3
Formulação do Modelo Inteligente

Este capítulo inicia-se com uma detalhada descrição da área de estudo, o Reservatório de Lajes. O subcapítulo 3.2 apresenta a definição de metodologia de cálculo. O subcapítulo 3.3 apresenta uma descrição do modelo inteligente. Os subcapítulos 3.4 e 3.6 apresentam os indicadores e métricas utilizados como entradas. O subcapítulo 3.5 é uma descrição do IAPR (Índice de Assembleia de Peixes), utilizado para testar o índice MIAQR-PALADINES biótico. O subcapítulo 3.7 apresenta a distribuição dos grupos de subíndices e o 3.8 as bases de regras, os conjuntos fuzzy e as funções de pertinência definidas pelos especialistas.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1021489/CA

3.1. Área de Estudo

3.1.1. Descrição da área de estudo – o Reservatório de Lajes

O Reservatório de Lajes foi construído em 1905 para geração de energia hidroelétrica represando águas dos rios Piraí e Ribeirão das Lajes (BRANCO et al., 2009). Desde 1940 até hoje, as águas do reservatório têm sido utilizadas para o abastecimento interno dos distritos do Rio de Janeiro (GUARINO et al., 2005). Na atualidade, o reservatório pertence a um sistema de reservatórios da Light SA, com uma geração de energia de 612 MW e uma oferta de 96% de água para os municípios do Rio de Janeiro (CEIVAP, 2001). O reservatório é utilizado para a pesca desportiva e, mais recentemente, para o cultivo de peixes em gaiolas em uma de suas baías.

O Reservatório de Lajes (22°43'S - 22°46'S de latitude e 44°30'W - 44°60'W de longitude) situa-se entre os morros da Serra das Araras, uma área preservada com florestas tropicais. Com uma área superficial de 38.9 km^2, o reservatório ocupa mais de 50% da área total da bacia hidrográfica. Está localizado a 415m acima do nível médio do mar e tem uma profundidade máxima de 40m, uma profundidade média de 15m e um volume acumulado de $450x10^6m^3$ (SOARES et al., 2008). O principal afluente é o rio Piraí. Este rio entra no reservatório através do Túnel de Tocos, que é um duto subterrâneo de 7km de cumprimento que transporta a água do Reservatório de Tocos (0,59 km^2) no afluente Piraí (GUARINO et al., 2005).

O reservatório é classificado como um sistema mesotrófico transparente, ou oligo-mesotrófico (uma classe especial de acordo com a legislação brasileira) (GUARINO et al., 2005), com uma baixa biomassa de fitoplâncton (zona eufótica media = 9.2m, fósforo total médio = 1.0µM, média de clorofila-a = 1.9µg L^{-1}) (SOARES et al., 2008).

Devido ao seu alto tempo de retenção (297 dias), o reservatório é considerado altamente sujeito a eutrofização (GUARINO et al., 2005). O prolongado período de estratificação leva a um hipolímnio anóxico, rico em nutrientes, que apresenta má qualidade da água na sua parte mais profunda. A manutenção da estratificação térmica durante a maior parte do ano é provavelmente causada pela baixa influência do vento, o longo tempo de retenção de água, a entrada de água fria do afluente e a chuva drenando diretamente no metalímnio. Em conclusão a heterogeneidade espacial é evidente no reservatório de Lajes, principalmente como consequência da sua localização em uma área preservada e seu longo tempo de retenção de água (SOARES et al., 2008).

Conforme BRANCO et al. (2009), o Reservatório de Lajes é considerado um reservatório geralmente monomítico com uma tendência de mistura da coluna d'água no inverno, dependendo das condições climáticas. Segundo o estudo de BRANCO et al. (2009), os eventos meteorológicos de passagens de frentes frias na região do reservatório não são capazes de perturbar a estabilidade da coluna d'água ou afetar a sua qualidade de água para abastecimento doméstico. No entanto, novas atividades humanas como a piscicultura podem acelerar o crescimento da entrada de nutrientes no reservatório, o qual tem sido retardado por décadas (GUARINO et al., 2005).

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1021489/CA

As margens do lago são íngremes e o contorno da costa não está bem desenvolvido. O nível de água do reservatório é mantido artificialmente, mas segue os padrões de chuva, com o mais alto nível a ser alcançado no final do período chuvoso (abril) e o nível mínimo no início (Novembro). A diferença entre os níveis máximo e mínimo de água é de aproximadamente 8m (BRANCO et al., 2009).

3.1.2. O trabalho de (SOARES et al., 2008)

SOARES et al. (2008) avaliaram o papel do tempo de retenção da água e das características hidrográficas sobre os reservatórios. Para investigar como esses fatores influenciam a limnologia, variáveis físicas e químicas foram aferidas em dois reservatórios tropicais localizados na mesma região geográfica com clima similar e tamanho comparável, porém com diferentes características hidrográficas e distinto tempo de retenção de água. Os reservatórios escolhidos para a análise foram os reservatórios de Lajes e Funil.

Em contraste ao Reservatório de Lajes, o Reservatório Funil é um sistema eutrófico turvo (fósforo total médio = 3,1 μM, zona eufótica media = 4,3 m) com uma elevada biomassa de fitoplâncton (concentração media de clorofila-a = 10,0 mg L^{-1}).

No Reservatório de Lajes as variáveis físicas e químicas foram aferidas em quatro locais de amostragem a partir de junho de 2002 a junho de 2003. O primeiro local de amostragem está localizado perto do rio, o segundo num ponto intermediário do reservatório, o terceiro perto do cultivo de peixes em gaiolas, e o quarto local perto da barragem. A Figura 22 apresenta os locais de amostragem no mapa.

No trabalho de SOARES et al. (2008) são descritas várias características limnológicas importantes do Reservatório de Lajes, características já citadas na seção anterior. Os componentes de maior relevância do estudo de Sorares na construção do MIAQR-PALADINES foram os resultados comparativos entre os locais de amostragem citados a seguir, resultados conclusivos para a definição das metodologias de cálculo do modelo.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1021489/CA

O primeiro e quarto local de amostragem são claramente distinguíveis. Porém, no segundo e terceiro locais foram observadas condições intermediárias entre características lóticas e lênticas. Neste caso, a gradiente lótica-lêntica esperada foi menos evidente. Embora o primeiro local tenha características lóticas e o segundo esteja localizado na zona de transição, o padrão típico de sedimentação e diminuição da produção primária em relação à zona de lêntica não foi observado no estudo.

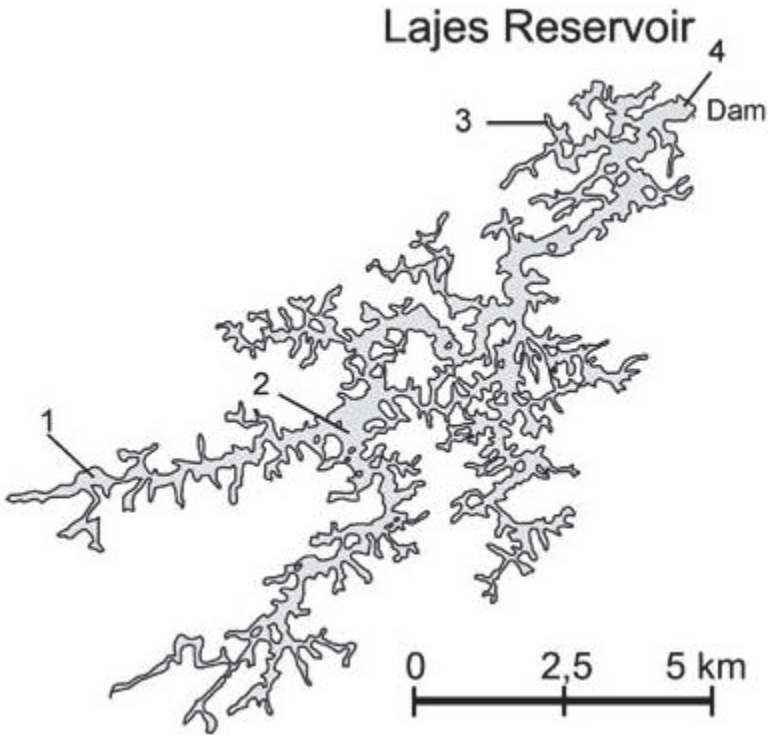

Figura 22. Mapa do Reservatório de Lajes mostrando os locais de amostragem. Fonte: (SOARES et al., 2008)

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1021489/CA

3.1.3. Locais de amostragem

Como fonte de informação analítica, útil na avaliação do modelo, foram utilizados valores extraídos de duas bases de dados, uma do Instituto de Biociências da Universidade Federal do Estado do Rio de Janeiro (UNIRIO), contendo variáveis físicas e químicas úteis na avaliação do índice de qualidade da água para o consumo humano, e a outra da Fundação de Apoio à Pesquisa Científica e Tecnológica da UFRRJ, que contém as métricas de assembleia de peixes utilizadas na formulação do índice biótico.

Os dados foram extraídos, no caso das variáveis físicas e químicas, de cinco locais de amostragem, e de vinte e quatro no caso das métricas de assembleia de peixes. As coordenadas dos locais de amostragem são apresentadas nas tabelas 3 e 4.

A localização dos pontos no mapa é apresentada na Figura 23**.** Os pontos foram agrupados em quatro zonas para melhorar sua visualização e apresentados nas figuras 24, 25, 26 e 27. As marcações vermelhas representam os locais de amostragem onde foram coletados os valores físicos e químicos, e as marcações amarelas onde foram coletadas as métricas de assembleia de peixes.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1021489/CA

Local	Coordenadas	
Tocos L1	22°47'26.17"S	44° 2'21.34"O
Ponte Bela L2	22°49'44.40"S	43°59'45.08"O
Baía da Barra L3	22°44'28.07"S	43°55'27.15"O
Barragem Lajes L4	22°42'7.87"S	43°53'1.46"O
Piscicultura L5	22°42'25.03"S	43°54'47.13"O

Tabela 3. Coordenadas dos locais de amostragem - variáveis físicas e químicas

Local	Coordenadas	
1	22°42'34.26"S	43°53'16.62"O
2	22°43'19.90"S	43°55'9.21"O
3	22°46'22.73"S	43°57'11.95"O
4	22°46'18.64"S	43°56'31.46"O
5	22°47'22.23"S	44° 0'52.44"O
6	22°47'19.95"S	43°59'36.96"O
7	22°47'45.77"S	43°55'39.14"O
8	22°47'48.17"S	43°57'31.74"O
9	22°48'28.81"S	43°58'49.80"O
10	22°43'51.35"S	43°54'29.35"O
11	22°42'33.55"S	43°54'51.68"O
12	22°47'4.31"S	44° 0'20.75"O
13	22°48'42.55"S	43°58'6.09"O
14	22°44'46.21"S	43°55'39.14"O
15	22°45'15.05"S	43°59'2.89"O
16	22°48'6.91"S	43°58'19.23"O
17	22°42'39.74"S	43°53'6.37"O
18	22°43'2.38"S	43°52'56.68"O
19	22°46'8.95"S	43°58'0.64"O
20	22°42'56.13"S	43°54'36.22"O
21	22°45'33.94"S	43°58'29.92"O
22	22°44'47.91"S	43°58'15.68"O
23	22°44'52.7"S	43°55'30.2"O
24	22°46'30.1"S	43°57'59.7"O

Tabela 4. Coordenadas dos locais de amostragem - métricas de assembleia de peixes

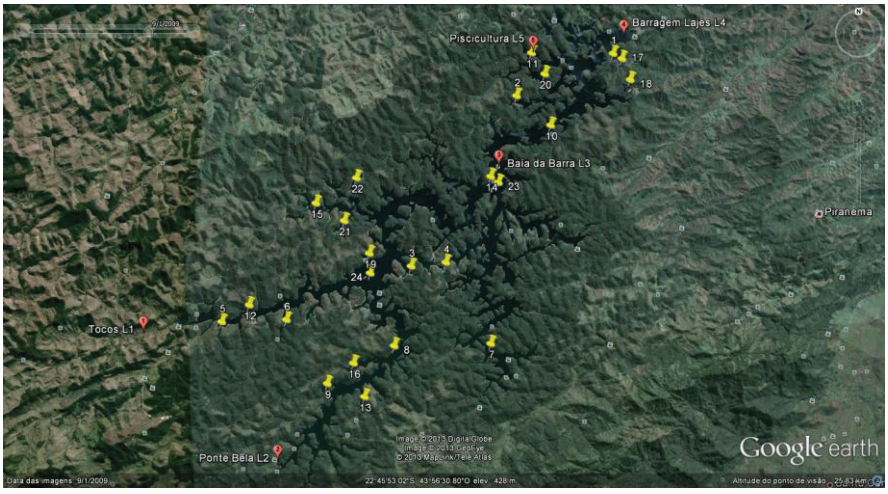

Figura 23. Amostras físicas e químicas, e biológicas

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1021489/CA

Figura 24. Amostras físicas e químicas e biológicas - zona 1

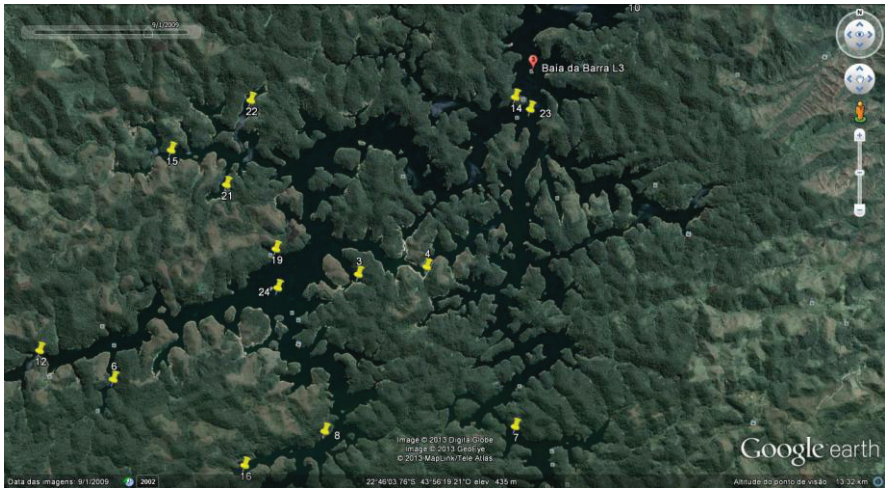

Figura 25. Amostras físicas e químicas e biológicas - zona 2

Figura 26. Amostras físicas e químicas e biológicas - zona 3

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1021489/CA

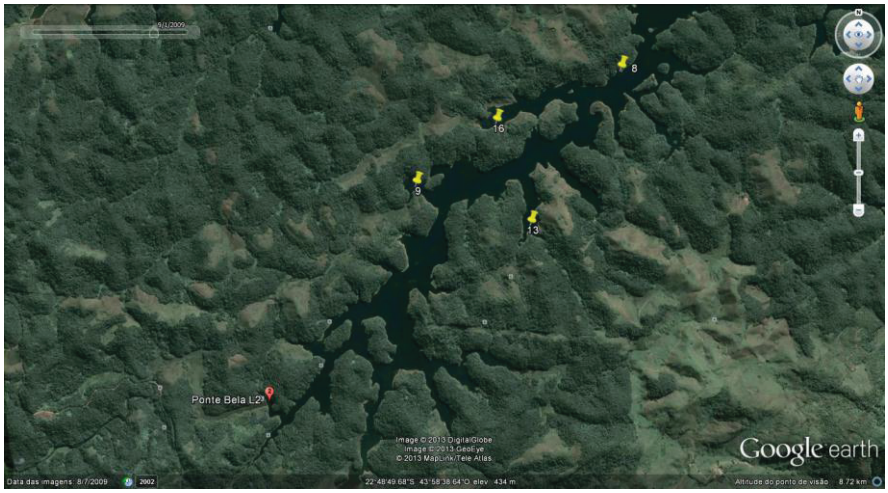

Figura 27. Amostras físicas e químicas e biológicas - zona 4

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1021489/CA

3.2. Metodologias de Cálculo

Dado que o gradiente vertical de um lago determina as características básicas do seu funcionamento**,** além de que a temperatura condiciona a influência de numerosas variáveis físicas e químicas, o MIAQR-PALADINES procura levar em consideração a estratificação térmica na formulação dos índices. Esta conclusão é válida considerando o longo tempo de retenção (297 dias) do Reservatório de Lajes. Em outras palavras, o MIAQR-PALADINES busca diferenciar o cálculo de qualidade entre o epilímnio, o metalímnio, o hipolímnio e uma possível mistura (o efeito de intrusão não foi considerado no modelo).

Em função da localização horizontal de uma amostra, o MIAQR-PALADINES também busca diferenciar o cálculo de qualidade entre zona de rio, zona de transição e zona lacustre. As três zonas possuem suas próprias propriedades biológicas, físicas e químicas (THORNTON, 1990), mais um motivo para serem consideradas relevantes no modelo.

Diferenciando o cálculo de qualidade entre zonas verticais e zonas longitudinais, o MIAQR-PALADINES pretende captar as características de cada ponto do reservatório. As possíveis combinações entre as zonas são:

- Zona lacustre – Epilímnio
- Zona lacustre – Metalímnio
- Zona lacustre – Hipolímnio
- Zona de lacustre – Mistura
- Zona de transição – Epilímnio
- Zona de transição – Metalímnio
- Zona de transição – Hipolímnio
- Zona de transição – Mistura
- Zona de rio

Pensou-se programar uma metodologia de cálculo para cada combinação, porém, de acordo com as características limnológicas próprias do reservatório**,** a zona de transição e a zona lacustre podem ser consideradas homogêneas como resultado da sua heterogeneidade espacial horizontal (GUARINO et al., 2005)**,** sendo assim, as duas zonas foram consideradas como uma só. Esta consideração diminuiu o número de metodologias de cálculo de nove para cinco. Estas cinco metodologias de cálculo são chamadas de: Zona epilímnio, zona metalímnio, zona hipolímnio, zona mistura e zona de rio.

Cada uma das metodologias foi definida utilizando as etapas descritas a seguir:

- Escolha das variáveis de entrada para cada índice.
  Nessa etapa foram selecionados os indicadores e as métricas de qualidade considerados determinantes na implementação de cada índice.
- Definição dos universos de discurso das variáveis de entrada.
  Etapa onde foram definidos os universos de discurso e os conjuntos fuzzy para cada uma das variáveis de entrada (indicadores de qualidade e métricas de assembleia de peixes).
- Definição das funções de pertinência.
  Etapa em que foram estabelecidas as funções de pertinência para cada conjunto fuzzy.
- Determinação dos subíndices.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1021489/CA

Nesta etapa foram determinados os subíndices usados como entradas para o índice de qualidade de água e para o índice biótico, seus universos de discurso e suas funções de pertinência.

- Construção das bases de regras.
  Etapa onde foram estabelecidas as regras, os antecedentes e os consequentes para cada subíndice e para os índices finais.

As cinco metodologias utilizam a mesma seleção de variáveis de entrada e a mesma estrutura de subíndices, porém, os universos de discurso de cada variável, as funções de pertinência de cada conjunto e as bases de regras diferem entre cada metodologia.

Todas as etapas foram desenvolvidas a partir de um debate com especialistas em qualidade da água e qualidade ambiental do Centro de Ciências Biológicas e da Saúde da Universidade Federal do Estado do Rio de Janeiro (UNIRIO) e do Departamento de Biologia Animal da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ). Cabe notar que "o julgamento de especialistas é a chave para qualquer diagnóstico ou avaliação ambiental" (SCARDI et al., 2008).

3.3.Descrição do modelo

Na avaliação da qualidade da água e qualidade biótica do Reservatório de Lajes o modelo leva em consideração:

- Dez indicadores físicos e químicos (temperatura, oxigênio dissolvido, pH, clorofila-a, nitrato, fósforo total, nitrito, amônio, condutividade e turbidez) para o cálculo da qualidade da água.
- Oito métricas de assembleia de peixes (número de espécies nativas, número de siluriformes nativos, número de characiformes nativos, porcentagem de biomassa de espécies não nativas, Dominance_D, Shannon_H, número de Lambaris N, número de Hypostomus affinis) para o cálculo da qualidade biótica.
- Estratificação e possível mistura da coluna d'água.
- Localização horizontal da amostra (zona de rio, transição e lacustre).
- Localização vertical da amostra.
- Data da coleta.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1021489/CA

Os indicadores de qualidade e as métricas de assembleia de peixes serão apresentados nos subcapítulos 3.4 e 3.6.

O modelo avalia a qualidade da água e a qualidade biótica de uma amostra de acordo com a sua localização horizontal e vertical no reservatório, e considera a possível estratificação térmica no momento da coletada. Os dez indicadores físicos e químicos, e as oito métricas de assembleia de peixes são consideradas entradas do sistema.

Define-se amostra como as seguintes entradas do sistema: coordenadas cartesianas de localização, profundidade da amostra, dados de temperatura e profundidade da coluna d'água em caso de que a amostra seja coletada na zona de transição ou lacustre, os dez indicadores físicos e químicos, e as oito métricas biológicas de assembleias de peixes.

Primeiramente, o modelo localiza a amostra longitudinalmente dentro do reservatório utilizando coordenadas cartesianas em graus minutos e segundos. A ferramenta identifica se a amostra está localizada na zona de rio, na zona de transição ou na zona lacustre. As bordas das zonas foram determinadas pelos especialistas e são constantes durante o ano todo. De acordo com as características limnológicas próprias do reservatório**,** a zona de transição e a zona lacustre podem ser consideradas homogêneas, como resultado da sua heterogeneidade espacial horizontal (GUARINO et al., 2005)**,** sendo assim, a metodologia de cálculo de qualidade para essas zonas, no Reservatório de Lajes, é a mesma.

Caso a amostra esteja localizada nas zonas de transição ou lacustre, o modelo analisará a presença de estratificação ou mistura. No caso em que há estratificação, a ferramenta identifica a camada de estratificação à qual pertence a amostra. O modelo analisa a presença de estratificação ou mistura usando a curva *temperatura vs. profundidade,* criada com base nos dados de temperatura e profundidade da coluna d'água.

Uma vez que a amostra é localizada, distinguindo-se em qual zona horizontal está e sabendo a qual camada pertence, *epilímnio*, *metalímnio* ou *hipolímnio*, o modelo utiliza uma das cinco metodologias de cálculo para avaliar a qualidade da água.

Conforme explicado no subcapítulo 3.2**,** foram criadas cinco metodologias de cálculo, uma metodologia para a *zona de rio*, e quatro metodologias para as

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1021489/CA

zonas de transição e lacustre, que correspondem às camadas de estratificação *epilímnio*, *metalímnio*, *hipolímnio* e de possível mistura de água.

Caso a amostra esteja localizada no *epilímnio* ou na *zona de rio* o modelo calcula os dois índices, o índice de qualidade da água utilizando os indicadores físicos e químicos, e o índice biótico usando as métricas de assembleia de peixes. Nas zonas *metalímnio* e *hipolímnio* é calculado unicamente o índice de qualidade da água já que no reservatório o número de peixes coletados nestas camadas não é considerável. Na Figura 28 apresenta-se o fluxograma da seleção da metodologia de cálculo.

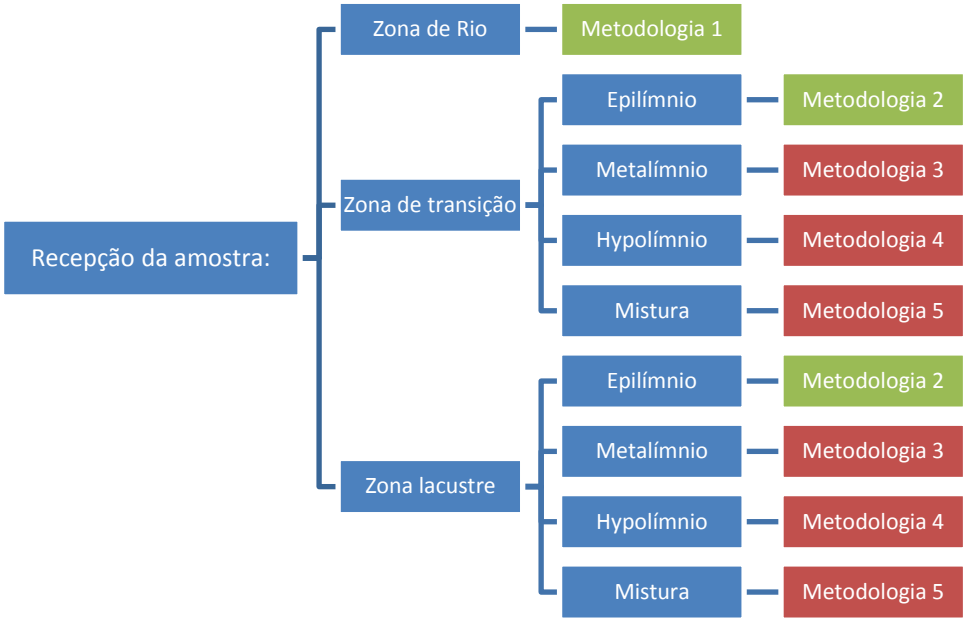

Figura 28. Seleção da metodologia de cálculo para a avaliação de qualidade de água e qualidade biótica

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1021489/CA

3.4. Indicadores Físicos e Químicos de Qualidade de Água usados na implementação do Índice

3.4.1. Temperatura

Variações de temperatura são parte do regime climático normal e corpos de água naturais apresentam variações sazonais e diurnas, bem como estratificação vertical. A temperatura superficial é influenciada por fatores tais como latitude, altitude, estação do ano, período do dia, taxa de fluxo e profundidade. A elevação da temperatura em um corpo d'água geralmente é provocada por despejos industriais (indústrias canavieiras, por exemplo) e usinas termoelétricas. A temperatura desempenha um papel crucial no meio aquático, condicionando as influências de uma série de variáveis físicas e químicas. Em geral, à medida que a temperatura aumenta, de 0 a 30°C, viscosidade, tensão superficial, compressibilidade, calor específico, constante de ionização e calor latente de vaporização diminuem, enquanto a condutividade térmica e a pressão de vapor aumentam. Organismos aquáticos possuem limites de tolerância térmica superior e inferior, temperaturas ótimas para crescimento, temperatura preferida em gradientes térmicos e limitações de temperatura para migração, desova e incubação do ovo. (CETESB, 2009c).

3.4.2. Oxigênio Dissolvido (OD)

O oxigênio proveniente da atmosfera dissolve-se nas águas naturais, devido à diferença de pressão parcial. Este mecanismo é regido pela Lei de Henry, que define a concentração de saturação de um gás na água, em função da temperatura:

$$C_{SAT} = \propto . pgás$$

onde $\propto$ é uma constante que varia inversamente proporcional à temperatura e *pgás* é a pressão exercida pelo gás sobre a superfície do líquido. No caso do oxigênio, ele é constituinte de 21% da atmosfera e, pela lei de Dalton, exerce uma pressão de 0,21 atm. Para 20°C, por exemplo, $\propto$ é igual a 43,9 e, portanto, a concentração de saturação de oxigênio em uma água superficial é igual a 43,9 x 0,21 = 9,2 mg/L. É muito comum em livros de química, a apresentação de tabelas de concentrações de saturação de oxigênio em função da temperatura, da pressão e da salinidade da água (CETESB, 2009c).

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1021489/CA

A taxa de reintrodução de oxigênio dissolvido em águas naturais através da superfície depende das características hidráulicas e é proporcional à velocidade, sendo que a taxa de reaeração superficial em uma cascata (queda d'água) é maior do que a de um rio de velocidade normal, que por sua vez apresenta taxa superior à de uma represa, com a velocidade normalmente bastante baixa (CETESB, 2009c).

Outra fonte importante de oxigênio nas águas é a fotossíntese de algas. Esta fonte não é muito significativa nos trechos de rios à jusante de fortes lançamentos de esgotos. A turbidez e a cor elevadas dificultam a penetração dos raios solares apenas poucas espécies resistentes às condições severas de poluição conseguem sobreviver. A contribuição fotossintética de oxigênio só é expressiva após grande parte da atividade bacteriana na decomposição de matéria orgânica ter ocorrido, bem como após terem se desenvolvido também os protozoários que, além de decompositores, consomem bactérias clarificando as águas e permitindo a penetração de luz (CETESB, 2009c).

Num corpo d'água eutrofizado, o crescimento excessivo de algas pode "mascarar" a avaliação do grau de poluição da água, quando se toma por base apenas a concentração de oxigênio dissolvido. Sob este aspecto, águas poluídas são aquelas que apresentam baixa concentração de oxigênio dissolvido (devido ao seu consumo na decomposição de compostos orgânicos), enquanto que as águas limpas apresentam concentrações de oxigênio dissolvido elevadas, chegando até a um pouco abaixo da concentração de saturação. No entanto, um corpo d´água com crescimento excessivo de algas pode apresentar, durante o período diurno, concentrações de oxigênio bem superiores a 10 mg/L, mesmo em temperaturas superiores a 20°C, caracterizando uma situação de supersaturação. Isto ocorre principalmente em lagos de baixa velocidade da água, nos quais podem se formar crostas verdes de algas à superfície (CETESB, 2009c).

Uma adequada provisão de oxigênio dissolvido é essencial para a manutenção de processos de autodepuração em sistemas aquáticos naturais e em estações de tratamento de esgotos. Através da medição da concentração de oxigênio dissolvido, os efeitos de resíduos oxidáveis sobre águas receptoras e a eficiência do tratamento dos esgotos, durante a oxidação bioquímica, podem ser avaliados. Os níveis de oxigênio dissolvido também indicam a capacidade de um corpo d'água natural em manter a vida aquática (CETESB, 2009c).

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1021489/CA

Conforme a resolução CONAMA 357/2005 (RESOLU, 2005) para águas doces classe 1, o oxigênio dissolvido em qualquer amostra não deve ser inferior a 6mg/L.

3.4.3. Potencial Hidrogeniônico (pH)

Por influir em diversos equilíbrios químicos que ocorrem naturalmente ou em processos unitários de tratamento de águas, o pH é um parâmetro importante em muitos estudos no campo do saneamento ambiental(CETESB, 2009c).

A influência do pH sobre os ecossistemas aquáticos naturais dá-se diretamente devido a seus efeitos sobre a fisiologia das diversas espécies. Também o efeito indireto é muito importante podendo, em determinadas condições de pH, contribuírem para a precipitação de elementos químicos tóxicos como metais pesados; outras condições podem exercer efeitos sobre as solubilidades de nutrientes. Desta forma, as restrições de faixas de pH são estabelecidas para as diversas classes de águas naturais. Os critérios de proteção à vida aquática fixam o pH entre 6 e 9 (CETESB, 2009c).

O pH é padrão de potabilidade, devendo as águas para abastecimento público apresentar valores entre 6,0 a 9,5, de acordo com a Portaria 518/04 do Ministério da Saúde. (CETESB, 2009c). Conforme a resolução CONAMA 357/2005 (RESOLU, 2005) para águas doces classe 1, define-se uma variação de pH entre 6 e 9.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1021489/CA

3.4.4. Clorofila-a

A clorofila-a a é a mais universal das clorofilas (a, b, c, e d) e representa, aproximadamente, de 1 a 2% do peso seco do material orgânico em todas as algas planctônicas e é, por isso, um indicador da biomassa algal. Assim a clorofila-a a é considerada a principal variável indicadora de estado trófico dos ambientes aquáticos (CETESB, 2009c).

A feofitina-a é um produto da degradação da clorofila-a, que pode interferir grandemente nas medidas deste pigmento, por absorver luz na mesma região do espectro que a clorofila-a a. O resultado de clorofila-a a deve ser corrigido, de forma a não incluir a concentração de feofitina-a (CETESB, 2009c).

Conforme a resolução CONAMA 357/2005 (RESOLU, 2005) o valor máximo de clorofila-a para águas doces classe 1 é de 10μg/L.

3.4.5. Série de Nitrogênio (nitrogênio orgânico, amônio, nitrato e nitrito)

O nitrogênio pode ser encontrado nas águas nas formas de nitrogênio orgânico, amoniacal, nitrito e nitrato. As duas primeiras são formas reduzidas e as duas últimas, oxidadas. Pode-se associar as etapas de degradação da poluição orgânica por meio da relação entre as formas de nitrogênio. Nas zonas de autodepuração natural em rios, distinguem-se as presenças de nitrogênio orgânico na zona de degradação, amoniacal na zona de decomposição ativa, nitrito na zona de recuperação e nitrato na zona de águas limpas. Ou seja, se for coletada uma amostra de água de um rio poluído e as análises demonstrarem predominância das formas reduzidas significa que o foco de poluição se encontra próximo; se prevalecerem o nitrito e o nitrato, denota que as descargas de esgotos se encontram distantes (CETESB, 2009c). Conforme a resolução CONAMA 357/2005 (RESOLU, 2005) o valor máximo de nitrito para águas doces classe 1 é de 1,0mg/L.

Os compostos de nitrogênio são nutrientes para processos biológicos e são caracterizados como macronutrientes, pois, depois do carbono, o nitrogênio é o elemento exigido em maior quantidade pelas células vivas. Quando descarregados nas águas naturais, conjuntamente com o fósforo e outros nutrientes presentes nos despejos, provocam o enriquecimento do meio, tornando-o eutrofizado. A eutrofização pode possibilitar o crescimento mais intenso de seres vivos que utilizam nutrientes, especialmente as algas. Estas grandes concentrações de algas podem trazer prejuízos aos múltiplos usos dessas águas, prejudicando seriamente o abastecimento público ou causando poluição decorrente da morte e decomposição desses organismos. O controle da eutrofização, através da redução do aporte de nitrogênio é comprometido pela multiplicidade de fontes, algumas muito difíceis de serem controladas como a fixação do nitrogênio atmosférico, por parte de alguns gêneros de algas. Por isso, deve-se investir preferencialmente no controle das fontes de fósforo(CETESB, 2009c).

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1021489/CA

Pela legislação federal em vigor, o nitrogênio amoniacal é padrão de classificação das águas naturais e padrão de emissão de esgotos. O amônio é um tóxico bastante restritivo à vida dos peixes, sendo que muitas espécies não suportam concentrações acima de 5 mg/L. Além disso, como visto anteriormente, o amônio provoca consumo de oxigênio dissolvido das águas naturais ao ser oxidada biologicamente, a chamada DBO. Por estes motivos, a concentração de nitrogênio amoniacal é um importante parâmetro de classificação das águas naturais e é normalmente utilizado na constituição de índices de qualidade das águas (CETESB, 2009c). Conforme a resolução CONAMA 357/2005 (RESOLU, 2005) o valor máximo de amônio para águas doces classe 1 é de 3,7mg/L.

Os nitratos são tóxicos, causando uma doença chamada metahemoglobinemia infantil, que é letal para crianças (o nitrato reduz-se a nitrito na corrente sanguínea, competindo com o oxigênio livre, tornando o sangue azul). Por isso, o nitrato é padrão de potabilidade, sendo 10 mg/L o valor máximo permitido pela Portaria 518/04 do Ministério da Saúde (CETESB, 2009c).

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1021489/CA

3.4.6. Fósforo Total

O fósforo aparece em águas naturais devido, principalmente, às descargas de esgotos sanitários. A matéria orgânica fecal e os detergentes em pó empregados em larga escala domesticamente constituem a principal fonte. 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 (CETESB, 2009c).

O fósforo pode se apresentar nas águas sob três formas diferentes. Os fosfatos orgânicos são a forma em que o fósforo compõe moléculas orgânicas, como a de um detergente, por exemplo. Os ortofosfatos são representados pelos radicais, que se combinam com cátions formando sais inorgânicos nas águas e os polifosfatos, ou fosfatos condensados, polímeros de ortofosfatos. Esta terceira forma não é muito importante nos estudos de controle de qualidade das águas, porque sofre hidrólise, convertendo-se rapidamente em ortofosfatos nas águas naturais (CETESB, 2009c).

Assim como o nitrogênio, o fósforo constitui-se em um dos principais nutrientes para os processos biológicos, ou seja, é um dos chamados macro-nutrientes, por ser exigido também em grandes quantidades pelas células. Nesta qualidade, torna-se parâmetro imprescindível em programas de caracterização de efluentes industriais que se pretende tratar por processo biológico. Ainda por ser nutriente para processos biológicos, o excesso de fósforo em esgotos sanitários e efluentes industriais conduz a processos de eutrofização das águas naturais (CETESB, 2009c). Conforme a resolução CONAMA 357/2005 (RESOLU, 2005) o valor máximo de fósforo total para águas doces classe 1 é de 0,020mg/L.

3.4.7. Condutividade

A condutividade é a expressão numérica da capacidade de uma água conduzir a corrente elétrica. Depende das concentrações iônicas e da temperatura e indica a quantidade de sais existentes na coluna d'água e, portanto, representa uma medida indireta da concentração de poluentes. Em geral, níveis superiores a 100 μS/cm indicam ambientes impactados (CETESB, 2009c).

A condutividade também fornece uma boa indicação das modificações na composição de uma água, especialmente na sua concentração mineral, mas não fornece nenhuma indicação das quantidades relativas dos vários componentes. A condutividade da água aumenta à medida que mais sólidos dissolvidos são adicionados. Altos valores podem indicar características corrosivas da água (CETESB, 2009c).

3.4.8. Turbidez

A turbidez de uma amostra de água é o grau de atenuação de intensidade que um feixe de luz sofre ao atravessá-la (esta redução dá-se por absorção e espalhamento, uma vez que as partículas que provocam turbidez nas águas são maiores que o comprimento de onda da luz branca), devido à presença de sólidos em suspensão, tais como partículas inorgânicas (areia, silte, argila) e detritos orgânicos, tais como algas e bactérias, plâncton em geral etc (CETESB, 2009c).

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1021489/CA

A erosão das margens dos rios em estações chuvosas, que é intensificada pelo mau uso do solo, é um exemplo de fenômeno que resulta em aumento da turbidez das águas e que exige manobras operacionais, tais como alterações nas dosagens de coagulantes e auxiliares, nas Estações de Tratamento de Águas. Este exemplo mostra também o caráter sistêmico da poluição, ocorrendo inter-relações ou transferência de problemas de um ambiente (água, ar ou solo) para outro (CETESB, 2009c).

Os esgotos domésticos e diversos efluentes industriais também provocam elevações na turbidez das águas. Um exemplo típico deste fato ocorre em consequência das atividades de mineração, onde os aumentos excessivos de turbidez têm provocado formação de grandes bancos de lodo em rios e alterações no ecossistema aquático (CETESB, 2009c). Conforme a resolução CONAMA 357/2005 (RESOLU, 2005) o valor máximo de turbidez para águas doces classe 1 é de 40 unidades nefelométricas de turbidez (UNT).

Alta turbidez reduz a fotossíntese de vegetação enraizada submersa e algas. Esse desenvolvimento reduzido de plantas pode, por sua vez, suprimir a produtividade de peixes. Logo, a turbidez pode influenciar nas comunidades biológicas aquáticas (CETESB, 2009c).

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1021489/CA

3.5. Índice de Assembleia de Peixes em Reservatórios (IAPR)

O Índice de Assembleia de Peixes em Reservatórios (IAPR) é um índice usado para avaliar a qualidade biótica em reservatórios. O índice avalia a qualidade em função de oito métricas: o número de peixes de espécies nativas, o número de peixes siluriformes nativos, o número de peixes characiformes nativos, a porcentagem de biomassa de espécies não nativas, a dominância, o índice de Shannon, o número de peixes da espécie lambaris e o número de peixes das espécies hypostomus affinis. As métricas são explicadas mais detalhadamente no subcapítulo 3.6**,** considerando que elas também são utilizadas na formulação do Índice MIAQR-PALADINES Biótico.

Com base no valor das métricas e utilizando o critério de atribuição de notas da Tabela 5, o IAPR é formulando somando as notas atribuídas a cada métrica.

Atributos	Critério para Atribuição das notas		
	0	5	10
Número espécies nativas	<5	5 a 8	>8
Número Siluriformes nativos	0	1 a 3	>3
Número Characiformes nativos	0	1 a 3	>3
Porcentagem de biomassa de espécies não nativas	> 75	50 a 75	< 50
Dominância	> 0,6	0,3 a 0,6	< 0,3
Shannon_H	< 1	1 a 1,5	> 1,5
Lambaris N	< 50	50 a 100	>100
Hypostomus Affinis	< 4	4 a 8	> 8

Tabela 5. Critério de atribuição de notas - IAPR

Por exemplo, considerando os dados de coleta:

Número de peixes de espécies nativas:	4
Número de peixes siluriformes nativos:	1
Número de peixes characiformes nativos:	2
Porcentagem de biomassa de espécies não nativas:	0,0469
Dominância:	0.3278
Índice de Shannon:	1.327
Número de peixes da espécie lambaris:	3
Número de peixes das espécies hypostomus affinis:	0

As notas atribuídas a cada métrica são: 0, 5, 5, 10, 5, 5, 0, 0 respectivamente, resultando num IAPR de 30.

O valor do IAPR é refletido na qualidade biótica do reservatório conforme a Tabela 6.

Valor IAPR	Qualidade Biótica
< 25	Ruim
25 50	Regular
> 50	Boa

Tabela 6. Avaliação da qualidade biótica conforme o valor do IAPR

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1021489/CA

3.6. Métricas de Assembleia de Peixes em Reservatórios

3.6.1. Número de Espécies Nativas

As espécies nativas são aquelas naturais de uma determinada região. As espécies nativas vêm interagindo com o ambiente e, assim, passaram por um rigoroso processo de seleção natural que gerou espécies geneticamente resistentes e adaptadas ao local. O maior número de espécies nativas reflete a maior qualidade do ambiente. A alteração do ambiente leva a perda de espécies nativas.

3.6.2. Número de Siluriformes Nativos

O número de siluriformes nativos representa os peixes que vivem associados ao fundo do reservatório. O aumento do desmatamento e consequente aumento da sedimentação causam a homogeneização do fundo do reservatório, podendo diminuir a abundancia destas espécies. Quanto maior o número de espécies de Siluriformes nativos, maior a qualidade desta parte do reservatório.

3.6.3. Número de Characiformes Nativos

O número de characiformes nativos representa os peixes que vivem associados à coluna d'agua do reservatório. Ambientes menos eutrofizados e com menor concentração de sólidos em suspenção podem aumentar a abundância destas espécies. Quanto maior o número de Characiformes, maior a qualidade desta parte do reservatório.

3.6.4. Porcentagem de Biomassa de Espécies não Nativas

A introdução de espécies não nativas modifica a estrutura da comunidade podendo levar a perda de espécies nativas. A degradação dos habitats aquáticos também possibilita o estabelecimento de espécies não nativas em detrimento das nativas. Quanto maior a biomassa de espécies não nativas, menor a qualidade biótica.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1021489/CA

3.6.5. Dominância

Maior dominância representa poucas espécies com maior número de indivíduos, podendo estar relacionado a um ambiente impactado que seleciona somente as espécies mais tolerantes, excluindo as espécies sensíveis. As espécies tolerantes aumentam sua abundância, tornando-se dominantes. Assim, quanto maior a dominância menor a qualidade biótica.

3.6.6. Índice de Shannon

Este índice reflete a importância relativa de cada espécie, ou seja, como os indivíduos se distribuem entre as espécies. É o contrário da dominância. Quanto maior este índice, maior a qualidade do ambiente, pois reflete uma uniformidade na abundância das espécies presentes.

3.6.7. Número de Lambaris N

Espécie com predomínio de insetos em sua dieta, que reflete a importância da mata ciliar ao redor do reservatório para a sua alimentação. Também podem refletir os períodos em que os níveis da água se encontram mais baixos, ocorrendo pouca disponibilidade da vegetação marginal. Quanto maior o número de lambaris no reservatório, maior a qualidade em relação às matas ciliares. Também é uma espécie utilizada como alimento por espécies de peixes carnívoros.

3.6.8. Número de Hypostomus Affinis

Espécie especializada no consumo de algas epilíticas (associados a substratos rochosos), que necessitam de águas com maior transparência para penetração de luz. Quanto mais abundante, maior é a heterogeneidade de habitats no reservatório e melhor é a qualidade da água.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1021489/CA

3.7. Determinação dos Subíndices

A modelagem usando-se lógica fuzzy não costuma ser prática com mais de quatro variáveis de entrada devido ao crescimento exponencial das regras, o que torna difícil a criação e gerenciamento das mesmas. Para contornar essa limitação costuma-se dividir as variáveis de entrada em sistemas fuzzy intermediários e usar a saída desses sistemas como entrada para o sistema final (PESSOA, 2010). Neste trabalho optou-se por usar apenas subsistemas com duas variáveis de entrada. Na modelagem do MIAQR-PALADINES as dez variáveis de qualidade de água e as oito de qualidade biótica foram divididas em grupos de duas, que deram origem a subíndices, que por sua vez foram usados como entrada para os índices finais (Figura 29 e Figura 30).

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1021489/CA

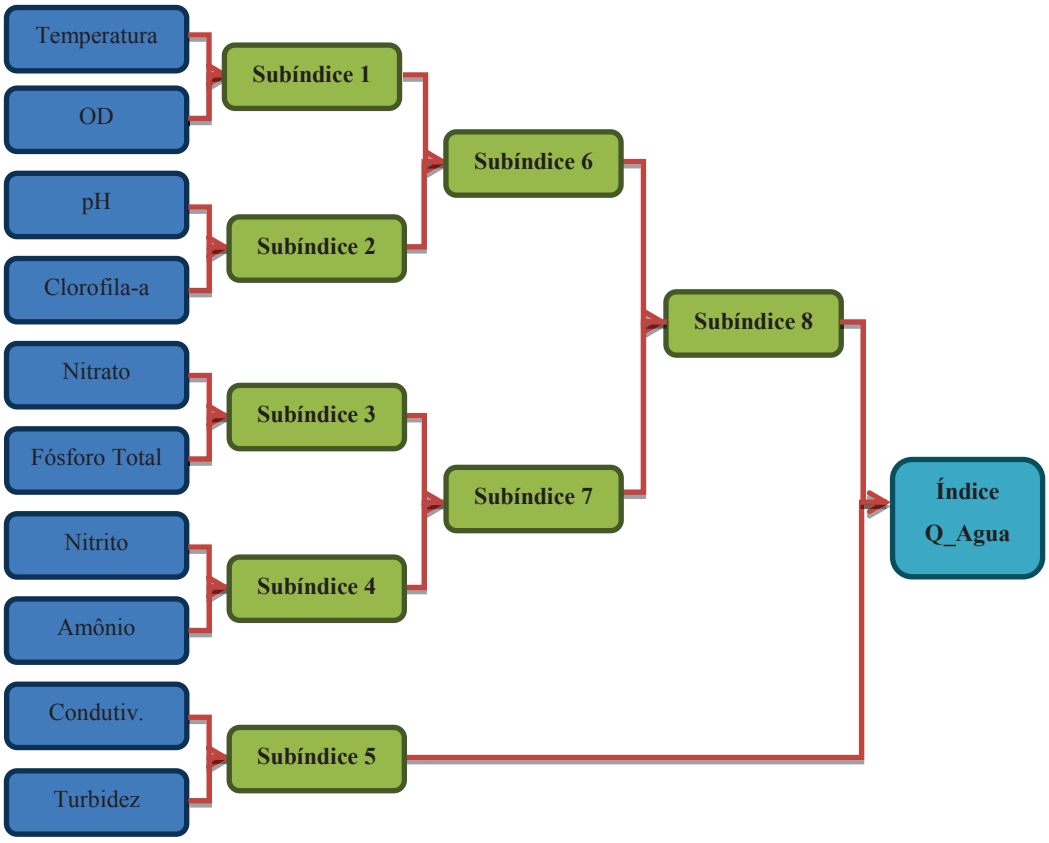

Figura 29. Fluxograma dos Subíndices que compõem o Índice de Qualidade da Água

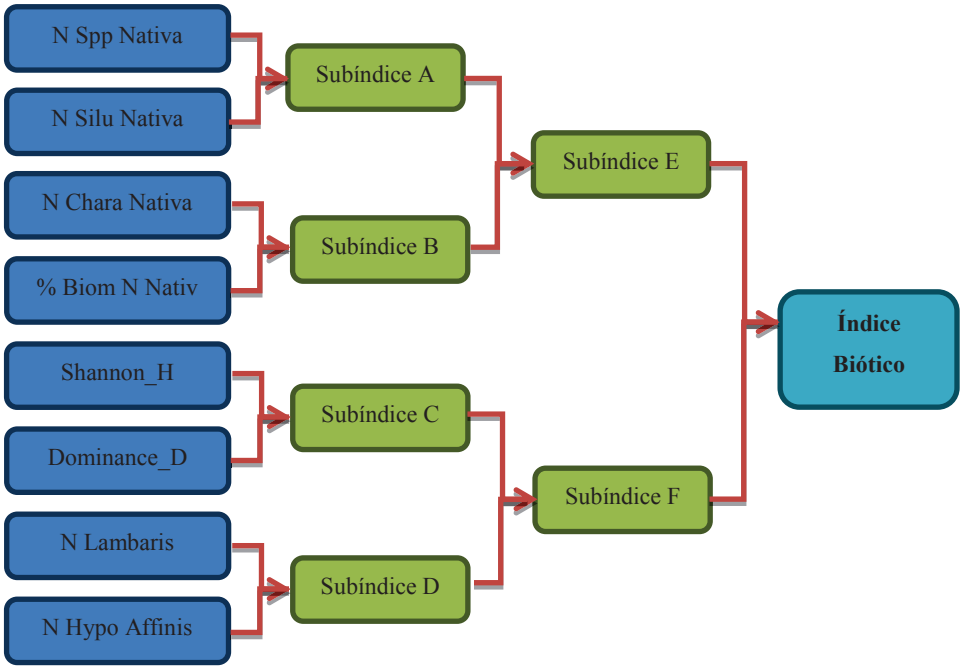

Figura 30. Fluxograma dos Subíndices que compõem o Índice de Qualidade Biótica

3.8. Base de Regras, Conjuntos Fuzzy e Funções de Pertinência

3.8.1. Base de Regras

A base de regras (conjuntos de regras para cada variável de entrada, subíndice e índice) foi determinada a partir de um prévio debate com os especialistas.

Como já foi descrito ao longo do texto, é quase inútil utilizar um sistema de avaliação fora da localidade geográfica e das características do corpo de água para as quais o sistema é originalmente elaborado, desta forma, a base de regras é extensível para outros reservatórios sempre que os mesmos tenham caraterísticas limnologicas semelhantes. Como também foi descrito anteriormente, as caraterísticas limnologicas de um reservatório atuam diretamente na estrutura vertical e horizontal de lagos e reservatórios, que por sua vez influi diretamente na qualidade. Por conseguinte, ao momento de considerar a utilização do modelo em

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1021489/CA

conjunto com base de regras na avaliação de um reservatório diferente ao Reservatório de Lajes, as seguintes caraterísticas limnologicas deverão ser especialmente consideradas:

- O reservatório deve ser de tamanho semelhante e estar localizado dentro de uma região geográfica com clima similar.
- Deve ter características hidrográficas parecidas.
- O tempo de retenção de água deve ser semelhante.

Para reservatórios que difiram grandemente do Reservatório de Lajes, além da base de regras, as metodologias de cálculo desarrolhadas no subcapítulo 3.2 também deverão ser modificadas.

As seguintes tabelas mostram as bases de regras criadas para cada metodologia de cálculo descrita no subcapítulo 3.2.

3.8.1.1. Epilímnio – Variáveis Físicas e Químicas

Subíndice 1

Temperatura (colunas) vs. Oxigênio Dissolvido (linhas)

	BAIXO	MÉDIO BAIXO	MÉDIO	MÉDIO ALTO	ALTO
BAIXO	ruim	ruim	ruim	ruim	ruim
MÉDIO BAIXO	médio	médio ruim	médio ruim	ruim	ruim
MÉDIO	médio	médio	médio	médio ruim	médio ruim
MÉDIO ALTO	médio bom	médio bom	médio bom	médio	médio
ALTO	bom	bom	bom	médio bom	médio

Subíndice 2

pH (colunas) vs. Clorofila-a (linhas)

	BAIXO	MÉDIO BAIXO	MÉDIO	MÉDIO ALTO	ALTO
BAIXO	médio ruim	médio ruim	bom	médio bom	médio ruim
MÉDIO BAIXO	médio ruim	médio ruim	bom	médio	médio ruim
MÉDIO	ruim	médio ruim	médio	médio	médio ruim
MÉDIO ALTO	ruim	médio ruim	médio ruim	médio ruim	ruim
ALTO	ruim	ruim	ruim	ruim	ruim

Subíndice 3

Nitrato (colunas) vs. Fosforo total (linhas)

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1021489/CA

	BAIXO	MÉDIO BAIXO	MÉDIO	MÉDIO ALTO	ALTO
BAIXO	bom	bom	médio bom	médio	médio ruim
MÉDIO BAIXO	bom	médio bom	médio	médio ruim	médio ruim
MÉDIO	médio bom	médio bom	médio	médio ruim	médio ruim
MÉDIO ALTO	médio	médio	médio ruim	ruim	ruim
ALTO	médio ruim	médio ruim	ruim	ruim	ruim

Subíndice 4

Nitrito (colunas) vs. Amônio (linhas)

	BAIXO	MÉDIO BAIXO	MÉDIO	MÉDIO ALTO	ALTO
BAIXO	bom	bom	médio bom	médio	médio ruim
MÉDIO BAIXO	bom	médio bom	médio	médio ruim	médio ruim
MÉDIO	médio bom	médio bom	médio	médio ruim	médio ruim
MÉDIO ALTO	médio	médio	médio ruim	ruim	ruim
ALTO	médio ruim	médio ruim	ruim	ruim	ruim

Subíndice 5

Condutividade (colunas) vs. Turbidez (linhas)

	BAIXO	MÉDIO BAIXO	MÉDIO	MÉDIO ALTO	ALTO
BAIXO	bom	bom	médio bom	médio	médio ruim
MÉDIO BAIXO	bom	bom	médio bom	médio	médio ruim
MÉDIO	médio bom	médio bom	médio	médio ruim	ruim
MÉDIO ALTO	médio ruim	médio ruim	médio ruim	ruim	ruim
ALTO	ruim	ruim	ruim	ruim	ruim

Subíndice 6

Subíndice 1 (colunas) vs. Subíndice 2 (linhas)

	BAIXO	MÉDIO BAIXO	MÉDIO	MÉDIO ALTO	ALTO
BAIXO	ruim	ruim	médio ruim	médio	médio
MÉDIO BAIXO	ruim	médio ruim	médio	médio	médio bom
MÉDIO	ruim	médio ruim	médio	médio bom	bom
MÉDIO ALTO	médio ruim	médio ruim	médio	médio bom	bom
ALTO	médio	médio	médio bom	bom	bom

Subíndice 7

Subíndice 3 (colunas) vs. Subíndice 4 (linhas)

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1021489/CA

	BAIXO	MÉDIO BAIXO	MÉDIO	MÉDIO ALTO	ALTO
BAIXO	ruim	ruim	médio ruim	médio	médio
MÉDIO BAIXO	ruim	ruim	médio ruim	médio	médio bom
MÉDIO	ruim	médio ruim	médio	médio bom	bom
MÉDIO ALTO	médio ruim	médio	médio bom	bom	bom
ALTO	médio	médio	médio bom	bom	bom

Subíndice 8

Subíndice 6 (colunas) vs. Subíndice 7 (linhas)

	BAIXO	MÉDIO BAIXO	MÉDIO	MÉDIO ALTO	ALTO
BAIXO	ruim	ruim	ruim	médio ruim	médio
MÉDIO BAIXO	ruim	ruim	médio ruim	médio	médio
MÉDIO	médio ruim	médio ruim	médio	médio bom	médio bom
MÉDIO ALTO	médio	médio	médio bom	bom	bom
ALTO	médio	médio bom	bom	bom	bom

Índice Físico – Químico

Subíndice 8 (colunas) vs. Subíndice 5 (linhas)

	BAIXO	MÉDIO BAIXO	MÉDIO	MÉDIO ALTO	ALTO
BAIXO	ruim	médio ruim	médio	médio bom	médio bom
MÉDIO BAIXO	ruim	médio ruim	médio	médio bom	bom
MÉDIO	ruim	médio ruim	médio	médio bom	bom
MÉDIO ALTO	ruim	médio ruim	médio	médio bom	bom
ALTO	ruim	médio ruim	médio	médio bom	bom

3.8.1.2. Epilímnio – Variáveis Biológicas

Subíndice A

Número Espécies Nativas (colunas) vs. Número Siluriformes Nativos (linhas)

	BAIXO	MÉDIO BAIXO	MÉDIO	MÉDIO ALTO	ALTO
BAIXO	ruim	ruim	médio ruim	médio	médio bom
MÉDIO BAIXO	ruim	médio ruim	médio ruim	médio	médio bom
MÉDIO	médio ruim	médio ruim	médio	médio bom	médio bom
MÉDIO ALTO	médio	médio	médio bom	médio bom	bom
ALTO	médio	médio	médio bom	bom	bom

Subíndice B

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1021489/CA

Número Characiformes Nativos (colunas) vs. % Biomassa Espécies não Nativas (linhas)

	BAIXO	MÉDIO BAIXO	MÉDIO	MÉDIO ALTO	ALTO
BAIXO	ruim	médio ruim	médio	médio bom	bom
MÉDIO BAIXO	ruim	médio ruim	médio	médio bom	bom
MÉDIO	ruim	médio ruim	médio ruim	médio	médio bom
MÉDIO ALTO	ruim	ruim	médio ruim	médio	médio
ALTO	ruim	ruim	médio ruim	médio ruim	médio

Subíndice C

Shannon_H (colunas) vs. Dominance_D (linhas)

	BAIXO	MÉDIO BAIXO	MÉDIO	MÉDIO ALTO	ALTO
BAIXO	médio	médio bom	médio bom	bom	bom
MÉDIO BAIXO	médio	médio	médio bom	bom	bom
MÉDIO	médio ruim	médio	médio bom	médio bom	médio bom
MÉDIO ALTO	ruim	médio ruim	médio	médio bom	médio bom
ALTO	ruim	ruim	médio ruim	médio	médio

Subíndice D

Lambaris N (colunas) vs. Hypostomus Affinis (linhas)

	BAIXO	MÉDIO BAIXO	MÉDIO	MÉDIO ALTO	ALTO
BAIXO	ruim	ruim	médio ruim	médio	médio
MÉDIO BAIXO	ruim	médio ruim	médio	médio bom	médio bom
MÉDIO	médio ruim	médio	médio	médio bom	bom
MÉDIO ALTO	médio	médio	médio	médio bom	bom
ALTO	médio	médio bom	médio bom	bom	bom

Subíndice E

Subíndice A (colunas) vs. Subíndice B (linhas)

	BAIXO	MÉDIO BAIXO	MÉDIO	MÉDIO ALTO	ALTO
BAIXO	ruim	médio ruim	médio ruim	médio	médio
MÉDIO BAIXO	médio ruim	médio ruim	médio	médio bom	médio bom
MÉDIO	médio ruim	médio ruim	médio	médio bom	médio bom
MÉDIO ALTO	médio	médio	médio bom	bom	bom
ALTO	médio	médio	médio bom	bom	bom

Subíndice F

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1021489/CA

Subíndice C (colunas) vs. Subíndice D (linhas)

	BAIXO	MÉDIO BAIXO	MÉDIO	MÉDIO ALTO	ALTO
BAIXO	ruim	ruim	médio ruim	médio ruim	médio ruim
MÉDIO BAIXO	médio ruim	médio ruim	médio	médio	médio
MÉDIO	médio	médio	médio	médio bom	médio bom
MÉDIO ALTO	médio bom	médio bom	médio bom	bom	bom
ALTO	médio bom	médio bom	médio bom	bom	bom

Índice Biótico

Subíndice E (colunas) vs. Subíndice F (linhas)

	BAIXO	MÉDIO BAIXO	MÉDIO	MÉDIO ALTO	ALTO
BAIXO	ruim	médio ruim	médio	médio bom	médio bom
MÉDIO BAIXO	ruim	médio ruim	médio	médio bom	médio bom
MÉDIO	médio ruim	médio	médio	médio bom	médio bom
MÉDIO ALTO	médio	médio	médio bom	médio bom	bom
ALTO	médio	médio	médio bom	bom	bom

3.8.1.3. Metalímnio – Variáveis Físicas e Químicas

Subíndice 1

Temperatura (colunas) vs. Oxigênio Dissolvido (linhas)

	BAIXO	MÉDIO BAIXO	MÉDIO	MÉDIO ALTO	ALTO
BAIXO	ruim	ruim	ruim	ruim	ruim
MÉDIO BAIXO	médio	médio ruim	médio ruim	ruim	ruim
MÉDIO	médio	médio	médio	médio ruim	médio ruim
MÉDIO ALTO	médio bom	médio bom	médio bom	médio	médio
ALTO	bom	bom	bom	médio bom	médio

Subíndice 2

pH (colunas) vs. Clorofila-a (linhas)

	BAIXO	MÉDIO BAIXO	MÉDIO	MÉDIO ALTO	ALTO
BAIXO	médio ruim	médio ruim	bom	médio bom	médio ruim
MÉDIO BAIXO	médio ruim	médio ruim	bom	médio	médio ruim
MÉDIO	ruim	médio ruim	médio	médio	médio ruim
MÉDIO ALTO	ruim	médio ruim	médio ruim	médio ruim	ruim
ALTO	ruim	ruim	ruim	ruim	ruim

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1021489/CA

Subíndice 3

Nitrato (colunas) vs. Fósforo total (linhas)

	BAIXO	MÉDIO BAIXO	MÉDIO	MÉDIO ALTO	ALTO
BAIXO	bom	bom	médio bom	médio	médio ruim
MÉDIO BAIXO	bom	médio bom	médio	médio ruim	médio ruim
MÉDIO	médio bom	médio bom	médio	médio ruim	médio ruim
MÉDIO ALTO	médio	médio	médio ruim	ruim	ruim
ALTO	médio ruim	médio ruim	ruim	ruim	ruim

Subíndice 4

Nitrito (colunas) vs. Amônio (linhas)

	BAIXO	MÉDIO BAIXO	MÉDIO	MÉDIO ALTO	ALTO
BAIXO	bom	bom	médio bom	médio	médio ruim
MÉDIO BAIXO	bom	médio bom	médio	médio ruim	médio ruim
MÉDIO	médio bom	médio bom	médio	médio ruim	médio ruim
MÉDIO ALTO	médio	médio	médio ruim	ruim	ruim
ALTO	médio ruim	médio ruim	ruim	ruim	ruim

Subíndice 5

Condutividade (colunas) vs. Turbidez (linhas)

	BAIXO	MÉDIO BAIXO	MÉDIO	MÉDIO ALTO	ALTO
BAIXO	bom	bom	médio bom	médio	médio ruim
MÉDIO BAIXO	bom	bom	médio bom	médio	médio ruim
MÉDIO	médio bom	médio bom	médio	médio ruim	ruim
MÉDIO ALTO	médio ruim	mio ruim	médio ruim	ruim	ruim
ALTO	ruim	ruim	ruim	ruim	ruim

Subíndice 6

Subíndice 1 (colunas) vs. Subíndice 2 (linhas)

	BAIXO	MÉDIO BAIXO	MÉDIO	MÉDIO ALTO	ALTO
BAIXO	ruim	ruim	médio ruim	médio	médio
MÉDIO BAIXO	ruim	médio ruim	médio	médio	médio bom
MÉDIO	ruim	médio ruim	médio	médio bom	bom
MÉDIO ALTO	médio ruim	médio ruim	médio	médio bom	bom
ALTO	médio	médio	médio bom	bom	bom

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1021489/CA

Subíndice 7

Subíndice 3 (colunas) vs. Subíndice 4 (linhas)

	BAIXO	MÉDIO BAIXO	MÉDIO	MÉDIO ALTO	ALTO
BAIXO	ruim	ruim	médio ruim	médio	médio
MÉDIO BAIXO	ruim	ruim	médio ruim	médio	médio bom
MÉDIO	ruim	médio ruim	médio	médio bom	bom
MÉDIO ALTO	médio ruim	médio	médio bom	bom	bom
ALTO	médio	médio	médio bom	bom	bom

Subíndice 8

Subíndice 6 (colunas) vs. Subíndice 7 (linhas)

	BAIXO	MÉDIO BAIXO	MÉDIO	MÉDIO ALTO	ALTO
BAIXO	ruim	ruim	ruim	médio ruim	médio
MÉDIO BAIXO	ruim	ruim	médio ruim	médio	médio
MÉDIO	médio ruim	médio ruim	médio	médio bom	médio bom
MÉDIO ALTO	médio	médio	médio bom	bom	bom
ALTO	médio	médio bom	bom	bom	bom

Índice Físico-Químico

Subíndice 8 (colunas) vs. Subíndice 5 (linhas)

	BAIXO	MÉDIO BAIXO	MÉDIO	MÉDIO ALTO	ALTO
BAIXO	ruim	médio ruim	médio	médio bom	médio bom
MÉDIO BAIXO	ruim	médio ruim	médio	médio bom	bom
MÉDIO	ruim	médio ruim	médio	médio bom	bom
MÉDIO ALTO	ruim	médio ruim	médio	médio bom	bom
ALTO	ruim	médio ruim	médio	médio bom	bom

3.8.1.4. Hipolímnio – Variáveis Físicas e Químicas

Subíndice 1

Temperatura (colunas) vs. Oxigênio Dissolvido (linhas)

	BAIXO	MÉDIO BAIXO	MÉDIO	MÉDIO ALTO	ALTO
BAIXO	ruim	ruim	ruim	ruim	ruim
MÉDIO BAIXO	médio	médio ruim	médio ruim	ruim	ruim
MÉDIO	médio	médio	médio	médio ruim	médio ruim
MÉDIO ALTO	médio bom	médio bom	médio bom	médio	médio
ALTO	bom	bom	bom	médio bom	médio

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1021489/CA

Subíndice 2

pH (colunas) vs. Clorofila-a (linhas)

	BAIXO	MÉDIO BAIXO	MÉDIO	MÉDIO ALTO	ALTO
BAIXO	médio ruim	médio ruim	bom	médio bom	médio ruim
MÉDIO BAIXO	médio ruim	médio ruim	bom	médio	médio ruim
MÉDIO	ruim	médio ruim	médio	médio	médio ruim
MÉDIO ALTO	ruim	médio ruim	médio ruim	médio ruim	ruim
ALTO	ruim	ruim	ruim	ruim	ruim

Subíndice 3

Nitrato (colunas) vs. Fósforo total (linhas)

	BAIXO	MÉDIO BAIXO	MÉDIO	MÉDIO ALTO	ALTO
BAIXO	bom	bom	médio bom	médio	médio ruim
MÉDIO BAIXO	bom	médio bom	médio	médio ruim	médio ruim
MÉDIO	médio bom	médio bom	médio	médio ruim	médio ruim
MÉDIO ALTO	médio	médio	médio ruim	ruim	ruim
ALTO	médio ruim	médio ruim	ruim	ruim	ruim

Subíndice 4

Nitrito (colunas) vs. Amônio (linhas)

	BAIXO	MÉDIO BAIXO	MÉDIO	MÉDIO ALTO	ALTO
BAIXO	bom	bom	médio bom	médio	médio ruim
MÉDIO BAIXO	bom	médio bom	médio	médio ruim	médio ruim
MÉDIO	médio bom	médio bom	médio	médio ruim	médio ruim
MÉDIO ALTO	médio	médio	médio ruim	ruim	ruim
ALTO	médio ruim	médio ruim	ruim	ruim	ruim

Subíndice 5

Condutividade (colunas) vs. Turbidez (linhas)

	BAIXO	MÉDIO BAIXO	MÉDIO	MÉDIO ALTO	ALTO
BAIXO	bom	bom	médio bom	médio	médio ruim
MÉDIO BAIXO	bom	bom	médio bom	médio	médio ruim
MÉDIO	médio bom	médio bom	médio	médio ruim	ruim
MÉDIO ALTO	médio ruim	mio ruim	médio ruim	ruim	ruim
ALTO	ruim	ruim	ruim	ruim	ruim

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1021489/CA

Subíndice 6

Subíndice 1 (colunas) vs. Subíndice 2 (linhas)

	BAIXO	MÉDIO BAIXO	MÉDIO	MÉDIO ALTO	ALTO
BAIXO	ruim	ruim	médio ruim	médio	médio
MÉDIO BAIXO	ruim	médio ruim	médio	médio	médio bom
MÉDIO	ruim	médio ruim	médio	médio bom	bom
MÉDIO ALTO	médio ruim	médio ruim	médio	médio bom	bom
ALTO	médio	médio	médio bom	bom	bom

Subíndice 7

Subíndice 3 (colunas) vs. Subíndice 4 (linhas)

	BAIXO	MÉDIO BAIXO	MÉDIO	MÉDIO ALTO	ALTO
BAIXO	ruim	ruim	médio ruim	médio	médio
MÉDIO BAIXO	ruim	ruim	médio ruim	médio	médio bom
MÉDIO	ruim	médio ruim	médio	médio bom	bom
MÉDIO ALTO	médio ruim	médio	médio bom	bom	bom
ALTO	médio	médio	médio bom	bom	bom

Subíndice 8

Subíndice 6 (colunas) vs. Subíndice 7 (linhas)

	BAIXO	MÉDIO BAIXO	MÉDIO	MÉDIO ALTO	ALTO
BAIXO	ruim	ruim	ruim	médio ruim	médio
MÉDIO BAIXO	ruim	ruim	médio ruim	médio	médio
MÉDIO	médio ruim	médio ruim	médio	médio bom	médio bom
MÉDIO ALTO	médio	médio	médio bom	bom	bom
ALTO	médio	médio bom	bom	bom	bom

Índice Físico-Químico

Subíndice 8 (colunas) vs. Subíndice 5 (linhas)

	BAIXO	MÉDIO BAIXO	MÉDIO	MÉDIO ALTO	ALTO
BAIXO	ruim	médio ruim	médio	médio bom	médio bom
MÉDIO BAIXO	ruim	médio ruim	médio	médio bom	bom
MÉDIO	ruim	médio ruim	médio	médio bom	bom
MÉDIO ALTO	ruim	médio ruim	médio	médio bom	bom
ALTO	ruim	médio ruim	médio	médio bom	bom

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1021489/CA

3.8.2.Conjuntos Fuzzy e Funções de Pertinência

A definição do domínio de cada variável e do suporte de cada conjunto foi resultado de uma análise, feita por especialistas, do comportamento das variáveis em função do tempo. Utilizaram-se bases de dados de coleta das variáveis na análise.

Foram criadas funções de pertinência trapezoidais e triangulares para todas as variáveis de entrada, subíndices e índices finais conforme as equações a seguir, equações já descritas anteriormente na secção 2.3.1.

$$\mu(x) = \text{trap}[x, a, b, c, d] = \begin{cases} 0 & , \quad x \leq a \\ 1 - \dfrac{(b-x)}{(b-a)} & , \quad a < x \leq b \\ 1 & , \quad b < x \leq c \\ \dfrac{(d-x)}{(d-c)} & , \quad c < x \leq d \\ 0 & , \quad x > d \end{cases} \qquad \text{eq. (40)}$$

$$\mu(x) = \text{tri}[x, e, f, g] = \begin{cases} 0 & , \quad x \leq e \\ 1 - \dfrac{(f-x)}{(f-e)} & , \quad e < x \leq f \\ \dfrac{(g-x)}{(g-f)} & , \quad f < x \leq g \\ 0 & , \quad x > g \end{cases} \qquad \text{eq. (41)}$$

No caso das variáveis de entrada, funções de pertinência triangulares foram utilizadas nos conjuntos intermediários (*Médio Baixo*, *Médio*, *Médio Alto*) e funções trapezoidais com domínio aberto, maioritariamente, nos conjuntos dos extremos (*Baixo* e *Alto*). Já nos subíndices e índices, foram usadas funções de pertinência decrescentes nos conjuntos *Ruim*, crescentes nos conjuntos *Bom,* e triangulares nos conjuntos *Médio Ruim*, *Médio* e *Médio Bom*. Não se encontrou motivo para utilizar outro tipo de função de pertinência nos conjuntos intermediários.

Os seguintes quadros e figuras mostram os conjuntos fuzzy e as funções de pertinência criadas para cada metodologia de cálculo descrita no subcapítulo 3.2.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1021489/CA

3.8.2.1. Epilímnio – Variáveis Físicas e Químicas

Temperatura e Oxigênio Dissolvido

	a/e	b/f	c/g	d	a/e	b/f	c/g	d
	Temperatura				Oxigênio Dissolvido			
Baixo	10	10	16	20.3	0	0	0	2
Médio Baixo	16	20.3	24.5	-	0	2	4	-
Médio	20.3	24.5	28.75	-	2	4	6	-
Médio Alto	24.5	28.75	33	-	4	6	8	-
Alto	28.75	33	40	40	6	8	10	10

Quadro 3. Domínio e suportes dos conjuntos das variáveis: Temperatura e Oxigênio Dissolvido

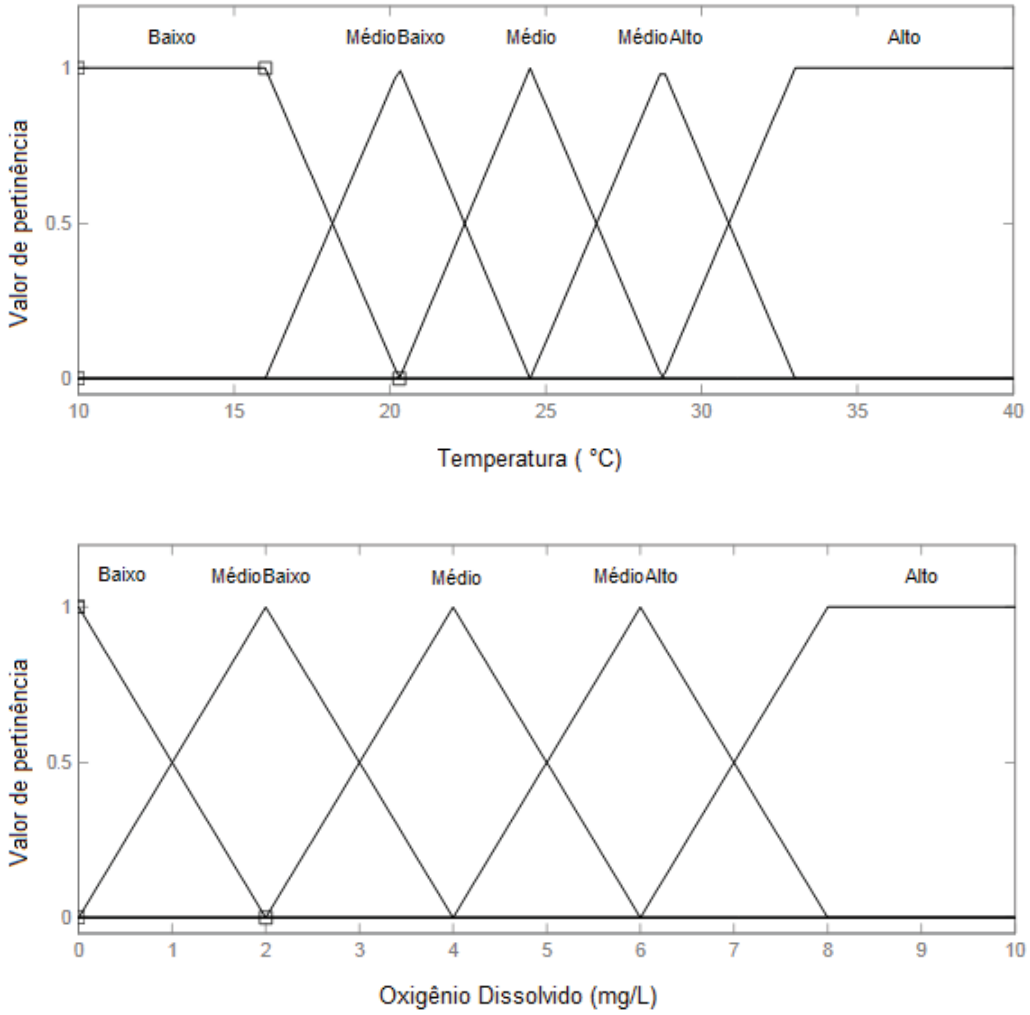

Figura 31. Conjuntos fuzzy e funções de pertinência das variáveis: Temperatura e Oxigênio Dissolvido

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1021489/CA

pH e Clorofila-a

	a/e	b/f	c/g	d	a/e	b/f	c/g	d
	pH				Clorofila-a			
Baixo	0	0	5	5.75	0	0	0	1.75
Médio Baixo	5	5.75	6.5	-	0	1.75	3.5	-
Médio	5.75	6.5	7.25	-	1.75	3.5	5.25	-
Médio Alto	6.5	7.25	8	-	3.5	5.25	7	-
Alto	7.25	8	14	14	5.25	7	15	15

Quadro 4. Domínio e suportes dos conjuntos das variáveis: pH e Clorofila-a

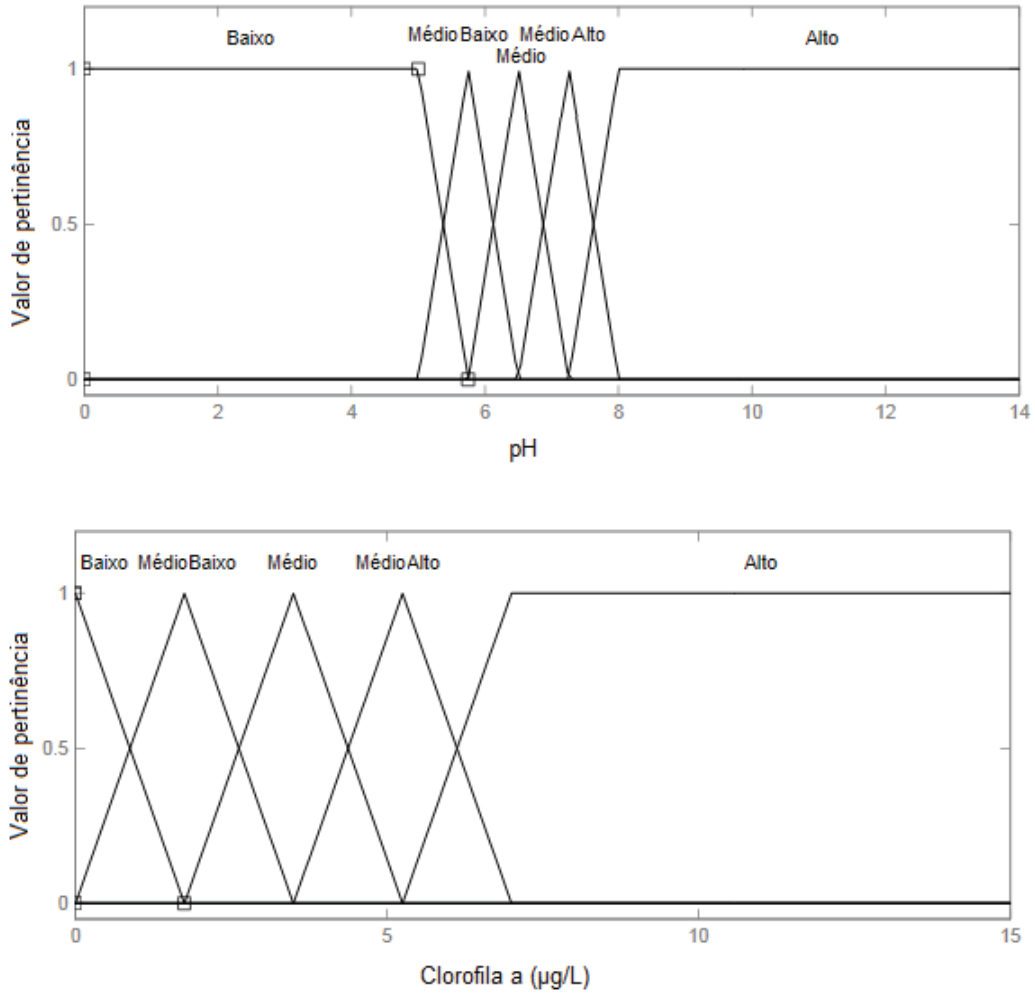

Figura 32. Conjuntos fuzzy e funções de pertinência das variáveis: pH e Clorofila-a

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1021489/CA

Nitrato e Fósforo Total

	a/e	b/f	c/g	d	a/e	b/f	c/g	d
	Nitrato				**Fósforo Total**			
Baixo	0	0	0	0.2	0	0	0	0.02
Médio Baixo	0	0.2	0.4	-	0	0.02	0.04	-
Médio	0.2	0.4	0.6	-	0.02	0.04	0.06	-
Médio Alto	0.4	0.6	0.8	-	0.04	0.06	0.08	-
Alto	0.6	0.8	1	1	0.06	0.12	0.3	0.3

Quadro 5. Domínio e suportes dos conjuntos das variáveis: Nitrato e Fósforo Total

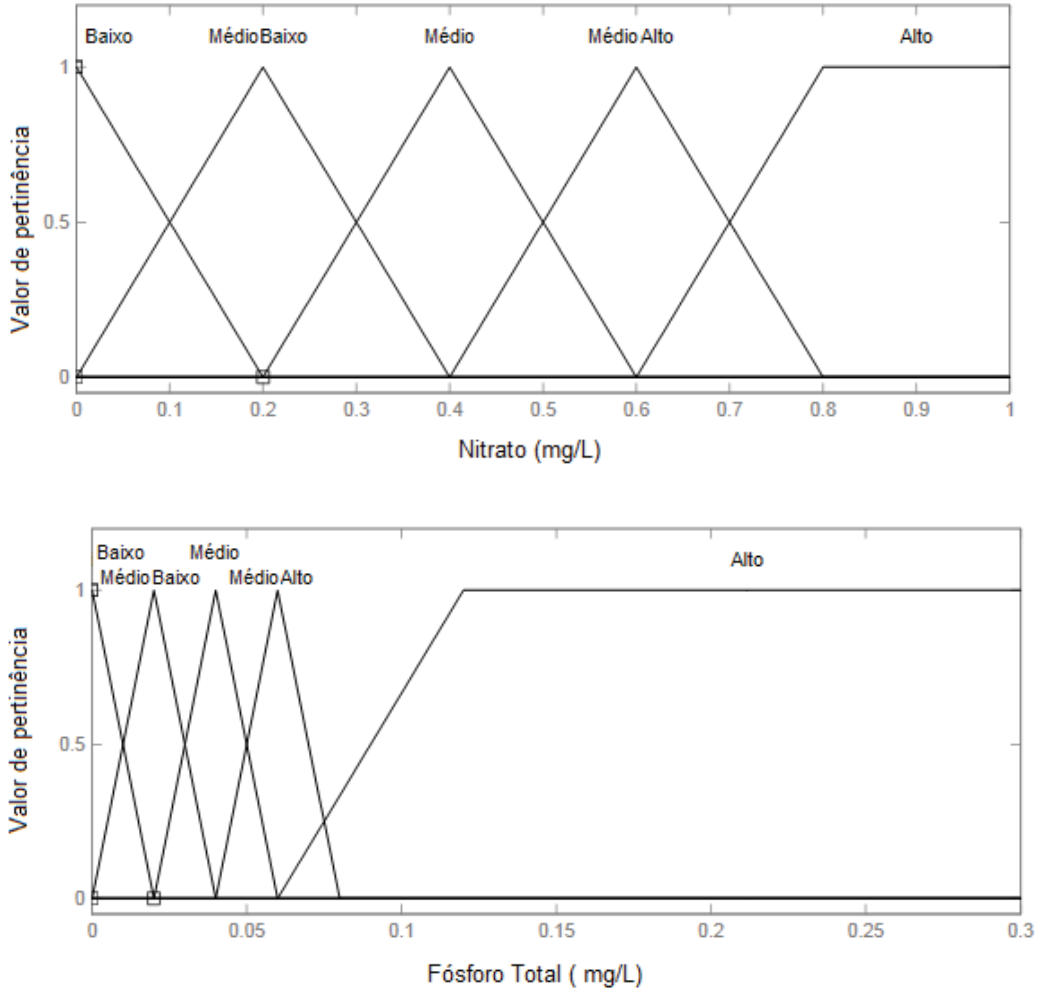

Figura 33. Conjuntos fuzzy e funções de pertinência das variáveis: Nitrato e Fósforo Total

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1021489/CA

Nitrito e Amônio

	a/e	b/f	c/g	d	a/e	b/f	c/g	d
	Nitrito				**Amônio**			
Baixo	0	0	0	0.0075	0	0	0	0.1
Médio Baixo	0	0.0075	0.015	-	0	0.1	0.2	-
Médio	0.0075	0.015	0.0225	-	0.1	0.2	0.3	-
Médio Alto	0.015	0.0225	0.03	-	0.2	0.3	0.4	-
Alto	0.0225	0.03	0.1	0.1	0.3	0.4	1	1

Quadro 6. Domínio e suportes dos conjuntos das variáveis: Nitrito e Amônio

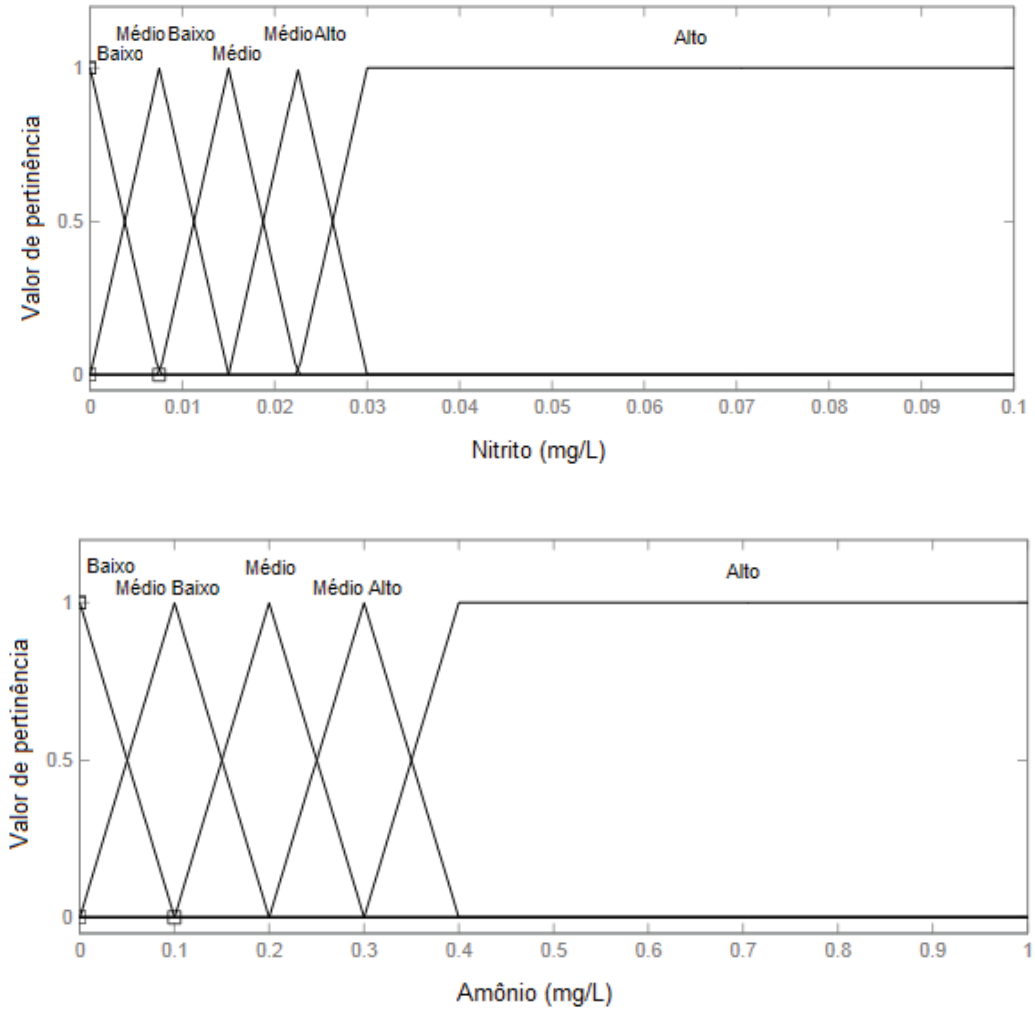

Figura 34. Conjuntos fuzzy e funções de pertinência das variáveis: Nitrito e Amônio

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1021489/CA

Condutividade e Turbidez

	a/e	b/f	c/g	d	a/e	b/f	c/g	d
	Condutividade				**Turbidez**			
Baixo	0	0	20	23	0	0	0.086	1.06
Médio Baixo	20	22.5	25	-	0.086	1.06	2.0306	-
Médio	22.5	25	27.5	-	1.06	2.0306	3	-
Médio Alto	25	27.5	30	-	2.0306	3.9	5.78	-
Alto	27.5	35	50	50	3.9	5.78	10	10

Quadro 7. Domínio e suportes dos conjuntos das variáveis: Condutividade e Turbidez

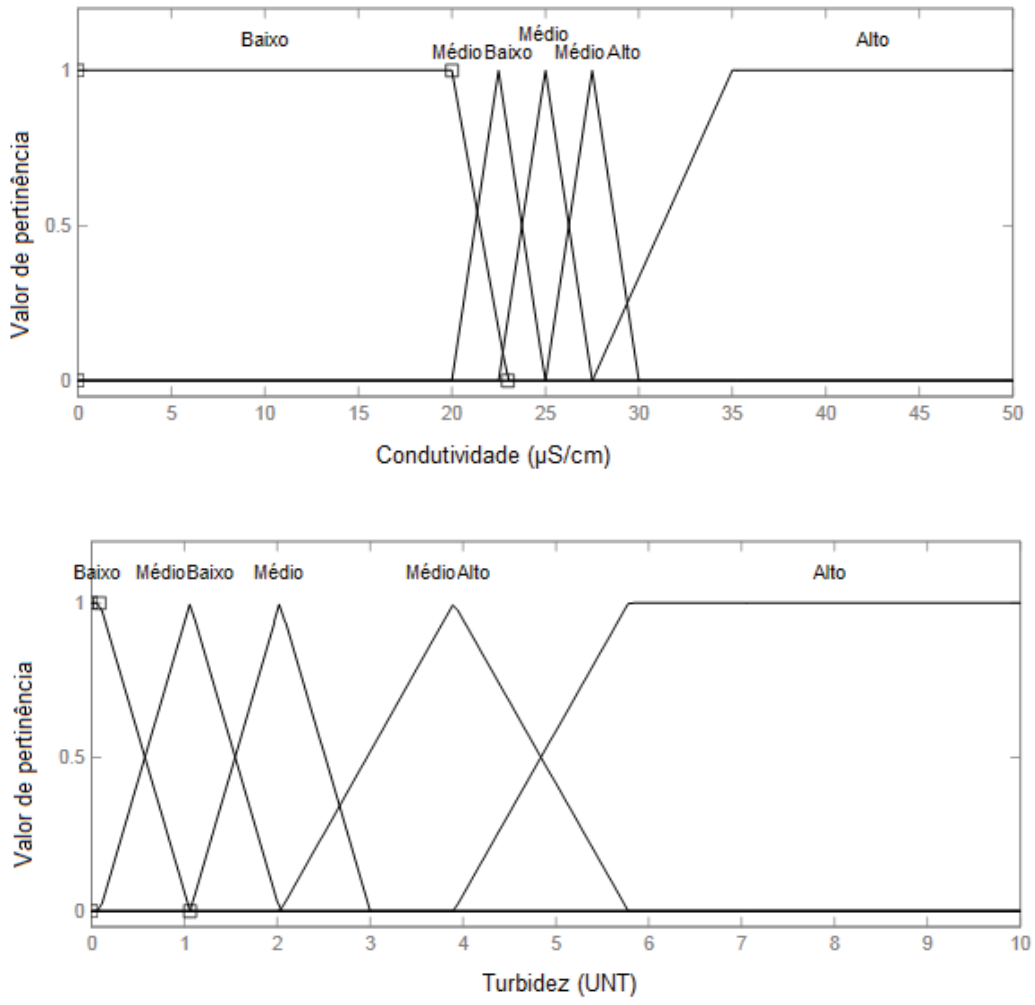

Figura 35. Conjuntos fuzzy e funções de pertinência das variáveis: Condutividade e Turbidez

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1021489/CA

3.8.2.2. Epilímnio – Variáveis Biológicas

Número de Espécies Nativas e Número de Siluriformes Nativos

	a/e	b/f	c/g	d	a/e	b/f	c/g	d
	Nº de Espécies Nativas				**Nº de Siluriformes Nativos**			
Baixo	0	0	0	5	0	0	0	1
Médio Baixo	0	5	6.5	-	0	1	2	-
Médio	5	6.5	8	-	1	2	3	-
Médio Alto	6.5	8	11	-	2	3	4	-
Alto	8	11	15	15	3	4	5	5

Quadro 8. Domínio e suportes dos conjuntos das variáveis: Número de Espécies Nativas e Número de Siluriformes Nativos

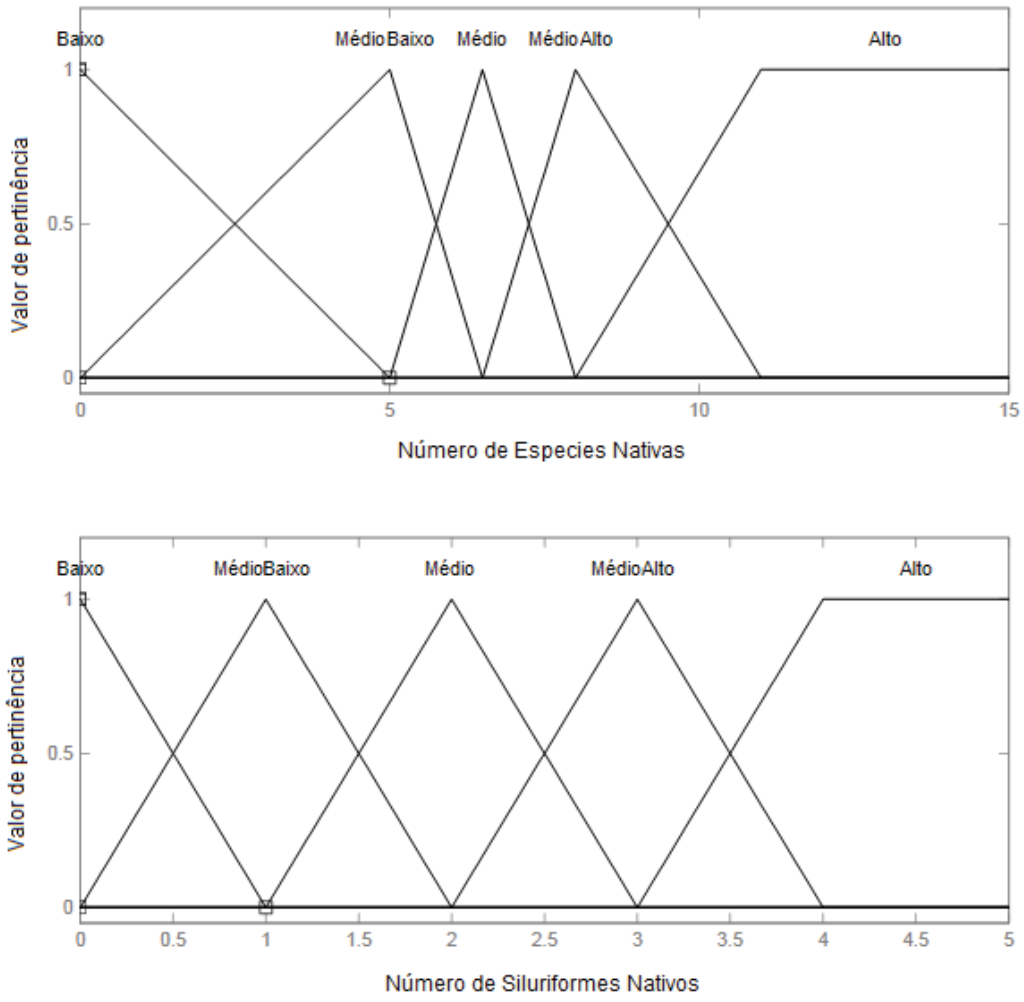

Figura 36. Conjuntos fuzzy e funções de pertinência das variáveis: Número de Espécies Nativas e Número de Siluriformes Nativos

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1021489/CA

Número de Characiformes Nativos e Porcentagem de Biomassa de Espécies Nativas

	a/e	b/f	c/g	d	a/e	b/f	c/g	d
	Nº de Characiformes Nativos				**% de Biomassa de Espécies Nativas**			
Baixo	0	0	0	1	0	0	0	20
Médio Baixo	0	1	2	-	0	20	30	-
Médio	1	2	3	-	20	30	75	-
Médio Alto	2	3	6	-	30	75	100	-
Alto	3	6	7	7	75	100	100	100

Quadro 9. Domínio e suportes dos conjuntos das variáveis: Número de Characiformes Nativos e % de Biomassa de Espécies Nativas

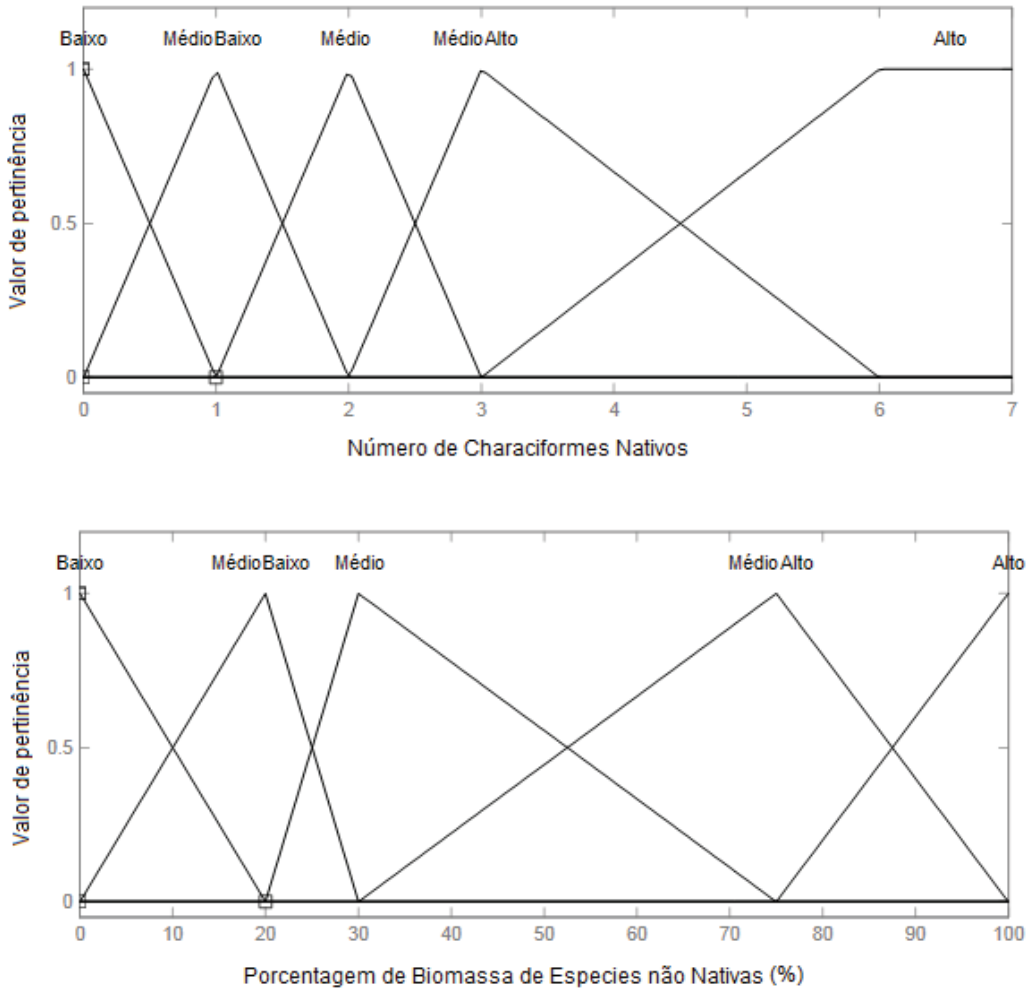

Figura 37. Conjuntos fuzzy e funções de pertinência das variáveis: Número de Characiformes Nativos e % de Biomassa de Espécies Nativas

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1021489/CA

Dominância e Índice de Shannon

	a/e	b/f	c/g	d	a/e	b/f	c/g	d
	Dominância				**Índice de Shannon**			
Baixo	0	0	0	0.3	0	0	0	1
Médio Baixo	0	0.3	0.45	-	0	1	1.25	-
Médio	0.3	0.45	0.6	-	1	1.25	1.5	-
Médio Alto	0.45	0.6	1	-	1.25	1.5	1.92	-
Alto	0.6	1	2	2	1.5	1.92	2.6	2.6

Quadro 10. Domínio e suportes dos conjuntos das variáveis: Dominância e Índice de Shannon

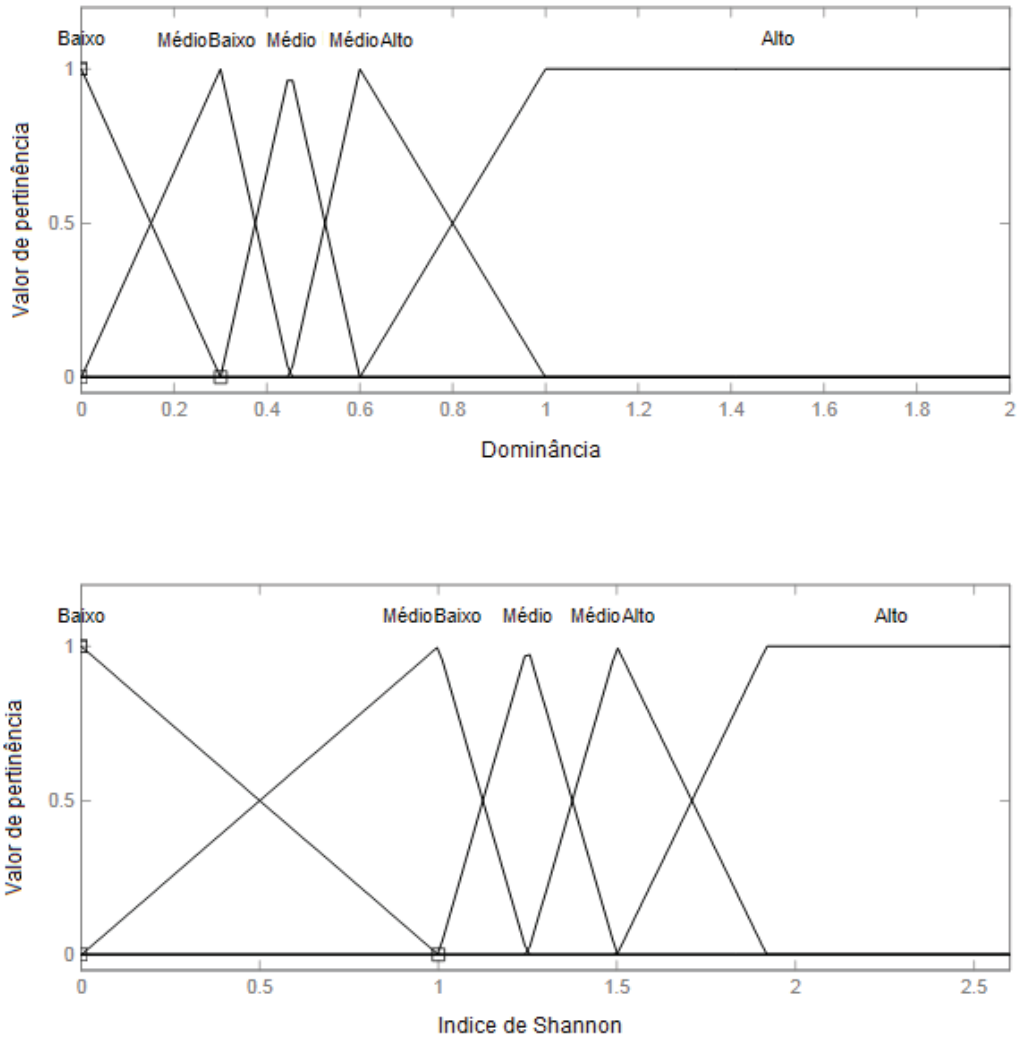

Figura 38. Conjuntos fuzzy e funções de pertinência das variáveis: Dominância e Índice de Shannon

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1021489/CA

Número de Indivíduos da Espécie Lambaris

	a/e	b/f	c/g	d	a/e	b/f	c/g	d
	Número de Indivíduos da Espécie Lambaris				**Número de Hypostomus Affinis**			
Baixo	0	0	0	13	0	0	0	1
Médio Baixo	0	13	25	-	0	1	2	-
Médio	13	25	50	-	1	2	4	-
Médio Alto	25	50	246	-	2	4	8	-
Alto	50	246	300	300	4	8	12	12

Quadro 11. Domínio e suportes dos conjuntos das variáveis: Número de Indivíduos da Espécie Lambaris e Número de Hypostomus Affinis

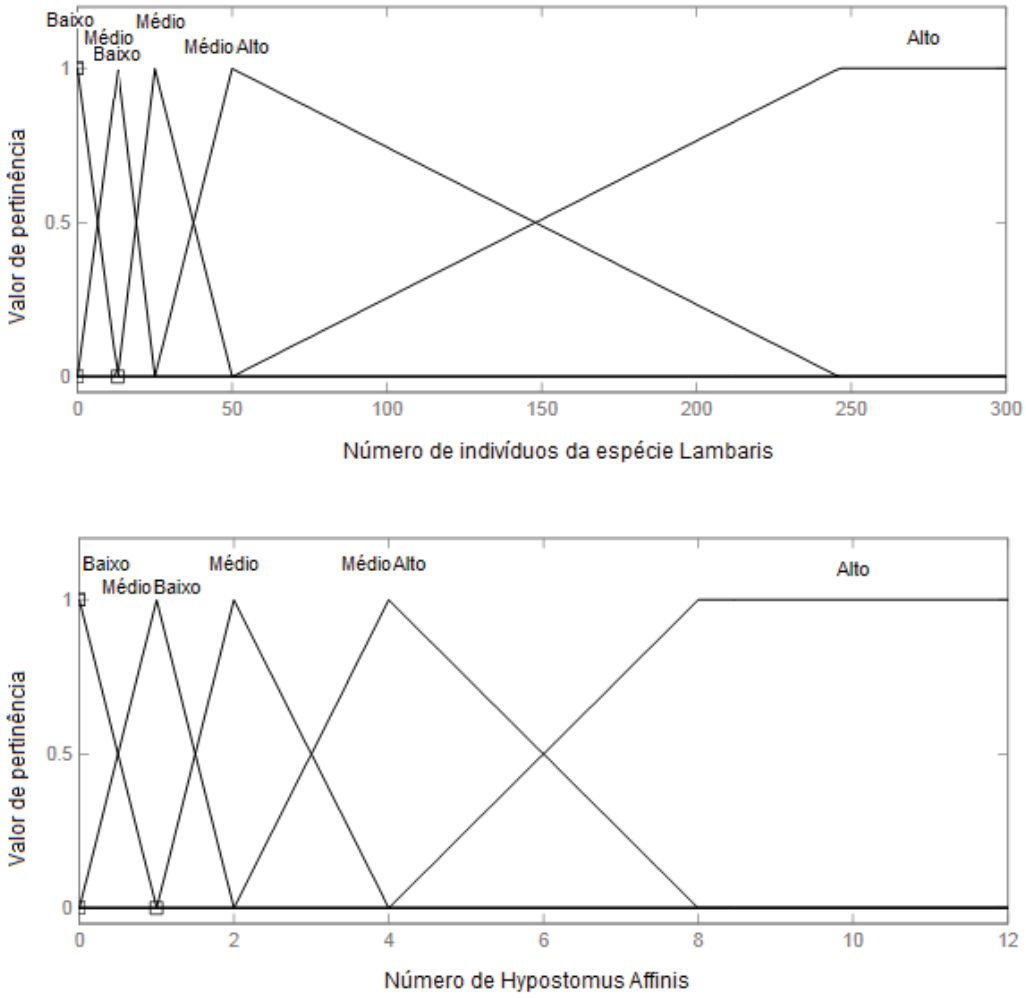

Figura 39. Conjuntos fuzzy e funções de pertinência das variáveis: Número de Indivíduos da Espécie Lambaris e Número de Hypostomus Affinis

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1021489/CA

3.8.2.3. Metalímnio – Variáveis Físicas e Químicas

O domínio das variáveis e os suportes dos conjuntos do *metalímnio* são apresentados no quadro a seguir.

	a/e	b/f	c/g	d	a/e	b/f	c/g	d
	Temperatura				**Oxigênio Dissolvido**			
Baixo	10	10	16	20.3	0	0	0	2
Médio Baixo	16	20.3	24.5	-	0	2	4	-
Médio	20.3	24.5	28.75	-	2	4	6	-
Médio Alto	24.5	28.75	33	-	4	6	8	-
Alto	28.75	33	40	40	6	8	10	10
	pH				**Clorofila-a**			
Baixo	0	0	5	5.75	0	0	0	1.75
Médio Baixo	5	5.75	6.5	-	0	1.75	3.5	-
Médio	5.75	6.5	7.25	-	1.75	3.5	5.25	-
Médio Alto	6.5	7.25	8	-	3.5	5.25	7	-
Alto	7.25	8	14	14	5.25	7	15	15
	Nitrato				**Fósforo Total**			
Baixo	0	0	0	0.2	0	0	0	0.02
Médio Baixo	0	0.2	0.4	-	0	0.02	0.04	-
Médio	0.2	0.4	0.6	-	0.02	0.04	0.06	-
Médio Alto	0.4	0.6	0.8	-	0.04	0.06	0.08	-
Alto	0.6	0.8	1	1	0.06	0.12	0.3	0.3
	Nitrito				**Amônio**			
Baixo	0	0	0	0.0075	0	0	0	0.1
Médio Baixo	0	0.0075	0.015	-	0	0.1	0.2	-
Médio	0.0075	0.015	0.0225	-	0.1	0.2	0.3	-
Médio Alto	0.015	0.0225	0.03	-	0.2	0.3	0.4	-
Alto	0.0225	0.03	0.1	0.1	0.3	0.4	1	1
	Condutividade				**Turbidez**			
Baixo	0	0	10	23	0	0	0.086	1.06
Médio Baixo	20	22.5	25	-	0.086	1.06	2.03	-
Médio	22.5	25	27.5	-	1.06	2.03	3	-
Médio Alto	25	27.5	30	-	2.03	3.9	5.78	-
Alto	27.5	35	50	50	3.9	5.78	10	10

Quadro 12. Domínio das variáveis e suportes dos conjuntos do metalímnio

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1021489/CA

3.8.2.4. Hipolímnio – Variáveis Físicas e Químicas

O domínio das variáveis e os suportes dos conjuntos do *hipolímnio* são apresentados no quadro a seguir.

	a/e	b/f	c/g	d	a/e	b/f	c/g	d
	Temperatura				**Oxigênio Dissolvido**			
Baixo	10	10	16	20.3	0	0	0	2
Médio Baixo	16	20.3	24.5	-	0	2	4	-
Médio	20.3	24.5	28.75	-	2	4	6	-
Médio Alto	24.5	28.75	33	-	4	6	8	-
Alto	28.75	33	40	40	6	8	10	10
	pH				**Clorofila-a**			
Baixo	0	0	5	5.75	0	0	0	1.75
Médio Baixo	5	5.75	6.5	-	0	1.75	3.5	-
Médio	5.75	6.5	7.25	-	1.75	3.5	5.25	-
Médio Alto	6.5	7.25	8	-	3.5	5.25	7	-
Alto	7.25	8	14	14	5.25	7	15	15
	Nitrato				**Fósforo Total**			
Baixo	0	0	0	0.2	0	0	0	0.02
Médio Baixo	0	0.2	0.4	-	0	0.02	0.04	-
Médio	0.2	0.4	0.6	-	0.02	0.04	0.06	-
Médio Alto	0.4	0.6	0.8	-	0.04	0.06	0.08	-
Alto	0.6	0.8	1	1	0.06	0.12	0.3	0.3
	Nitrito				**Amônio**			
Baixo	0	0	0	0.0075	0	0	0	0.1
Médio Baixo	0	0.0075	0.015	-	0	0.1	0.2	-
Médio	0.0075	0.015	0.0225	-	0.1	0.2	0.3	-
Médio Alto	0.015	0.0225	0.03	-	0.2	0.3	0.4	-
Alto	0.0225	0.03	0.1	0.1	0.3	0.4	1	1
	Condutividade				**Turbidez**			
Baixo	0	0	20	23	0	0	0.086	1.06
Médio Baixo	20	22.5	25	-	0.086	1.06	2.03	-
Médio	22.5	25	27.5	-	1.06	2.03	3	-
Médio Alto	25	27.5	30	-	2.03	3.9	5.78	-
Alto	27.5	35	50	50	3.9	5.78	10	10

Quadro 13. Domínio das variáveis e suportes dos conjuntos do hipolímnio

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1021489/CA

3.8.2.5. Subíndices e Índices Finais

Os domínios das variáveis e os suportes dos conjuntos para cada subíndice e índice de cada metodologia (*epilímnio, metalímnio* e *hipolímnio*) são apresentados no quadro a seguir.

	a/e	b/f	c/g	d
Baixo	0	0	0	25
Médio Baixo	0	25	50	-
Médio	25	50	75	-
Médio Alto	50	75	100	-
Alto	75	100	100	100

Quadro 14. Domínio das variáveis e suportes dos conjuntos dos subíndices e índices finais

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1021489/CA