

ÍNDICES DE QUALIDADE DE ÁGUA

Rosa Alencar Santana de Almeida



Índices de qualidade de água



REITOR

Fábio Josué Souza dos Santos

VICE-REITOR

José Pereira Mascarenhas Bisneto



Editora UFRB

SUPERINTENDENTE

Rosineide Pereira Mubarack Garcia

CONSELHO EDITORIAL

Ana Lúcia Moreno Amor

Josival Santos Souza

Luiz Carlos Soares de Carvalho Júnior

Maurício Ferreira da Silva

Paulo Romero Guimarães Serrano de Andrade

Robério Marcelo Rodrigues Ribeiro

Rosineide Pereira Mubarack Garcia (presidente)

Sirlara Donato Assunção Wandenkolk Alves

Walter Emanuel de Carvalho Mariano

SUPLENTES

Carlos Alfredo Lopes de Carvalho

Marcílio Delan Baliza Fernandes

Wilson Rogério Penteado Júnior



Associação Brasileira
das Editoras Universitárias

Rosa Alencar Santana de Almeida

Índices de qualidade de água



Editora UFRB

Cruz das Almas - Bahia /2021

Copyright©2020, Rosa Alencar Santana de Almeida.

Direitos para esta edição cedidos à EDUFRB.

Projeto gráfico e editoração eletrônica:

Antonio Vagno Santana Cardoso

Capa

André Matias Carneiro

Revisão e normatização técnica:

Rosa Alencar Santana de Almeida

A reprodução não-autorizada desta publicação, por qualquer meio, seja total ou parcial, constitui violação da Lei nº 9.610/98.

A447i

Almeida, Rosa Alencar Santana de.

Índices de qualidade de água / Rosa Alencar Santana de Almeida. _ Cruz das Almas, BA: EDUFRB, 2021.

114.; il.

Este Livro tem vínculo técnico com a Área de Engenharia Sanitária e Ambiental.

ISBN: 978-65-87743-25-7.

1.Água – Uso. 2.Água – Controle de qualidade.

I.Universidade Federal do Recôncavo da Bahia.

II.Título.

CDD: 556.5

Ficha elaborada pela Biblioteca Central de Cruz das Almas - UFRB.

Responsável pela Elaboração - Antonio Marcos Sarmento das Chagas (Bibliotecário - CRB5 / 1615).

(os dados para catalogação foram enviados pelo usuário via formulário eletrônico).



Editora UFRB

Rua Rui Barbosa, 710 – Centro
44380-000 Cruz das Almas – Bahia - Brasil

Tel.: (75) 3621-7672

editora@reitoria.ufrb.edu.br

www.ufrb.edu.br/editora

www.facebook.com/editoraufrb

Apresentação

A sociedade e os tomadores de decisão precisam de ferramentas simples para conhecer a qualidade da água disponível. Logo, caracterizar a qualidade da água para os mais diversos usos é muito importante. Os índices de qualidade de água (IQA's) são meios utilizados para traduzir, em um único valor, as características de uma determinada amostra de água, representando uma síntese das concentrações das substâncias contidas na porção coletada.

Apesar disso, no mercado nacional tem-se uma baixa oferta de livros dedicados exclusivamente a esta temática. Além disso, ainda que a literatura básica sobre qualidade de água aborde o tema, permanecem lacunas que podem ser preenchidas com uma publicação dedicada exclusivamente ao assunto.

A fim de ampliar os conhecimentos, e responder algumas questões sobre os índices, foram recolhidas informações, na literatura nacional e internacional. Dentre os projetos, estão os trabalhos de mestrado e de doutorado: “Índice de Qualidade de Águas Subterrâneas destinadas ao uso na produção de água potável” (IQUAS) (ALMEIDA, 2007) e “Índice de Qualidade de uso da Água Subterrânea (e-IQUAS): uma metodologia de modelagem numérica flexível” (ALMEIDA, 2012), respectivamente. Nessas pesquisas foram analisados os conceitos e definições que possibilitaram a elaboração de índices de qualidade de água, e foram propostos dois novos índices: IQUAS e e-IQUAS.

No percurso, diferentes instrumentos de investigação foram utilizados: metodologia Delphi aplicada aos grupos de especialistas em qualidade da água, questionários aplicados aos moradores de comunidades pesquisadas, para conhecer a suas percepções sobre a qualidade da água consumida, além de experimentações com amostras de água de qualidades diversas e utilizadas para diferentes

usos. Também foi realizada ampla pesquisa bibliográfica para ampliar os conhecimentos já existentes.

Portanto, para a produção desse livro, foram recolhidas informações de estudos antecedentes, citados no texto, além das notas da dissertação de mestrado e da tese de doutorado supramencionadas. Também foram reportados alguns relatos de experiências, adquiridos no decorrer da pesquisa.

Espera-se que, com essa publicação, sejam legadas contribuições ao tema em pauta.

Sumário

Água de boa qualidade	11
Legislação brasileira e qualidade da água.....	15
Revisão da literatura sobre IQA	21
Índices de qualidade de água.....	25
Construção de IQA	29
Método DELPHI.....	35
IQA para diversos usos	41
Índices de qualidade da água subterrânea	77
O melhor índice	85
Calculadoras de IQA´s na web	89
Apêndice	91
Referências	107
Sobre a autora	113

Água de boa qualidade

A avaliação da qualidade da água de um manancial requer muita atenção. A água pode ser adequada a determinado uso e insatisfatória ou não indicada para outra atividade. Além disso, a qualidade da água deve ser acompanhada ao longo do tempo, pois pode sofrer variações.

Uma das formas para informar a qualidade da água em uma região é por meio de laudos com as concentrações das substâncias presentes em uma amostra. Estas listas podem conter desde alguns poucos parâmetros mais comuns até centenas de parâmetros variados. A infinidade dificulta o entendimento, até mesmo dos técnicos experientes. Sem falar que, a destinação ou uso da água e a atividade preponderante na região de coleta tornam a escolha dos parâmetros bastante complexa.

Outra maneira, bem mais acessível e direta, é utilizar os índices de qualidade de água.

Representação por índices

Um índice pode ser entendido por qualquer pessoa. Os índices são ferramentas que informam a qualidade ou estado de um fenômeno de forma resumida e esclarecedora. Na maioria das vezes eles possuem a vantagem de integrar diversas variáveis, expressas através de um número, que permite uma leitura fácil e aproxima o público não técnico.

Siche *et al.* (2007) definem o índice como um valor numérico que reproduz corretamente a interpretação da realidade de um sistema simples ou complexo, seja ele natural, social ou econômico, e que tem seu cálculo pautado em bases científicas e métodos adequados.

Indicadores ambientais

Um fator de relevância da formulação de índices é sua utilização como suporte aos sistemas de indicadores. Os sistemas de indicadores ambientais são exemplos desta associação. Eles representam as condições ambientais, com diversas finalidades. Tanto para monitorar as condições do ambiente, na identificação de riscos potenciais a saúde, como para acompanhar tendências na saúde resultante da exposição a fatores de riscos ambientais. Também são empregados para comparar estados de saúde ambiental e auxiliar onde for necessário; monitorar e avaliar os efeitos de políticas ou outras intervenções em saúde ambiental; contribuir na conscientização sobre saúde ambiental; e ajudar nas investigações sobre as ligações entre ambiente e saúde (como parte de estudos epidemiológicos), servindo de base para subsidiar políticas públicas e intervenções de saúde.

Um indicador ambiental informa sobre a ocorrência, a magnitude e a evolução de um fenômeno, e o significado de tal manifestação. São avisos sobre os efeitos e a importância socioambiental das evidências. Uma perspectiva para avaliar o progresso ou recuo dos sintomas, ao longo do tempo. Bons indicadores são decisivos para compreensão do dinamismo do ambiente.

Qualidade de água

A Organização das Nações Unidas para a Educação, a Ciência e a Cultura (UNESCO do inglês *United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization*), por meio do Programa Mundial de Avaliação da Água (WWAP, do inglês *World Water Assessment Programme*) formula indicadores mundiais dos recursos hídricos.

Eles são usados para monitorar o desempenho e acompanhar mudanças no ambiente natural e no ambiente socioeconômico e

político do mundo da água, ou seja, na governança, na tarifação da água e na avaliação da qualidade.

As conclusões são divulgadas no “Relatório Mundial sobre o Desenvolvimento dos Recursos Hídricos das Nações Unidas” (WWDR, *United Nations World Water Development Report*, acrónimo do inglês) desde o ano de 2003. São informações sobre o uso extensivo e não sustentável dos recursos, as tendências no uso industrial da água, as condições de acesso à água potável e as condições de qualidade da água, tais como medidas de salinidade das águas subterrâneas, nitratos e nitritos (UNESCO, 2019).

No âmbito nacional, um conjunto de indicadores de sustentabilidade ambiental propostos por Marinho *et al* (2006) apontam para os recursos hídricos e para o ambiente urbano. Dentre eles tem-se:

- Índice de Qualidade Água para avaliar a contaminação da água por esgoto doméstico;
- Vazão de água superficial extraída / total da população (m³/h/N) para avaliar a demanda per capita de extração de água superficial;
- Percentual da população (%) com acesso à água potável para avaliar o nível de universalidade do acesso à água para abastecimento humano;
- Número de habitações em áreas de riscos por bairro (N/ bairro) para indicar a evolução e a dimensão e vulnerabilidade das ocupações habitacionais no ambiente urbano.

Ou seja, os indicadores para medir utilização extensiva água, alterações no estado natural, emissão de poluição, ou lançamento de efluentes, estão sempre associados aos índices de qualidade de água.

Por outro lado, um conjunto de indicadores pode ser agregado de modo a facilitar a comunicação do grande número de elementos

ali reunidos. Assim são concebidas outras maneiras de se obter medidas-sínteses, por meio dos indicadores compostos ou índices, que resumem informações que isoladas seriam de difícil interpretação (FREITAS et al., 2011). Siche *et al.* (2007) salientam ainda que, um índice pode compor outro índice, tal como o Índice de Sustentabilidade Ambiental ou ESI (do inglês *Environment Sustainability Index*) tem como uma de suas variáveis a Pegada Ecológica ou EF (do inglês *Ecological Footprint*).

Legislação brasileira e qualidade da água

O primeiro instrumento legal brasileiro próprio aos recursos hídricos foi o Decreto Nº. 643/34 assinado pelo então Presidente Getúlio Dorneles Vargas em 10 de Julho de 1934, que ficou conhecido como “Código das Águas” (BRASIL, 1934). Constam do seu enunciado: a classificação das águas em comuns, particulares e públicas e as premissas para o uso da água das águas subterrâneas. E também os critérios para uso, segundo os quais o dono de terras poderia: apropriar-se das águas que existissem debaixo da superfície da sua propriedade e explorar o recurso por meio de poços, galerias, ou outro equipamento; entretanto os aproveitamentos existentes não poderiam ser prejudicados e o curso natural das águas públicas dominicais, públicas de uso comuns ou particulares não poderia ser derivado ou desviado (BRASIL, 1934). Com a promulgação da constituição da República Federativa do Brasil, em dia 5 de outubro de 1988, foram introduzidas novas definições: parte dos recursos hídricos passou a serem bens da união (Art. 20), e parte dos Estados (Art. 26), respectivamente:

- Bens da União (Art. 20): “os lagos, rios e quaisquer correntes de água em terrenos de seu domínio, ou que banhem mais de um Estado, sirvam de limites com outros países, ou se estendam a território estrangeiro ou dele provenham, bem como os terrenos marginais e as praias fluviais”.
- Bens dos Estados (Art. 26) “as águas superficiais ou subterrâneas, fluentes, emergentes e em depósito, ressalvadas, neste caso, na forma da lei, as decorrentes de obras da União”.

Foi a utilização econômica que fez com que a água fosse reconhecida como recurso hídrico, tal como são reconhecidos os recursos minerais largamente utilizados economicamente. Ou seja, o termo recurso hídrico refere-se à função econômica da água desempenhada como meio para irrigação, hidroeletricidade, engarrafamento de águas minerais, produção de alimentos, dentre outros. Desta maneira têm-se dois aspectos: a água como substância essencial à vida tal como é conhecida, e como recurso hídrico, fundamental à produção de bens. E sob essa dupla perspectiva estabelecem-se os instrumentos legisladores: leis, decretos, portarias, resoluções, que tornam possível a gestão de modo a contemplar o poder público, a sociedade civil e o empresariado nacional:

Meio ambiente e recursos hídricos

Em 31 de Agosto de 1981 foi promulgada a Lei Federal Nº. 6.938. Esta lei define a Política Nacional do Meio Ambiente (PNMA), seus fins e mecanismos de formulação e aplicação, e cria o Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), órgão consultivo e deliberativo do Sistema Nacional de Meio Ambiente (SISNAMA) (BRASIL, 1981).

De acordo com o disposto na legislação cabe ao CONAMA deliberar, no âmbito de sua competência, sobre normas e padrões compatíveis com o meio ambiente ecologicamente equilibrado e essencial à sadia qualidade de vida (BRASIL, 1981). Neste sentido, o Regimento Interno do conselho define como competências a elaboração de resoluções, decisões, moções, recomendações e proposições, cada um deles aplicável as diferentes atuações do órgão. As resoluções são utilizadas para deliberação vinculada a diretrizes e normas técnicas, critérios e padrões relativos à proteção ambiental e ao uso sustentável dos recursos ambientais. Três resoluções são

importantes quanto às definições de padrões aceitáveis de qualidade de água, utilizados na elaboração dos índices de qualidade de água:

- Resolução CONAMA Nº 357 de 17 de Março de 2005 (BRASIL. MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, 2005), dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências.
- Resolução CONAMA Nº 396 de 3 de Abril de 2008 (BRASIL. MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, 2008a), especifica para as águas subterrâneas, dispõe sobre a classificação e diretrizes ambientais para o enquadramento das águas subterrâneas e dá outras providências.
- Resolução CONAMA Nº 430 de 13 de Maio de 2011 (BRASIL. MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, 2011), dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução nº 357, de 17 de março de 2005,

Quinze anos depois da Política Nacional do Meio Ambiente, foi promulgada a Lei Federal Nº 9.433 em 8 de Janeiro de 1997 (BRASIL, 1997). A “Lei das Águas”, como é conhecida, estabeleceu um marco na gestão dos recursos hídricos nacionais, suporte para a criação do Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH) e o do Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos (SINGREH) (BRASIL, 1997). A Lei Federal Nº 9.433/97 também definiu as diretrizes para o Plano Nacional de Recursos Hídricos (PNRH), que foi concluído e aprovado em 30 de janeiro de 2006, nove anos após a promulgação da lei. No plano estão definidas as diretrizes, metas e programas para assegurar o uso racional da água no Brasil até 2020, destacando-se ali a disposição em consolidar o marco institucional

existente e superar ambiguidades relativas à gestão das águas subterrâneas. Foram feitas duas revisões ao plano inicialmente proposto, a última delas foi aprovada por meio da Resolução N° 181 de 7 de Dezembro de 2016 (BRASIL. MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, 2016) com destaque para as prioridades, ações e metas do PNRH para o período 2016 -2020, e para a obrigatoriedade de aprovação de novo PNRH em 2021.

No âmbito do SINGREH, compete ao CNRH estabelecer as diretrizes complementares para implementação da Política Nacional de Recursos Hídricos (BRASIL, 1997). De modo similar ao CONAMA, os atos do CNRH são representados por moções e resoluções. Quanto às deliberações do CNRH relacionadas à qualidade da água estão em vigor as resoluções;

- Resolução CNRH N° 91/2008, de 05 de Novembro de 2008, dispõe sobre procedimentos gerais para o enquadramento dos corpos de água superficiais e subterrâneos (BRASIL. MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, 2008b).
- Resolução CNRH N° 92/2008, de 05 de Novembro de 2008, estabelece critérios e procedimentos gerais para proteção e conservação das águas subterrâneas no território brasileiro (BRASIL. MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, 2008c).

Água para consumo humano

Quanto à qualidade da água como substância apropriada para consumo humano, as atribuições são do Ministério da Saúde. O Decreto N° 79.367, de 9 de Março de 1977, determinou ao órgão a elaboração normas e o estabelecimento de padrão de potabilidade de água a serem observados em todo o território nacional, e que os fixasse em portaria englobando: (i) Definições, (ii) Características de

qualidade de água potável, (iii) Amostragem e (iv) Método de análise de água (BRASIL. MINISTÉRIO DA SAÚDE, 1977). As publicações são feitas desde 1977, na seguinte ordem:

- Portaria BSB Nº 56, assinada em Brasília (BSB) em 14 de março de 1977.
- Portaria GM N.º 36/1990, editada pelo Gabinete do Ministro (GM).
- Portaria MS N.º 1469 de 29 de dezembro de 2000.
- Portaria MS N.º 518, de 25 de março de 2004.
- Portaria MS Nº 2914/2011 de 11 de Dezembro de 2011.
- Portaria da Consolidação nº 5/2017 (BRASIL. MINISTÉRIO DA SAÚDE, 2017).

Revisão da literatura sobre IQA

Os primeiros índices de qualidade de água foram desenvolvidos na década de sessenta do século passado e são largamente utilizados para exprimir a qualidade das águas dos mananciais superficiais, adequados aos diversos ambientes (rios, lagos, água estuarina), com pouca referência à qualidade das águas subterrâneas. Antes se dispunha de processos gráficos para interpretação geoquímica da água, com combinações de cátions e ânions.

Nenhum deles incorporava a presença de substâncias que caracterizam a influência de atividades humanas.

Processos gráficos

Inúmeras substâncias se misturam e se dissolvem na água. A presença de cada uma delas é determinada por meio de análises físico químicas. As substâncias analisadas são escolhidas conforme a qualidade requerida a cada uso da água. Para tabulação e apresentação dos dados podem ser empregados alguns recursos gráficos.

As ferramentas para interpretação gráfica e numérica são relativamente simples e podem ser usadas sem que o usuário possua conhecimentos aprofundados em química. Elas foram agrupadas em quatro categorias de acordo com as possibilidades de uso: métodos de classificação, métodos de correlação, métodos analíticos e métodos ilustrativos, como segue (ZAPOROZEC, 1972):

- Os **métodos classificativos** são usados para caracterização básica da composição química da água. Tais métodos diferenciam os tipos químicos de água e ajudam a identificar os tipos dominantes. Neste caso, os diagramas padrão são

de pouca importância devido à sua inaptidão para lidar com grandes volumes de dados. Um método muito útil para caracterização primária da composição química da água é a fórmula proposta por Kurlov em 1928, onde composição química é expressa por uma função entre ânions e cátions no numerador e denominador, respectivamente. Em 1940 R.A. Hill publicou o seu diagrama original representando os triângulos de cátions e ânions, e identificando nove tipos de água.

- Os **métodos de correlação** são usados para comparar análises químicas com o objetivo de encontrar diferenças ou semelhanças na composição de águas. Os mais convenientes neste caso são os métodos que utilizam sistemas lineares e numéricos, embora também sejam utilizados os diagramas padronizados. Um das melhores técnicas por mostrar correlação entre tipos de águas é a expressão da relação entre íons, ou a concentração de um componente em relação à concentração total, expressa em termos de relações matemáticas. Outro método de correlação utiliza gráficos lineares. Um dos gráficos mais conhecidos utilizando a escala aritmética ou logarítmica para expressão de dados de qualidade de água foi proposto pelos hidroquímicos franceses R. Frey e H. Schoeller em 1935. Mais adiante, em 1951, H.A.Stiff apresentaria um método mais sofisticado para demonstrar mudanças na composição química da água.
- Os **métodos analíticos** são utilizados para identificar a origem da água e determinar os processos envolvidos na química natural da água, são baseados principalmente em métodos numéricos e sistemas lineares para expressão

das análises. Um diagrama de interesse histórico foi o de Langelier e Ludwig (1942) no qual os cátions são lançados na ordenada e ânions na abscissa, em porcentagem. Um número considerável de autores descreveu formas para combinar os triângulos de cátions e de ânions de vários modos. Em 1942 A. M. Piper desenvolveu um método similar ao de Hill, e onze anos depois, em 1953, publicou a sua versão definitiva.

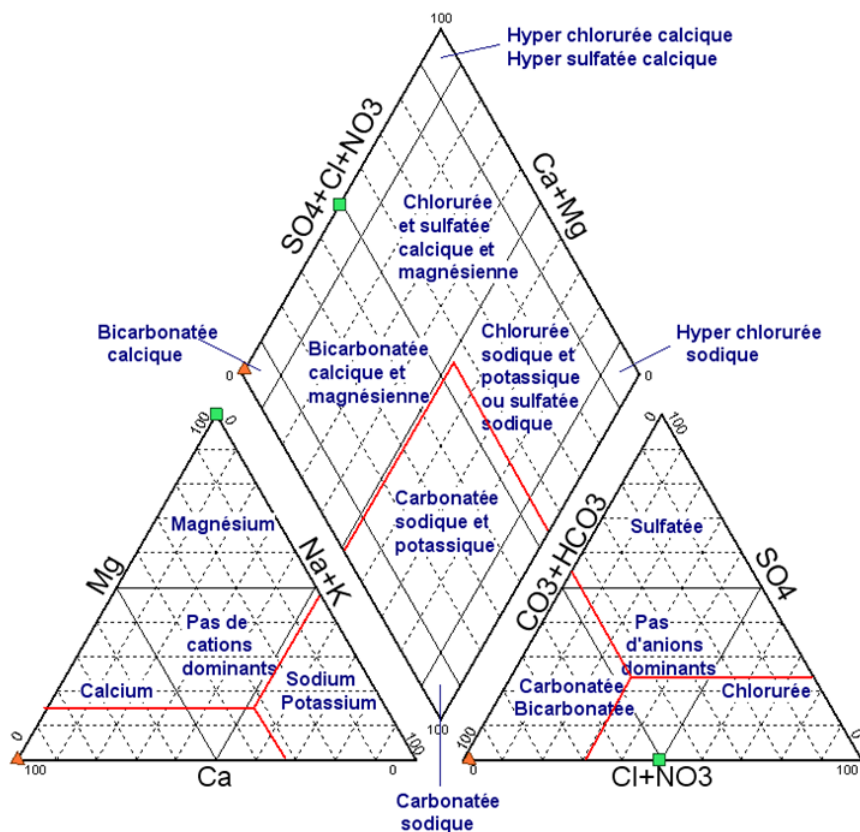
- Finalmente, os **métodos ilustrativos** são usados para representação da qualidade de água em mapas ou para outras finalidades. A qualidade da água pode ser ilustrada em um mapa através de símbolos de uso, normalmente consistindo em vários diagramas de padrões. Os gráficos de barra são muito ilustrativos para relatórios orais ou escritos de qualidade de água. O gráfico de barra mais amplamente usado foi proposto por W.D. Collins em 1923.

Método Piper

O Diagrama de Piper é um dos métodos analíticos mais difundidos para classificação da água em função dos íons dominantes. A técnica consiste na construção de um diagrama com a plotagem dos resultados da concentração de parâmetros em uma amostra de água.

Para classificação pelo método de Piper (Figura 1), os minerais presentes na água são distribuídos na forma de cátions (Cálcio, Magnésio, Sódio, Potássio, Ferro) e ânions (Cloretos, Carbonatos, Bicarbonatos, Sulfatos, Nitratos). Os pontos plotados no campo central do diagrama, em forma de diamante, têm áreas proporcionais à concentração total, e estão localizados no ponto de intersecção da extensão dos pontos dos triângulos dos ânions e cátions.

Figura 1 - Diagrama de Piper



Fonte: Wikimedia Commons (2020)

A visualização desses diagramas não é simples. A interpretação dos dados também requer conhecimentos especializados. Portanto, eles são inadequados para informar ao grande público.

Índices de qualidade de água

O primeiro índice com escala numérica para representar os diferentes padrões de qualidade de água foi apresentado pelo pesquisador alemão Robert K. Horton, em 1965 (HORTON, 1965). Esse pioneirismo deu ao Índice de Horton o título de primeiro índice moderno, e citações em inúmeras pesquisas sobre desenvolvimento e aplicação de índices de qualidade de água.

Os índices de qualidade de água podem ser de uso geral ou específicos. Na formulação dos índices de uso geral não se consideram o tipo de uso da água. Já nos índices específicos a classificação da água baseia-se nos tipos de consumo e na aplicação: ingestão, industrial, preservação ambiental, dentre tantos.

A formulação pode ser obtida por meio da opinião de especialistas (OE) ou através de métodos estatísticos. A primeira é uma abordagem subjetiva. Já nos índices onde são usados métodos estatísticos, prescindem-se as opiniões pessoais. Nesses casos, diminuem as chances de subjetividade. As abordagens estatísticas são usadas para escolha das variáveis mais significativas e para estabelecimento da significância de cada uma delas.

Alguns índices servem para monitorar a qualidade da água no ponto de captação. Esses são aplicados aos mananciais de água superficiais e subterrâneos, na sua forma natural (bruta). O WQI NSF (Water Quality Index) proposto pela *National Sanitation Foundation* (NSF), dos Estados Unidos, é muito utilizado para caracterizar os mananciais superficiais, adequado aos rios, lagos e água estuarina. No Brasil, esse índice foi adaptado pela Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB), com a denominação Índice de Qualidade das Águas (IQA CETESB).

Outros índices servem para qualificar as águas tratadas e distribuídas para abastecimento público, independente do seu

compartimento de origem. Embora incorporem parâmetros que indicam a qualidade natural da água bruta, possuem uma abrangência limitada e visam exprimir a eficiência dos sistemas de tratamento operados pelas concessionárias.

Nos capítulos seguintes são abordadas as etapas e a metodologia mais empregadas para o desenvolvimento e são detalhados alguns índices considerados relevantes.

Benefícios e restrições

Os índices são recursos importantes para caracterizar uma massa de água, porém não devem ser usados como única fonte de informação. Eles ajudam muito, mas não fornecem todos os itens necessários, de modo que o uso indiscriminado pode levar a conclusões equivocadas. Logo, não podem ser usados para fornecer informações definitivas sobre a qualidade da água sem considerar todos os dados químicos, biológicos e físicos adequados, como também não são suficientes para prevenir os riscos à saúde.

As maiores vantagens encontram-se: na facilidade de aplicação, no poder de síntese, e na simplicidade em comunicar. Entretanto, eles não fornecem informações sobre as concentrações e propriedades individuais de cada parâmetro. Eles representam o entrelaçamento de todos os parâmetros; mas não avisam quais deles têm efeitos positivos ou negativos sobre o índice.

O tipo de agregação também supervaloriza ou esconde propriedades dos parâmetros. As zonas de ambiguidade e de eclipse são aspectos encontrados nas formas aditivas e multiplicativas de agregação. As zonas de ambiguidade ocorrem quando todos os subíndices indicam a qualidade da água aceitável, mas o índice agregado mostra que não. Já as zonas de eclipse são aquelas onde a contagem do índice “esconde” o teor inaceitável de um ou mais

parâmetros do índice. Ou seja, uma boa nota indicará adequação para um uso particular; mas pode omitir uma propriedade marginal.

Diretrizes para formulação

A formulação requer uma série de critérios, sem os quais o "novo índice" pode ser confundido com apenas mais um "malabarismo de números" que não traduz nenhum resultado relevante. Eles foram resumidos em uma lista de vinte características consideradas ideais (OTT, 1978):

1. Seja relativamente fácil de aplicar;
2. Estabeleça um equilíbrio razoável entre simplificações excessivas e complexidade técnica;
3. Confira uma compreensão da importância dos dados que ele representa;
4. Inclua variáveis ampla e rotineiramente medidas;
5. Inclua variáveis que têm efeitos claros sobre a vida aquática, o uso recreacional, ou ambos;
6. Inclua substâncias tóxicas;
7. Possa acomodar facilmente novas variáveis;
8. Seja baseado em limites recomendados e padrões de qualidade da água;
9. Seja desenvolvido a partir de um raciocínio lógico, científico ou de procedimentos;
10. Seja testado em uma série de áreas geográficas;
11. Mostre concordância razoável com opinião de especialistas;
12. Mostre correlação razoável com as medidas biológicas da qualidade da água;
13. Seja adimensional;

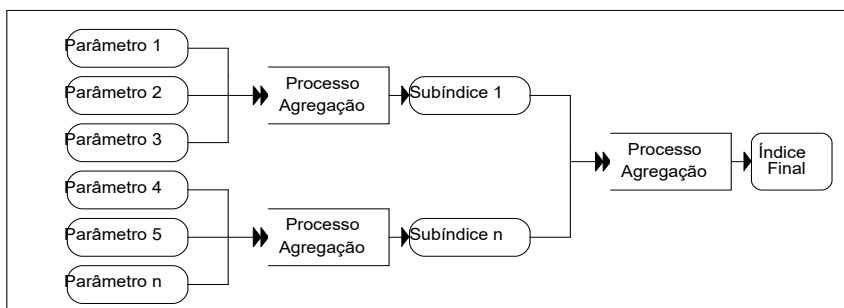
14. Tenha um alcance claramente definido;
15. Exiba desejáveis propriedades estatísticas que permitam que sejam feitas interpretações probabilísticas;
16. Evite eclipse (ou seja, não permita que o cálculo matemático do índice “esconda” o teor inaceitável de um ou mais parâmetros do índice);
17. Mostre a sensibilidade a pequenas alterações na qualidade da água;
18. Seja aplicável para mostrar tendências ao longo do tempo, para comparações entre diferentes locais, e para fins de informação pública;
19. Inclua orientações sobre como lidar com os valores ausentes (parâmetros não medidos);
20. Tenha as limitações do índice claramente documentadas.

Construção de IQA

O desenvolvimento de um índice de qualidade de água engloba quatro etapas. A Figura 2 mostra a sequência das atividades.

- Seleção de parâmetros;
- Construção de Subíndices, ou seja, transformação dos parâmetros de diferentes unidades e dimensões em uma escala comum;
- Atribuição dos pesos para todos os parâmetros;
- Agregação de subíndices para produzir uma contagem de índice final.

Figura 2 - Etapas para desenvolvimento dos índices de qualidade de água.



Fonte: Elaboração própria, 2020.

Seleção dos parâmetros

Uma das maneiras utilizadas para a seleção dos parâmetros é a consulta a especialistas. Os pesquisadores selecionam os parâmetros que julgam serem os mais significativos, as respostas são tabuladas e um número limitado de parâmetros é eleito, de

modo a garantir a praticidade e representatividade da escolha. É um método subjetivo, embasado na técnica Delphi (Capítulo 6), no qual cada especialista imprime ao índice a marca de sua área de conhecimento. Outra forma é a utilização de métodos da estatística multivariada, livres da parcialidade.

Qualquer que seja o método, os padrões são transitórios. Novas pesquisas esclarecem, com novos fatos, os efeitos benéficos ou prejudiciais de uma substância. Ou evidenciam impactos que tornam uma substância prejudicial, modificando o conjunto de parâmetros essenciais ao índice, ou o peso de um deles.

Construção de subíndices

A concentração dos parâmetros é medida em diferentes unidades. Por exemplo, a turbidez é expressa em unidades nefelométricas de turbidez (NTU), enquanto que o teor dos parâmetros químicos é expresso em miligramas por litro (mg/L) ou microgramas por litro ($\mu\text{g/L}$).

As faixas de concentração também são diferentes. Se tomada como exemplo uma água com concentração de Mercúrio da ordem de 0,0009 mg/L Hg, atenderia à legislação, mas uma outra que tivesse o dobro desta concentração (0,0018 mg/L Hg) estaria fora dos padrões estabelecidos (VMP = 0,001 mg/L Hg). Entretanto, uma amostra com concentração de cloreto da ordem de 10 mg/L Cl, atende à legislação, como também atenderia uma água com o dobro desta concentração (20 mg/L) e até com vinte vezes (VMP = 250 mg/L Cl). E mais ainda, enquanto alguns parâmetros variam em faixas muito pequenas (OD = 0 a 12 mg/L OD), outros abrangem valores muito maiores (Sódio = 0 a 1000 mg/L Na).

Ou seja, as unidades e as magnitudes são distintas, como também são diferentes as relações entre concentração e impacto. Para formulação do índice é necessário reduzi-las a uma grandeza

comum. Por isso são construídos subíndices, para que as unidades e as faixas de concentrações dos parâmetros sejam expressas em uma única escala.

Para calcular os valores de cada subíndice são usadas funções matemáticas chamadas “funções do subíndice”, que podem consistir em: simples multiplicador; ou magnitude da variável elevada a expoentes; ou outra relação funcional (linear, não linear, linear segmentada, não linear segmentada), cada uma delas com vantagens e limitações.

Atribuição de pesos

A concentração dos parâmetros tem diferentes influências na qualidade da água. A escolha do determinante deve equilibrar a quantidade de parâmetros com a autenticidade dos dados e a efetividade do índice. Os pesos devem exprimir a relação de importância do parâmetro na qualidade da água. A atribuição pode ser feita por consulta aos especialistas, com aplicação da técnica Delphi, ou por meio de métodos estatísticos.

Agregação de subíndices

A última etapa na formulação do índice é agregação dos subíndices para composição do índice final. São utilizados vários métodos de agregação. Todos eles têm benefícios e desvantagens. A forma apropriada depende dos objetivos para os quais o índice foi desenvolvido. As mais comuns são:

- Índice de Soma Linear: É composto pela adição de subíndices sem pesos. É muito simples, mas tem a desvantagem de provocar qualificação de água insatisfatória. Mesmo quando todos os parâmetros estão atendendo aos limites

estabelecidos, os somatórios pode exceder ao valor permissível, mesmo que nenhum dos subíndices exceda, gerando o problema da “ambiguidade”.

$$I = I_1 + I_2 + I_3 \dots + I_n \quad \text{Equação 1}$$

- Soma Ponderada: Este tipo de agregação elimina o problema da ambigüidade, mas provoca um problema de “eclipse” que acontece quando pelo menos um parâmetro reflete qualidade da água insatisfatória, e a contagem do índice “esconde” o nível inaceitável de um ou mais parâmetros constituintes.

$$I = I_1 * i_1 + I_2 * i_2 + I_3 * i_3 + \dots + I_n * i_n \quad \text{Onde:}$$

$$\sum i_1 + i_2 + \dots + i_n = 1 \quad \text{Equação 2}$$

- Raiz do Somatório da Potência: É um bom método para agregação, pois, não oferece regiões de “ambiguidade” ou de “eclipse”. É um método pouco utilizado.

$$I = \left[\sum_{i=1}^{i=n} I^p \right]^{1/p} \quad \text{Equação 3}$$

- Operador Máximo: O índice assume o maior valor de todos os subíndices, e o índice (I) = 0 se e somente se todos os subíndices forem iguais a zero. Este tipo de agregação é apropriado para determinar se um valor permissível é violado e por quanto.

$$I = \max \{I_1 + I_2 + \dots + I_n\} \quad \text{Equação 4}$$

- Operador Mínimo: Calcula subíndices em escala decrescente, semelhante ao modelo para o índice de operador máximo. Não provoca “eclipse” e “ambiguidade”.

É um bom candidato para agregar subíndices de escala decrescente.

$$I = \min\{I_1 + I_2 + \dots + I_n\} \quad \text{Equação 5}$$

- Multiplicativo: A função de agregação de multiplicação mais comum é o produto de pesos, que elimina o problema de “eclipse”, pois um índice é zero se qualquer subíndice é zero, e também elimina a “ambiguidade”, pois o índice será zero se e somente se pelo menos um subíndice for zero. Isto significa que se qualquer subíndice exibir qualidade de água insatisfatória, o índice global exibirá qualidade insatisfatória.

$$\prod_{i=1}^{i=n} I_i^{w_i} \quad \text{Onde } \sum_{i=1}^{i=n} w_i = 1 \quad \text{Equação 6}$$

Aplicação do índice

Os índices de qualidade de água são aplicados tanto para uma amostra de água individual, como para um conjunto de amostras de determinada região ou de determinado período, fruto de monitoramento ou de qualquer outro tipo de avaliação.

Método DELPHI

A técnica DELPHI é um método para extrair e refinar julgamentos de um grupo. O DELPHI caracteriza-se como método para estruturar a comunicação de modo que o processo seja eficaz permitindo que o grupo, como um todo, lide com um problema complexo (LINSTONE; TUROFF, 1976).

A técnica Delphi foi aplicada inicialmente na área de tecnologia: previsões de novas tecnologias e os impactos sociais e econômicos decorrentes das mudanças tecnológicas. As áreas foram ampliadas, e a técnica passou a ser aplicada na indústria, na propaganda, e também na academia. Nos Estados Unidos tem-se um histórico de vários estudos, especialmente em saúde pública e na área de educação (ADLER e ZIGLIO, 1996; COMISH, 1977, *apud* RAND CORPORATION, 2005).

Mais recentemente são relatadas aplicações na pesquisa qualitativa em ciências sociais (BRADY, 2015), na estimativa de valores médios para proteção de bens ambientais (STRAND et al., 2017), na identificação de fatores de êxitos em empreendimentos (MARTÍNEZ GARCÍA; PADILLA CARMONA; SUÁREZ ORTEGA, 2018), dentre outras. No Brasil, tem-se pesquisas nas áreas de saúde (REVORÊDO et al., 2015) e educação (MARQUES; FREITAS, 2018), como também nas engenharias (SOUZA; ZAMBALDE, 2018).

História

Os estudos preliminares para formatação da técnica DELPHI são de 1944. Eles intencionavam prever futuras tecnologias que poderiam interessar ao exército norte americano. Inicialmente a técnica era voltada para o tratamento de opiniões individuais,

de forma separada. Em 1953, Norman Dalkey e Olaf Helmer introduziram o controle de retroalimentação ("*feedback*"), na forma de uma representação estatística da "resposta do grupo", após a qual o processo se repete.

Fundamentos

Para reduzir o desvio das respostas e se aproximar do consenso dos especialistas, é preciso minimizar os efeitos da influência de indivíduos dominantes e das comunicações irrelevantes. Também é preciso afastar grupos de pressão que direcionam as respostas para um suposto acordo. São aplicadas três premissas:

- Respostas anônimas: as opiniões dos membros do grupo são obtidas por meio de questionários formais;
- Repetição e controle de avaliação: a interação é efetuada por um exercício sistemático administrado em várias repetições, com avaliação controlada entre as rodadas;
- Respostas estatísticas do grupo: na rodada final, a opinião de grupo é definida como consenso de opiniões individuais. Ou seja, a opinião de todos os membros do grupo estará representada na resposta final.

O sucesso do método depende muito da escolha criteriosa dos participantes. A expertise no tema, comprometimento e satisfação em contribuir são essenciais aos painelistas.

Para grupos acadêmicos a seleção pode ser feita por indicações de instituições ou por uma rede de relacionamentos. Para grupos não alcançados por esses canais são sugeridas as redes sociais e outros mecanismos. Pessoas que têm algo a dizer podem ser incorporadas e ajudar com ideias inovadoras.

Depois de formada a lista, todas as pessoas devem ser contatadas individualmente. De forma geral a maioria dos estudos usa painéis de

15 a 35 pessoas. Deve ser aguardada uma taxa de aceitação entre 35 e 75 por cento. As comunicações devem ser preferencialmente, individualizadas. Conta-se um pouco sobre o projeto e seus objetivos. É importante informar o tempo disponível necessário à participação e o compromisso do método com o anonimato.

Roteiro para aplicação

São descritas dez atividades para aplicação do método Delphi (FOWELS 1978, *apud* RAND CORPORATION, 2005):

- Formação de uma equipe para empreender e monitorar;
- Seleção de um ou mais grupos de especialistas que participarão do exercício.
- Desenvolvimento da primeira etapa do questionário. Nessa etapa o problema é esclarecido e são apresentadas questões abertas;
- Testes do questionário para adequar a formulação, corrigir ambiguidades e incertezas;
- Envio dos primeiros questionários aos painelistas;
- Análise das respostas da primeira etapa;
- Preparação dos questionários da segunda etapa (*round*);
- Envio dos questionários da segunda etapa aos painelistas;
- Análise das respostas dos questionários da segunda etapa. As duas etapas anteriores (preparação e envio) e mais a análise serão repetidas como desejado, ou conforme a necessidade, para estabilização dos resultados;
- Preparação de um relatório de análise para apresentação das conclusões.

Antes de colocar em prática

Os convites aos potenciais respondentes devem ser feitos por meio de “cartas convite”, entregues pessoalmente, enviadas via correio eletrônico ou por meio de plataformas de pesquisa online.

Caso seja factível, o convite deve ser presencial, pois aproxima o respondente e fortalece o seu vínculo com a pesquisa. Outra vantagem observada na visitação é que em apenas uma abordagem é feito o convite, o aceite e a entrega dos questionários, em contraste com outras modalidades onde são necessárias pelo menos três iniciativas: convidar, aguardar aceite e disponibilizar o questionário.

Cuidados na recepção das respostas

Alguns cuidados devem tomados, especialmente se a aplicação for via rede de computadores:

- Para convites via correio eletrônico, sugere-se identificar as mensagens de retorno dos convites não entregues e a forma de correção. Algumas retornam por erro no endereço eletrônico, por terem caído na caixa de *spams*, ou porque a caixa estava indisponível. Os problemas devem corrigidos e as mensagens reenviadas, pelo menos mais uma vez;
- Para convites via plataformas de pesquisa, sugere-se usar mecanismos para evitar a participação dos chamados “robôs”;
- Para preservar o anonimato dos respondentes os convites devem ser feitos de modo que os destinatários não sejam identificados;
- Todas as respostas devem catalogadas e tratadas de forma personalizada. Alguns respondentes podem solicitar mais

detalhes sobre a pesquisa, outros podem indicar novos participantes, e alguns podem declinar do convite;

- Todas as mensagens devem ser respondidas, inclusive aquelas de contatados que não aceitaram o convite.

Nos segundo e terceiro *rounds* podem ocorrer atrasos nas respostas, ou até mesmo desistências. Para diminuir a evasão, sugere-se que seja realizado um segundo chamamento. É importante retomar o contato com os painelistas, reiterar a importância da participação de cada um deles e solicitar que respondam a pesquisa. Deve ser estabelecida uma data limite para envio das respostas e informado que ao final desse prazo as respostas serão tabuladas e analisadas, para qualquer número de painelistas que tiver atendido à convocação.

Relato de experiência

No estudo desenvolvido por Almeida (2007) para formulação do Índice de Qualidade de Águas Subterrâneas destinadas ao uso na produção de água potável (IQUAS) foi montado um painel composto por especialistas oriundos de diversos setores:

- Universidades e centros de pesquisa, convidados mediante sua participação em eventos e publicação de artigos relacionados ao tema da pesquisa;
- Empresas concessionárias serviços de saneamento, convidados mediante sua participação em associações que agregam estes profissionais;
- Empresas de engenharia, convidados mediante sua atuação no mercado em área relacionada ao tema da pesquisa.

Os convites foram feitos por meio de “cartas convites”, enviadas via e-mail ou entregues pessoalmente, após contato telefônico. Um

fato relevante foi novas indicações feitas por painelistas de primeira hora, de modo que foi criada uma “árvore de respondentes”.

A forma de abordagem presencial obteve 83% de aceitação, enquanto que apenas 32% dos contatados via rede de computadores acolheram o convite. Na visita foram apresentados os objetivos da pesquisa e as razões para escolha do respondente. Essa forma de convite foi muito eficiente, pois algumas dúvidas puderam ser respondidas imediatamente. Entretanto, não garantiu a participação em todas as rodadas e evasão foi significativa.

IQA para diversos usos

Neste capítulo são descritos alguns índices para caracterização da qualidade geral da água. Eles são baseados na seleção de parâmetros, determinação de pesos e agregação de subíndices, e lidam principalmente com características físico químicas da água.

Índice de Horton

O índice desenvolvido pela equipe do pesquisador alemão Robert K. Horton em 1965 é considerado o primeiro índice moderno. Ele foi apresentado como uma ferramenta para avaliação dos programas de redução de poluição em cursos d'água e para a informação pública (DERÍSIO, 2017).

O índice de Horton utiliza as dez variáveis mais destacadas, na época, para avaliar a qualidade da água. A estrutura do índice e dos pesos é baseada em julgamentos do autor e de um grupo de pesquisadores associados. Tem a seguinte distribuição de pesos: um para quatro parâmetros (condutividade, cloretos, alcalinidade e extrato de clorofórmio de carbono), dois para um parâmetro (bactérias do grupo coliformes) e quatro para três parâmetros (oxigênio dissolvido, tratamento de esgoto e pH).

A condutividade serve como medida aproximada dos sólidos totais dissolvidos (TDS), e o extrato de clorofórmio de carbono (CCE) reflete a influência da matéria orgânica. A variável "tratamento de esgotos" refere-se ao percentual (%) da população atendida. Não estão incluídos elementos tóxicos e substâncias relacionadas à poluição industrial. Para Horton (1965), por definição, nenhum curso d'água deveria conter substâncias prejudiciais aos seres humanos, animais ou à vida aquática.

Mesmo com essas ressalvas, o índice tem características importantes: número de variáveis limitado, garantindo a praticidade; variáveis com significação em todas as regiões e que refletem a disponibilidade de dados.

O índice de Horton consiste em um somatório ponderado de subíndices, dividido pelo somatório dos pesos multiplicado por dois coeficientes (M1 e M2):

$$WQI_{\text{HORTON}} = \frac{\sum_{i=1}^n W_i * l_i}{\sum_{i=1}^n W_i} M1 * M2 \quad \text{Equação 7}$$

Onde:

W_i = peso do parâmetro i

l_i = subíndice do parâmetro i

$M1$ = coeficiente de temperatura:

$M1 = 1$ se $T < 34^{\circ}\text{C}$;

$M1 = 0,5$ se $T \geq 34^{\circ}\text{C}$

$M2$ = coeficiente de poluição aparente

$M2 = 1$ se sólidos sedimentáveis $< 0,1 \text{ mg/L}$;

$M2 = 0,5$ se sólidos sedimentáveis $\geq 0,1 \text{ mg/L}$

Os subíndices são funções lineares segmentadas, resolvidas por etapas. Como exemplo, para o subíndice “Oxigênio Dissolvido” tem-se: $l=0$ para OD menor que 10% de saturação, $l = 30$ para OD entre 10% e 30% de saturação e $l = 100$ para OD acima de 70% de saturação.

Índice de brown

O índice WQI NSF (ou Índice de Brown) foi criado em 1970, por um grupo de pesquisadores coordenados por Robert M. Brown, com o apoio da *National Sanitation Foundation (NSF - USA)*. Segundo relatam Brown *et al.* (1970), o índice tanto pode ser

usado para monitorar mudanças temporais da qualidade de água em um manancial específico, como pode ajudar na comparação da qualidade de uma fonte de água com outros mananciais de água na região ou de qualquer outro local ao redor do mundo, como também para determinar se um trecho em particular pode ser considerado "saudável".

A técnica Delphi (Capítulo 6) foi usada para formulação do índice. A técnica consiste na consulta e consenso de respostas de um grupo de especialistas da área de interesse. Foi convidado um grupo de 142 especialistas que contribuiriam para a criação do que se chamou de "índice de qualidade de água padrão" (NSF, 2004). O resultado deveria representar o nível de qualidade de água em uma determinada bacia hidrográfica, num lago, rio, ou córrego.

Os procedimentos iniciais incluíram uma lista de trinta e cinco parâmetros. Os respondentes eram livres para acrescentar novos itens. Depois, cada parâmetro deveria ser marcado com as indicações: "incluir", "indeciso" ou "não incluir", representando a sua significação como contribuinte para a qualidade global da água. E ao final deveria ser estabelecida uma escala de 1 (maior importância) a 5 (menor importância) para cada um dos parâmetros selecionados.

Na etapa seguinte as respostas foram publicizadas. Cada respondente pode opinar: manter ou modificar suas escolhas, à luz da opinião dos demais participantes.

Na rodada posterior foi solicitado aos painelistas que: (1) escolhessem não mais do que 15 parâmetros, que eles considerassem os mais importantes, e (2) representassem graficamente a variação da concentração dos parâmetros na água.

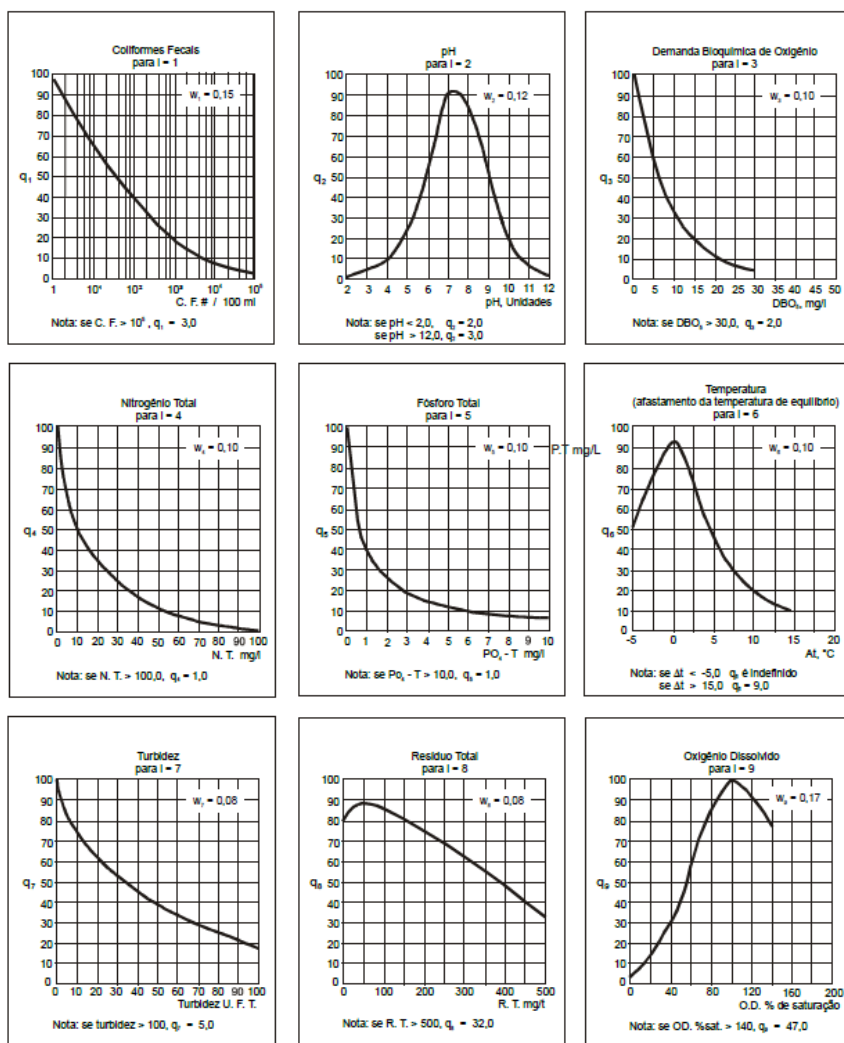
A lista completa de parâmetros, organizada em ordem decrescente de significação, foi apresentada a cada pesquisador e finalmente foi obtida uma lista com onze parâmetros. O Quadro 1 mostra a lista dos parâmetros indicados pelos respondentes em ordem de importância e o indicador da relevância atribuída a cada

um dos parâmetros na qualidade da água. O indicador da relevância é calculado como a média aritmética da somatória da multiplicação da quantidade de votos do parâmetro vezes a significância atribuída ao parâmetro, adotando-se o valor numérico decrescente da maior significância [=1] para a menor significância [= 5].

Quadro 1 - WQI NSF - Lista de parâmetros mais significativos							
Importância	Parâmetro	Quantidade de votos por relevância atribuída ao parâmetro (maior =1 / menor =5)					
		1	2	3	4	5	Média
1	Oxigênio dissolvido	75	7	5	1	2	1,31
2	Demanda bioquímica de oxigênio	48	22	33	4	15	1,65
3	Turbidez	26	54	45	48	25	2,33
4	Sólidos totais	21	46	54	24	15	2,25
5	Nitrato	26	70	42	16	15	2,06
6	Fosfato	29	64	45	12	15	2,01
7	pH	56	38	24	16	10	1,62
8	Temperatura	49	30	39	16	30	1,89
9	Coliformes Fecais	68	12	18	4	10	1,35
10	Praguicidas	32	46	36	24	5	1,93
11	Elementos tóxicos	23	42	54	16	10	2,13

Fonte: Kumar; Alappat (2009).

As curvas que representam graficamente a variação de cada parâmetro foram desenhadas sem atribuir equações. São funções implícitas, ou seja, originadas de uma curva empírica, da qual não se conhece a equação exata da curva. As praguicidas e os elementos tóxicos não foram incluídos. Para esses elementos são definidas regras especiais, ou seja, se forem detectados em teores que excedam 0,1mg/L, o índice de qualidade da água será “zero”. A Figura 3 mostra as curvas de qualidade dos nove parâmetros finais do índice.

Figura 3 - WQI NSF - Curvas de qualidade dos parâmetros

Fonte: CETESB (2018).

Para conversão em pesos, foi atribuído um peso temporário (1.0) ao parâmetro que recebeu a avaliação de significação mais alta,

isto é aquele que obteve o valor 1 (mais alta significação) na escala decrescente de importância.

Todos os outros pesos temporários foram obtidos dividindo cada avaliação média individual pela avaliação mais alta. Cada peso temporário foi dividido então pela soma de todos os pesos temporários para chegar ao peso final. O Quadro 2 reproduz a avaliação média, pesos temporários e pesos finais dos parâmetros selecionados para o Índice de Brown.

Quadro 2 - WQI NSF – Significado e peso dos parâmetros			
Parâmetros	Média Aritmética de Significação dos Parâmetros na avaliação dos especialistas, em escala decrescente, mais importante obtém menor valor.	Pesos Temporários	Pesos Finais
Oxigênio dissolvido	1,4	1	0,17
Coliformes fecais	1,5	0,93	0,15
pH	2,1	0,67	0,12
DBO (5-dias)	2,3	0,61	0,1
Nitrato	2,4	0,58	0,1
Fosfato	2,4	0,58	0,1
Temperatura	2,4	0,58	0,1
Turbidez	2,9	0,48	0,08
Sólidos Totais	3,2	0,44	0,08
Total		5,87	1

Quadro 2 - WQI NSF – Significado e peso dos parâmetros	
Fórmulas:	
Peso Temporário = Média do Parâmetro de Maior Significação / Média Significação do Parâmetro a ser calculado	Peso Final = Peso Temporário do Parâmetro / Somatória dos Pesos
Exemplo: Turbidez	
Peso Temporário = $1,4 / 2,9 = 0,48$	Peso Final = $0,48 / 5,87 = 0,08$

Fonte: Adaptado de Abbasi e Abbasi (2012).

A agregação dos parâmetros foi proposta inicialmente na forma de um somatório do produto da qualidade do parâmetro pelo peso a ele atribuído. A qualidade do parâmetro é um número compreendido de 0 a 100 (nota) lido da curva do subíndice correspondente.

$$WQI_{NSF} = \sum_{i=1}^n W_i \times Q_i \quad \text{Equação 8}$$

Onde: W = peso do parâmetro i

Q = qualidade do parâmetro i

Mesmo com larga utilização, a forma aditiva do índice permite ambiguidade nos resultados. Para reduzir o problema foi adotado método de agregação multiplicativa para o mesmo conjunto e peso de parâmetros, tal que o WQI é dado por um produtório das notas (Q_i) elevados aos respectivos pesos (W_i), ou seja:

$$WQI_{NSF} = \prod_{i=1}^n Q_i^{W_i} \quad \text{Equação 9}$$

O cálculo do WQI NSF utiliza uma escala de 0 a 100 para avaliar a qualidade da água, sendo 100 a maior pontuação. A escala completa é mostrada no Quadro 3.

Quadro 3 - Escala de qualidade do WQI NSF	
ESCALA	QUALIDADE DA ÁGUA
91-100	Água Excelente
71-90	Boa
51-70	Média ou mediana
26-50	Razoável
0-25	Ruim

Fonte: Adaptado de NSF (2004).

O índice de Brown é bastante utilizado até os dias atuais como suporte para representar a qualidade da água em geral.

Índice de Nemerow

O Índice de Poluição de Nemerow (NPI do inglês *Nemerow's Pollution Index*) foi desenvolvido na década de 1970, por pesquisadores do departamento de engenharia civil da *Syracuse University* (New York, USA). A pesquisa atendeu a um projeto sobre os benefícios do aprimoramento da qualidade da água, oferecido pela agência de proteção ambiental americana (EPA, sigla em inglês para *US Environmental Protection Agency*). O índice foi proposto para medir a poluição relativa quando se consideram itens múltiplos de qualidade da água (NEMEROW; SUMITOMO, 1971).

Foram definidas três classificações de uso da água: uso com contato humano; uso com contato indireto e uso não consuntivo. A primeira categoria inclui ingestão (englobando água usada para fabricação de bebidas) e natação. A segunda categoria inclui pesca, processamento de alimentos e agricultura. E a última categoria inclui

usos que não envolvem o consumo direto da água, como navegação, refrigeração industrial e algumas atividades recreativas (NEMEROW; SUMITOMO, 1971).

O principal conceito do método baseia-se nas expressões que representam os numerosos parâmetros de qualidades da água, com os seus respectivos níveis admissíveis para cada um dos usos. O índice é calculado para cada uma das classificações, usando a equação:

$$CRP = \frac{C_i}{L_{ij}} \quad \text{Equação 10}$$

Onde:

CRP = Contribuição Relativa de Poluição

C_i = nível de qualidade da água do parâmetro i

L_{ij} = nível de qualidade permissível de i para o uso de água j .

Esta relação representa a contribuição relativa de poluição (CRP) pelo parâmetro de qualidade i . As equações são diferentes para parâmetros em que a concentração diminui à medida que a poluição aumenta, como Oxigênio Dissolvido (OD), como também para os casos onde o parâmetro tem faixas de valores admissíveis (desde / até), como pH.

Para reduzir o problema de eclipse, os valores relativos foram agregados usando a “raiz quadrada da média do quadrado” (RMS, do inglês *root mean square*). Para obter o valor de PI_j , para cada uso específico j , o valor máximo C_i/L_{ij} para todos i foi combinado com a média aritmética de C_i/L_{ij} em uma operação RMS:

$$NPI_j = \sqrt{\frac{\left(\frac{C_i}{L_{ij}}\right)_{\text{máximo}}^2 + \left(\frac{C_i}{L_{ij}}\right)_{\text{média}}^2}{2}} \quad \text{Equação 11}$$

Com essa abordagem, cada índice de uso específico reflete tanto o maior valor relativo (uma medida do extremo), como a média de todos os valores relativos (uma medida de tendência central). Para

sua aplicação, são recomendadas, no mínimo, 14 variáveis, todavia devem ser utilizados tantos parâmetros quantos sejam possíveis: temperatura, cor, turbidez, pH, coliformes fecais, sólidos dissolvidos totais, sólidos suspensos, nitrogênio total, alcalinidade, dureza, cloreto, ferro e magnésio, sulfato e oxigênio dissolvido.

Um índice de poluição excessiva também foi proposto como resultado da média ponderada dos três índices de poluição; o peso para cada um dos poluentes está relacionado ao uso correspondente ao tipo do curso de água (NEMEROW; SUMITOMO, 1971). Ou seja, o coeficiente de peso (w_j), é determinado pela importância relativa do uso da água (j) na região ou comunidade.

$$PI = \sum_{j=1}^3 W_j * PI_j \quad \text{Equação 12}$$

Índice de Prati

O índice de poluição de Prati foi proposto em 1971. O nome decorre da avaliação dos seus desenvolvedores de que, ao considerar os vários poluentes presentes ao mesmo tempo no corpo hídrico, medidos separadamente, o índice pode ser usado para avaliação numérica de uma característica puramente qualitativa expressa pelo termo “poluição” (PRATI; PAVANELLO; PESARIN, 1971).

As expressões matemáticas foram estabelecidas para cada um dos fatores poluentes investigados. E as concentrações dos parâmetros foram transformadas em níveis de poluição expressas em 'unidades de medida de poluição'. O desenvolvimento envolveu três etapas:

- 1) Estabelecimento das classificações dos parâmetros de acordo aos padrões relacionados à concentração de cada um deles, como mostrado no Quadro 4.
- 2) Eleição do “poluente referência”, cujo valor foi considerado diretamente como índice de referência.

- 3) Determinação das expressões matemáticas para transformar em índice cada um dos valores dos poluentes. Foram usadas as propriedades analíticas de várias curvas para assegurar que a transformação resultante não só seria aplicável a valores pequenos de concentrações de poluente, mas também para os valores que excedessem a maior classe.

Quadro 4 - Índice de Poluição de Prati – Classificação dos Parâmetros

Parâmetro	Excelente	Aceitável	Ligeiramente Poluído	Poluído	Fortemente Poluído
Ph (UT)	6,5 – 8,0	6,0 – 8,4	5,0 – 9,0	3,9 – 10,1	< 3,9; > 10,1
OD (%)	88–112	75–125	50–150	20–200	<20; >200
DBO (mg/L)	1.5	3.0	6.0	12.0	>12.0
DQO (mg/L)	10	20	40	80	>80
Sólidos Suspensos (mg/L)	20	40	100	278	>278
NH3 (mg/L)	0.1	0,3	0,9	2,7	>2,7
NO3 (mg/L)	4	12	36	108	>108
Cloretos (mg/L)	50	150	300	620	>620
Ferro (mg/L)	0.1	0.3	0.9	2.7	>2.7
Manganês (mg/L)	0.05	0,17	0,5	1	>1
ABS (mg/L)	0.09	1	3.5	8.5	>8.5
CCE (mg/L)	1	2	4	8	>8

Fonte: Adaptado de Prati, Pavanello e Pesarin (1971).

Os subíndices propostos por Prati estão reproduzidos no Quadro 5. O índice final é obtido como uma média aritmética dos treze subíndices.

$$I_{PRATI} = 1/13 \sum_{i=1}^{i=13} I_i$$
 Equação 13

Quadro 5 - Índice de Poluição de Prati – Equações dos Subíndices			
Sub –Índice	Parâmetro	Faixa de Concentração	Equação
1	Ph (UT)	0 ≤ x < 5	I = -0.4x ² + 14
		5 ≤ x < 7	I = -2x + 14
		7 ≤ x < 9	I = x ² -14x +49
		9 ≤ x < 14	I = -0.4x ² +11.2x+64.4
2	OD (%)	0 ≤ x < 50	I = 0.00168x ² -0.249x + 12.25
		50 ≤ x < 100	I = -0.08x + 8
		100 ≤ X	I = 0.08x -8
3	DBO (mg/L)		I = 0.66666x
4	DQO (mg/L)		I = 0.10x
5	Permanganato (mg/L)		I= 0.04x
6	Sólidos Suspensos (mg/L)		I=2 ^[2.1 log (0.1x-1)]
7	NH3 (mg/L)		I=2 ^[2.1 log (10x)]
8	NO3 (mg/L)		I=2 ^[2.1 log (0.25)]
9	Cloretos (mg/L)	0 ≤ x < 50	I=0.000228x ² + 0.0314x
		50 ≤ x < 300	I=.000132x ² +0.0074x+0.6
		300 ≤ X	I=3.75 (0.02x -5.2)0.5
10	Ferro (mg/L)		I=2 ^[2.1log(10x)]
11	Manganês (mg/L)	50 ≤ x <0,5	I=2.5x + 3.9 □ x
		0,5 ≤ X	I=5.25x ² + 2.75
12	ABS (mg/L)	0 ≤ x <1	I=-1.2x + 3.2 □ x
		1 ≤ X	I=0.8x + 1.2
13	CCE (mg/L)		I=x

Fonte: Adaptado de Prati, Pavanello e Pesarin (1971).

Uma característica importante desse índice é que: se um poluente está presente em concentrações menores que outros poluentes, mas seu efeito poluidor for maior, então haverá um impacto grande na contagem do índice.

Índice de Deininger

O índice de Deininger foi apresentado em 1971 para avaliar a qualidade da água para abastecimento público. E diferentemente de outros índices específicos para águas tratadas, distingue o manancial de onde provém a água.

A técnica Delphi (Capítulo 6) foi aplicada a um grupo restrito de doze respondentes, selecionados dentre os 142 pesquisadores que participaram da formulação WQI NSF. Foram escolhidos os parâmetros votados por 75% dos painelistas. Ao final estabeleceram-se duas formulações, com 11 e 13 parâmetros respectivamente para águas provenientes de mananciais de superfície ou subterrâneos.

Sete parâmetros são comuns ao WQI NSF, e dois deles (Fluoreto e Ferro) são exclusivos do índice para mananciais subterrâneos. O Quadro 6 apresenta uma comparação entre os pesos atribuídos por Deininger para os índices voltados aos mananciais superficiais e subterrâneos e por Brown no índice da WQI NSF.

Para a agregação dos subíndices foram propostas: uma forma aditiva e outra por média geométrica:

Aditiva:

$$I_{DEIADT} = \sum_{i=1}^n W_i * Q_i \quad \text{Equação 14}$$

Geométrica:

$$I_{DEIGEO} = \left[\prod_{i=1}^{i=11} W_i * Q_i \right]^{1/11} \quad \text{Equação 15}$$

Onde:

W = peso do parâmetro i

Q = qualidade do parâmetro i

Quadro 6 – Comparativo entre os índices de Deininger e WQI NSF

Parâmetro	Deininger Superficiais	Deininger Subterrâneos	WQI NSF
Coliformes Fecais	0,14	0,12	0,15
Cor	0,10	0,08	
DBO 5	0,09	0,08	0,10
Dureza	0,08	0,07	
Fenóis	0,10	0,08	
Ferro		0,07	
Fluoreto		0,07	
Fosfatos			0,10
Nitrato	0,10	0,09	0,10
Oxigênio Dissolvido	0,06	0,05	0,17
pH	0,08	0,07	0,12
Sólidos Dissolvidos	0,10	0,08	
Sólidos Totais			0,08
Temperatura	0,07	0,06	0,10
Turbidez	0,09	0,08	0,08
Total	1	1	1

Fonte: Adaptado de Abbasi e Abbasi (2012).

Índice de Dinius

Semelhante aos índices propostos por Horton, Brown e Deininger, esse índice é baseado em uma escala decrescente de qualidade, com valores expressos em porcentagem, sendo a água excelente aquela que corresponde a 100%. Foi proposto por S. H. Dinius em 1972 como uma tentativa de projetar um sistema para medir os custos e os impactos de esforços empreendidos para o controle de poluição.

As equações dos subíndices foram descritas considerando os diferentes níveis das variáveis poluentes, de acordo com a literatura disponível à época. São onze equações de subíndices, apresentadas no Quadro 7.

O índice final inclui, portanto onze parâmetros, agregados por somatório ponderado, com pesos estabelecidos de acordo com o grau de importância de cada um deles. Os pesos variaram de 0.5 a 5 em uma escala básica de importância. Nessa escala, de 1 a 5, revelam-se respectivamente as importâncias: muito pequena (1), pequena (2), média (3), grande (4), e muito grande (5). A soma dos pesos é 21, que é o denominador na equação de índice.

A equação do Índice de Dinius é similar aos índices de Horton e a forma aditiva do índice de Brown:

$$I_{\text{DINIUS}} = \frac{1}{21} \sum_{i=1}^n Q_i * W_i \quad \text{Equação 16}$$

Onde:

W = peso do parâmetro i

Q = qualidade do parâmetro i

Quadro 7 - Índice de Dinius - 11 Parâmetros – Equações dos Subíndices				
Subíndice	Parâmetro	Faixa	Equação	Peso
1	Oxigênio Dissolvido (%)		$I = x$	$W_i = 5$
2	DQO 5 dias (mg/L)		$I = 107 x^{-0.642}$	$W_i = 2$
3	Coliformes Totais (MPN/100ml)		$I = 100 (x)^{-0.3}$	$W_i = 3$
4	Coliformes Fecais (MPN/100ml)		$I = 100 (5x)^{-0.3}$	$W_i = 4$
5	Condutividade Específica ($\mu\text{mho/cm}$)		$I = 535x^{-0.3565}$	$W_i = 1$
6	Cloreto (mg/L)		$I = 125.8x^{-0.207}$	$W_i = 0,5$
7	Dureza (CaCo_3 , ppm)		$I = 10^{1.974-0.00132x}$	$W_i = 1$
8	Alcalinidade (CaCo_3 , ppm)		$I = 108x^{-0.178}$	$W_i = 0,5$
9	pH	$x < 6,7$	$I = 10^{0.2335+0.44}$	$W_i = 1$
		$6,7 \leq x \leq 7,58$	$I = 100$	
		$x > 7,58$	$I = 10^{4.22-0.293x}$	
10	Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)	$x_a = \text{temperatura}$, $x_b = \text{temperatura}$ padrão	$I = -4 (x_a - x_b) + 112$	$W_i = 2$
11	Cor		$I = 128 x^{-0.288}$	$W_i = 1$

Fonte: Adaptado de Dinius (1987).

Um novo índice voltado à avaliação do nível de poluição em águas doces foi proposto por Dinius em 1987. A metodologia Delphi (Capítulo 6) foi usada para averiguar: os poluentes a serem incluídos no índice; a relação entre a quantidade destes poluentes na água e a qualidade resultante; e a importância de cada variável de poluição para cada uso de água, como também para poluição global (DINIUS, 1987).

O índice de avaliação da poluição em águas doces engloba doze parâmetros considerados chaves para caracterização da água para seis diferentes usos: abastecimento público, recreação, pesca, mariscagem, agricultura e indústria. São eles: oxigênio dissolvido, DBO, coliformes totais, *escherichia coli*, pH, alcalinidade, dureza, cloreto, condutividade específica, temperatura, cor, e nitrato. Os subíndices são calculados separadamente, com equações próprias para cada parâmetro. O Quadro 8 apresenta os parâmetros e seus respectivos equações e pesos.

Quadro 8 - Índice de Dinius - 12 Parâmetros – Equações dos Subíndices				
Sub	Parâmetro	Faixa	Equação	Peso
1	Oxigênio Dissolvido (%)		$I = 0,82 \times + 10,56$	0,109
2	DBO 5 dias (mg/L)		$I = 108 (x)^{-0.3494}$	0,097
3	Coliformes Totais (MPN/100ml)		$I = 136 (x)^{-0.1311}$	0,09
4	E Coli (MPN/100ml)		$I = 106 (x)^{-0.1286}$	0,116
5	Alcalinidade (CaCo ₃ , ppm)		$I = 110 (x)^{-0.1342}$	0,063
6	Dureza (CaCo ₃ , ppm)		$I = 552 (x)^{-0.4488}$	0,065
7	Cloreto (mg/L)		$I = 391 (x)^{-0.3480}$	0,074

Quadro 8 - Índice de Dinius - 12 Parâmetros – Equações dos Subíndices				
8	Condutividade Específica (µmho/cm)		$I = 506 (x)^{-0.3315}$	0,079
9	pH	$x < 6,9$	$I = 10^{0.6803+0.1856(x)}$	0,077
		$6,9 \leq x \leq 7,1$	$I = 1$	0,09
		$x > 7,1$	$I = 10^{3.65-0.2216(x)}$	0,077
10	Nitrato		$I = 125 (x)^{-0.2718}$	0,063
11	Temperatura (°C)	xa = temperatura, xb = temperatura padrão	$I = 10^{2.004-0.0382(xa-xb)}$	0,109
12	Cor (Unidade de cor)		$I = 127 (x)^{-0.2394}$	0,097

Fonte: Adaptado de Dinius (1987).

Os subíndices são combinados usando uma função de agregação multiplicativa, na qual o peso de cada equação de subíndice foi baseado na avaliação de importância atribuída pelos representantes do painel Delphi:

$$WQI_{DINIUS12} = \prod_{i=1}^n I_i^{w_i}$$
 Equação 17

Onde

$WQI_{DINIUS12}$ é o índice de qualidade da água, um número entre 0 e 100;

I_i é o subíndice da variável poluente, um número entre 0 e 100;

W_i é o peso unitário da variável poluente, um número entre 0 e 1;

n é o número de variáveis poluentes.

Exemplo: Para o subíndice do Nitrato, tem-se a equação XX:

$$W_{I_{\text{Nitrito}}} [125(x) - 0.2718]^{0.063} \quad \text{Equação 18}$$

Índice de O'Connor

A qualidade exigida depende do uso da água, ou seja, altos teores de um parâmetro podem ser cruciais para determinado uso e terem importância apenas marginal para outros. Essa foi a premissa adotada para o desenvolvimento de dois índices. Um deles voltado à sustentação da vida selvagem e peixes (FAWL- *Fish And Wild Life*) e outro para abastecimento público (PWS - *Public Water Supply*).

Para consolidar o argumento, os índices FAWL, PWS, e também o WQI NSF, foram aplicados e comparados em cinco séries de dados. Os resultados do exercício com os novos índices (FAWL – PWS) foram mais próximos do índice de uso geral (WQI NSF) do que entre eles. Para O'Connor (BROWN et al., 1972) essa resposta legítima o destaque do uso da água no desenvolvimento dos índices de qualidade. A Quadro 9 apresenta a comparação entre os pesos utilizados nos três índices.

A fórmula utilizada por O'Connor é a mesma do índice WQI NSF complementada com um coeficiente (δ), ao qual é atribuído o valor 0 (zero) quando alguma substância tóxica ultrapassa os limites ou o valor 1 (um) quando todos os parâmetros estão dentro dos padrões estabelecidos pela legislação.

$$I_{\text{CONNOR}} = \delta \sum_{i=1}^{I=n} Q_i * W_i \quad \text{Equação 19}$$

Onde:

W_i = peso do parâmetro i

Q_i = qualidade do parâmetro i

Quadro 9 – Comparativo entre os índices O'Connor e WQI NSF			
Parâmetros	Pesos		
	WQI NSF	Índices de O'Connor	
		FAWL	PWS
Oxigênio Dissolvido	0,17	0,206	0,056
Coliformes Fecais	0,15		0,171
pH	0,12	0,142	0,079
DBO 5	0,1		
Nitrato	0,1	0,074	0,07
Fosfatos	0,1	0,064	
Temperatura	0,1	0,169	
Turbidez	0,08	0,088	0,058
Sólidos Totais	0,08		
Sólidos Dissolvidos		0,074	0,084
Fenóis		0,099	0,104
Amônia		0,084	
Fluoreto			0,079
Dureza			0,077
Cloreto			0,06
Alcalinidade			0,058
Cor			0,054
Sulfatos			0,05
Total	1	1	1

Fonte: Adaptado de Brown *et al.* (1972),

IQA CETESB

A Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB) adaptou a forma multiplicativa do WQI NSF, e designou o Índice de Qualidade de Água (IQA). A companhia utilizou o IQA CETESB no período de 1975 a 2002 como ferramenta para dar informações básicas sobre a qualidade da água dos mananciais do Estado de São Paulo.

O Quadro 10 apresenta os parâmetros do IQA CETESB, o peso relativo de cada um deles e a equação que calcula o índice,

como também a escala de valores para classificação da água. Para o novo índice a única modificação introduzida foi a substituição do parâmetro nitrogênio nitrato pelo nitrogênio. Os pesos e as curvas foram mantidos:

$$IQA_{CETESB} = \prod_{i=1}^{I=N} Qi^{wi} \quad \text{Equação 20}$$

Onde:

W = peso do parâmetro i

Q = qualidade do parâmetro i

Quadro 10 – IQA CETESB - Índice de Qualidade de Água Superficial			
Parâmetros e Pesos Relativos		Equação $IQA = \prod_{i=1}^n q_i^{w_i}$	Classificação da Qualidade da Água
Parâmetro	Peso (W)		
Temperatura da amostra	0,10		80 -100 = Ótima 52 – 79 = Boa 37 – 51 = Regular 20 –36 = Ruim 0 – 19 = Péssima
PH	0,12		
Oxigênio dissolvido	0,17		
Demanda bioquímica de oxigênio	0,10		
Coliformes termotolerantes	0,15		
Nitrogênio total	0,10		
Fósforo total	0,10		
Sólidos totais	0,08		
Turbidez	0,08		

Fonte: Adaptado de CETESB (2018),

Em 2002, a CETESB introduziu dois novos índices específicos. O IAP – Índices de Qualidade de Águas Brutas para Fins de Abastecimento Público e o IVA – Índice de Preservação da Vida Aquática, (Quadro 11). E mais adiante, em 2011, criou o IQAC – Índice de Qualidade das Águas para avaliar a qualidade das águas costeiras.

Quadro 11 – Cetesb – Índices de Qualidade de Água			
Critério de Qualidade	Índices e Grupos de Parâmetros		
Qualidade de água bruta para fins de abastecimento público	Fórmula IAP = IQA * ISTO	IQA	Parâmetros Básicos
		ISTO	Parâmetros que indicam a presença de substâncias tóxicas
Qualidade de água para a proteção da vida aquática	Fórmula IVA = (IPMCA * 1,2) + IET	IPMCA	Índice de Parâmetros Mínimos para a Preservação da Vida Aquática
		IET	Índice de Estado Trófico
Águas Costeiras	IQAC – Índice de Qualidade das Águas Costeiras, com metodologia do WQI CCME (CCME, 2017)		

Fonte: Adaptado de CETESB (2018),

Índice de Stoner

Em 1978, Jerry. D. Stoner, de maneira semelhante aos pesquisadores Nemerow e Sumitomo, em 1971 e O’Connor, em

1972, utilizou o argumento de que “diferentes usos da água” exigem “diferentes composições dos índices”, para criar dois novos índices: para abastecimento público e para irrigação.

Para cada um dos índices, foram definidos dois tipos de parâmetros. O primeiro grupo, tipo I, engloba os parâmetros considerados tóxicos mesmo em baixas concentrações (exemplos: chumbo, clordano (composto usado como pesticida) e rádio). Já as propriedades dos parâmetros do tipo II são aquelas que afetam características estéticas, como cor, sabor e odor, ou aquelas que podem tornar a água imprópria para uso, ou produzem efeitos nocivos à saúde quando suas concentrações se tornam significativamente altas (STONER, 1978).

Para o Índice de Qualidade da Água para Abastecimento Público (WQI(P)) foram selecionados 26 parâmetros do tipo I e 13 do tipo II. Os parâmetros foram escolhidos com base em: (1) perigo para a saúde humana, (2) efeitos estéticos significativos, (3) significativos efeitos econômicos e (ou) (4) capacidade para tornar a água indesejável para a maioria dos consumidores. Dentre as substâncias do Tipo I estão: arsênio, bário, cádmio, cromo, chumbo, mercúrio, e agrotóxicos organoclorados como aldrin, dieldrin, lindano. E no segundo grupo, Tipo II, são citados: ferro, sulfato e zinco (STONER, 1978).

Para o Índice de Irrigação (WQI(I)) foram indicados 5 e 16 parâmetros, respectivamente dos tipos I e II. Como constituintes com propriedades do Tipo I foram selecionados aqueles que são considerados extremamente fitotóxicos, mesmo em concentrações muito baixas: metais traço, como molibdênio e selênio, que são extremamente fitotóxicos, ou herbicidas orgânicos, como dalapon e ácido diclorofenóxiacético (2,4 - D). No grupo com propriedades do Tipo II estão: arsênio, boro, cádmio, cobre, fluoreto, níquel e zinco (STONER, 1978).

Para calcular os índices de qualidade da água são somados os efeitos das propriedades Tipo I e Tipo II.

Para os parâmetros do primeiro grupo (Tipo I) adota-se o seguinte procedimento: caso a concentração seja menor ou igual ao limite estabelecido para o parâmetro, é atribuído o valor um (1); e caso contrário, a concentração exceda ao limite, atribui-se o valor zero (0). Ou seja, se o valor de pelo menos uma propriedade do tipo I exceder a concentração limite, o valor do WQI não poderá ser maior que zero.

Os parâmetros do segundo grupo (Tipo II) são representados por funções matemáticas que representam propriedades individuais de qualidade de água, chamadas “funções de qualidade” (QF), ajustadas para cada parâmetro por um fator de classificação (RF) (STONER, 1978).

$$I_{STONER} = \sum_{i=1}^{i=n} (QF)_i * (RF)_i + \sum_{j=1}^{j=z} (Tj) \quad \text{Equação 21}$$

Onde:

I_{STONER} é o índice de qualidade da água para uso específico

n é o número de propriedades do Tipo II,

$(QF)_i$ é a Função de Qualidade i-ésimo Tipo II,

$(RF)_i$ é o Fator de Classificação do i-ésimo Tipo II,

z é o número de propriedades do Tipo I,

$(T)_j$ é o valor da i-ésima propriedade Tipo I.

OREGON WQI

O índice *Oregon Water Quality Index* (OWQI), mantido pelo departamento de qualidade ambiental do estado do Oregon (*Oregon Department Environmental Quality* - DEQ), nos Estados Unidos, foi desenvolvido em 1979, descontinuado em 1983 e rerepresentado em 1995. Ele é amplamente utilizado para avaliar a qualidade da água

para usos recreativos em geral, como pesca e natação. O OWQI não é voltado para determinar a qualidade da água para usos específicos.

O índice expressa a qualidade da água por meio de oito parâmetros: temperatura, oxigênio dissolvido (porcentagem de saturação e concentração), demanda bioquímica de oxigênio (DBO), pH, sólidos totais, nitrogênio amoniacal e nitrogênio, fósforo total e bactérias. É calculado em duas etapas:

- 1) Os resultados da análise para cada parâmetro, em diferentes unidades de medida, são transformados em valores de subíndices, sem unidade. Esses valores variam de 10 (pior caso) a 100 (ideal), dependendo da contribuição do parâmetro ao comprometimento da qualidade da água.
- 2) Os subíndices são combinados em um único valor do índice (na faixa: 10 – 100), usando como método de agregação a raiz quadrada da média harmônica. Esse método foi utilizado, pois segundo os autores atende melhor do que as médias aritmética e geométrica, comumente utilizadas (DOJLIDO et al. 1994 apud CUDE, 2001). O método permite que o parâmetro mais afetado contribua com maior influência sobre o índice de qualidade da água.

$$OWQI = \sqrt{\frac{n}{\sum \frac{1}{SI_i}}} \quad \text{Equação 22}$$

Índice Bhargava

Devendra Swaroop Bhargava descreveu dois índices de qualidade de água. Em 1983 apresentou um índice para classificação e zoneamento do Rio Ganges (BHARGAVA, 1983), e logo em 1985, uma nova proposta para o Rio Yamuna (BHARGAVA, 1985). Nos dois projetos têm-se quatro grupos de parâmetros:

O primeiro representa a qualidade bacteriana da água e por isso inclui as concentrações de organismos coliformes;

O segundo grupo inclui as substâncias tóxicas e os metais pesados, ou seja, aquelas substâncias que tem um efeito tóxico cumulativo no organismo;

O terceiro contém os parâmetros que estimulam efeitos físicos, como odor, cor, e turbidez;

E o último inclui as substâncias não tóxicas, inorgânicas e orgânicas, dentre elas: cloreto, sulfato, ferro, manganês, zinco, cobre, sólidos totais dissolvidos (TDS).

Para cada um dos parâmetros foram estabelecidos os limites de concentração máximos permitidos ($C_{\max}$). Tais limites obedecem às orientações da agência de proteção ambiental americana (EPA, do inglês *Environment Protection Agency*). Para cada grupo são dispostas funções por subíndices ($fi(Pi)$), refletindo os efeitos das concentrações dos diferentes parâmetros em uma amostra de água. O Quadro 12 mostra as funções dos subíndices e as concentrações máximas.

Quadro 12 - Funções dos subíndices de Bhargava		
Variável	Função do Subíndice	Concentração (C) Máxima
Grupo 1	$f1 = \exp^{-16(C-1)}$	Coliformes / 100 ml
Grupo 2	$f2 = \exp^{-4(C-1)}$	0,05 mg/L
Grupo 3	$f3 = \exp^{-2(C-1)}$	1 UT e 15 Unidade Cor
Grupo 4	$f4 = \exp^{-2(C-1)}$	250 mg/L

Fonte: Adaptado de Bhargava (1983,1985).

Para cálculo do índice final, os subíndices são agregados por uma função multiplicativa, de modo que $fi(Pi)$ é a função de sensibilidade da variável i e n é o número de variáveis consideradas. Com este índice a água será considerada própria para consumo quando o índice for maior do que 90.

Índice de Smith

O índice proposto por David G. Smith, em 1987, foi desenvolvido utilizando os princípios da técnica Delphi. Entretanto, contrariamente às recomendações do método, os respondentes foram autorizados a fazer contato com o coordenador e trocar opiniões, como também foram realizadas rodadas adicionais para obtenção de uma maior convergência das opiniões.

Para descrever um índice baseado nos padrões recomendados pela legislação da Nova Zelândia, foram utilizados cinco questionários, enviados a 18 especialistas em qualidade de água. O primeiro questionário foi para a escolha dos parâmetros. Após a escolha inicial foram realizadas mais duas rodadas de questionário, além do envio de material suplementar e novas perguntas aos respondentes. Para Smith (1990), estas estratégias ajudaram na resolução de questões difíceis e contenciosas. O desenvolvimento do índice constou de três etapas:

- Etapa 1: Seleção de Parâmetros, acordados entre os painelistas como sendo o mais desejável e apropriado para cada um dos quatro usos da água.
- Etapa 2: Desenvolvimento das curva dos subíndices, desenhadas a partir de gráficos em branco fornecidos aos painelistas.
- Etapa 3: Agregação dos subíndices por operador mínimo, ou seja, a variável de qualidade da água com a pontuação mais baixa é empregada para produzir a pontuação final do índice.
- O Índice de Smith abrange quatro tipos de uso da água, com e sem contato:
- Águas para uso geral (Geral): senso estético geral, manutenção de comunidades aquáticas, atividades pesqueira, pecuária, irrigação, uso ocasional de contato,

como natação, lançamento de efluentes, e abastecimento público de água após o tratamento extensivo.

- Águas brutas de rios (Banho): destinadas ao banho, como também proteção da vida aquática.
- Águas destinadas ao abastecimento de água potável, após tratamento convencional (Potável).
- Águas salgadas, destinadas à desova de peixes (Pesca).
- As relações entre os tipos de uso e os parâmetros estão sumarizadas no Quadro 13. Os parâmetros são aqueles normalmente usados para avaliação da qualidade geral da água, entretanto a obrigatoriedade, ou não, da análise depende do uso da água. O índice não inclui substâncias tóxicas, explicado porque a toxicidade não é um problema generalizado na Nova Zelândia. A amônia está incluída no índice de abastecimento de água, mas não como consequência de sua toxicidade.

Quadro 13 - Parâmetros do Índice de Smith por tipo de uso

Parâmetro	Geral	Banho	Potável	Pesca
Oxigênio Dissolvido	PO, PP	PO, PP	PO, PP	PO, PP
pH	PO, PP	PO, PP	PO, PP	PO, PP
Sólidos Suspensos	PO	PO	PO	PO
Turbidez	PO	PO	PO	PO
Temperatura (normal)	PO, PP	PO, PP	PO, PP	PO, PP
Temperatura (elevação)	PO, PP	PO, PP	PO, PP	PO, PP
DBO5 (não filtrado)	PO	PO	NE	PO
Amônia			PO, PP	
Coliformes Fecais	PO	PO, PP	PO, PP	

Legenda: PO, PP: Parâmetro Obrigatório, e para o qual existe um padrão numérico proposto; PO: Parâmetro Obrigatório; NE: embora o parâmetro não seja especificado para o uso nas avaliações de água potável, ele pode ser incluído se as condições locais o justificarem.

Fonte: Adaptado de Smith (1990).

As curvas dos subíndices, obtidas do consenso entre os painelistas e desenhadas para os nove parâmetros, representam as notas para cada concentração do parâmetro, medida na amostra. O índice final é determinado pela menor nota dentre os subíndices:

$$I_{SMITH} = \min[I1, I2, \dots, In] \quad \text{Equação 23}$$

Onde

I_{SMITH} = menor valor de todos os subíndices

A utilização do operador mínimo justifica-se, pois segundo Smith (1990) a adequação para o uso da água decorre em grande parte por preocupações com a sua característica mais precária. Além disso, têm-se outras vantagens do operador mínimo (SMITH, 1990):

Não precisa haver restrições quanto ao número parâmetros empregados, ao contrário de outros modelos de agregação que precisam limitar os parâmetros para reduzir o efeito “eclipse”;

Novos parâmetros podem ser facilmente introduzidos ou os atuais omitidos sem afetar o cálculo do índice. Isto é difícil com métodos que aplicam a ponderação para agregação dos parâmetros.

As ponderações não são necessárias, simplificando desse modo o desenvolvimento de índices.

WQI CCME

O índice estabelecido pelo conselho de ministros do meio ambiente do Canadá (do inglês, *Canadian Council of Ministers of the Environment (CCME)*) é baseado em uma combinação de três fatores, cada um dos quais variando na escala entre zero e 100. Os fatores representam: a abrangência do impacto causado por uma não conformidade (Alcance), a frequência com a qual ocorreu a não conformidade (Frequência) e a amplitude da não conformidade, ou seja, desvio entre valor não conforme e o valor esperado (meta). Ou seja:

Primeiro fator: Alcance (F1) = representa a abrangência das não conformidades, dada pela porcentagem das variáveis que estiveram não conformes em relação aos teores exigidos:

$$F1 = \left(\frac{\text{Número de variáveis que falharam}}{\text{Número total de variáveis}} \right) \times 100$$

Segundo fator: Frequência (F2) = representa a porcentagem de amostras individuais cujos parâmetros não atenderam à meta estabelecida:

$$F2 = \left(\frac{\text{Número de testes que falharam}}{\text{Número total de testes realizados}} \right) \times 100$$

Terceiro fator: Amplitude (F3) = representa o montante pela qual os valores medidos dos ensaios não atingiram as suas metas, melhor dizendo é a diferença entre o valor observado e o valor desejado. O fator F3 é calculado em três passos: primeiro define-se número de vezes pelo qual uma concentração individual é superior à meta; em seguida o montante coletivo pelo qual os testes individuais estão fora de conformidade - soma normalizada dos desvios, ou NSE (*"normalized sum of excursions"*, em inglês) e finalmente o fator é calculado por uma função assintótica que se adapta a soma normalizada dos "desvios de direção" dos objetivos (NSE) para gerar um intervalo entre 0 e 100.

$$F3 = \frac{NSE}{0,01 \times SND + 0,01} \quad F3 = \frac{NSE}{0,01 \times SND + 0,01}$$

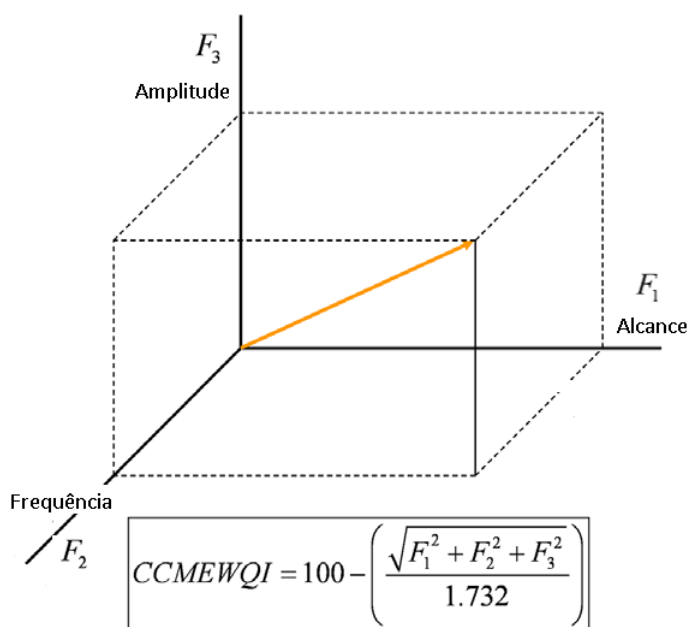
Uma vez que os fatores foram obtidos, o índice em si pode ser calculado pela soma dos três fatores, como se fossem vetores.

$$CCMEWQI = 100 - \left(\frac{\sqrt{F1^2 + F2^2 + F3^2}}{1,732} \right)$$

O comprimento do vetor é então dimensionado para o intervalo entre zero e 100. O valor de 100 é então subtraído da norma do vetor para produzir um índice que é 0 ou próximo a 0 para a qualidade da água muito ruim, e perto de 100 para qualidade da água excelente. A Figura 4 mostra o modelo conceitual do índice.

A atribuição de valores do WQI CCME para as categorias de qualidade da água é chamada de "categorização". Os valores calculados são desmembrados em cinco categorias descritivas para simplificar a apresentação, como mostrado no Quadro 14.

Figura 4 - Modelo WQI CCME.



Fonte: CCME (2017).

Quadro 14 - Esquema de categorias do WQI CCME		
Categoria	Faixas	Descrição
Excelente	95-100	A qualidade da água está protegida, com ausência de ameaça ou virtual impacto; condições muito próximas níveis naturais.
Bom	80-94	A qualidade da água está protegida, tem apenas um pequeno grau de ameaça ou impacto; as condições raramente divergem dos níveis naturais ou desejáveis.
Mediana	65-79	A qualidade da água normalmente é protegida, mas ocasionalmente ameaçada ou danificada; as condições às vezes afastam-se dos níveis naturais ou desejáveis.
Marginal	45-64	A qualidade da água é frequentemente ameaçada ou prejudicada; as condições frequentemente afastam-se dos níveis naturais ou desejáveis.
Ruim	0-44	A qualidade da água é quase sempre ameaçada ou prejudicada; as condições geralmente afastam-se dos níveis naturais ou desejáveis.

Fonte: CCME (2017).

O WQI CCME WQI tem uma característica relevante sobre a seleção dos parâmetros. Ele não determina quais parâmetros devem ser adotados, nem um número de variáveis a ser testada, ou mesmo o período de aplicação, e o tipo de corpo d'água testado (fluxo, trecho do rio, lago, etc.). Define apenas que a massa de água, o tempo, as variáveis e os teores adequados precisam ser definidos pelo usuário antes do índice ser calculado (CCME, 2017). Ou seja, o corpo hídrico onde o índice será aplicado pode ser definido por uma estação e o período escolhido depende da quantidade de dados disponíveis e os requisitos exigidos no monitoramento. A recomendação é de que, no mínimo, quatro parâmetros sejam amostrados pelo menos quatro vezes. No entanto, um número máximo de variáveis ou amostras não é especificado.

Comparação entre Índices

O Quadro 15 relaciona os parâmetros e substâncias presentes na água com os Índices de Qualidade de Água historiados neste capítulo. Os índices de Stoner e o WQI CCME ficaram de fora porque suas formulações são flexíveis quanto a inclusão ou corte de parâmetros. O Quadro 16 sintetiza os tipos de agregação usados nos índices estudados.

Quadro 15 - Parâmetros e Substâncias X Índices de Qualidade de Água											
Índice	Horton	Brown	Nemerow	Prati	Deininger	Dinius	Connor	CETESB	OWQI	Bhargava	Smith
Ano Formulação	1965	1970	1970	1971	1972	1971	1975	1975	1979	1983	1987
ABS				X							
Alcalinidade	X					X	X				
Amônia (NH ₃)				X			X				
Bactérias	X	X	X		X	X	X	X	X	X	X
CCE	X			X							
Cloreto	X		X	X		X	X			X	
Condutância Específica	X										
Condutividade						X					
Cobre										X	
Cor			X		X	X	X			X	
DBO 5		X		X	X		X	X	X		X
DQO				X		X					
Dureza					X	X	X				

Quadro 15 - Parâmetros e Substâncias X Índices de Qualidade de Água											
Fenóis					X		X				
Ferro			X	X						X	
Fluoreto							X				
Fosfatos		X					X				
Fósforo Total								X	X		
Manganês			X	X						X	
Nitrato (NO3)		X		X	X		X				
Nitrogênio Amoniacal									X		X
Nitrogênio Total								X	X		
Odor										X	
Oxigênio Dissolvido	X	X	X	X	X	X	X	X	X		X
Permanganato											
pH	X	X		X	X	X	X	X	X		X
Sólidos Dissolvidos					X		X				
Sólidos Suspensos				X							X
Sólidos Totais		X	X				X	X	X	X	
Sulfatos			X				X			X	
Temperatura		X			X	X	X	X	X		X
Turbidez			X		X		X	X		X	X
Zinco										X	

Fonte: Elaboração própria (2020).

Quadro 16 - Funções de agregação X Índices de Qualidade de Água			
Índice	Composição	Grupos	Agregação
Horton	Índice Único	Subíndices (Conjunto de Parâmetros)	Somatório ponderado, dos subíndices dividido pelo somatório dos pesos multiplicado por dois coeficientes.
	Coeficiente Temperatura	-	
	Coeficiente Poluição Manifesta	-	
Brown	Índice Único	Subíndices (Conjunto de Parâmetros)	Somatório dos produtos da qualidade do parâmetro pelo peso a ele atribuído.
Prati	Índice Único	Subíndices (Conjunto de Parâmetros)	Média aritmética dos subíndices
Dinius	Índice Único	Subíndices (Conjunto de Parâmetros)	Média aritmética do somatório do produto da qualidade do parâmetro pelo peso a ele atribuído.
Smith	Índice Único	Subíndices (Conjunto de Parâmetros)	Operador Mínimo
O'Connor	Índice Único	Subíndices (Conjunto de Parâmetros)	Somatório do produto do peso pela qualidade do parâmetro
Deininger	Índice Único – 11 parâmetros	Subíndices (Conjunto de Parâmetros)	Aditiva (somatório do produto do peso pela qualidade do parâmetro) ou Média Geométrica.
Stoner	Índice de parâmetros normalmente considerados tóxicos	Subíndices (Conjunto de Parâmetros)	Combinação linear dos parâmetros
	Índice de parâmetros que representam riscos à saúde e que afetam as características estéticas	Subíndices (Conjunto de Parâmetros)	Combinação ponderada dos parâmetros

Quadro 16 - Funções de agregação X Índices de Qualidade de Água			
Índice	Composição	Grupos	Agregação
Bhargava	Índices agrupando os parâmetros por tipo	Subíndices (Conjunto de Parâmetros do mesmo tipo)	Agregação Multiplicativa
CETESB	IQA - Índice de Parâmetros Básicos	Subíndices (Conjunto de Parâmetros)	Produto dos índices IQA e ISTO
	ISTO = Índice de Parâmetros que indicam a presença de substâncias tóxicas	Subíndices (Conjunto de Parâmetros)	

Fonte: Elaboração própria (2020).

Índices de qualidade da água subterrânea

São índices voltados exclusivamente para caracterização da qualidade das águas subterrâneas.

IQNAS

O Índice de Qualidade Natural da Água Subterrânea (IQNAS) foi desenvolvido por pesquisadores da Universidade Federal da Bahia, e surgiu como a primeira tentativa de formulação de um índice de qualidade para as águas subterrâneas explotadas nos quatro domínios hidrogeológicos básicos do Estado da Bahia, os aquíferos: sedimentar, cárstico, cristalino e metassedimentar (OLIVEIRA, I. B.; NEGRÃO, F. I. & ROCHA, 2003). O IQNAS não incorpora a presença de elementos tóxicos que cada vez mais vêm alterando a qualidade natural das águas subterrâneas, assim, refletem tão somente a qualidade ambiental das águas.

O Quadro 17 apresenta os parâmetros que compõem o IQNAS, a equação utilizada para o cálculo do índice e a escala de classificação da água.

Quadro 17 - IQNAS - Índice de Qualidade Natural de Água Subterrânea		
Parâmetros	Equação	Classificação da Qualidade da Água
Cloreto	$IQA = \prod_{i=1}^n q_i^{w_i}$	80 -100 = Ótima 52 – 79 = Boa 37 – 51 = Aceitável 0 –36 = Inaceitável
pH		
Resíduos Totais		
Dureza		
Flúor		
Nitrato		

Fonte: Oliveira, Negrão e Rocha (2003).

IQUAS

O Índice de qualidade de águas subterrâneas destinadas ao uso na produção de água potável (IQUAS) foi criado para caracterizar as águas subterrâneas destinadas ao uso na produção de água potável (ALMEIDA, 2007). O IQUAS une características do índice de Qualidade Natural da Água Subterrânea (IQNAS) com as sugestões de “agrupamento de alterações” do modelo francês SEQ ESO (CADILHAC, 2003).

A escolha dos grupos de alteração e dos parâmetros foi feita pelo método Delphi (Capítulo 6). Os “Grupos de Alterações” são conjuntos de parâmetros de mesma natureza ou cuja presença na água produzem os mesmos efeitos. Cada parâmetro tem um peso dentro do seu grupo. E cada grupo define um subíndice, ao qual é atribuído um peso na formação do índice geral. Os grupos de alteração (subíndices), os parâmetros, as equações para cálculo das notas dos parâmetros, e seus respectivos pesos, são mostrados no Quadro 18 - “Grupos de Alteração de Qualidade da Água Subterrânea”.

Quadro 18 - Grupos de Alteração de Qualidade da Água Subterrânea			
Alteração de Qualidade	Parâmetros	Limites de Validade da Equação	Equação da nota versus intensidade do parâmetro
Microorganismos	Coliformes Termotolerantes	$X < 1$	$Y = 100$ (Ausência)
		$X \geq 1$	$Y = 0$ (Presença)
Ferro e Manganês	Ferro	$X \leq 0,09 \text{ mg/L}$	$Y = 100$
		$X > 0,09 \text{ mg/L}$	$Y = 35,081 * X^{-0,4261}$
	Manganês	$X \leq 0,02 \text{ mg/L}$	$Y = 100$
		$X > 0,02 \text{ mg/L}$	$Y = 22,847 * X^{-0,3803}$

Quadro 18 - Grupos de Alteração de Qualidade da Água Subterrânea

Alteração de Qualidade	Parâmetros	Limites de Validade da Equação	Equação da nota versus intensidade do parâmetro
Mineralização - Salinidade	Cloreto	$X \leq 51 \text{ mg/L}$	$Y = 100$
		$X > 51 \text{ mg/L}$	$Y = 596,79 * X^{-0,4553}$
	Dureza	$X \leq 10 \text{ mg/L}$	$Y = 100$
		$X > 10 \text{ mg/L}$	$Y = -13,603 * \ln(X) + 130,16$
	Fluoreto	$X \leq 0,1 \text{ mg/L}$	$Y = 20$
		$0,1 < X \leq 0,8 \text{ mg/L}$	$Y = 116,79 * X^{0,7001}$
		$0,8 < X \leq 2 \text{ mg/L}$	$Y = 56,798 * X^{-1,1589}$
		$X > 2 \text{ mg/L}$	$Y = 20$
	pH	$X < 2,0$	$Y = 20$
		$2,0 \leq X \leq 5,0$	$Y = 16,1 + (3,0 * X)$
		$5,1 \leq X \leq 7,4$	$Y = -142,67 + (32,0 * X)$
		$7,5 \leq X \leq 10,0$	$Y = 316,96 - (29,2 * X)$
		$10,1 \leq X \leq 12,0$	$Y = 98,0 - (8,0 * X)$
		$X > 12 \text{ mg/L}$	$Y = 2$
	Sulfatos	$X \leq 20 \text{ mg/L}$	$Y = 100$
		$X > 20 \text{ mg/L}$	$Y = 409,02 * X^{-0,4705}$
Partículas em Suspensão	Turbidez	$X \leq 0,2 \text{ NTU}$	$Y = 100$
		$X > 0,2 \text{ NTU}$	$Y = 60,638 * X^{-0,2338}$
Nitratos	Nitrato	$X \leq 1,5 \text{ mg/L}$	$Y = 100$
		$X > 1,5 \text{ mg/L}$	$Y = 115,78 * X^{-0,3314}$

Quadro 18 - Grupos de Alteração de Qualidade da Água Subterrânea			
Alteração de Qualidade	Parâmetros	Limites de Validade da Equação	Equação da nota versus intensidade do parâmetro
Nitrogenados (fora nitrato)	Amônia	$X \leq 0,1 \text{ mg/L}$	$Y = 100$
		$X > 0,1 \text{ mg/L}$	$Y = 56,703 * X^{-0,2324}$
Micropoluentes Minerais	Mercúrio Total	$X \leq 3,5 * 10^{-6} \text{ mg/L}$	$Y = 100$
		$X > 3,5 * 10^{-6} \text{ mg/L}$	$Y = 18,547 * X^{-0,1336}$
Micropoluentes Orgânicos	Benzeno	$X < 0,001 \text{ mg/L}$	$Y = 100$
		$X > 0,001 \text{ mg/L}$	$Y = 7,9114 * X^{-0,3622}$

Fonte: Adaptado de Almeida (2007).

A equação final para o cálculo do índice IQUAS, pelo método de agregação multiplicativo, é dada por:

$$IQUAS = I_{\text{BIO}}^{0,19} * I_{\text{FEMN}}^{0,06} * I_{\text{MS}}^{0,19} * I_{\text{PS}}^{0,06} * I_{\text{NIT}}^{0,19} * I_{\text{AMO}}^{0,06} * I_{\text{MIN}}^{0,06} * I_{\text{ORG}}^{0,19}$$

Equação 24

O cálculo do índice resulta num número adimensional na faixa de 0 a 100 que descreve cinco classes de qualidade das águas subterrâneas: 100-80 (Ótima); 79-52 (Boa); 51-37 (Regular); 36-20 (Ruim); e 19-0 (Péssima).

e-IQUAS

O Índice de Qualidade de Uso da Água Subterrânea (e-IQUAS) admite a inclusão de qualquer parâmetro com significação na qualidade da água subterrânea. Ou seja, não há limites e nem obrigatoriedade de parâmetros para compor o índice. É um índice

fácil de aplicar, equilibrado do ponto de vista de complexidade técnica e totalmente flexível à inclusão de qualquer variável.

De modo similar ao IQUAS, os parâmetros que produzem os mesmos efeitos na qualidade da água são reunidos em “Grupos de Alterações” ou “subíndices”. A nota atribuída ao subíndice é a menor nota entre todos os parâmetros do grupo. O índice final (e-IQUAS) é obtido pela menor nota entre todos os subíndices.

Para calcular o e-IQUAS de uma determinada amostra são executados os seguintes procedimentos:

- a) Identificação dos parâmetros medidos na amostra, por grupo de alteração (Quadro 19).

Quadro 19 - Grupo de alterações e parâmetros de qualidade da água	
Grupo de Alteração	Parâmetro
Agrotóxicos e Pesticidas	Aldrin + Dieldrin
	Atrazina
	Bentazona
	2,4-D
	DDT (p,p'-DDT + p,p'-DDE + p,p'-DDD)
	Endossulfan (a + b + sulfato)
	Endrin
	Glifosato + Ampa
	Lindano (g-HCH)
	Metolaclo
	Metoxiclo
	Pentaclorofenol
	1,2 Diclorobenzeno
	1,4 Diclorobenzeno
	1,2-Dicloroetano
	1,1-Dicloroetano
	1,2-Dicloroetano (cis+trans)
	Triclorobenzeno (1,2,3-TCB + 1,2,4-TCB)
	1,1,2 Tricloroetano
	Alacloro
	Clordano (cis + trans)
	Malation
	Molinato
	Pendimetalina
	Permetrina

Quadro 19 - Grupo de alterações e parâmetros de qualidade da água	
Grupo de Alteração	Parâmetro
	Propanil
	Simazina
	Trifluralina
	Aldicarb+ ald. Sulfona + ald. Sulfóxido
	Carbuforan
	Clorotalonil
	Clorpirifós
	Heptacloro epóxido + Heptacloro
Elementos Filtráveis e Partículas	Ferro
	Manganês
	Turbidez
Matéria Orgânica e Nutriente	Nitrato
	Nitrito
Micro-organismos	E. coli
	Coliformes Termotolerantes
Micropoluentes Minerais	Alumínio
	Arsênio total
	Boro total
	Cádmio total
	Cianeto livre
	Cobre dissolvido
	Cromo total - (Cr III + Cr VI)
	Zinco
	Antimônio
	Mercurio total
	Níquel total
	Prata total
	Bário total
	Berílio total
	Molibidênio
	Selênio total
	Urânio total
	Vanádio total
Micropoluentes Orgânicos	Benzeno
	Benzo(a)antraceno
	Benzo(a)pireno
	Benzo(b)fluoranteno
	Benzo(k)fluoranteno
	Cloreto de vinila
	Clorofórmio
	Criseno
	Dibenzo antraceno
	Diclorometano
	Hexaclorobenzeno
	Xileno Total (o+m+p)
	Estireno
	Etilbenzeno
	Tolueno
	Tetracloreteno
	Acrilamida
	Fenóis totais (substâncias que reagem com 4-aminoantipirina)
	Indeno (1,2,3) pireno
	Tetracloreto de carbono

Mineralização e Salinidade	Chumbo total
	Cloreto
	Sódio
	Sulfato total
	Fluoreto total
	Sólidos Totais Dissolvidos (STD)
	pH
PCB	PCBs (somatória de 7)

Fonte: Adaptado da Resolução CONAMA N°396/2008 (BRASIL. MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, 2008a).

- b) Enquadramento e atribuição da nota do parâmetro por categoria de qualidade. Ou seja, atribuir nota ao parâmetro, de acordo com a concentração da substância na amostra analisada (Quadro 20). Uma relação dos parâmetros comuns, com suas categorias, está reproduzida no APÊNDICE I. Outras fichas podem ser elaboradas pelo leitor, ao avaliar as características e limites apropriados ao parâmetro que deseja analisar.

Quadro 20 - Categorias de qualidade do parâmetro				
Categoria	Concentrações (n)	Nota	Qualificação	Semáforo
1	Concentração abaixo de um valor de referência (C1)	80	Ótima	Ótima
2	Concentração entre os valores de relevância (C1 e C2)	60	Boa	Boa
3	Concentração entre os valores de relevância (C2 e C3 = valor máximo admissível)	40	Regular	Regular
4	Concentração acima do valor máximo admissível (C3)	20	Ruim	Ruim

Fonte: Almeida (2012).

- c) Definir a nota de cada grupo de alterações, pelo método de agregação de “operador mínimo”.

$$N_{\text{GRUPO}} = \min [N_{\text{par}1}, N_{\text{par}2} \dots N_{\text{par}n}] \quad \text{Equação 25}$$

Onde:

N_i = Nota do parâmetro i

N_{GRUPO} = Nota do Grupo de Alterações

- d) Atribuir a nota final ao índice **e-IQUAS**, ou seja, a menor nota entre todas as notas dos “grupos de alterações” que fazem parte do índice. O e-IQUAS é um número adimensional com valores: 20, 40, 60 e 80, associados respectivamente às classes de qualidade das águas subterrâneas: Ruim, Regular, Boa e Ótima, com mostrado no Quadro 21.

$$e\text{-IQUAS} = \min [N_{\text{GRUPO}1}, N_{\text{GRUPO}2} \dots N_{\text{GRUPO}n}] \quad \text{Equação 26}$$

Onde:

N_{GRUPO} = Nota do Grupo de Alterações

e-IQUAS = Índice de Qualidade de Uso da Água Subterrânea

Quadro 21 - Semáforo de qualidade da água subterrânea		
e-IQUAS	Qualificação	Semáforo
80	Ótima	Azul
60	Boa	Verde
40	Regular	Laranja
20	Ruim	Vermelho

Fonte: Almeida (2012).

O melhor índice

O índice de qualidade de água deve ser capaz de fornecer a melhor informação possível sobre o compartimento hídrico analisado. Essa premissa depende de duas características: formulação e dados.

A formulação deve ser simples, fácil de aplicar, e deve incluir os parâmetros exigidos para investigação mínima relativa ao objetivo de cálculo do índice. Todos os dados necessários para aplicação do índice devem estar disponíveis e serem confiáveis. Não se recomenda aplicar um índice para o qual não se dispõe de análises para todas as variáveis. Inferir teores ou eliminar variáveis fragiliza o resultado.

Assim, não existe o melhor índice. Existe o índice mais adequado ao compartimento hídrico que se pretende caracterizar.

Índices de referência

Os índices de qualidade de água desenvolvidos pela *National Sanitation Foundation* (WQI NSF) e pelo *Canadian Council of Ministers of the Environment* (WQI CCME) são utilizados em todo mundo e serviram de modelo para elaboração de novos índices em várias regiões.

São relatados usos do WQI NSF para caracterizar águas de uso geral, de forma isolada e também em associação com outras ferramentas. No Brasil, o WQI NSF serviu de base para elaboração do IQA CETESB, largamente utilizado. A Agência Nacional de Águas (ANA) utiliza o IQA CETESB para apresentar o Panorama da Qualidade das Águas Superficiais do Brasil e o relatório da Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil.

As aplicações do WQI CCME são descritas em vários estudos. O índice é aplicado para acompanhar a qualidade da água em

diferentes pontos dos cursos d'água e/ou em diferentes épocas do ano. São relatadas aplicações diretas e adaptações, como também experiências em associação com outras ferramentas de avaliação. Os guias com informações e os procedimentos necessários à aplicação do WQI CCME estão disponíveis no site institucional do CCME, na aba *Canadian Environmental Quality Guidelines*.

Comentários sobre formulações

O desenvolvimento de um índice de qualidade de água normalmente abrange quatro etapas: (1) seleção dos parâmetros ou variáveis; (2) estruturação dos subíndices, ou seja, processo de transformação dos parâmetros de diferentes unidades e faixas em uma escala comum; (3) atribuição de pesos aos parâmetros, de acordo com sua relevância e efeitos que possa causar à qualidade da água; (4) agregação dos subíndices para produzir o índice final. O índice de qualidade de água é, portanto, um número adimensional resultante de um procedimento de cálculo, no qual são usados como variáveis os parâmetros indicadores.

Várias técnicas são utilizadas para a seleção das variáveis que irão compor o índice. A técnica Delphi, caracterizada pela abordagem de opinião de especialistas é muito utilizada, e o papel desempenhado pelo comitê de respondentes deve ser enfatizado. Entretanto, a escolha pessoal dos parâmetros tem um viés subjetivo, e pode excluir parâmetros importantes, além do que o estabelecimento de pesos pode ficar comprometido.

O uso das diferentes abordagens estatísticas reduz suposições e robustece a escolha dos parâmetros mais significativos. Elas também podem ser usadas para estruturação dos subíndices, melhorando a precisão do índice.

Novas abordagens

A incorporação de outras metodologias na formulação de índices de qualidade de água é uma prática consolidada. A utilização de critérios estatísticos tem o benefício de reduzir os pressupostos subjetivos, entretanto os procedimentos são complexos e precisam ser adaptados aos dados disponíveis.

São usadas técnicas clássicas, disponíveis na literatura, como Análise Fatorial Multivariada (MFA do inglês *Multivariate Factorial Analysis*) e Análise de Componentes Principais (PCA do inglês *Principal Component Analysis*). As técnicas auxiliam na escolha os parâmetros mais significativos (seleção) e na determinação da significância de cada um deles (pesos), com base na análise dos dados de qualidade da água que se pretende analisar.

Calculadoras de IQA'S na web

WQI CCME

No site institucional do *Canadian Council of Ministers of the Environment (CCME)* são encontrados uma planilha eletrônica para cálculo e um manual do usuário do WQI CCME. O CCME, porém alerta que o êxito da aplicação está condicionado às características da região onde o índice será aplicado.

ACQUAINDEX

A comunidade ACQUAINDEX mantida por pesquisadores da Universidade Federal do Recôncavo da Bahia (UFRB), em parceria com o Grupo de Pesquisa e Extensão em Informática, Educação e Sociedade - Onda Digital (UFBA) é um repositório de trabalhos científicos na temática de Índices de Qualidade de Água. O site também oferece *links* para algumas calculadoras de índices.

O aplicativo e-IQUAS, desenvolvido com ferramentas do projeto software livre, para cálculo índice de qualidade de uso da água subterrânea (e-IQUAS) está acessível na página da comunidade (<https://noosfero.ufba.br/acquaindex>).

SCQA

O Sistema de Cálculo da Qualidade da Água - SCQA é um sistema gerenciador de banco de dados e um sistema aplicativo para calcular o Índice de Qualidade de Água (IQA), disponibilizado pelo Instituto Mineiro de Gestão das Águas (IGAM) no âmbito do Sistema Estadual de Informações sobre Recursos Hídricos (InfoHidro).

O sistema de cálculo da qualidade da água (SCQA) calcula o Índice de Qualidade de Água da WQI NSF. São três etapas: a) Cálculo da nota de cada um dos parâmetros, a partir da digitação da concentração do parâmetro e cálculo da equação correspondente; b) Cálculo do subíndice como resultado do produto entre a nota do parâmetro e o peso correspondente; c) Aplicação do método de agregação (produtório) dos subíndices, para obtenção da nota de qualidade da água.

WQI NSF *on-line*

O WQI NSF pode ser calculado por meio do aplicativo *on-line* disponibilizado pelo centro de pesquisas *Water Reserch Center*.

São exigidos resultados das análises de oxigênio dissolvido (%), coliformes fecais (colônias/100 ml), pH, demanda bioquímica de oxigênio (DBO), temperatura (°C), fosfato (mg/l), nitrato (mg/l), turbidez (NTU) e sólidos totais (mg/l). Os dados pessoais do usuário são opcionais. O sistema indica e permite alterar localização geográfica. Ao final exibe resultado do WQI NSF para a amostra.

Apêndice

APÊNDICE I - Relação de parâmetros e suas categorias

Parâmetros Valores em mg/L	Nº CAS	VMP Res CONAMA Nº 396/08 (Valores em µg/L)	Fourth Guidelines OMS	Concentração abaixo de um valor de referência ($< C1$)	Concentração entre os valores de relevância ($> C1$ e $\leq C2$)		Concentração entre os valores de relevância ($> C2$ e $\leq C3$ = valor máximo admissível)		Concentração acima do valor máximo admissível ($> C3$ = valor máximo admis- sível)
				80	60		40		20
				($< C1$)	($> C1$)	($\leq C2$)	($> C2$)	($\leq C3$)	($> C3$)
Parâmetros inorgânicos	28								
Alumínio	7429-90-5	200 µg/L	0,2 mg/l	100	100	130	130	200	200
Antimônio	7440-36-0	5 µg/L	0.02 mg/l (20 µg/l)	0,1	0,1	5	5	20	20
Arsênio	7440-38-2	10 µg/L	0.01 mg/l (10 µg/l)	1	1	2	2	10	10
Bário	7440-39-3	700 µg/L	0.7 mg/l (700 µg/l)	500	500	600	600	700	700
Berílio	7440-41-7	4 µg/L	12 µg/l	1	1	3	3	4	4
Boro	7440-42-8	500 µg/L	2.4 mg/l (2400 µg/l)	100	100	300	300	500	500
Cádmio	7440-43-9	5 µg/L	0.003 mg/l (3 µg/l)	2	2	3	3	5	5
Chumbo	7439-92-1	10 µg/L	0.01 mg/l (10 µg/l)	2	2	3	3	10	10

APÊNDICE I - Relação de parâmetros e suas categorias

Parâmetros Valores em mg/L	Nº CAS	VMP Res CONAMA Nº 396/08 (Valores em µg.L)	Fourth Guidelines OMS	Concentração abaixo de um valor de referência (< C1)	Concentração entre os valores de relevância (> C1 e ≤ C2)		Concentração entre os valores de relevância (> C2 e ≤ C3 = valor máximo admissível)		Concentração acima do valor máximo admissível (> C3 = valor máximo admis- sível)
				80	60		40		20
				(< C1)	(> C1)	(≤ C2)	(> C2)	(≤ C3)	(> C3)
Cianeto	57-12-5	70 µg/L	Não há preocupação com a saúde nos níveis encontrados na água potável	2	2	3	3	70	70
Cloreto	16887-00-6	250000 µg/L	250 mg/l	80000	80000	200000	200000	250000	250000
Cobre	7440-50-8	2000 µg/L	2 mg/l (2000 µg/l)	1000	1000	1500	1500	2000	2000
Cromo - (Cr III + Cr VI)	CrIII - 16065831 Cr VI - 18540299	50	0.05 mg/l (50 µg/l)	2	2	15	15	50	50
Ferro	7439-89-6	300	Nenhum valor de refe- rência é proposto para o ferro na água potável	300	300	1000	1000	3000	3000
Fluoreto	7782-41-4	1500	1.5 mg/l (1500 µg/l)	500	500	1000	1000	1500	1500

APÊNDICE I - Relação de parâmetros e suas categorias

Parâmetros Valores em mg/L	Nº CAS	VMP Res CONAMA Nº 396/08 (Valores em µg.L)	Fourth Guidelines OMS	Concentração abaixo de um valor de referência (< C1)	Concentração entre os valores de relevância (> C1 e ≤ C2)		Concentração entre os valores de relevância (> C2 e ≤ C3 = valor máximo admissível)		Concentração acima do valor máximo admissível (> C3 = valor máximo admis- sível)
				80	60		40		20
				(< C1)	(> C1)	(≤ C2)	(> C2)	(≤ C3)	(> C3)
Manganês	7439-96-5	100	Nenhum valor de referência é proposto para o manganês na água potável	100	100	200	200	400	400
Mercurio	7439-97-6	1	0.006 mg/l (6 µg/l)	0,5	0,5	1	1	6	6
Molibidênio	7439-98-7	70	Nenhum valor de referência é proposto para o molibidênio na água potável, isto porque as concentrações em água potável ocorrem bem abaixo dos valores de preocupação para saúde. No guia anterior o valor de referência era de 0,07 mg/l.	10	10	20	20	70	70

APÊNDICE I - Relação de parâmetros e suas categorias

Parâmetros Valores em mg/L	Nº CAS	VMP Res CONAMA Nº 396/08 (Valores em µg.L)	Fourth Guidelines OMS	Concentração abaixo de um valor de referência ($< C1$)	Concentração entre os valores de relevância ($> C1$ e $\leq C2$)		Concentração entre os valores de relevância ($> C2$ e $\leq C3$ = valor máximo admissível)		Concentração acima do valor máximo admissível ($> C3$ = valor máximo admis- sível)
				80	60		40		20
				($< C1$)	($> C1$)	($\leq C2$)	($> C2$)	($\leq C3$)	($> C3$)
Níquel	7440-02-0	20	0.07 mg/l (70 µg/l)	10	10	20	20	70	70
Nitrato (Ex- presso em N)	14797- 55-8	10.000 µg/L	11 mg/l	5000	5000	10000	10000	11000	11000
Nitrito (Ex- presso em N)	14797- 65-0	1.000 µg/L	0.9 mg/l	100	100	900	900	1000	1000
Prata	7440-22-4	100	Os dados disponí- veis são insuficientes para definições de valores de referência baseados em agra- vos à saúde humana.	50	50	60	60	100	100
Selênio	7782-49-2	10	0.04 mg/l (40 µg/l)	9	9	10	10	40	40
Sódio	7440-23-5	200.000 µg/L	200 mg/l	150000	150000	180000	180000	200000	200000

APÊNDICE I - Relação de parâmetros e suas categorias

Parâmetros Valores em mg/L	Nº CAS	VMP Res CONAMA Nº 396/08 (Valores em µg/L)	Fourth Guidelines OMS	Concentração abaixo de um valor de referência ($< C1$)	Concentração entre os valores de relevância ($> C1$ e $\leq C2$)		Concentração entre os valores de relevância ($> C2$ e $\leq C3$ = valor máximo admissível)		Concentração acima do valor máximo admissível ($> C3$ = valor máximo admis- sível)
				80	60		40		20
				($< C1$)	($> C1$)	($\leq C2$)	($> C2$)	($\leq C3$)	($> C3$)
Sólidos Totais Dissolvidos (STD)		1000000 µg/L	Não há preocupação com a saúde nos níveis encontrados na água potável	600000	600000	900000	900000	1000000	1000000
Sulfato		250000 µg/L	Não há preocupação com a saúde nos níveis encontrados na água potável	100000	100000	250000	250000	500000	500000
Urânio	7440-61-1	15	0.03 mg/l (30 µg/l)	10	10	15	15	30	30
Vanádio	7440-62-2	50	Não foram encon- tradas informações sobre o Vanádio	30	30	40	40	50	50
Zinco	7440-66-6	5000 µg/L	Não há preocupação com a saúde nos níveis encontrados na água potável	3000	3000	4000	4000	5000	5000

APÊNDICE I - Relação de parâmetros e suas categorias

Parâmetros Valores em mg/L	Nº CAS	VMP Res CONAMA Nº 396/08 (Valores em µg.L)	Fourth Guidelines OMS	Concentração abaixo de um valor de referência ($< C1$)	Concentração entre os valores de relevância ($> C1$ e $\leq C2$)		Concentração entre os valores de relevância ($> C2$ e $\leq C3$ = valor máximo admissível)		Concentração acima do valor máximo admissível ($> C3$ = valor máximo admis- sível)
				80	60		40		20
				($< C1$)	($> C1$)	($\leq C2$)	($> C2$)	($\leq C3$)	($> C3$)
Parâmetros orgânicos	26								
Acrilamida	79-06-1	0,5	0,0005 mg/l (0,5 µg/l)	0,2	0,2	0,4	0,4	0,5	0,5
Benzeno	71-43-2	5	0.01 mg/l (10 µg/l)	0,1	0,1	5	5	10	10
Benzo(a) antraceno	56-55-3	0,05	0.0007 mg/l (0.7 µg/l)	0,05	0,05	0,1	0,1	0,7	0,7
Benzo(a) pireno	50-32-8	0,05	0.0007 mg/l (0.7 µg/l)	0,05	0,05	0,1	0,1	0,7	0,7
Benzo(b) fluoranteno	205-99-2	0,05	0.0007 mg/l (0.7 µg/l)	0,05	0,05	0,1	0,1	0,7	0,7
Benzo(k) fluoranteno	207-08-9	0,05	0.0007 mg/l (0.7 µg/l)	0,05	0,05	0,1	0,1	0,7	0,7
Cloreto de vinila	75-01-4	5	0.0003 mg/l (0.3 µg/l)	0,1	0,1	0,2	0,2	0,3	0,3
Clorofórmio	67-66-3	200	0.3 mg/l (300 µg/l)	150	150	200	200	300	300

APÊNDICE I - Relação de parâmetros e suas categorias

Parâmetros Valores em mg/L	Nº CAS	VMP Res CONAMA Nº 396/08 (Valores em µg.L)	Fourth Guidelines OMS	Concentração abaixo de um valor de referência ($< C1$)	Concentração entre os valores de relevância ($> C1$ e $\leq C2$)		Concentração entre os valores de relevância ($> C2$ e $\leq C3$ = valor máximo admissível)		Concentração acima do valor máximo admissível ($> C3$ = valor máximo admis- sível)
				80	60		40		20
				($< C1$)	($> C1$)	($\leq C2$)	($> C2$)	($\leq C3$)	($> C3$)
Criseno	218-01-9	0,05	Não foram encon- tradas informações sobre Criseno	0,03	0,03	0,04	0,04	0,05	0,05
1,2 Dicloro- benzeno	95-50-1	1000 µg/L	1 mg/l (1000 µg/l)	10	10	500	500	1000	1000
1,4 Dicloro- benzeno	106-46-7	300	0.3 mg/l (300 µg/l)	10	10	200	200	300	300
1,2-Dicloroe- tano	107-06-2	10	0.03 mg/l (30 µg/l)	0,1	0,1	10	10	30	30
1,1-Dicloroe- teno	75-35-4	30	Não há preocupação com a saúde nos níveis encontrados na água potável	0,1	0,1	10	10	30	30
1,2-Dicloro- eteno (cis+- trans)	cis (156- 59-2) trans (156-60-5)	50	0.05 mg/l (50 µg/l)	10	10	40	40	50	50

APÊNDICE I - Relação de parâmetros e suas categorias

Parâmetros Valores em mg/L	Nº CAS	VMP Res CONAMA Nº 396/08 (Valores em µg.L)	Fourth Guidelines OMS	Concentração abaixo de um valor de referência ($< C1$)	Concentração entre os valores de relevância ($> C1$ e $\leq C2$)		Concentração entre os valores de relevância ($> C2$ e $\leq C3$ = valor máximo admissível)		Concentração acima do valor máximo admissível ($> C3$ = valor máximo admis- sível)
				80	60		40		20
				($< C1$)	($> C1$)	($\leq C2$)	($> C2$)	($\leq C3$)	($> C3$)
Dibenzo antraceno	53-70-3	0,05	Não foram encon- tradas informações sobre o Dibenzo antraceno	0,03	0,03	0,04	0,04	0,05	0,05
Diclorome- tano	75-09-2	20	0.02 mg/l (20 µg/l)	10	10	15	15	20	20
Estireno	100-42-5	20	0.02 mg/l (20 µg/l)	10	10	15	15	20	20
Etilbenzeno	100-41-4	200	0.3 mg/l (300 µg/l)	2	2	200	200	300	300
Indeno (1,2,3) pireno	193-39- 005	0,05	Adotar recomenda- ções previstas para os demais HAP's	0,05	0,05	0,1	0,1	0,2	0,2
PCBs (soma- tória de 7)	1336-36-3	0,5	Não foram encon- tradas informações sobre as Bifenilas Policloradas	0,3	0,3	0,4	0,4	0,5	0,5

APÊNDICE I - Relação de parâmetros e suas categorias

Parâmetros Valores em mg/L	Nº CAS	VMP Res CONAMA Nº 396/08 (Valores em µg/L)	Fourth Guidelines OMS	Concentração abaixo de um valor de referência ($< C1$)	Concentração entre os valores de relevância ($> C1$ e $\leq C2$)		Concentração entre os valores de relevância ($> C2$ e $\leq C3$ = valor máximo admissível)		Concentração acima do valor máximo admissível ($> C3$ = valor máximo admis- sível)
				80	60		40		20
				($< C1$)	($> C1$)	($\leq C2$)	($> C2$)	($\leq C3$)	($> C3$)
Tetracloreto de carbono	56-23-5	2	0.004 mg/l (4 µg/l)	1	1	2	2	4	4
Tolueno	108-88-3	170	0.7 mg/l (700 µg/l)	1	1	170	170	700	700
Tetracloreoe- teno	127-18-4	40	0.04 mg/l (40 µg/l)	1	1	10	10	40	40
Triclorobenze- no (1,2,3-TCB + 1,2,4-TCB)	1,2,4- TCB(120- 82-1); 1,3,5- TCB(108- 70-3); 1,2,3- TCB(87- 61- 6)	20	Não há preocupação com a saúde nos níveis encontrados na água potável	20	20	25	25	30	30
1,1,2 Tricloro- eteno	79-01-6	70	0.02 mg/l (20 µg/l)	2	2	10	10	20	20

APÊNDICE I - Relação de parâmetros e suas categorias

Parâmetros Valores em mg/L	Nº CAS	VMP Res CONAMA Nº 396/08 (Valores em µg.L)	Fourth Guidelines OMS	Concentração abaixo de um valor de referência ($< C1$)	Concentração entre os valores de relevância ($> C1$ e $\leq C2$)		Concentração entre os valores de relevância ($> C2$ e $\leq C3$ = valor máximo admissível)		Concentração acima do valor máximo admissível ($> C3$ = valor máximo admis- sível)
				80	60		40		20
				($< C1$)	($> C1$)	($\leq C2$)	($> C2$)	($\leq C3$)	($> C3$)
Xileno Total (o+m+p)	m (108-38-3); o (95-47-6); p (106-42-3)	300	0.5 mg/l (500 µg/l)	5	5	300	300	500	500
Agrotóxicos	27								
Alacloro	15972-60-8	20	0.02 mg/l (20 µg/l)	1	1	10	10	20	20
Aldicarb+ ald. Sulfona + ald. Sulfóxido	Aldicarb (116-06-3), ald. sulfona (1646-88- 4) e ald. sulfó- xido (1646- 87-3)	10	0.01 mg/l (10 µg/l)	1	1	5	5	10	10

APÊNDICE I - Relação de parâmetros e suas categorias

Parâmetros Valores em mg/L	Nº CAS	VMP Res CONAMA Nº 396/08 (Valores em µg.L)	Fourth Guidelines OMS	Concentração abaixo de um valor de referência (< C1)	Concentração entre os valores de relevância (> C1 e ≤ C2)		Concentração entre os valores de relevância (> C2 e ≤ C3 = valor máximo admissível)		Concentração acima do valor máximo admissível (> C3 = valor máximo admis- sível)
				80	60		40		20
				(< C1)	(> C1)	(≤ C2)	(> C2)	(≤ C3)	(> C3)
Aldrin + Dieldrin	Aldrin (309-00-2) Dieldrin (60-57-1)	0,03	0.000 03 mg/l (0.03 µg/l)	0,02	0,02	0,025	0,025	0,03	0,03
Atrazina	1912-24-9	2	0.2 mg/l (200 µg/l)	0,1	0,1	1	1	2	2
Bentazona	25057- 89-0	300	Não há preocupação com a saúde nos níveis encontrados na água potável	200	200	250	250	300	300
Carbuporan	1563-66-2	7	0.007 mg/l (7 µg/l)	1	1	3	3	7	7
Clordano (cis + trans)	57-47-9	0,2	0.0002 mg/l (0.2 µg/l)	0,1	0,1	0,12	0,12	0,2	0,2
Clorotalonil	1897-45-6	30	Excluída do Guia OMS por ser impro- vável sua ocorrência em água potável.	20	20	25	25	30	30

APÊNDICE I - Relação de parâmetros e suas categorias

Parâmetros Valores em mg/L	Nº CAS	VMP Res CONAMA Nº 396/08 (Valores em µg.L)	Fourth Guidelines OMS	Concentração abaixo de um valor de referência ($< C1$)	Concentração entre os valores de relevância ($> C1$ e $\leq C2$)		Concentração entre os valores de relevância ($> C2$ e $\leq C3$ = valor máximo admissível)		Concentração acima do valor máximo admissível ($> C3$ = valor máximo admis- sível)
				80	60		40		20
				($< C1$)	($> C1$)	($\leq C2$)	($> C2$)	($\leq C3$)	($> C3$)
Clorpirifós	2921-88-2	30	0.03 mg/l (30 µg/l)	0,1	0,1	10	10	30	30
2,4-D	94-75-7	30	0.03 mg/l (30 µg/l)	1	1	20	20	30	30
DDT (p,p'- DDT + p,p'-DDE + p,p'-DDD)	p,p'-DDT (50-29-3); p,p'-DDE (72-55-9); p,p'-DDD (72-54-8)	2	0.001 mg/l (1 µg/l)	0,1	0,1	0,6	0,6	1	1
Endossul- fan (☒ + ☒ + sulfato)	I (959-98- 8); II (33213- 65-9); sulfato (1031-07-8)	20	Não há preocupação com a saúde nos níveis encontrados na água potável	10	10	15	15	20	20

APÊNDICE I - Relação de parâmetros e suas categorias

Parâmetros Valores em mg/L	Nº CAS	VMP Res CONAMA Nº 396/08 (Valores em µg.L)	Fourth Guidelines OMS	Concentração abaixo de um valor de referência (< C1)	Concentração entre os valores de relevância (> C1 e ≤ C2)		Concentração entre os valores de relevância (> C2 e ≤ C3 = valor máximo admissível)		Concentração acima do valor máximo admissível (> C3 = valor máximo admis- sível)
				80	60		40		20
				(< C1)	(> C1)	(≤ C2)	(> C2)	(≤ C3)	(> C3)
Endrin	72-20-8	0,6	0.0006 mg/l (0.6 µg/l)	0,2	0,2	0,4	0,4	0,6	0,6
Glifosato + Ampa	1071-83-6	500	Não há preocupação com a saúde nos níveis encontrados na água potável	300	300	450	450	500	500
Heptacloro epóxido + Heptacloro	Heptacloro (76-44-8);	0,03	Não há preocupação com a saúde nos níveis encontrados na água potável	0,01	0,01	0,02	0,02	0,03	0,03
Hexacloro- benzeno	118-74-1	1	Não há preocupação com a saúde nos níveis encontrados na água potável	0,5	0,5	0,7	0,7	1	1
Lindano (□-H- CH)	58-89-9	2	0.002 mg/l (2 µg/l)	0,1	0,1	1	1	2	2

APÊNDICE I - Relação de parâmetros e suas categorias

Parâmetros Valores em mg/L	Nº CAS	VMP Res CONAMA Nº 396/08 (Valores em µg.L)	Fourth Guidelines OMS	Concentração abaixo de um valor de referência ($< C1$)	Concentração entre os valores de relevância ($> C1$ e $\leq C2$)		Concentração entre os valores de relevância ($> C2$ e $\leq C3$ = valor máximo admissível)		Concentração acima do valor máximo admissível ($> C3$ = valor máximo admis- sível)
				80	60		40		20
				($< C1$)	($> C1$)	($\leq C2$)	($> C2$)	($\leq C3$)	($> C3$)
Malation	121-75-5	190	Não há preocupação com a saúde nos níveis encontrados na água potável	190	190	500	500	900	900
Metolacoloro	51218-45-2	10	0.01 mg/l (10 µg/l)	0,1	0,1	8	8	10	10
Metoxicloro	72-43-5	20	0.02 mg/l (20 µg/l)	0,1	0,1	8	8	20	20
Molinato	2212-67-1	6	0.006 mg/l (6 µg/l)	1	1	3	3	6	6
Pendimetalina	40487-42-1	20	0.02 mg/l (20 µg/l)	1	1	10	10	20	20
Pentacoloro- fenol	87-86-5	9	0.009 mg/l (9 µg/l)	0,4	0,4	5	5	9	9
Permetrina	52645-53-1	20	0.3 mg/l (300 µg/l)	20	20	100	100	300	300

APÊNDICE I - Relação de parâmetros e suas categorias

Parâmetros Valores em mg/L	Nº CAS	VMP Res CONAMA Nº 396/08 (Valores em µg.L)	Fourth Guidelines OMS	Concentração abaixo de um valor de referência ($< C1$)	Concentração entre os valores de relevância ($> C1$ e $\leq C2$)		Concentração entre os valores de relevância ($> C2$ e $\leq C3$ = valor máximo admissível)		Concentração acima do valor máximo admissível ($> C3$ = valor máximo admis- sível)
				80	60		40		20
				($< C1$)	($> C1$)	($\leq C2$)	($> C2$)	($\leq C3$)	($> C3$)
Propanil	709-98-8	20	Não são previstos valores de referência, pois se transforma rapidamente nos metabólitos que são mais tóxicos.	5	5	15	15	20	20
Simazina	122-34-9	2	0.002 mg/l (2 µg/l)	0,1	0,1	0,5	0,5	2	2
Trifluralina	1582-09-8	20	0.02 mg/l (20 µg/l)	1	1	5	5	20	20
Microorga- nismos	2								
E. coli		Ausente em 100ml	Ausência					Ausên- cia	Ausência
Coliformes Termotole- rantes		Ausente em 100ml	Ausência	Ausência	Ausên- cia	Ausên- cia	Ausên- cia	Ausên- cia	Ausência

APÊNDICE I - Relação de parâmetros e suas categorias									
Parâmetros Valores em mg/L	Nº CAS	VMP Res CONAMA Nº 396/08 (Valores em µg.L)	Fourth Guidelines OMS	Concentração abaixo de um valor de referência ($< C1$)	Concentração entre os valores de relevância ($> C1$ e $\leq C2$)		Concentração entre os valores de relevância ($> C2$ e $\leq C3$ = valor máximo admissível)		Concentração acima do valor máximo admissível ($> C3$ = valor máximo admis- sível)
				80	60		40		20
				($< C1$)	($> C1$)	($\leq C2$)	($> C2$)	($\leq C3$)	($> C3$)
Monitora- mento Art. 13	2								
pH	Para mais dados, ver Ficha de Categoria	Não Esta- belecido	Não há preocupação com a saúde nos níveis encontrados na água potável						
Turbidez		Não Esta- belecido	1	4	4	5	5	15	
Total de Pa- râmetros	85		85						

Fonte: Almeida, (2012).

Referências

ABBASI, Tasneem; ABBASI, S. **Water Quality Indices**. [s.l.: s.n.]. DOI: 10.1016/C2010-0-69472-7.

ALMEIDA, Rosa Alencar Santana De. **Índice de qualidade de águas subterrâneas destinadas ao uso na produção de água potável (IQUAS)**. 2007. Universidade Federal da Bahia, [S. l.], 2007.

ALMEIDA, Rosa Alencar Santana De. **Índice de Qualidade de Uso da Água Subterrânea (e-IQUAS): Uma Metodologia de Modelagem Numérica Flexível**. 2012. Universidade Federal da Bahia, [S. l.], 2012.

BHARGAVA, Devendra Swaroop. Use of water quality index for river classification and zoning of Ganga river. **Environmental Pollution. Series B, Chemical and Physical**, [S. l.], 1983. DOI: 10.1016/0143-148X(83)90029-0.

BHARGAVA, Devendra Swaroop. Water quality variations and control technology of Yamuna River. **Environmental Pollution Series A, Ecological and Biological**, [S. l.], v. 37, n. 4, p. 355–376, 1985. DOI: 10.1016/0143-1471(85)90124-2. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0143147185901242>.

BRADY, Shane R. Utilizing and Adapting the Delphi Method for Use in Qualitative Research. **International Journal of Qualitative Methods**, [S. l.], 2015. DOI: 10.1177/1609406915621381.

BRASIL. MINISTÉRIO DA SAÚDE, MS. DECRETO Nº 79.367, de 9 de Março de 1977. Dispõe sobre normas e o padrão de potabilidade de água e dá outras providências. 1977. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto/1970-1979/d79367.htm.

BRASIL. MINISTÉRIO DA SAÚDE, MS. Portaria de Consolidação nº 5 de 28 de setembro de 2017. **Ministério da Saúde**, [S. l.], 2017.

BRASIL. MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, MMA. Resolução

CONAMA N° 357/2005. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, BRASIL, 2005. Disponível em: <http://www2.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=459>.

BRASIL. MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, MMA. **Resolução CONAMA N° 396/2008****Diário Oficial da União**, 2008. a. Disponível em: <http://www2.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=562>.

BRASIL. MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, MMA. RESOLUÇÃO N° 91, de 05 de Novembro de 2008. Dispõe sobre procedimentos gerais para o enquadramento dos corpos de água superficiais e subterrâneos. 2008b. Disponível em: <https://cnrh.mdr.gov.br/resolucoes/820-resolucao-n-91-de-5-de-novembro-de-2008/file>.

BRASIL. MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, MMA. RESOLUÇÃO N° 92, de 05 de Novembro de 2008. Estabelece critérios e procedimentos gerais para proteção e conservação das águas subterrâneas no território brasileiro. 2008c.

BRASIL. MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, MMA. Resolução CONAMA N° 430/2011. Complementa e altera a Resolução n° 357/2005. Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução CONAMA. **Diário Oficial da União**, 2011. Disponível em: <http://www2.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=646>.

BRASIL. MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, MMA. Resolução RDC N° 181, de 7 de Dezembro de 2016. Aprova as Prioridades, Ações e Metas do Plano Nacional de Recursos Hídricos para 2016-2020. 2016.

BRASIL. Decreto N° 24.643, de 10 de Julho de 1934. Código de Águas. Brasil, 1934.

BRASIL. LEI N° 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 União**, 1981.

BRASIL. Lei 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. **Diário Oficial da União**, 1997.

BROWN, R.M., MCCLELLAND, N. I., DEININGER, R. A., TOZER, R. G. A Water quality index: Do we dare? **Water & Sewage Works**, [S. l.], v. 117, n. 10, p. 339–343, 1970.

BROWN, Robert M.; MCCLELLAND, Nina I.; DEININGER, Rolf A.; O'CONNOR, Michael F. A Water Quality Index -Crashing the Psychological Barrier. *In: Indicators of Environmental Quality*. [s.l.: s.n.]. DOI: 10.1007/978-1-4684-1698-5_15.

CADILHAC, Laurent. Le système d'évaluation de la qualité des eaux souterraines " SEQ - Eaux souterraines ". **La Houille Blanche**, [S. l.], 2003. DOI: 10.1051/lhb/2003040.

CCME. CCME Water Quality Index user's manual 2017 Update. **Canadian Water Quality Guidelines for the Protection of Aquatic Life**, [S. l.], 2017. Disponível em: https://www.ccme.ca/files/Resources/water/water_quality/WQI Manual EN.pdf.

CETESB. Apêndice D - Índices de Qualidade das Águas. **Qualidade das Águas Interiores no Estado de São Paul**, [S. l.], 2018. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/aguas-interiores/wp-content/uploads/sites/12/2017/11/Apêndice-D-Índices-de-Qualidade-das-Águas.pdf>.

CUDE, C. G. Oregon water quality index: A tool for evaluating water quality management effectiveness. **Journal of the American Water Resources Association**, [S. l.], 2001. DOI: 10.1111/j.1752-1688.2001.tb05480.x.

DERÍSIO, J. C. **Introdução ao controle de poluição ambiental**. 5. ed. [s.l: s.n.].

DINIUS, S. H. DESIGN OF AN INDEX OF WATER QUALITY. **JAW-RA Journal of the American Water Resources Association**, [S. l.], 1987. DOI: 10.1111/j.1752-1688.1987.tb02959.x.

FREITAS, Carlos Machado De; SOBRAL, André; BARCELLOS, Christovam; GURGEL, Helen C.; PEDROSO, Marcel de Moraes. **Saúde ambiental : guia básico para construção de indicadores**. Brasília: Ministério da Saúde, 2011. Disponível em: http://bvsms.saude.gov.br/bvs/publicacoes/saude_ambiental_guia_basico.pdf.

HORTON, R. K. An Index Number System for Rating Water Quality. **Journal of Water Pollution Control Federation**, [S. l.], 1965.

KUMAR, Dinesh; ALAPPAT, Babu J. NSF-water quality index: Does it represent the experts' opinion? **Practice Periodical of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste Management**, [S. l.], 2009. DOI: 10.1061/(ASCE)1090-025X(2009)13:1(75).

LINSTONE, H. A.; TUROFF, M. The Delphi Method: Techniques and Applications. **Technometrics**, [S. l.], 1976. DOI: 10.2307/1268751.

MARINHO, M. M. O. , SANTANA, R. A., PIMENTEL, R. M. C., AGRA FILHO S. S., LOUREIRO, A., GARRIDO, E., PEREIRA F. **Indicadores de sustentabilidade ambiental**. Salvador (BA): Superintendência de Estudos Econômicos e Sociais da Bahia, 2006.

MARQUES, Joana Brás Varanda; FREITAS, Denise De. Método DELPHI: caracterização e potencialidades na pesquisa em Educação. **Pro-Posições**, [S. l.], 2018. DOI: 10.1590/1980-6248-2015-0140.

MARTÍNEZ GARCÍA, Inmaculada; PADILLA CARMONA, M^a. Teresa; SUÁREZ ORTEGA, Magdalena. Aplicación de la metodología Delphi a la identificación de factores de éxito en el emprendimiento. **Revista de Investigación Educativa**, [S. l.], 2018. DOI: 10.6018/rie.37.1.320911.

NEMEROW, NELSON LEONARD; SUMITOMO, Hisashi. **Benefits of water quality enhancement: Water pollution control research series**. New York (USA): EPA - Environmental Protection Agency, 1971.

NSF. **NATIONAL SANITATION FOUNDATION**. 2004. Disponível em: <https://www.nsf.org/>. Acesso em: 6 jul. 2020.

OLIVEIRA, I. B.; NEGRÃO, F. I. & ROCHA, T. S. DETERMINAÇÃO DO ÍNDICE DE QUALIDADE DA ÁGUA SUBTERRÂNEA – IQAS, COM BASE NOS DADOS DE POÇOS TUBULARES DO ESTADO DA BAHIA: ÁREAS PILOTO: RECÔNCAVO E PLATÔ DE IRECÊ. **Abas**, [S. l.], 2003.

OTT, W. R. WATER QUALITY INDICES: A SURVEY OF INDICES USED IN THE UNITED STATES. **Oxford University**, [S. l.], 1978.

PRATI, L.; PAVANELLO, R.; PESARIN, F. Assessment of surface water quality by a single index of pollution. **Water Research**, [S. l.], v. 5, n. 9, p. 741–751, 1971. DOI: 10.1016/0043-1354(71)90097-2. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0043135471900972>.

RAND CORPORATION. **Objective analysis. Effective solutions**. 2005. Disponível em: https://www.rand.org/pubs/corporate_pubs/CP940.html. Acesso em: 30 jul. 2020.

REVORÊDO, Luciana Da Silva; MAIA, Rodrigo Silva; TORRES, Gilson De Vasconcelos; CHAVES MAIA, Eulália Maria. O USO DA TÉCNICA DELPHI EM SAÚDE: UMA REVISÃO INTEGRATIVA DE ESTUDOS BRASILEIROS. **Revista Arquivos de Ciências da Saúde**, [S. l.], 2015. DOI: 10.17696/2318-3691.22.2.2015.136.

SICHE, Raúl; AGOSTINHO, Feni; ORTEGA, Enrique; ROMEIRO, Ademar. Índices versus indicadores: precisões conceituais na discussão da sustentabilidade de países. **Ambiente & Sociedade**, [S. l.], 2007. DOI: 10.1590/s1414-753x2007000200009.

SMITH, David G. A better water quality indexing system for rivers and streams. **Water Research**, [S. l.], v. 24, n. 10, p. 1237–1244, 1990. DOI: 10.1016/0043-1354(90)90047-A. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/004313549090047A>.

SOUZA, Donizeti Leandro De; ZAMBALDE, André Luiz. Uma visão geral da literatura sobre prospecção de tecnologias futuras: características, desafios e tendências. **Revista Gestão & Tecnologia**, [S. l.], v. 18, n. 3, p. 261–281, 2018. DOI: 10.20397/2177-6652/2018.v18i3.1264. Disponível em: <http://revistagt.fpl.edu.br/get/article/view/1264>.

STONER, Jerry D. WATER-QUALITY INDICES FOR SPECIFIC WATER USES. **US Geol Surv Circ**, [S. l.], 1978. DOI: 10.3133/cir770.

STRAND, Jon; CARSON, Richard T.; NAVRUD, Stale; ORTIZ-BOBEA, Ariel; VINCENT, Jeffrey R. Using the Delphi method to value protection of the Amazon rainforest. **Ecological Economics**, [S. l.], v. 131, p. 475–484, 2017. DOI: 10.1016/j.ecolecon.2016.09.028. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0921800915304638>.

UNESCO. **Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2019. No dejar a nadie atrás**. [s.l: s.n.].

WIKIMEDIA COMMONS. **Diagrama de Piper**. 2020. Disponível em: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/d/db/Diagramme_de_Piper.png.

ZAPOROZEC, Alexander. Graphical Interpretation of Water- Quality Data. **Groundwater**, [S. l.], 1972. DOI: 10.1111/j.1745-6584.1972.tb02912.x.

Sobre a autora



Rosa Alencar Santana de Almeida

Graduada em Engenharia Civil pela Escola Politécnica da Universidade Federal da Bahia, com mestrado em Engenharia Ambiental Urbana e Doutorado em Energia e Ambiente pela mesma instituição, atua na área de Engenharia Sanitária e Ambiental, especialmente no âmbito do saneamento ambiental, qualidade da água para consumo humano, indicadores e índices de qualidade da água.

Identificar a qualidade da água adequada aos diversos usos é uma imposição diante dos desafios relacionados aos eventos de indisponibilidade registrados na atualidade. Uma forma de caracterizar e divulgar é por meio dos índices de qualidade de água (IQA). Os índices são ferramentas aplicadas para revelar situações específicas, monitorar e examinar tendências, dar conhecimento ao público não técnico e ajudar os tomadores de decisão. Vários outros métodos foram tentados, entretanto uma das maneiras mais utilizadas mundialmente é o IQA, formato que traduz em um número o significado do grande número de substâncias presentes na água. Este livro discute os índices de qualidade de água (IQA) de forma concisa, descreve as ferramentas que os antecederam, qual a sua finalidade, como são produzidos, aborda os benefícios e as desvantagens destes instrumentos. Também relata as principais experiências na formulação de índices e indica softwares e sites para cálculo de vários tipos de formulações. É um guia de referência para estudantes, engenheiros sanitaristas e ambientais, interessados na temática de qualidade da água, se familiarizarem com os Índices de Qualidade de Água.

ISBN: 978-65-87743-25-7



Editora UFRB