

Determinação das funções de pertinência dos índices de qualidade da água e de substâncias tóxicas e organolépticas

Luís Roberto Almeida Gabriel Filho¹, Camila Pires Cremasco², Luiz Roberto Almeida Gabriel³, Polyana Aguiar Romanini⁴, José Eduardo Ferreira Gabriel⁵, Leonardo Rigo Almeida Gabriel⁶

¹Professor Doutor do curso de Administração (CET, UNESP, Presidente Prudente) e do curso de Pós-Graduação em Agronomia/Irrigação e Drenagem (FCA, UNESP, Presidente Prudente); ²Professor Doutor do curso de Tecnologia no Agronegócio (FATEC, Presidente Prudente); ³Professor Livre Docente do Departamento de Matemática, ⁴Mestranda em Matemática Aplicada e Computacional (FCT, UNESP, Presidente Prudente); ⁵Professor Doutor dos cursos de Administração e Economia (FAI, Adamantina); ⁶Médico do AME (Tupã).

RESUMO

Devido à grande preocupação existente com a qualidade da água de rios no estado de São Paulo, são necessárias avaliações que utilizem técnicas eficientes e de fácil interpretação pelos usuários. Para uma avaliação precisa e robusta da qualidade da água é necessária a utilização técnicas que envolvam um grande número de parâmetros e suas interações. Neste trabalho, efetuou-se uma modelagem matemática para avaliação da qualidade da água considerando diversos parâmetros utilizados em geral para a classificação da água, tais como índices definidos por *IAP* (índice da qualidade da água bruta para fins de abastecimento público), *IAV* (índice de qualidade de água para proteção da vida aquática) e *ISTO* (índice de substâncias tóxicas e organolépticas), além das variáveis ecotoxicológicas, físicas, hidrológicas, químicas e microbiológicas. Foram elaboradas funções de pertinência para modelos *fuzzy* com o objetivo de se obter um novo método de descrição da qualidade da água, permitindo avaliações futuras da qualidade da água através de um único índice que considere todos os parâmetros citados. Dentre as vantagens da aplicação da lógica *fuzzy*, é possível destacar sua simplicidade e seu baixo custo computacional, além da redução de perdas de informações por sua capacidade de obtenção de graus de pertinência para cada classe de geo-objetos. A criação das funções de pertinência analiticamente e também por implementação computacional no *software* Matlab® foi baseada em informações do Ministério da Saúde e tais funções mostraram-se adequadas em relação aos dados observados para qualquer possível futura avaliação das situações futuras da qualidade de água.

Palavras-chave: modelagem matemática, lógica *fuzzy*, índice da qualidade da água.

Determination of membership functions of the indices of water quality and of toxic and organoleptic substances

Abstract

Because the major concern existing with the water quality of rivers in the state of São Paulo, assessments are needed which use techniques efficient and easy interpretation by users. For a accurate and robust assessment of water quality is necessary to use techniques which involve a large number of parameters and their interactions. In this work, made up a mathematical model to evaluate of water quality taking into account various parameters used in general for the classification of water, such as indices defined by *IAP* (index of quality of raw water for public supply), *IAV* (index water quality for protection of aquatic life) and *ISTO* (index of toxic and organoleptic), besides the variables ecotoxicological, physical, hydrological, chemical and microbiological. Membership functions were developed for *fuzzy* models with the aim of obtaining a new method of describing the quality of water, allowing future assessments of water quality through a single index that considers all the parameters cited. Among the advantages of applying *fuzzy* logic, it is possible highlight its simplicity and low computational cost, in addition to reducing losses of information by their ability to raise levels of relevance for each class of geo-objects. The creation of membership functions analytically and also by implementing the computational in *software* Matlab® was based on information from the Ministry of Health and such functions have proved adequate in relation to the observed data for future evaluation of any possible future situations of water quality.

Keywords: mathematical modeling, *fuzzy* logic, index of water quality.

Introdução

A água é substância essencial para a vida do homem e dos demais seres vivos que habitam no nosso planeta. Cerca de 97,5% da água que cobre a superfície da Terra é salgada. Dos restantes 2,5%, dois terços estão em estados sólidos, nas geleiras e calotas polares. A maior parte da água em estado líquido encontra-se no subterrâneo. Lagos, rios e lençóis freáticos menos profundos são apenas 0,26% de toda a água potável. É dessa pequena fração que toda a humanidade (e boa parte da flora e fauna) depende para sobreviver. A água está em eterna reciclagem, há bilhões de anos. A questão é o descompasso entre o tempo necessário para essa renovação e o ritmo em que estes recursos hídricos são explorados.

Alguns países têm muito mais água do que necessitam. É o caso do Canadá, da Islândia e do Brasil. Outros são situados em regiões extremamente secas, como o norte da África, o Oriente Médio e o norte da China.

O Brasil detém 12% de toda a água superficial do planeta, o país tem água potável suficiente para abastecer 57 vezes a necessidade do país, mas a distribuição pelo território nacional não é equilibrada. Portanto a gestão da rede hídrica nacional é fundamental para evitar a destruição dos recursos naturais e a repetição dos episódios de racionalização e blecaute que afetaram algumas regiões do país mais de uma vez.

A fim de gerenciar os recursos hídricos brasileiros, a Agência Nacional das Águas (ANA) divide o país em 12 regiões hidrográficas, que correspondem a 12 bacias. A bacia hidrográfica é usualmente definida como a área na qual ocorre a captação de água (drenagem) para um rio principal e seus afluentes devido às suas características geográficas e topográficas (AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS, 2007).

O estado de São Paulo é composto por 21 Comitês de bacias hidrográficas e 22 Unidades de Gerenciamento de Recursos Hídricos (UGRHs) indicados na Figura 1, constando entre elas as Bacias do Rio Aguapeí e do Rio do Peixe, objetos deste estudo. Localizadas no Oeste Paulista, tais Bacias abrangem uma área de 23.965 quilômetros quadrados, envolvendo 57 municípios. Estes rios por apresentarem muitas semelhanças sob ponto de vista do meio físico foram inseridos em um único Comitê de Bacia Hidrográfica. Porém, as Bacias dos Rios Aguapeí e Peixe são separadas por UGRHs, denominadas unidades 20 e 21.

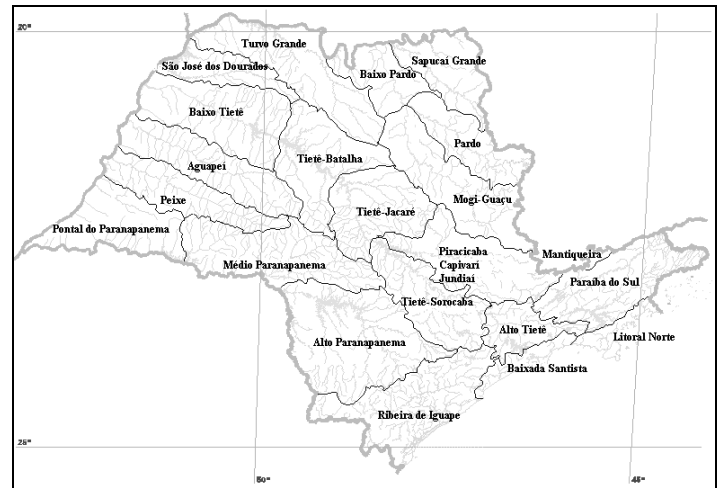


Figura 1. Bacias Hidrográficas do Estado de São Paulo (AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS, 2007)

Para o estudo das formas de avaliação da qualidade da água, é preciso o estudo das variáveis qualidade do IAP (índice de qualidade de água bruta) para fins de abastecimento público e IVA (índice de qualidade de água para proteção da vida aquática). Os índices utilizados para verificar a e qualidade de água nas bacias são:

- *IAP*: Índice de qualidade de água bruta para fins de abastecimento público;
- *IQA*: Índice de Qualidade de Águas;
- *ISTO*: Índice de Substâncias Tóxicas e Organolépticas.

O *IAP* (Índice de qualidade de água bruta para fins de abastecimento público) é o produto da ponderação dos resultados atuais do *IQA* e do *ISTO*:

$$IAP = IQA \cdot ISTO, \quad (1)$$

enquanto que o *ISTO* é composto pelo grupo de substâncias que afetam a qualidade organoléptica da água, bem como de substâncias tóxicas.

As propriedades organolépticas são aquelas que podem ser percebidas pelos sentidos humanos, como por exemplo, olfato e paladar, enquanto que as substâncias tóxicas são aquelas capazes de provocar a morte ou danos à saúde humana se ingeridas, inaladas ou por contato com a pele, mesmo em pequenas quantidades.

Assim, o índice será composto por três grupos principais de variáveis: grupo de variáveis básicas, grupo de variáveis que indicam a presença de substâncias tóxicas e grupo de variáveis que afetam a qualidade organoléptica.

O *IQA* (índice de qualidade das águas) é calculado pelo produtório ponderado das qualidades de água correspondentes às variáveis básicas. As variáveis são Temperatura da Água, pH, Oxigênio Dissolvido, Demanda Bioquímica de Oxigênio, Coliformes Termotolerantes, Nitrogênio Total, Fósforo Total, Resíduo Total e Turbidez);

Para o cálculo é utilizada a seguinte equação:

$$IQA = \prod_{i=1}^n q_i^{w_i}, \quad (2)$$

onde:

IQA é o índice da qualidade da água (entre 0 e 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:

$$\sum_{i=1}^n w_i = 1, \quad (3)$$

onde n é número de parâmetros que entram no cálculo do *IQA*.

A partir do cálculo efetuado, pode-se determinar a qualidade das águas brutas, que é indicada pelo *IQA* conforme indica a Tabela 2.

Tabela 1. Parâmetro do *IQA* com variação na escala de 0 a 100 (COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL, 2007).

Categoria	Ponderação
Ótima	79 < <i>IQA</i> ≤ 100
Boa	51 < <i>IQA</i> ≤ 79
Regular	36 < <i>IQA</i> ≤ 51
Ruim	19 < <i>IQA</i> ≤ 36
Péssima	<i>IQA</i> ≤ 19

O Índice de Substâncias Tóxicas e Organoléptica (*ISTO*) é obtido pelo agrupamento das seguintes variáveis:

- Variáveis que indicam a presença de substâncias tóxicas: teste de Ames - Genotoxicidade, potencial de formação de trihalometanos (*PFTHM*), número de células de cianobactérias, cádmio, chumbo, cromo total, mercúrio e níquel;
- Grupo de variáveis que afetam a qualidade organoléptica: ferro, manganês, alumínio, cobre e zinco.

Após a inclusão dos parâmetros no *ISTO*, são estabelecidas curvas de qualidade com imagem entre 0 e 1. Estas curvas de qualidade,

representadas através das variáveis potencial de formação de trihalometanos e metais, são construídas utilizando-se dois níveis de qualidade (q_i), que associam os valores numéricos 1,0 e 0,5 aos limites superior (L_S) e inferior (L_i), respectivamente.

As faixas de variação de qualidade (q_i), que são atribuídas aos valores medidos para o potencial de formação de trihalometanos e também para os metais que compõem o *ISTO*, refletem, segundo o Ministério da Saúde (2004), as seguintes condições de qualidade da água bruta destinada ao abastecimento público:

- Valor medido $< L_i$: águas adequadas para o consumo humano. Atendem aos padrões de portabilidade da Portaria 518/04 do Ministério da Saúde em relação às variáveis avaliadas;
- $L_i < \text{Valor medido} < L_S$: águas adequadas para tratamento convencional. Atendem aos padrões de qualidade da classe 3 da Resolução CONAMA 357/05 em relação às variáveis determinadas;
- Valor medido $> L_S$: águas que não devem ser submetidas apenas a tratamento convencional. Não atendem aos padrões de qualidade da classe 3 da Resolução CONAMA 357/05 em relação às variáveis avaliadas.

Desta forma, o limite inferior para cada uma dessas variáveis foi considerado como sendo os padrões de portabilidade estabelecidos na Portaria 518/04 do Ministério da Saúde e para o limite superior foram considerados os padrões de qualidade de água doce Classe 3 da CONAMA 357/05.

Portanto, através das curvas de qualidade, determinam-se os valores de qualidade normalizados, q_i (número variando entre 0 e 1), para cada uma das variáveis do *ISTO*, que estão incluídas ou no grupo de substâncias tóxicas, ou no grupo de organolépticas. O cálculo do *ISTO* (Índice de Substâncias Tóxicas e Organolépticas) é o resultado do produto dos grupos de substâncias tóxicas e as que alteram a qualidade organoléptica da água, como descrito analiticamente pela Equação (1).

Porém, um problema que em geral ocorre nas faixas das classificações são os limites destas faixas. Pode-se observar na Tabela 1 que o valor $IQA = 36$ é classificado na Categoria Ruim, enquanto que o valor $IQA = 37$ é Regular. Este comportamento, caracterizado como instabilidade de classificação, é constatado em todos os limites das faixas das categorias.

Uma alternativa viável para a análise da qualidade da água sem o efeito desta instabilidade é a utilização da lógica *fuzzy*, também conhecida como lógica difusa. Segundo Barros et al. (2007), esta metodologia foi estruturada em 1965 pelo Dr. Lofti Asker Zadeh da Universidade da Califórnia para tratar e representar incertezas.

Segundo Cremasco (2008), a lógica difusa torna-se importante na medida em que o mundo em que vivemos não é constituído por fatos absolutamente verdadeiros ou falsos. É a lógica que permite representar valores de pertinência (grau de verdade) intermediários entre valores de verdadeiro ou falso da lógica clássica.

Para a análise da qualidade da água, devem-se encontrar inicialmente as funções de pertinência e estruturá-las de acordo com as informações já existente com o objetivo de se obter um controle das informações vagas, em geral descritas em uma linguagem natural e

convertê-las para um formato numérico de fácil utilização computacional que, segundo Amendola et al. (2005), pode ser realizado pelo *software Matlab*.

Desta forma, o presente trabalho apresenta uma proposta para a modelagem matemática por meio de funções de pertinências dos índices pré-estabelecidos relacionados à qualidade da água a fim de possibilitar sua utilização futura em uma avaliação desta qualidade de maneira mais robusta, através da criação do “Índice *Fuzzy* da Qualidade da Água”.

Material e métodos

Neste trabalho foram estabelecidas como objetos para o desenvolvimento das funções de pertinência associada variáveis linguísticas dos índices *IAP*, *IVA* e qualidade da água.

Tais variáveis foram denominadas de entrada para um sistema *fuzzy* avaliando o nível de qualidade da água doce no interior do estado de São Paulo por meio da classificação do ambiente.

A confecção das funções de pertinências dependeu dos dados já coletados por sítios governamentais e do auxílio do *software Matlab*® 6.5.

As informações foram obtidas através do monitoramento (UGRHIs), no período entre 2005,

2006 e 2007 das Bacias do Rios do Peixe e Aguapeí.

As variáveis linguísticas da variável *IAP* foram denominadas “Ótima”, “Boa”, “Regular”, “Ruim” e “Péssima”, constituindo também os conjuntos *fuzzy* desta variável.. Isto significa que um valor dado de *IAP* pode não ser, por exemplo, completamente “Ótimo”, mas ser “Ótimo” com certo grau de aderência. Para a variável *IVA* também se utilizou funções de mesmas denominações.

Resultados e discussão

Inicialmente, após a reestruturação e análise dos dados e cálculos já conhecidos sobre os índices, foram construídas funções de pertinência das variáveis *ISTO* e *IQA*, que constituíram as variáveis de entrada do sistema *fuzzy*.

Utilizando as variáveis linguísticas apresentadas pelo Ministério da Saúde (2004) (Tabela 2), foram calculados percentis dos grupos de dados e determinados suportes das funções de pertinência (pelos pontos limites), possibilitando a construção das mesmas com o *software Matlab*, conforme indica a Figura 2.

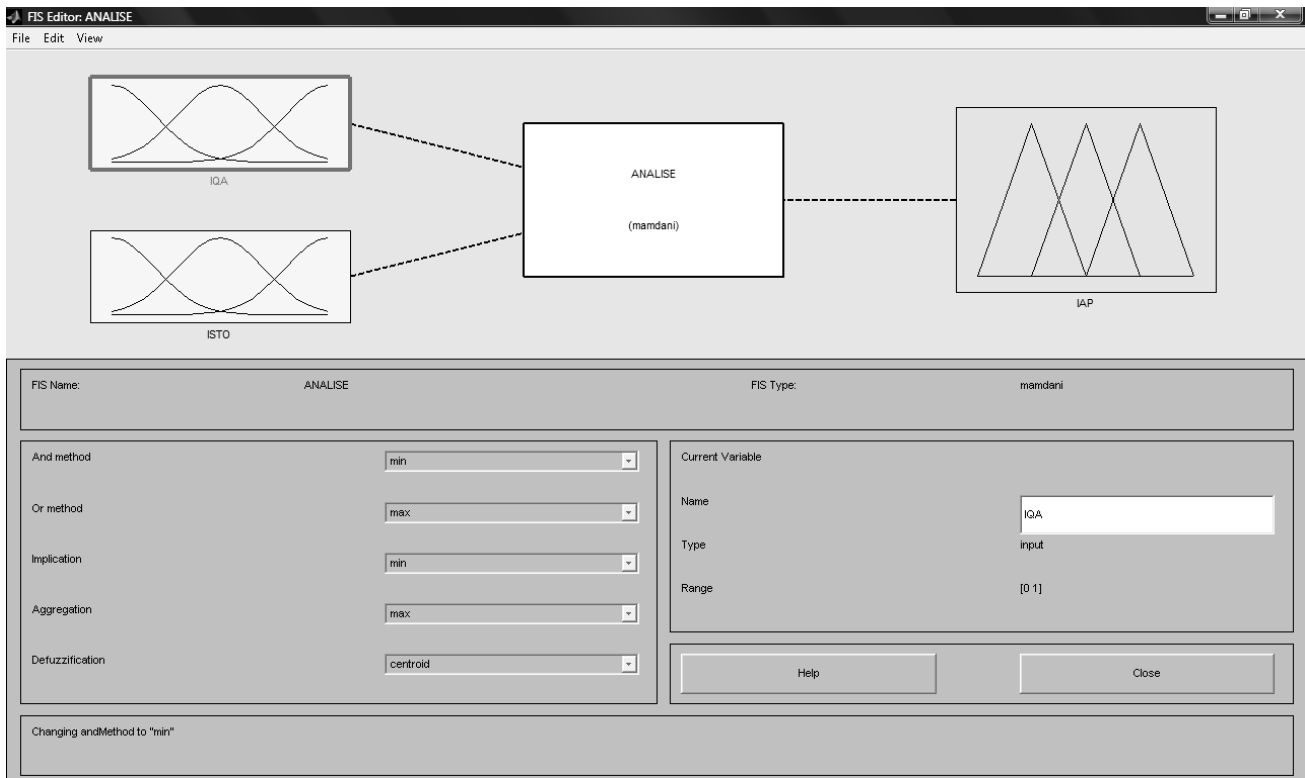


Figura 2. Representação da tela inicial do Matlab, sistema *fuzzy* e variáveis de entrada.

As Figuras 3 e 4 mostram as funções de pertinência do sistema *fuzzy* das variáveis de entrada *IQA* e *ISTO*, enquanto que a Figura 5 consiste nas funções de pertinência da variável de saída “Índice *Fuzzy* da Qualidade da Água”,

todas construídas por meio dos valores observados na Tabela 2 e pelo *software* Matlab. Vale ressaltar que para a elaboração dos limites das funções de pertinências destas três variáveis, foram calculados os percentis nos níveis 21%, 49%, 64% e 81% no conjunto dos *IAP* calculados.

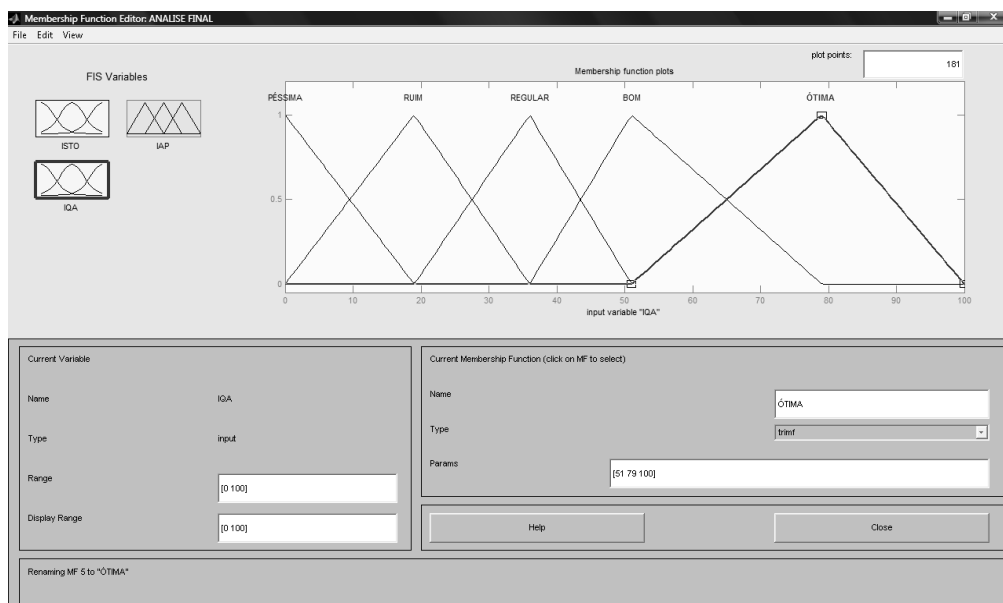


Figura 3. Funções de pertinência da variável de entrada *IQA*.

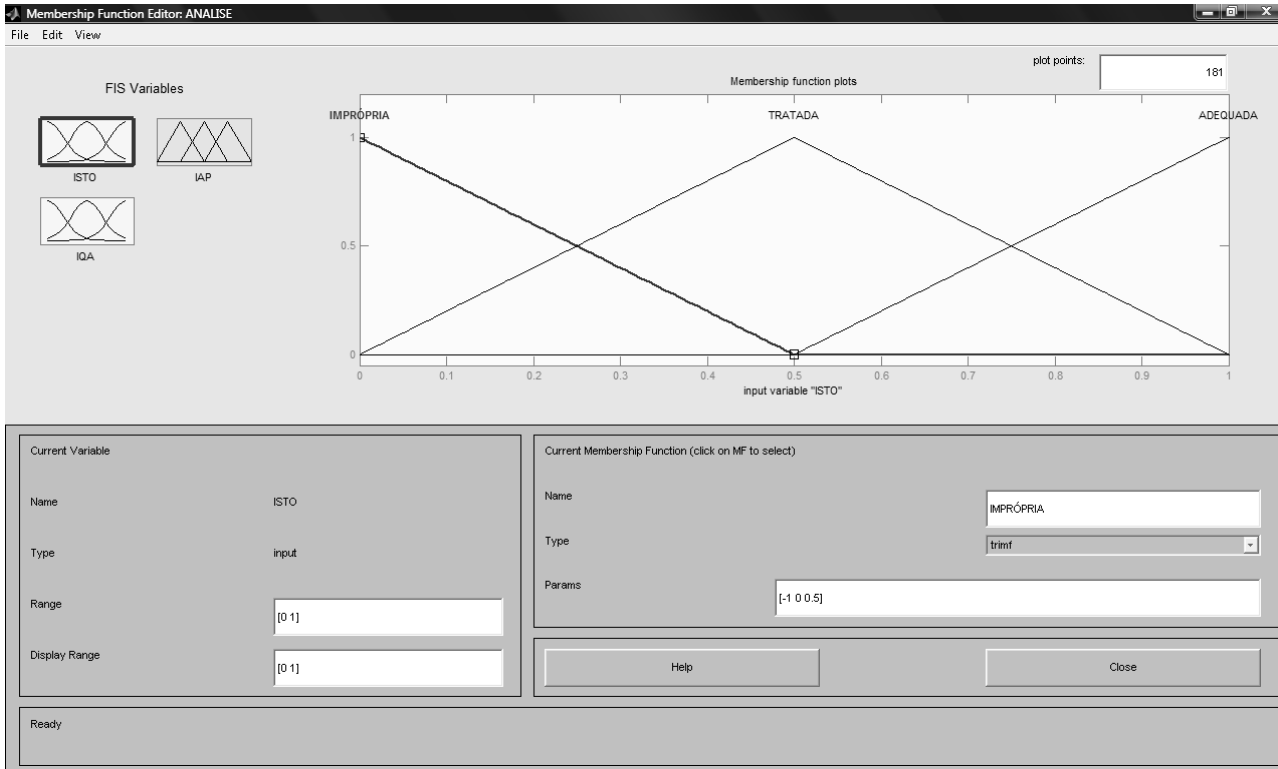


Figura 4. Funções de pertinência da variável de entrada *ISTO*.

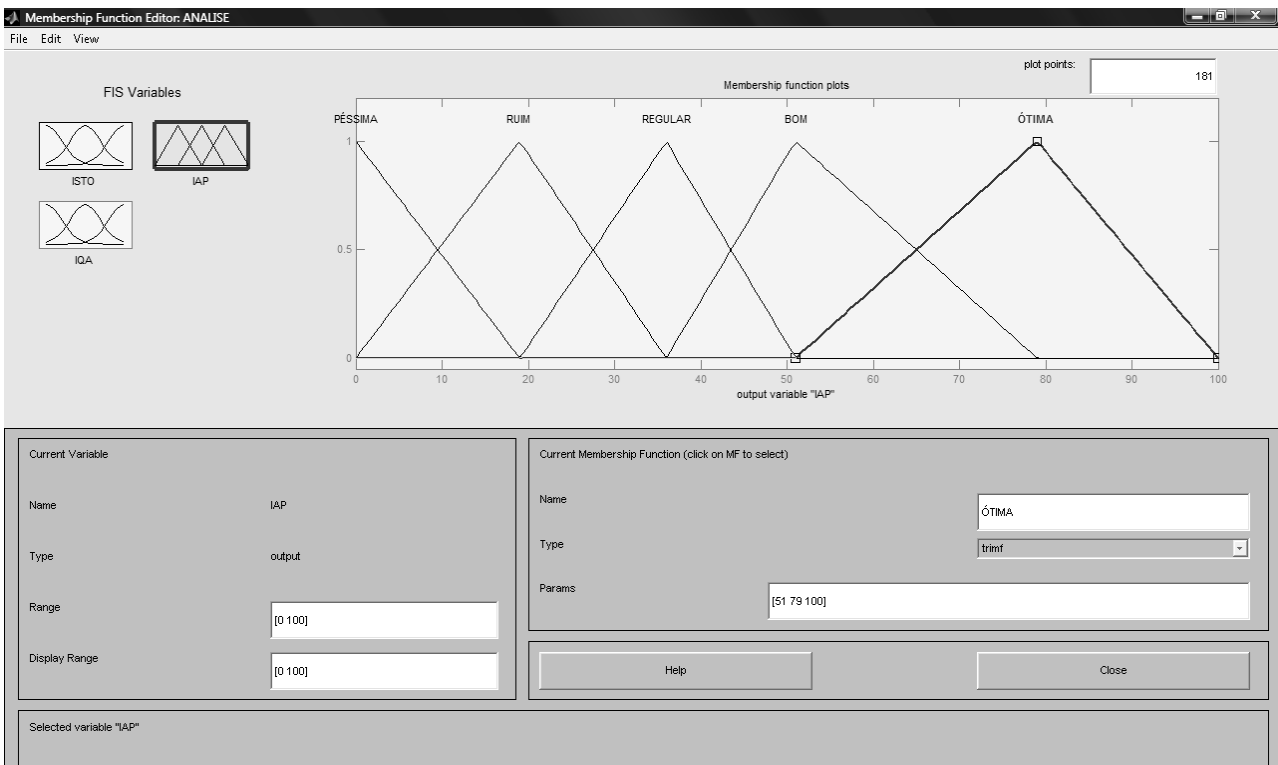


Figura 5. Funções de pertinência da variável de saída “Índice *Fuzzy* da Qualidade da Água”.

A Figura 6 apresenta as variáveis *IQA* e *ISTO* interligadas por meio de pesquisas oriundas

de dados do Ministério da Saúde indicados na Tabela 2, apresentando previamente uma base de regras para a elaboração de um sistema *fuzzy*.

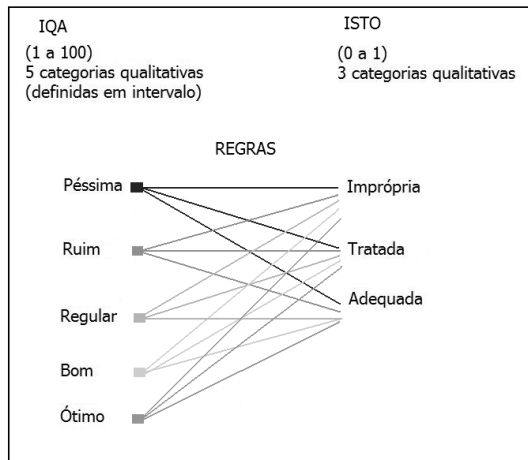


Figura 6. Representação gráfica de uma base de regras

A partir das funções de pertinência das variáveis de entrada (*IQA* e *ISTO*) e da variável de saída (Índice *Fuzzy* da Qualidade da Água), e utilizando a base de regras estruturada na Figura 6, é possível estabelecer um sistema baseado em regras *fuzzy*. Utilizando.

Também pelo método de inferência de Mandani, é possível avaliar futuramente qualquer tipo de água que venha a ser coletada. Desta maneira, tal sistema constiu um excelente método de avaliação a ser utilizado nos rios estudados neste trabalho, uma vez que a resposta (saída) do sistema é uma nota para a qualidade que pode também ser interpretada qualitativamente com “Imprópria”, “Tratada” ou “Adequada”.

Conclusões

No decorrer do desenvolvimento deste trabalho, foram encontradas barreiras significativas para se obter dados sobre a qualidade da água no estado de São Paulo.

A análise dos resultados demonstra que é viável criar ferramentas baseadas em lógica *fuzzy* para o auxílio à tomada de decisão na Avaliação da qualidade da água doce no interior do estado de São Paulo. A elaboração precisa das funções

de pertinência foi o passo inicial e fundamental para a criação do sistema *fuzzy*.

As técnicas *fuzzy* reduzem as perdas de informações por sua capacidade de obtenção de graus de pertinência para cada classe de geo-objetos.

As funções de pertinência podem ter diferentes formas, a melhor forma após vários estudos foi a forma triangular para as duas variáveis, dependendo do conceito e da análise nos pontos de fronteira que se deseja representar e do contexto em que serão utilizadas outras formas para os conjuntos de entrada e saída do controlador. Para exemplificar o quanto o contexto é relevante na definição de funções de pertinência e de sua distribuição ao longo de um dado universo, considere-se a variável IAP (água), constituída dos seguintes termos: IAP (água) = {Ótima, Boa, Regular, Ruim, Péssima}. A esse se fazem corresponder conjuntos *fuzzy* A, B, C, D e E, respectivamente, definidos por suas funções de pertinência.

Desta maneira, tal sistema constiu um excelente método de avaliação a ser utilizado nos rios estudados neste trabalho, uma vez que a resposta (saída) do sistema é uma nota para a qualidade que pode também ser interpretada qualitativamente com “Imprópria”, “Tratada” ou “Adequada”.

Referências

- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS - ANA. **Aplicação dos Recursos - 2006/2007**. Disponível em: <<http://www.ana.gov.br/GestaoRecHidricos/Bacia.asp>>. Acesso em fevereiro 2009.
- AMENDOLA, M.; SOUZA, L. O.; BARROS, L. C. **Manual do uso da teoria dos conjuntos fuzzy no Matlab 6.5**. Campinas: UNICAMP/IMECC. Coleção IMECC - Versão II, maio de 2005.

BARROS, L. C., BASSANEZI, R. C. **Tópicos de lógica fuzzy e biomatemática**. Campinas/SP: UNICAMP/IMECC, 2006. 354 p. (Coleção IMECC - Textos didáticos v.5.)

COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL – CETESB. **Relatório de Qualidade das Águas Interiores no Estado de São Paulo 2006/2007**. Disponível em <http://www.cetesb.sp.gov.br/Agua/rios/publicacoes.asp>. Acesso em fevereiro de 2009.

CREMASCO, C. P. C. **Aplicação da lógica fuzzy para avaliação do faturamento do consumo de energia elétrica e demanda de uma empresa de avicultura de postura**. 97 f. Tese (Doutorado em Agronomia) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu, 2008.

MINISTÉRIO DA SAÚDE. **Normas e padrão de potabilidade das águas destinadas ao consumo humano**. Portaria no. 518/GM. Brasília, Brasil, março de 2004.