
26	RU	PE	PE	<b>PE</b>
27	RU	PE	RU	<b>PE</b>
28	RU	PE	RE	<b>PE</b>
29	RU	PE	BO	<b>RU</b>
30	RU	PE	OT	<b>RU</b>
31	RU	RU	PE	<b>PE</b>
32	RU	RU	RU	<b>PE</b>
33	RU	RU	RE	<b>RU</b>

---

34	RU	RU	BO	<b>RU</b>
35	RU	RU	OT	<b>RU</b>
36	RU	RE	PE	<b>PE</b>
37	RU	RE	RU	<b>RU</b>
38	RU	RE	RE	<b>RU</b>
39	RU	RE	BO	<b>RU</b>
40	RU	RE	OT	<b>RU</b>
41	RU	BO	PE	<b>RU</b>
42	RU	BO	RU	<b>RU</b>
43	RU	BO	RE	<b>RU</b>
44	RU	BO	BO	<b>RE</b>
45	RU	BO	OT	<b>RE</b>
46	RU	OT	PE	<b>RE</b>
47	RU	OT	RU	<b>RE</b>
48	RU	OT	RE	<b>RE</b>
49	RU	OT	BO	<b>RE</b>
50	RU	OT	OT	<b>RE</b>
51	RE	PE	PE	<b>PE</b>
52	RE	PE	RU	<b>RU</b>
53	RE	PE	RE	<b>RU</b>
54	RE	PE	BO	<b>RU</b>
55	RE	PE	OT	<b>RU</b>
56	RE	RU	PE	<b>RU</b>
57	RE	RU	RU	<b>RU</b>
58	RE	RU	RE	<b>RU</b>
59	RE	RU	BO	<b>RE</b>
60	RE	RU	OT	<b>RE</b>
61	RE	RE	PE	<b>RU</b>
62	RE	RE	RU	<b>RU</b>
63	RE	RE	RE	<b>RE</b>
64	RE	RE	BO	<b>RE</b>
65	RE	RE	OT	<b>RE</b>
66	RE	BO	PE	<b>RE</b>
67	RE	BO	RU	<b>RE</b>
68	RE	BO	RE	<b>RE</b>
69	RE	BO	BO	<b>BO</b>
70	RE	BO	OT	<b>OT</b>
71	RE	OT	PE	<b>RE</b>
72	RE	OT	RU	<b>RE</b>

73	RE	OT	RE	<b>RE</b>
74	RE	OT	BO	<b>RE</b>
75	RE	OT	OT	<b>RE</b>
76	BO	PE	PE	<b>RU</b>
77	BO	PE	RU	<b>RU</b>
78	BO	PE	RE	<b>RE</b>
79	BO	PE	BO	<b>RE</b>
80	BO	PE	OT	<b>RE</b>
81	BO	RU	PE	<b>RU</b>
82	BO	RU	RU	<b>RE</b>
83	BO	RU	RE	<b>RE</b>
84	BO	RU	BO	<b>RE</b>
85	BO	RU	OT	<b>RE</b>
86	BO	RE	PE	<b>RE</b>
87	BO	RE	RU	<b>RE</b>
88	BO	RE	RE	<b>RE</b>
89	BO	RE	BO	<b>BO</b>
90	BO	RE	OT	<b>BO</b>
91	BO	BO	PE	<b>RE</b>
92	BO	BO	RU	<b>BO</b>
93	BO	BO	RE	<b>BO</b>
94	BO	BO	BO	<b>BO</b>
95	BO	BO	OT	<b>BO</b>
96	BO	OT	PE	<b>BO</b>
97	BO	OT	RU	<b>BO</b>
98	BO	OT	RE	<b>BO</b>
99	BO	OT	BO	<b>BO</b>
100	BO	OT	OT	<b>OT</b>
101	OT	PE	PE	<b>RE</b>
102	OT	PE	RU	<b>RE</b>
103	OT	PE	RE	<b>BO</b>
104	OT	PE	BO	<b>BO</b>
105	OT	PE	OT	<b>BO</b>
106	OT	RU	PE	<b>RE</b>
107	OT	RU	RU	<b>BO</b>
108	OT	RU	RE	<b>BO</b>
109	OT	RU	BO	<b>BO</b>
110	OT	RU	OT	<b>BO</b>
111	OT	RE	PE	<b>BO</b>

---

112	OT	RE	RU	<b>BO</b>
113	OT	RE	RE	<b>BO</b>
114	OT	RE	BO	<b>BO</b>
115	OT	RE	OT	<b>BO</b>
116	OT	BO	PE	<b>BO</b>
117	OT	BO	RU	<b>BO</b>
118	OT	BO	RE	<b>OT</b>
119	OT	BO	BO	<b>OT</b>
120	OT	BO	OT	<b>OT</b>
121	OT	OT	PE	<b>OT</b>
122	OT	OT	RU	<b>BO</b>
123	OT	OT	RE	<b>OT</b>
124	OT	OT	BO	<b>OT</b>
125	OT	OT	OT	<b>OT</b>

---