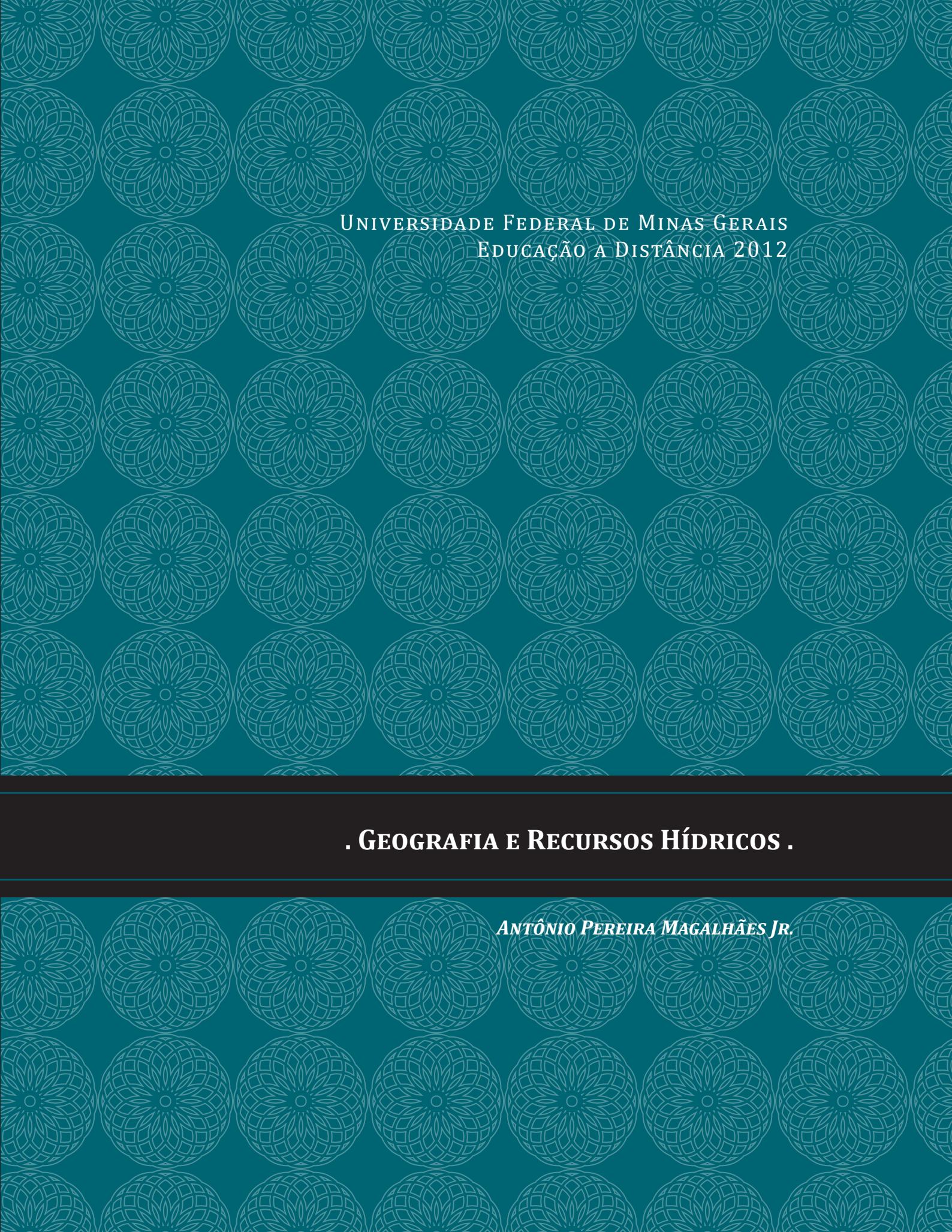




UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
EDUCAÇÃO A DISTÂNCIA 2012

. GEOGRAFIA E RECURSOS HÍDRICOS .

ANTÔNIO PEREIRA MAGALHÃES JR.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
EDUCAÇÃO A DISTÂNCIA 2012

. GEOGRAFIA E RECURSOS HÍDRICOS .

ANTÔNIO PEREIRA MAGALHÃES JR.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
EDUCAÇÃO A DISTÂNCIA 2012

. GEOGRAFIA E RECURSOS HÍDRICOS .

ANTÔNIO PEREIRA MAGALHÃES JR.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

Prof^º Clélio Campolina Diniz
Reitor
Prof^ª Rocksane de Carvalho Norton
Vice-Reitora
Prof^ª Antônia Vitória Soares Aranha
Pró Reitora de Graduação
Prof^º André Luiz dos Santos Cabral
Pró Reitor Adjunto de Graduação

CENTRO DE APOIO À EDUCAÇÃO A DISTÂNCIA

Prof^º Fernando Selmar Rocha Fidalgo
Diretor de Educação à Distância
Prof^º Wagner José Corradi Barbosa
Coordenador da UAB/UFMG

EDITOR CAED-UFMG

Prof^º Fernando Selmar Rocha Fidalgo

CONSELHO EDITORIAL

Prof^ª Ângela Imaculada Loureiro de Freitas Dalberto
Prof^ºDan Avritzer
Prof^ª Eliane Novato Silva
Prof^º Hormindo Pereira de Souza
Prof^ª Paulina Maria Maia Barbosa
Prof^ª Simone de Fátima Barbosa Tófani
Prof^ª Vilma Lúcia Macagnan Carvalho
Prof^º Wagner José Corradi Barbosa

COLEÇÃO EAD - GEOGRAFIA

Coordenadora: Fulana de Tal
Livro: Pedologia
Autor: Fulano de Tal
Projeto Gráfico: Laboratório de Arte e Tecnologia para Educação/EBA/UFMG
Este livro recebeu apoio financeiro do Pró-licenciatura (SEED-MEC) e da UAB/CAPEs.

PROGRAMA BÁSICO

Parte Teórica:

1 – Bases conceituais da disciplina

Discussão de conceitos e idéias relacionados ao estudo das águas doces: distribuição, oferta, escassez, demanda, acesso, políticas públicas e outros fundamentos de base para a disciplina.

2 – Quadro legal e institucional da gestão da água no Brasil.

A Lei da Água e a Política Nacional de Recursos Hídricos. O Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos. Instrumentos e princípios de gestão das águas.

3 - Dinâmica da água, domínios hidrológicos e ambientes fluviais.

* Bases conceituais da dinâmica da água nos ambientes naturais e transformados. Domínios e fluxos hidrológicos superficiais e sub-superficiais. Ambientes fluviais, bacias hidrográficas, planícies e terraços.

4 – Usos, pressões e impactos sobre as águas

* Principais pressões e impactos sobre as águas doces em quantidade e qualidade; Poluição hídrica; Parâmetros e indicadores de qualidade da água.

5 – Proteção e recuperação de ambientes fluviais.

Noções básicas de proteção e recuperação de ambientes fluviais.

Sites com informações e documentação a ser consultada:

- ANA – Agência Nacional de Águas.
ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica.
CETESB - Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental.
CPRM - Companhia de Pesquisas e Recursos Minerais. *Recursos Hídricos*.
EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisas Agropecuárias.
FEAM – Fundação Estadual do Meio Ambiente.
IBAMA - Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis.
IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística.
IGAM – Instituto Mineiro de Gestão das Águas.
INEMET – Instituto Nacional de Meteorologia. Brasília.
INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais.
IWMI – International Water Management Institute.
MMA – Ministério do Meio Ambiente.
OIEAU – Office International de l’eau. (em francês, espanhol e inglês).
RIOB - Rede Internacional de Organismos de Bacia.

Documentos Legais relevantes:

ESFERA FEDERAL

- Lei nº 4.771, de 15 de setembro de 1965 - Institui o Novo Código Florestal. (modificada pela Lei 7803/89).
- Lei nº 5.318, de 26/09/67 - Institui a Política Nacional do Saneamento e cria o Conselho Nacional de Saneamento.
- Lei Federal n. 6.766/79: Parcelamento do Solo Urbano.
- Lei Federal n. 6.938/81, alterada pelas leis n. 7.804/89 e 8.028/90: cria o SNUC.
- Constituição Federal de 1988 (dominialidade das águas, etc).
- Lei Federal nº 6938, de 31\08\81, que dispõe sobre a Política Nacional de Meio Ambiente (regulamentada pelo Decreto 88.351 e alterada pela Lei nº 10.165, de 27 de dezembro de 2000).
- Lei nº 7.754, de 14/04/89 - Estabelece medidas para a proteção de florestas existentes nas nascentes dos rios.
- Lei Federal da Água: 9.433/97, regulamentada pelo Decreto 41.578/01.
- Lei Federal n. 9605/98, regulamentada pelo Decreto n. 3179/99 (Lei de Crimes Ambientais).
- Resolução CONAMA n. 001/86 (complementada pelas Resoluções CONAMA 6 e 11 de 1986): definiu o escopo, as responsabilidades e as diretrizes para a implementação da avaliação de impacto ambiental. Regulamentou a elaboração de EIA e RIMA.
- Resolução CONAMA n.237/97 (autonomia municipal para licenciamento de empreendimentos de impacto local).
- Lei 9.984 de 19 de julho de 2000 – Dispõe sobre a criação da Agencia Nacional de Águas (ANA).
- Resolução CONAMA n. 303/02, que revoga a Resolução CONAMA 004/85 (parâmetros e definições de Áreas de Preservação Permanente).
- Portaria Ministério da Saúde nº 518/2004 - Estabelece os procedimentos e responsabilidades relativos ao controle e vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade (revoga a Portaria n. 1469 de 29/12/00)
- Resolução CONAMA nº 357, de 17 de março de 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 (substitui a Resolução nº 20, de 18/06/86 que Estabelece classificação das águas doces, salobras e salinas do território nacional).
- Resolução nº 369, de 28/03/2006 - Dispõe sobre os casos excepcionais, de utilidade pública, interesse social ou baixo impacto ambiental, que possibilitam a intervenção ou supressão de vegetação em Área de Preservação Permanente-APP.
- Lei nº 11.445 de 05/01/2007 – Estabelece as diretrizes nacionais para o saneamento básico.
- Resolução CONAMA nº 396, de 03/04/2008 – Dispõe sobre a classificação e diretrizes ambientais para o enquadramento das águas subterrâneas e dá outras providências.

ESFERA ESTADUAL (MINAS GERAIS)

- Deliberação Normativa 010/86 do COPAM: dispõe sobre normas e padrões para lançamento de efluentes nas coleções de águas e sobre a qualidade das águas de MG.
- Lei nº 11.720, de 29 de dezembro de 1994 - Dispõe Sobre a Política Estadual de Saneamento Básico.
- Lei Estadual 12 582/97 – reestruturação da SEMAD.
- Deliberação Normativa 29/98 do COPAM: convênio entre o Estado e municípios para licenciamento.
- Decreto 43278/03 COPAM: descentralização do COPAM em MG; URCs (Unidades Regionais Colegiadas).
- Lei n. 12.040, de 28.12.95: ICMS Ecológico.
- Lei nº 12.581, de 17 de julho de 1997 - Dispõe sobre a organização da Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável - SEMAD - e dá outras providências.
- Lei 13199 de 29 de Janeiro de 1999 - Dispõe sobre a Política Estadual de Recursos Hídricos e dá outras providências.
- Decreto nº 41.578 de 8 de Março de 2001 - Regulamenta a Lei nº 13.199, de 29 de janeiro de 1999, que dispõe sobre a Política Estadual de Recursos Hídricos.
- Lei Estadual nº 13.771 de 11 de Dezembro de 2000 - Dispõe sobre a administração, a proteção e a conservação das águas subterrâneas de domínio do Estado e dá outras providências.
- Deliberação Normativa CERH nº4, de 18 de fevereiro de 2002 - Estabelece diretrizes para a formação e funcionamento de Comitês de Bacia Hidrográfica, e dá outras providências.
- Lei nº 14.309, de 19 de junho de 2002 - Dispõe sobre as políticas florestal e de proteção à biodiversidade no Estado.
- Deliberação Normativa CERH nº 06, de 04 de outubro de 2002 - Estabelece as Unidades de Planejamento e Gestão de Recursos Hídricos do Estado de Minas Gerais. (alterada pelas Deliberações Normativas CERH nº 15, de 22 de setembro de 2004 e nº 18, de 21 de dezembro de 2005).
- Decreto Estadual nº 44.046, de 13 de junho de 2005 - Regulamenta a cobrança pelo uso de recursos hídricos de domínio do Estado.

PRIMEIRA PARTE

1. A RELEVÂNCIA DOS ESTUDOS DAS ÁGUAS DOCES	00
1.1. Hidrologia e abordagens das águas	00
1.2. Informações e reflexões sobre a realidade das águas doces no mundo e no Brasil	00
2. A GESTÃO DE RECURSOS HÍDRICOS	00
2.1. Princípios e bases conceituais	00
2.2. Elementos constituintes do processo de gestão de recursos hídricos	00
2.3. Modelos de gestão de recursos hídricos	00
2.4. Princípios das modernas abordagens de gestão dos recursos hídricos	00
2.5. Alguns aspectos estratégicos na gestão da água	00
3. A GESTÃO DAS ÁGUAS NO BRASIL: ASPECTOS HISTÓRICOS, LEGAIS E INSTITUCIONAIS	00
3.1. Dados de disponibilidades e demandas	00
3.2. Principais problemas na gestão de recursos hídricos no Brasil	00
3.3. Estrutura legal e institucional da gestão da água no Brasil	00
3.3.1. Marcos históricos	00
3.3.2. Lei nº 9.433 de 8 de Janeiro de 1997	00
3.2.2.1. Os planos diretores de bacias hidrográficas	00
3.2.2.2. Enquadramento de corpos d’água em classes de uso	00
3.2.2.3. Classes de uso preponderantes das águas territoriais brasileiras	00
3.2.2.4. Cobrança pelo uso da água	00
3.2.2.5. Outorga do uso da água (resolução CONAMA n. 357/2005)	00
3.2.2.6. Empreendimentos e usos da água sujeitos a outorga (lei federal n. 9.433, de 08/01/1997)	00
3.2.2.7. Independentes de outorga pelo poder público	00
3.2.2.8. Estudos de impactos ambientais	00

SEGUNDA PARTE

4. DINÂMICA DA ÁGUA, DOMÍNIOS HIDROLÓGICOS E AMBIENTES FLUVIAIS	00
4.1. Elementos do ciclo hidrológico	00
4.1.1. Umidade do ar	00
4.1.2. Precipitação	00
4.1.3. Interceptação da água pela vegetação	00
4.1.4. Evaporação	00
4.1.5. Evapotranspiração (ETP)	00
4.1.6. Infiltração, percolação e drenagem superficial	00
4.2. Corpos d’água e domínios hidrológicos superficiais	00
4.2.1. Morfometria fluvial	00
4.2.1.1. Elementos morfométricos de classe linear	00
4.2.1.2. Elementos morfométricos de classe zonal	00
4.2.2. Vales e planícies fluviais	00
4.2.3. Cursos d’água	00
4.2.4. Lagos	00
4.2.5. Noções de hidrometria fluvial	00
4.3. Águas subterrâneas	00
4.3.1. Aquíferos	00
4.3.2. Noções da dinâmica hidrológica subsuperficial e parâmetros hidrogeológicos	00

TERCEIRA PARTE

5. PRESSÕES, IMPACTOS E PROTEÇÃO DAS ÁGUAS	00
5.1. Funções e utilização da água	00
5.2. Qualidade da água	00
5.2.1. Poluição e contaminação	00

5.2.2. Parâmetros de qualidade das águas	00
5.2.2.1. Parâmetros físico-químicos	00
5.2.2.2. Parâmetros biológicos	00
5.2.2.3. Principais constituintes iônicos das águas	00
5.2.2.4. Principais constituintes secundários das águas	00
5.2.2.5. IQA – Índices de qualidade da água	00
5.2.3. Padrões de qualidade das águas	00
5.2.4. Exemplos de critérios ou padrões de qualidade das águas segundo seu uso	00
5.3. Categorias de poluição da água	00
5.3.1. Eutrofização	00
5.3.2. Micropoluentes inorgânicos e poluição tóxica	00
5.3.3. Assoreamento	00
5.3.4. Resíduos sólidos	00
5.3.5. Outras categorias de poluição	00
5.4. Água, saneamento e saúde	00
5.4.1. Bases conceituais	00
5.4.2. Esgotamento sanitário	00
5.4.3.Reuso de águas residuárias	00
5.5. Impactos ambientais em ambientes hídricos	00
5.5.1. Impactos no nível d’água subterrâneo	00
5.5.2. Saturação do solo e elevação do nível freático	00
5.5.3. Urbanização	00
5.5.4. Agropecuária	00
5.5.5. Usos industriais	00
5.5.6. Construção de reservatórios hídricos artificiais	00
5.6. Proteção e recuperação de ambientes hídricos	00

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 – Divisão hidrográfica nacional	00
Figura 3.2 – Mapa de unidades de planejamento e gestão de recursos hídricos de Minas Gerais	00

Figura 4.1 – Ciclo hidrológico	00
Figura 4.2 – Propostas de hierarquia fluvial de Horton e Strahler	00
Figura 4.3 - Magnitude fluvial definida por Scheidegger e Shreve	00
Figura 4.4 – Integral hipsométrica da bacia do Rio Uberabinha	00
Figura 4.5 - Parâmetros utilizados no cálculo do índice RDE para segmentos de drenagem	00
Figura 4.6 – Planície de inundação e terraço fluvial	00
Figura 4.7 – Terraços, várzea e leitos fluviais	00
Figura 4.8 – Canal meandrante	00
Figura 4.9 –Processos de erosão/deposição em canais meandrantess e formação de meandros abandonados	00
Figura 4.10 – Canais entrelaçados	00
Figura 4.11 – Canais anastomosados	00
Figura 4.12 - Lago da represa da Pampulha em Belo Horizonte–MG	00
Figura 4.13 – Forma geométrica da seção do canal	00
Figura 4.14 – Tipos de aquíferos quanto à dinâmica da água subterrânea	00
Figura 4.15 – Aquíferos e diferentes tipos de poços	00
Figura 4.16 – Tipos de porosidade possíveis na circulação da água subterrânea	00
Figura 5.1 - Ciclo do uso da água	00
Figura 5.2 – Principais substâncias poluidoras da água	00
Figura 5.3– Processo de eutrofização	00
Figura 5.4 – Lançamento de esgotos na água	00
Figura 5.5 – Inundação em área urbana	00
Figura 5.6 – Rio Tietê canalizado (São Paulo)	00
Figura 5.7 – Irrigação por aspersão	00
Figura 5.8 – Represa para geração de energia	00

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 3.1 – Usos gerais da água no mundo	00
Gráfico 3.2 – Usos da água no Brasil em termos de vazões captadas	00
Gráfico 3.3 – Percentuais da água no mundo por setores	00

Gráfico 3.4 – Volume de água consumido para a produção de alimentos 00

Gráfico 3.5 – Volume de água per capita utilizado na indústria 00

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1 - Distribuição de recursos hídricos no globo 00

Tabela 1.2 - Quantidades hídricas no globo 00

Tabela 1.3 - Maiores e menores disponibilidades hídricas por países 00

Tabela 1.4 - Limites hídricos segundo diferentes fontes (m3/hab/ano) 00

Tabela 1.5 - Relação entre disponibilidade hídrica potencial e níveis de uso (m3/hab/ano) 00

Tabela 1.6 – Percentuais de vazões de rios geradas fora dos limites nacionais 00

Tabela 3.1 – Disponibilidade hídrica por região 00

Tabela 3.2 - Distribuição espacial da produção hídrica no Sudeste do país, por estado e por bacia 00

Tabela 3.3 - Maiores bacias fluviais do Brasil 00

Tabela 3.4 - Comparação entre a situação da disponibilidade hídrica dos estados brasileiros e alguns países da Europa 00

Tabela 3.5 - Municípios brasileiros abastecidos, por tipo de manancial 00

Tabela 3.6 – Detalhamento das regiões hidrográficas brasileiras 00

Tabela 3.7 – Tipos de outorga de água 00

Tabela 4.1 - Atributos e parâmetros morfométricos hipsométricos 00

Tabela 4.2 - Características morfométricas do Índice de Hack 00

Tabela 4.3 - Áreas de preservação permanente 00

Tabela 4.4 - Grau de entrelaçamento e sinuosidade 00

Tabela 4.5 - Relação entre largura e profundidade 00

Tabela 4.6 – Tabela exemplo de referencial de coeficientes de escoamento superficial (C) 00

Tabela 4.7 - Coeficiente de rugosidade 00

Tabela 4.8 - Tempos de concentração para bacias de comprimento aproximadamente igual ao dobro da largura média e topografia ondulada (5 % média) 00

Tabela 4.10 – Fatores de correção 00

Tabela 4.11 - Intensidades aproximadas de P em mm/h, possíveis de ocorrer nas regiões SE e S do Brasil 00

Tabela 4.12 – Quadro esquemático do balanço hídrico de Thortwaite e Matter (1955) 00

Tabela 5.1 - Parâmetros de referência para consumo médio de água 00

Tabela 5.2 - Retiradas médias por habitante e por faixa populacional 00

Tabela 5.3 – Necessidades de água para usos domésticos 00

Tabela 5.4 - Exemplos de vazões específicas médias industriais 00

Tabela 5.5- Demandas estimadas de diversos produtos agrícolas 00

Tabela 5.6 – Principais hidrovias brasileiras 00

Tabela 5.7 – Usos da água e potencial consuntivo no Brasil 00

Tabela 5.8 – Principais constituintes das águas 00

Tabela 5.9 - Principais sais e gases que dão sabor à água 00

Tabela 5.10 – Dureza total em CaCO³ segundo Custódio e Llamas (1983) 00

Tabela 5.11 – Dureza total em CaCO³ segundo Von Sperling (1996) 00

Tabela 5.12 - Classificação das águas quanto ao resíduo seco 00

Tabela 5.13 - Principais microorganismos de interesse na gestão das águas 00

Tabela 5.14 - Pesos atribuídos aos parâmetros componentes do IQA 00

Tabela 5.15 - Níveis de qualidade para os valores de IQA 00

Tabela 5.16 - Índices de qualidade da água 00

Tabela 5.17 - Classes de águas doces brasileiras segundo o Conama 00

Tabela 5.18 – Parâmetros microbiológicos da água potável 00

Tabela 5.19 - Padrão de turbidez para água pós-filtração ou pré-desinfecção 00

Tabela 5.20 - Índice de Langelier (1936) 00

Tabela 5.21 - Índice de estabilidade de Ryznar (1944) 00

Tabela 5.22 - Razão N total/P total em águas residuárias lançadas em lagos 00

Tabela 5.23 - Tipos de liners usados em aterros sanitários 00

Tabela 5.24 – Processos ou sistemas de tratamentos de esgotos por tipo de parâmetro de qualidade 00

Tabela 5.25 - Distâncias recomendadas para o distanciamento de bacias de retenção de águas pluviais 00



1. A RELEVÂNCIA DOS ESTUDOS DAS ÁGUAS DOCES

BASES CONCEITUAIS SOBRE GESTÃO DAS ÁGUAS

QUADRO LEGAL E INSTITUCIONAL DA GESTÃO DAS ÁGUAS NO BRASIL

A LEI DAS ÁGUAS

1.1. Hidrologia e Abordagens das Águas

Os estudos e abordagens relacionados às águas e/ou aos recursos hídricos devem considerar a diferença conceitual entre ambos, a saber:

- **Recursos hídricos** são as águas enfocadas sob o ponto de vista da utilização ou apropriação pelo homem; são, portanto, as águas com potencial de uso ou aquelas efetivamente utilizadas.
- **Águas** quando nos referimos apenas ao termo águas, abordando todas as águas de um modo geral, sem distinção, não enfocando o seu potencial de uso pelo homem.

A água é um elemento de interesse para diversas ciências, já que é vital em termos biológicos e essencial para as múltiplas atividades econômicas. Desse modo, a água faz parte dos focos de estudo da química, da física, das engenharias, da geologia, da biologia, da geografia e de muitas outras ciências. Por outro lado, as abordagens da água podem ser diferentes, de acordo com os objetivos de cada ciência.

A **Hidrologia** é a ciência do estudo da quantidade, da circulação, da distribuição e das características das águas terrestres, bem como suas relações com o meio ambiente. É a ciência do movimento contínuo e organizado da água no planeta, chamado ciclo hidrológico. Em uma abordagem geográfica, o objeto de estudo da hidrologia não é o volume de água da hidrosfera, volume este estável à escala geológica, mas o movimento da água. Como alerta Lambert (1996), o conceito central em hidrologia é o de ciclo hidrológico.

A Hidrologia como ciência nasceu no séc. XVII com a obra “*De L’Origine des Fontaines*”, de Perrault (1674), que mediu as variáveis precipitação, vazão e evaporação na bacia do rio Sena, na França (LAMBERT, 1996).

A Hidrologia tradicional, desenvolvida no contexto das ciências exatas, apresenta basicamente três enfoques:

- **Hidrologia determinística ou genética:** estuda modelos hidrológicos físicos, com parâmetros iniciais e finais conhecidos; desenvolveu-se a partir da segunda metade do século XX, embasando-se em modelos matemáticos fundamentados na mecânica dos fluidos.

- **Hidrologia paramétrica:** estuda as relações entre parâmetros físicos e os processos hidrológicos em unidades espaciais, como as bacias hidrográficas.
- **Hidrologia probabilística ou estocástica:** estuda modelos estatísticos com previsão de continuidade dos dados; embasou-se na hidrologia aritmética desenvolvida a partir da segunda metade do século XIX, quando eram feitas medidas regulares de precipitação e vazão de rios, enfatizando-se médias anuais ou mensais; a partir da segunda metade do século XX, desenvolveu-se a hidrologia probabilística por meio da engenharia, enfatizando-se a análise de frequência e probabilidades de eventos extremos.

Enquanto a Hidrologia tradicional possui uma conceituação já consolidada na literatura com suas origens na engenharia, diferentes outras abordagens realizam estudos hidrológicos não tradicionais, atendendo aos princípios e objetivos de cada ciência. Abaixo, destacamos algumas das abordagens hidrológicas tradicionais e não tradicionais:

TRADICIONAIS

- **Abordagem conceitual ou empírico-descritiva:** é a abordagem da hidrologia clássica, quando não há preocupação com aspectos físicos das unidades espaciais de estudo, como as bacias hidrográficas, enfocando-se a descrição matemática dos processos hidrológicos; é uma abordagem de domínio de engenheiros hidrólogos.
- **Abordagem hidrodinâmica ou hidráulica:** enfocam-se os fluxos energéticos e os parâmetros físicos da água e dos seus meios de propagação; é mais aplicada pelos engenheiros hidrólogos.

NÃO TRADICIONAIS

- **Abordagem agronômica ou ecofisiológica:** busca-se dar ênfase em processos agroclimatológicos como a evapotranspiração, bem como ao estudo dos mecanismos físicos e biológicos dos fluxos hídricos no sistema solo-planta-atmosfera; é aplicada prioritariamente por agrônomos.
- **Abordagem biológica:** busca-se dar ênfase aos elementos e processos hidrológicos condicionantes da biota aquática, bem como as interações entre a água e os organismos vivos, destacando-se o estudo de bioindicadores de qualidade da água; essa abordagem é aplicada principalmente pelos biólogos.
- **Abordagem geográfica:** a geografia é extremamente abrangente em termos de objetos de estudo e dentre os aspectos enfocados por essa ciência está a dinâmica da água ao longo das etapas do ciclo hidrológico; nessas etapas, a geografia se preocupa com o condicionamento que a água exerce nos usos e atividades humanas, bem como suas consequências em termos de impactos qualitativos e quantitativos nas águas; portanto, pensar em uma abordagem geográfica das águas é pensar de modo distinto das abordagens anteriores, já que a geografia tem o diferencial de associar e relacionar os elementos do meio físico e do meio humano.

Podemos compreender uma abordagem geográfica das águas do seguinte modo:

É a abordagem que visa à análise das águas em seu contexto espacial e temporal, buscando a descrição e interpretação da estrutura e de processos físicos e humanos ocorrentes em domínios hidrológicos e suas relações com domínios ambientais associados.

A partir do enfoque nas águas, busca-se identificar e analisar relações e interações de causa-efeito nas interfaces hidrosfera-litosfera-atmosfera-biosfera-antroposfera, enfatizando-se o papel da água na gênese e dinâmica de espaços naturais e transformados pelo homem.

1.2. Informações e Reflexões sobre a Realidade das Águas Doces no Mundo e no Brasil

O estudo das águas compreende a análise da sua distribuição espacial e temporal no planeta. A distribuição das águas doces não é homogênea, havendo áreas e países muito ricos e muito pobres em água. A escassez ou falta de água pode não apenas inviabilizar atividades humanas como a agricultura e a pecuária, como inviabilizar a própria vida devido ao seu caráter vital. O conceito de escassez hídrica está ligado exatamente à falta de água para atender aos usos e demandas de água, em quantidade e qualidade.

Alguns termos adotados pela **Organização das Nações Unidas – ONU** – nos últimos anos, tornaram-se referência na literatura para o estudo de questões referentes à gestão de recursos hídricos. Informar-se sobre estes conceitos é importante para se compreender a literatura sobre as questões hídricas. Alguns termos relevantes são:

- **Acesso à água potável:** proporção da população com acesso à água potável na residência ou a uma conveniente distância da residência.
- **População atendida:** inclui a população urbana servida por conexões domiciliares ao sistema de água, seja a população urbana não servida por conexões domiciliares, mas com razoável acesso a poços, tanques ou torneiras públicas, ou a população rural com razoável acesso à água potável.
- **Razoável acesso à água potável:** abastecimento domiciliar de água ou a quinze minutos de distância de caminhada; atualmente, uma definição mais apropriada deve ser adotada levando em conta as condições locais – em áreas urbanas, uma distância de não mais de 200 m de uma residência a um ponto público de abastecimento de água; e em áreas rurais, o razoável acesso implica que ninguém deve gastar uma parte desproporcional de seu tempo diário procurando água para as necessidades familiares.
- **Distância conveniente da água:** 200 m de distância entre a residência e o ponto de captação de água.
- **Adequada quantidade de água:** quantidade necessária para satisfazer as necessidades metabólicas, higiênicas e domésticas de cada indivíduo; situa-se por volta de 20 litros de água limpa por pessoa/dia.

- **Água limpa:** esse termo depende do uso da água; em geral, a água não deve conter agentes químicos ou biológicos em níveis de concentração que prejudiquem a saúde; água limpa inclui águas superficiais tratadas e não tratadas, mas descontaminadas, como as derivadas de poços protegidos e nascentes; e águas superficiais não tratadas como as de lagos e rios devem ser consideradas como limpas somente se a qualidade da água for regularmente monitorada e considerada aceitável pelos órgãos de saúde pública.

Problemas de escassez hídrica não são recentes no mundo. Estudos relatam que a escassez hídrica já afetava as sociedades indígenas da América pré-hispânica, bem como as populações dos impérios romano, grego e chinês. Buscando dominar a sazonalidade da oferta das águas em áreas com climas áridos ou semiáridos, essas populações eram obrigadas a superar a escassez hídrica com a construção de aquedutos, poços e reservatórios artificiais.

A escassez hídrica é frequente ao longo de toda a história humana, e o seu aspecto vital motivou o **Comitê de Direitos Econômicos, Culturais e Sociais da ONU** a aprovar, em 2002, uma observação geral sobre a água, considerando-a como **direito humano** (Genebra, 29/11/02). Este reconhecimento foi um grande avanço em termos sociais, já que as agendas e políticas nacionais vinham tendendo a considerar o acesso à água como uma necessidade vital e não como um direito, cuja diferença é muito importante. Reconhecer o direito significa que a coletividade tem a responsabilidade de garantir as condições de acesso a todos; e reconhecer a necessidade vital não admite nenhuma responsabilidade coletiva, mas apenas individual.

Muitos dos problemas de escassez hídrica no planeta resultam do modo pouco adequado como a humanidade explora e utiliza as águas. Os problemas de superexploração e do desperdício das águas devem ser combatidos para que os processos de gestão possam equilibrar as demandas e a oferta do recurso. Muitos brasileiros que vivem em regiões de climas úmidos agem segundo a cultura do desperdício de água. Desde crianças, aprendemos que o Brasil é um país rico em recursos hídricos (12 % da água doce do planeta) e que, portanto, a água estará sempre jorrando em nossas torneiras.

Porém, não fomos acostumados a associar essa cultura da abundância hídrica, em termos absolutos, com sua distribuição irregular no espaço. Temos áreas muito ricas em água como a Amazônia, e outras com escassez como o sertão nordestino. Estas diferenças são resultantes de aspectos naturais, já que o quadro climático é espacialmente diferente. O clima semiárido vigente no sertão nordestino é muito sazonal, havendo concentração de chuvas em um pequeno período do ano. Já na Amazônia o clima equatorial fornece elevados índices pluviométricos ao longo de todo o ano.

Por outro lado, a desigualdade espacial da oferta hídrica também é resultante dos seus aspectos de qualidade. A água pode ser abundante, mas pode estar poluída e não ser apropriada para diferentes usos e demandas. De que adianta morar ao lado de um rio se as águas poluídas impedem o seu uso para beber, irrigar ou nadar? Este quadro representa uma escassez relativa de água, ou seja, a água existe, mas não pode ser usada. A quantidade de água que circula no ciclo hidrológico é relativamente constante

ao longo dos anos, mas sua qualidade vem sendo bastante comprometida na maior parte das áreas habitadas do planeta.

Além da escassez natural absoluta de água devido a variações de índices pluviométricos, ou da escassez relativa devido à poluição, deve-se destacar a escassez derivada das demandas elevadas. Há cerca de 113 bilhões de m³ de água circulando no ciclo hidrológico, mesma quantidade existente há 2.000 anos; porém, a população mundial era, naquela época, inferior a 3 % do total atual. A quantidade se mantém constante, mas as demandas aumentam geometricamente. Há um século que as necessidades de água dobram a cada quinze anos nos países industrializados. Da Revolução Industrial a 1992, a população cresceu oito vezes, enquanto a quantidade de água usada pelo homem aumentou 35 vezes (MAYS, 2007). As demandas desenfreadas também geram escassez em áreas onde havia abundância de água.

Há uma tendência, por parte da população que vive em áreas com abundância hídrica, em pensar que a água é um recurso infinito ou renovável. Realmente, a água mantém certa regularidade nos volumes existentes no ciclo hidrológico do planeta ao longo do tempo, mas em escala local, regional ou mesmo nacional a água pode escassear ou acabar. Por motivos de superexploração (demandas elevadas), poluição (comprometimento da qualidade) ou degradação ambiental (desmatamentos, erosão acelerada, etc.), a água doce superficial pode desaparecer de um local ao longo do tempo.

Há uma mudança dos volumes de água presentes em cada vetor do ciclo hidrológico, ou seja, pode haver aumento das taxas de escoamento superficial e evaporação em lugar da infiltração, levando a uma redução do abastecimento das áreas subterrâneas. Deste modo, as chuvas continuam caindo, mas a água não fica retida no solo e subsolo, evaporando e/ou escoando rapidamente para os rios, resultando em certa aridez superficial.

Portanto, a água é um recurso finito e não renovável se utilizada de forma irracional ou se for degradada, já que não desaparece do planeta (ciclo hidrológico), mas pode desaparecer de certas áreas. Como exemplo, estimativas simplificadas revelam que o tempo de residência da água (tempo que a água permanece em certo ambiente) varia entre 8,2 dias, 17,3 dias e 4.786 anos para os volumes armazenados, respectivamente na atmosfera, nos rios e nos aquíferos subterrâneos (CHOW, MAIDMENT & MAYS, 1988), mostrando que a água, sob essa perspectiva, pode ser vista como recurso não renovável.

Apesar dos esforços realizados em diversos países do globo para melhorar o uso e o manejo dos recursos hídricos, as crescentes demandas e a degradação da qualidade da água seguem, em geral, aumentando, assim como os riscos de inundações e secas. Dado que a disponibilidade anual renovável de água pura é relativamente fixa, os especialistas advertem que a eminente crise de recursos hídricos será o principal problema ambiental da próxima década. O crescimento da população, a escassa capacidade de manejo da água, a fragmentação das estruturas institucionais, a necessidade de melhorar o planejamento, e a gestão e a conservação da água são alguns dos fatores que explicam os crescentes problemas referentes aos recursos hídricos no globo.

O fato de ser essencial às atividades humanas e insubstituível no que diz respeito à vida faz do acesso à água um direito individual e coletivo, humano e social (RICCARDO PETRELLA, 2004). No nível individual, a **ética das águas** exige uma reavaliação dos estilos de vida e padrões de consumo. Como insumo produtivo e como receptora de grande parte dos efluentes líquidos e sólidos da humanidade (esgotos, lixo), a água tem participação em quase todos os produtos que compramos e é poluída pela maior parte dos que jogamos fora. Como exemplo, produzir um carro comum pode consumir mais de 50 vezes o seu peso em água. Assim, enquanto o mercado falha ao incorporar os custos sociais e ecológicos de produção, mudanças voluntárias nos padrões de consumo têm um papel fundamental na busca da sustentabilidade.

As tendências atuais de gestão da água enfocam a necessidade de gestão racional da demanda, e não apenas da oferta. Manter e aumentar os volumes de água potencialmente utilizáveis é um aspecto importante dos processos de gestão dos recursos hídricos, mas deve-se também buscar gerenciar os usos e as demandas, visando à compatibilização de usos e a minimização dos conflitos, bem como o equilíbrio entre os volumes existentes e as demandas.

Para isto, alguns princípios éticos relativos ao comportamento humano em relação às águas vêm sendo destacados em encontros ambientais e na literatura internacional (SELBORNE, 2002):

- **Princípio da dignidade humana:** não há vida sem água.
- **Princípio da participação:** a gestão dos assuntos referentes às águas é de interesse comum e cabe a todos participar.
- **Princípio da solidariedade:** a existência ou a falta de água afeta os seres humanos de modo interdependente, exigindo a soma de esforços e interesses.
- **Princípio da igualdade humana:** todos os seres humanos são iguais e têm direitos iguais sobre as águas.
- **Princípio do bem comum:** as águas representam um bem comum da humanidade.
- **Princípio da economia:** as águas devem ser concebidas e utilizadas sob a perspectiva do uso prudente e eficiente, havendo equilíbrio entre usos, demandas e proteção.

Para processos eficientes de gestão das águas, devem-se conhecer os dados quantitativos da água, ou seja, a sua disponibilidade. A disponibilidade hídrica tornou-se um fator de desenvolvimento econômico e social. As necessidades de água crescem com o desenvolvimento, a ponto de sua demanda poder ser considerada como índice de desenvolvimento, assim como o aço e a eletricidade (LAMBERT, 1996).

O planeta dispõe de 1,386 bilhão de km³ de água, sendo que 1m³ equivale a 1.000 litros (CLARKE E KING, 2005). Sua distribuição pode ser analisada em termos da superfície da

terra que ocupa ou da distribuição em volume. Em termos de superfície terrestre, as águas apresentam a seguinte distribuição (CLARKE E KING, 2005):

- mares/oceanos – 71 %
- geleiras – 10 %
- desertos/áreas semiáridas – 9 %
- áreas com águas disponíveis –10 %

No entanto, apenas 1/5 da água disponível na superfície é potável e, do total de águas subterrâneas, 50 % são inviáveis para uso humano, pois se situam a mais de 800 m de profundidade.

A distribuição dos recursos hídricos nos continentes do planeta pode ser observada na Tabela 1.1., apresentada a seguir. Observa- se que a Ásia e a América do Sul concentram a maior quantidade de recursos hídricos.

Tabela 1.1. Distribuição de Recursos Hídricos no Globo				
CONTINENTE	ÁREA (1000 Km2)	VAZÃO ESPECÍFICA MÉDIA ANUAL (L/s/ Km2)	VAZÃO MÉDIA ANUAL (m3/s)	VOLUME MÉDIO ANUAL (Km3/s)
Europa	10.500	9,7	102.000	3.210
Ásia	43.475	10,5	458.000	14.410
África	30.120	4,8	145.000	4.570
América do N.	24.200	10,7	260.000	8.200
América do S.	17.800	21,0	334.000	11.760
Austrália e Tasmânia	7.683	1,44	11.000	348
Oceania	1.267	51,1	65.000	2.040
Antártica	3.980	5,2	73.000	2.310
TOTAL	149.025	10,0	1.488.000	46.808

Fonte: UNESCO (1978)

Quanto ao volume, as águas salgadas representam 97,5 % do total existente no planeta, enquanto as águas doces respondem por 2,5 %, como mostra a Tabela 2, a seguir.

Tabela 1.2. Quantidades Hídricas no Globo				
RESERVATÓRIO	ÁREA (103 km2)	VOLUME (106 km3)	% DO VOLUME TOTAL	% DO VOLUME DE ÁGUA DOCE
Águas salgadas (oceanos, mares)	361.300	1.338	97,5	-
Água doce	-	35	2,53	100
Umidade do solo	-	0,016	0,001	0,05
Calotas polares	16.227	24,1	1,74	68,9
Antártica	13.980	21,6	1,56	61,7
Groelândia	1.802	2,3	0,17	6,68
Ártico	226	0,084	0,006	0,24
Geleiras	224	0,041	0,003	0,12
Solos gelados	21.000	0,3	0,022	0,86
Lagos	2.059	0,176	0,013	0,26
Água doce	1.236	0,091	0,007	-
Água salgada	822	0,085	0,006	-
Pântanos	2.683	0,011	0,0008	0,03
Rios	14.880	0,002	0,0002	0,006
Biomassa	-	0,001	0,0001	0,003
Vapor atmosfera	-	0,013	0,001	0,04
TOTAIS	-	1.386	100	-

Fonte: UNESCO/PHI (1998)

No balanço hídrico global, cerca de 577.200 km³/ano de água transformam-se em vapor, sendo 503.000 a partir dos oceanos, e cerca de 458.000 km³/ano de água precipitam-se nos oceanos (chuva, neve, neblina) e 119.000 km³/ano nos continentes (UNESCO/PHI, 1998).

As águas apresentam um período de retorno (ou de renovação) que se refere ao tempo em que um mesmo volume de água, caso fosse retirado, retornaria ao mesmo ambiente ao longo do tempo. Este período é importante para estudarmos os possíveis impactos dos usos humanos, levando-se em conta o tempo que o ambiente necessita para se recuperar. Os dados a seguir mostram alguns períodos de retorno, em anos, para as águas presentes em diferentes ambientes (UNESCO/PHI, 1998):

- umidade do solo – 1 ano
- lagos: 10 anos
- rios – 0,032 ano
- oceanos – 3000 anos
- vapor atmosférico – 0,027 ano
- aquíferos profundos – 5000 ano
- geleiras – 8300 anos

Em muitas situações, os problemas relacionados à água não decorrem de sua disponibilidade (oferta), mas da falta de acesso e da falta de uso adequado das águas. Nestes casos, a crise da água é uma crise de eficiência da gestão. A busca da eficiência social, econômica e ecológica da gestão e da utilização da água é a principal estratégia de combate aos problemas de escassez da água, mesmo onde essa escassez possui causas naturais. Nas regiões semiáridas, por exemplo, uma gestão eficiente das águas pluviais permitiria que as água fossem armazenadas nos curtos, mas intensos, períodos de chuva ao longo do ano. As águas armazenadas podem servir a diferentes usos durante os períodos de estiagem.

O índice de acesso à água potável tem sido definido pela ONU e pelo Banco Mundial como o percentual da população que pode obter água potável com razoável facilidade. Nas zonas urbanas, a razoável facilidade significa a existência de um poço ou fonte pública a menos de 200 metros da residência, enquanto nas zonas rurais significa que os habitantes não têm que passar demasiado tempo diário para buscar água (WORLD BANK, 2010). Este critério é adotado no Brasil, pelo **Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE**. A adoção de índices de acesso à água é importante quando são analisados os dados no nível internacional. Em 2006, mais de um bilhão de pessoas tinha problemas de acesso à água potável, e 2,6 bilhões não eram atendidas por serviços de saneamento básico (PNUD, 2006).

Outros índices visam quantificar aspectos de disponibilidade quantitativa da água. Um deles é o **Índice de Pobreza da Água**, desenvolvido pelo **Centro para a Ecologia e Hidrologia**, de Wallingford, Reino Unido, com o auxílio de mais de 100 especialistas sobre águas no mundo (LAWRENCE *et al*, 2002). Este índice permite a classificação de 147 países, a partir dos seguintes componentes: recursos, acesso, capacidade, uso e impacto ambiental. Entre os resultados, é interessante notar que alguns dos países mais ricos do mundo, como EUA e Japão, encontram-se entre os últimos postos do *ranking*. O índice é calculado com base na pontuação de 0 a 20 para cada uma das cinco dimensões, resultando em uma escala de 0 a 100. O Brasil obteve uma classificação considerada média (56 a 61,9 pontos).

O índice aproveita bases de dados já consolidadas, como o **Índice de Desenvolvimento Humano – IDH** – da ONU, e demonstra que não é a quantidade de recursos disponíveis

que determina o nível de pobreza de um país, mas, sim, a eficiência do uso dos recursos. O Índice de Pobreza da Água permite identificar dois conjuntos de países:

- **Países mais ricos em água** (ordem decrescente): Finlândia, Canadá, Islândia, Noruega, Guiana, Suriname, Áustria, Irlanda, Suécia e Suíça.
- **Países mais pobres em água** (ordem decrescente): Haiti, Níger, Etiópia, Eritréa, Malawi, Djibouti, Chade, Benin e Ruanda.

Outros estudos também classificam os países com base na disponibilidade hídrica, como é o caso do trabalho da **UNESCO** (2003), que os apresenta com maiores e menores disponibilidades hídricas, em metros cúbicos por habitante. Alguns dos dados estão presentes na Tabela 3, apresentada a seguir.

Tabela 1.3. Maiores e Menores Disponibilidades Hídricas por Países	
PAÍSES COM MAIOR DISPONIBILIDADE DE ÁGUA	M ³ /HAB
Guiana Francesa	812
Islândia	609
Suriname	292
Congo	275
Países com menor disponibilidade de água	m ³ /hab
Kuwait	10
Faixa de Gaza (Palestina)	52
Emirados Árabes Unidos	58
Ilhas Bahamas	66

Fonte: UNESCO (2003)

O consumo médio diário de água em países desenvolvidos é de 2.000 l\hab. Este valor é considerado pela ONU o limite adequado para a manutenção de uma boa qualidade de vida, como é adotado nos relatórios das Nações Unidas sobre o **Desenvolvimento dos Recursos Hídricos no Mundo** (UNESCO, 2009). A ONU calcula que a oferta hídrica entre 1.000 e 2.000 m³/ano por habitante é suficiente para “usufruto do conforto moderno e para o desenvolvimento sustentável”.

A *European Environment Agency* e as Nações Unidas utilizam o **Índice de Retirada de Água** ou *water exploitation index*, que é igual ao quociente entre a retirada total anual e a vazão média de longo período. Este índice adota a seguinte classificação (ANA, 2005):

- < 5% – situação excelente e há pouca ou nenhuma atividade de gerenciamento necessária; a água é considerada um bem livre;
- 5 a 10% – a situação é confortável, podendo ocorrer necessidade de gerenciamento para solução de problemas locais de abastecimento;
- 10 a 20% – a situação é preocupante e atividade de gerenciamento é indispensável, exigindo a realização de investimentos médios;
- 20% a 40% – a situação é crítica, exigindo intensa atividade de gerenciamento e grandes investimentos;
- 40% – a situação é muito crítica.

Segundo padrões internacionalmente aceitos, uma comunidade humana necessita de cerca de 1.700 m³/hab./ano de água doce para seus usos indispensáveis (fins agrícolas, alimentares, industriais, energéticos, dentre outros). Há cerca de 26 países do mundo com disponibilidade de menos de 1.000 m³ anuais/hab., configurando uma situação de escassez. A quantidade de água suficiente para a manutenção dos usos domésticos é de 50 l/hab./dia, ou seja, 18 m³/hab./ano (NEUTZLING, 2004).

Entre os valores considerados internacionalmente como parâmetros para a gestão das águas, destaca-se o valor mínimo de água necessário para sustentar a vida humana, definido pela ONU como sendo de 20 litros de água por dia (PNUD, 2006). O indicador mais conhecido de escassez de água é o **Indicador de Estresse Hídrico de Falkenmark**, criado em 1989, que se refere à quantidade de recursos hídricos renováveis *per capita*/ano, adotado na escala de países. Originalmente, o indicador considera necessário um volume de um milhão de metros cúbicos de água/ano para sustentar 2.000 pessoas de uma sociedade de elevado nível de desenvolvimento. O valor de 1.700 m³/hab./ano define o limite hídrico de estresse, acima do qual a escassez de água ocorre somente esporadicamente e localmente. Abaixo deste limite, o estresse aparece regularmente, e abaixo de 1.000 m³/hab./ano, a escassez torna-se um fator limitante ao crescimento econômico, à saúde humana e ao bem estar das populações. Já abaixo de 500 m³/hab./ano, a escassez torna-se um fator limitante à vida.

Buscando soluções para a escassez de água, alguns países investem na dessalinização da água salgada. Há cerca de 13.000 usinas de dessalinização no Golfo Pérsico, Califórnia (EUA), Espanha, Malta, Austrália, Índia e Caribe, convertendo cerca de seis bilhões de m³/ano de água salgada em água doce. As técnicas de dessalinização implicam em custos de energia. Outros países investem na reutilização das águas, como é o caso de Israel, onde mais de 70 % da água servida é reutilizada na irrigação.

1.2. Escassez Hídrica

Podemos compreender a escassez hídrica com base em diferentes enfoques, a saber:

1.2.1. O Enfoque Social

- **Escassez real ou absoluta:** este tipo de escassez refere-se à real falta de água por causas naturais ou pela ação humana; os estoques de água utilizável não suprem as demandas.
- **Escassez relativa:** neste caso, a escassez não está relacionada à falta de água em termos absolutos, mas, sim, à falta de água em dois contextos:
 - **falta de água** cuja qualidade atenda às necessidades dos usos de certa unidade territorial, como uma região, um estado ou um país, referindo-se, portanto, a escassez de água de qualidade;
 - **escassez absoluta** mascarada pelo aumento contínuo da oferta de água a custos crescentes, mas a população não percebe devido às estratégias adotadas pelos gestores para aumentar a sua oferta, com obras estruturais (barramentos, desvios, etc.), bombeamentos de água subterrânea ou captação de água de fontes cada vez mais distantes; cria-se uma ilusão de abundância hídrica em áreas com escassez, levando a comportamentos negativos como o consumo excessivo; a gestão da oferta e da demanda é, portanto, essencial nestes casos.

1.2.2. O Enfoque Econômico

- **Escassez física:** ocorre quando, mesmo com elevadas produtividade e eficiência no uso da água, não há suficiente estoque de recursos hídricos para manter o crescimento das demandas; o problema não é, portanto, a disponibilidade hídrica em termos absolutos, mas, sim, as demandas elevadas que sobrecarregam os estoques hídricos; a gestão da demanda deve ser empreendida juntamente com a gestão da oferta de água.
- **Escassez Econômica:** ocorre quando há suficiente disponibilidade de água para manter as demandas, mas as tendências de crescimento econômico exigem investimentos em armazenamento de água, adução e sistemas de abastecimento; nestes casos, as taxas de crescimento econômico não são satisfatoriamente atendidas pelos volumes de água disponíveis, a médios e longos prazos, a não ser que o homem interfira no aumento dos estoques hídricos.

1.2.3. O Enfoque Ecológico

O enfoque ecológico aborda e considera as implicações ecológicas da escassez hídrica, envolvendo as suas conseqüências sobre o equilíbrio dos ecossistemas, a manutenção da vida no planeta e a qualidade de vida das populações. É um enfoque aplicado principalmente pelos biólogos.

Vários indicadores adotam taxas que medem as pressões da exploração de recursos renováveis para uso humano. O Relatório ***World Water Vision*** (2000, *apud* UNESCO, 2009) utiliza um valor de 40 % para indicar o elevado estresse hídrico. Apesar da facilidade de compreensão, esses indicadores não consideram, em geral, os usos não consultivos, as práticas de reuso, a infraestrutura e a capacidade administrativa para a gestão das águas. As Tabelas 4 e 5 ilustram os mais usados limites hídricos abordados na literatura:

Tabela 1.4. Limites Hídricos segundo diferentes Fontes (m3/hab/ano)						
FONTE	LIMITE HÍDRICO DE ESTRESSE	LIMITE HÍDRICO DE ESCASSEZ	ESCASSEZ CRÔNICA	ESCASSEZ HÍDRICA ABSOLUTA	SUFICIÊNCIA DE ÁGUA	INSUFICIÊNCIA DE ÁGUA
Engelman & Leroy (1993)	1.000	1.667				
Falkenmark & Widstrand (1992)	Acima de 1.700	Abaixo de 1.700	1.000	500		
ONU (2.000)		< 1.000			> 1.700	1.000 – 1.700
UNESCO (2003)	500 a 1.700	< 500				

Fontes: Cosgrove & Rijsberman (2000); Engelman & Leroy (1993);
ONU (2000, *apud* MAGALHÃES JR, 2007); UNESCO (2003)¹.

Tabela 1.5. Relação entre Disponibilidade Hídrica Potencial e Níveis de Uso (m3/hab/ano)						
POTENCIAIS	MUITO POBRE < 500	POBRE 500 – 1000	REGULAR 1.000 – 2.000	SUFICIENTE 2.000 – 10.000	RICO 10.000 – 100.000	MUITO RICO > 100.000
NÍVEIS DE USO						
Muito baixo < 100	Malta Bahamas	Quênia	Etiópia	Gana Nigéria	Angola Indonésia	Gabão Papua
Baixo 100 - 500	Argélia Israel	Cabo Verde	África do Sul Polônia	China	Áustria Brasil	Guiana Francesa Islândia
Moderado 500 – 1.000	Arábia Saudita Líbia		Bélgica Ucrânia	Alemanha França Itália Japão	Nova Zelândia Rússia	
Alto 1.000 – 2.000		Egito	Paquistão	Bulgária EUA Filipinas	Argentina Austrália Chile	
Muito Alto > 2.000		EUA (Colorado)		Cazaquistão Iraque	Turquistão	Sibéria Suriname

Fonte: ONU, 2000 (in MAGALHÃES JR., 2007)

1 UNESCO – *The United Nations World Water Development Report. Water for people, water for life*. Disponível em <<http://www.unesco.org/water/wwap>>.

A tabela anterior mostra exemplos de países classificados segundo a relação entre a disponibilidade hídrica potencial e os níveis de uso da água. Segundo esta classificação da ONU (2000, *apud* MAGALHÃES JR, 2007), os países/regiões mais pobres em disponibilidade hídrica (m³/hab/ano) são Kuwait (0), Malta (40), Qatar (54), Gaza (59), Bahamas (75), Arábia Saudita (105), Líbia (111), Bahrain (185), Jordânia (211) e Emirados Árabes Unidos (279).

No trabalho de Clarke e King (2005), é ressaltado que cerca de 500 milhões de pessoas vivem em países com escassez crônica de água e outras 2,4 bilhões vivem em países com ameaças de escassez. Os autores também destacam que há previsões para os próximos anos de absoluta escassez de água para dezessete países do Oriente Médio, do Sul da África e para as regiões mais secas do oeste e sul da Índia e norte da China, bem como extrema escassez de água na África subsaariana.

1.3. Água e Saúde

As questões hídricas têm relação direta com a saúde humana. Em termos de disponibilidade de água em quantidade, há limites abaixo dos quais a própria vida humana fica comprometida. A ONU considera que 20 litros de água por dia é o mínimo exigido para qualquer ser humano viver (PNUD, 2006). Já em termos de qualidade da água, grande parte das doenças humanas é transmitida por meio de águas poluídas. Segundo relatório da WHO e da UNICEF (2000) ocorre anualmente no mundo quatro bilhões de casos de diarreia, com 2,2 milhões de mortes, a maioria entre crianças de até cinco anos. O relatório adverte que água segura, higiene e saneamento adequados podem reduzir de um quarto a um terço os casos de doenças diarreicas no globo.

Relatório da **Organização Panamericana da Saúde** e da **Organização Mundial da Saúde** (OPS; OMS, 2001) alerta que a cada oito segundos uma criança morre devido a uma doença relacionada à água, e que a cada ano mais de cinco milhões de pessoas morrem de alguma doença associada a águas poluídas ou contaminadas. O relatório também alerta que, a todo o momento, estima-se que metade da população nos países em desenvolvimento esteja sofrendo de alguma doença transmitida por meio da água poluída (diarreia, hepatite vírica, ascaris, dracunculíase, esquistossomose, febre tifoide, ancilostomíase, dentre outras).

Os esgotos são os principais causadores da poluição da água nos países menos desenvolvidos e, como consequência, os principais causadores das doenças transmitidas por meio da água. A solução dos problemas relacionados às doenças transmitidas por águas contaminadas passa, necessariamente, pela universalização dos serviços de saneamento básico, principalmente a coleta e o tratamento dos esgotos.

O **Relatório do Desenvolvimento Humano – 2006**, elaborado pelo **Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento – PNUD** – (PNUD, 2006), destaca que cerca de 1,1 bilhões de pessoas dos países em desenvolvimento não têm acesso a mínimas quantidades de água potável, a maioria vivendo na Ásia e na África Subsaariana. Esta população vive com menos de cinco litros de água por dia.

Por outro lado, 2,6 bilhões de pessoas, metade da população do mundo em desenvolvimento, não dispõem de saneamento básico. Como consequência, 1,8 milhão de crianças morre no mundo, em decorrência de problemas como diarreia e outras doenças provocadas por água poluída e más condições de saneamento. O relatório também alerta que, no Brasil, 20% da população mais rica gozam de acesso à água e ao saneamento em níveis amplamente comparáveis aos registrados nos países ricos, enquanto 20% dos mais pobres registram taxas de cobertura mais baixas do que no Vietnã.

Esse quadro não resulta da falta de água e não necessariamente da falta de recursos financeiros, mas, sim, da falta ou ineficiência dos processos de gestão, sendo um problema político. Os dados demonstram que os problemas de escassez hídrica no mundo são, em primeira instância, problemas vinculados à pobreza. O atendimento aos serviços de saneamento é um indicador que reflete a distribuição da riqueza em muitas regiões do globo. Os pobres são as maiores vítimas da incapacidade ou da falta de vontade política para resolver os problemas de escassez hídrica, em quantidade e qualidade, bem como das doenças transmitidas por meio das águas contaminadas.

Estima-se que 80% de todas as moléstias e mais de 1/3 dos óbitos dos países em desenvolvimento sejam causados pelo consumo de água contaminada, e, em média, até um décimo do tempo produtivo de cada pessoa se perde devido a doenças relacionadas com a água (SENADO FEDERAL, 1997). No início do século XXI, cerca de 30.000 pessoas morriam diariamente por doenças relacionadas à água contaminada (NEUTZLING, 2004). Doenças transmitidas por meio de água contaminada matam uma criança a cada quinze segundos no mundo, e diarreias comuns matam cerca de 4.500 crianças por dia, sendo a segunda maior causa de mortes em crianças de menos de cinco anos (PNUD, 2006). No caso brasileiro, cerca de 70 % das internações hospitalares no Brasil ocorrem devido a doenças transmitidas por meio da água, como disenteria, hepatite, febre tifoide, cólera e esquistossomose.

Todos esses dados refletem a estreita relação entre a inexistência ou carência de serviços de saneamento e a disseminação de doenças. Novamente, percebe-se que essa situação afeta, prioritariamente, a população pobre do mundo, vitimada pela ausência/carência de serviços de saneamento. A incapacidade ou a falta de vontade política para resolver esse quadro é, em grande parte, a causa dos problemas de saúde pública no mundo. A crise da água é, em muitos sentidos, uma crise dos pobres (PNUD, 2006).

1.4. Águas e Conflitos: o Papel Estratégico da Água

Outro aspecto que deve ser destacado nessa introdução é a importância das águas como recurso estratégico nas questões geopolíticas mundiais. Os recursos hídricos são elementos potenciais de conflitos internacionais e regionais, principalmente em áreas com escassez hídrica. Conflitos por causa de água e guerras civis e internacionais ameaçam tornar-se um fator chave do panorama mundial no século XXI (VILLIERS, 2002).

Como mostra a Tabela 6, em alguns países quase toda a água superficial tem origem fora de suas fronteiras, potencializando os conflitos. Desvios, barramentos e poluição de mananciais hídricos podem ser utilizados como armas estratégicas em conflitos. Eles podem ocorrer tendo as obras hídricas como arma ou serem motivados pelo anseio de domínio das águas para viabilização do desenvolvimento de uma unidade territorial.

Tabela 1.6. Percentuais de Vazões de Rios geradas fora dos Limites Nacionais	
PAÍS	% DE DESCARGA GERADA FORA DO PAÍS
Egito	97
Hungria	95
Mauritânia	95
Botswana	94
Bulgária	91
Holanda	89
Gâmbia	86
Camboja	82
Romênia	82
Luxemburgo	80
Síria	79
Congo	77
Sudão	77
Paraguai	70
Rep. Tcheca	69
Níger	68
Iraque	66
Albânia	53
Uruguai	52
Alemanha	51
Portugal	48

Fonte: Gleick (1993)



CAPÍTULO 2

2.1. Princípios e Bases Conceituais

As águas ocorrem naturalmente em diferentes ambientes do planeta, mas somente um processo adequado de gestão pode viabilizar a apropriação equilibrada dos recursos hídricos pelo homem (usos), em relação à oferta existente (disponibilidade), evitando a superexploração, a escassez e a degradação dos estoques hídricos em quantidade e qualidade. Gestão de recursos hídricos é o processo voltado à formulação de princípios e diretrizes, ao preparo de documentos orientadores e normativos, à estruturação de sistemas gerenciais e à tomada de decisões que têm por objetivo final promover o inventário, uso, controle e proteção dos recursos hídricos (LANNA, 1997).

Os países do globo passam, geralmente, por certas fases ou etapas de gestão da água que indicam o seu nível ou estágio em termos de gestão. Estas fases podem ocorrer mais cedo ou mais tarde em cada país, dependendo do contexto histórico nacional, das prioridades, da estrutura socioeconômica e da estrutura política, legal e institucional. Grande parte dos países desenvolvidos passou pelas seguintes fases no que se refere às águas:

- Aumento contínuo da oferta de água em quantidade.
- Aumento contínuo da oferta de água em qualidade.
- Gestão dos ambientes aquáticos.
- Gestão da demanda de água (tendência mais recente na Europa e EUA): compatibilização da gestão da oferta com a gestão da demanda, buscando-se induzir ao uso equilibrado dos recursos em relação à disponibilidade hídrica; busca-se, deste modo, evitar desperdícios e otimizar os usos.

Nos anos 1960, a comunidade científica internacional reconheceu que o uso racional da água está estreitamente vinculado ao conhecimento adequado do ciclo hidrológico. Em 1965, a UNESCO iniciou o primeiro programa internacional de estudo das águas: o **Decênio Hidrológico Internacional**, e, em 1975, iniciou o **Programa Hidrológico Internacional**, executado em fases plurianuais.

O modelo de gestão das águas da *Tennessee Valley Authority – TVA* –, lançado nos EUA em 1933, influenciou diversos modelos de gestão da água no mundo, inclusive no Brasil. O modelo foi baseado em um sistema centralizador e na valorização de medidas estruturais de grande porte, visando o aumento da oferta de água (barragens, ETEs, etc.).

A apropriação das águas pelo homem ocorre segundo as doutrinas vigentes nos países, como por exemplo:

- **Doutrina Ripariana:** de origem francesa, esta doutrina baseia-se no fato do proprietário ripariano de terras banhadas por cursos d'água (terras riparianas) e situadas em sua bacia hidrográfica, ser autorizado a usar as águas do curso d'água na margem que lhe é comum, desde que não modifique substancialmente sua qualidade, quantidade e ponto de saída.
- **Doutrina da Apropriação Prioritária:** sua origem está na lei civil romana e estabelece a norma “primeiro em tempo, primeiro em direito”, isto é, o direito ao uso depende do benefício prestado pelas águas e despreza o fato do usuário ser proprietário das terras.
- **Outorga de direito de uso:** as águas não são de propriedade privada e sua utilização está sujeita à solicitação e à aprovação prévia de órgãos competentes; esse é o caso do Brasil.

2.1.1. A Água como um Bem Econômico

Um bem econômico é assim considerado em função da limitação de sua oferta (raridade), devendo haver uma demanda exprimindo uma necessidade ou desejo, a existência de um meio de satisfazer tal demanda e a necessidade de um esforço para a produção. Na esfera econômica, a água é considerada como algo útil e apropriável para satisfazer necessidades, sendo o seu uso determinado pelos objetivos de produção e/ou consumo.

A água esteve excluída durante muito tempo (até o século XVIII) da esfera econômica, devido ao seu caráter de recurso natural (**dom gratuito da natureza**) e ao seu caráter de recurso renovável (neste caso, a água não é vista como rara). O princípio da gratuidade da água era colocado em função da ausência de um setor organizado de produção e distribuição, além da própria influência da consideração da água como dom gratuito da natureza.

Ao longo do tempo, alguns fatores determinaram a inserção do valor econômico à água, tais como sua rarefação pelo aumento da demanda e modificações ambientais, sua repartição espacial desigual, a criação de setor de produção e distribuição e a percepção da água como bem fundamental do ponto de vista do desenvolvimento econômico.

2.1.2. A Água como um Bem Natural

Sob esse enfoque, a água não é vista necessariamente como um recurso, mas, sim, como um elemento natural necessário à manutenção do equilíbrio das funções e processos ambientais. Nessa perspectiva, há um enfoque no estudo dos impactos das ações humanas. Após os anos de 1960, aumentou a influência da corrente ecológica nos estudos da água. A gestão dos recursos hídricos passa a incorporar, além das esferas da produção e consumo tradicionais, também as esferas naturais de proteção, degradação e renovação dos recursos.

2.2. Elementos Constituintes do Processo de Gestão de Recursos Hídricos

Uma gestão das águas eficiente deve ser constituída por uma política que estabelece as diretrizes gerais, por um modelo de gerenciamento que estabelece a organização legal e institucional, e por um sistema de gerenciamento que reúne os instrumentos para o preparo e execução do planejamento das águas:

- **Política das Águas:** conjunto consistente de princípios doutrinários que conformam as aspirações sociais e/ou governamentais no que concerne à regulamentação ou modificação nos usos, controle e proteção dos recursos hídricos.
- **Plano de Águas:** qualquer estudo prospectivo que busca, na sua essência, adequar o uso, o controle e o grau de proteção dos recursos hídricos às aspirações sociais e/ou governamentais expressas, formal ou informalmente, em uma política das águas, através da coordenação, compatibilização, articulação e/ou projetos de intervenções.
- **Sistema de Gerenciamento das Águas:** conjunto de organismos, agências e instalações governamentais e privadas, estabelecidos com o objetivo de executar a política das águas, através do **Modelo de Gerenciamento das Águas** adotado e tendo por instrumento o **Planejamento das Águas**.

2.3. Avaliação de Recursos Hídricos

É o conjunto de procedimentos que visam oferecer uma base de dados científicos para sua utilização racional, compreendendo a estimativa da quantidade de recursos e seu potencial de oferta futuro, previsão de possíveis conflitos entre oferta e demanda, e identificação contínua de fontes potenciais de água doce. Deve ter caráter integrador, considerando os aspectos quantitativo e qualitativo e os aspectos das águas superficiais e subterrâneas, além de considerar a ocupação do solo e uso da água.

2.4. Planejamento em Recursos Hídricos

O planejamento no processo de gestão refere-se ao processo sistemático de suporte às decisões, baseado no levantamento e organização de informações, visando antecipar-se aos problemas e desafios e compatibilizar os usos e demandas com a disponibilidade hídrica. O planejamento também envolve um trabalho permanente de acompanhamento e avaliação do processo decisório, em termos das repercussões das ações empreendidas.

2.5. Gerenciamento de Recursos Hídricos

Muitas vezes, o gerenciamento é tomado como sinônimo de gestão, mas diversos autores consideram-no como a parte mais operacional do seu processo, ou seja, o processo contínuo de efetivação das decisões tomadas. Lanna (1997) define o gerenciamento de recursos hídricos como o conjunto de ações governamentais destinadas a regular o uso e o controle dos recursos hídricos, e a avaliar a conformidade da situação corrente com os princípios doutrinários estabelecidos pela política das águas.

Segundo Neto (1988), o gerenciamento inclui, no mínimo, os seguintes aspectos:

- Planejamento de recursos hídricos
- Outorga e fiscalização de concessões de uso
- Coordenação dos múltiplos agentes setoriais que atuam ou interferem no setor
- Controle do monitoramento da quantidade e qualidade das águas

O gerenciamento integrado da água doce deve visar à eficiência das ações humanas na busca dos seguintes aspectos:

- Utilização adequada e otimizada de águas superficiais e subterrâneas, e efluentes tratados de forma sistêmica e indissociada.
- Gestão indissociada da água em seu contexto natural e humano, considerando os elementos ambientais direta e indiretamente relacionados.
- Aumento e manutenção dos estoques hídricos, em quantidade e qualidade, para fins sociais, ecológicos e econômicos.
- Regularidade da oferta de água, em quantidade e qualidade, adequada aos diferentes usos, e atendendo às exigências legais, sociais, econômicas e ecológicas, com o menor custo possível.
- Acesso aos serviços de saneamento básico, à saúde pública e à melhoria da qualidade de vida.
- Conservação dos recursos naturais e dos ambientes naturais e transformados pelo homem.
- Aumento e/ou a manutenção das taxas de produção de biomassa.
- Criação, implementação e desenvolvimento de fluxos e redes de informação ambiental.
- Informação, conscientização e educação ambiental.
- Fortalecimento das estruturas institucionais e sociais locais, incluindo os colegiados de gestão ambiental, descentralizados e participativos.

2.6. Modelos de Gestão de Recursos Hídricos

Alguns modelos de gestão de recursos hídricos são destacados na literatura (LANNA, 1997):

2.6.1. Modelo Burocrático

Começou a ser implantado no final do séc. XIX, mas no Brasil foi implantado na década de 1930, através do **Código das Águas**. Objetiva primordialmente cumprir e fazer cumprir os dispositivos legais e baseia-se na criação e implementação de instrumentos legais sobre proteção ambiental, fazendo com que o poder tenda a concentrar-se gradualmente em entidades públicas, destinadas a aprovar concessões e autorizações de uso, licenciamento de obras, fiscalização, interdição ou multa, e demais ações formais. Algumas críticas podem ser apontadas a esse modelo:

- Desempenho restrito ao cumprimento de normas, com falta de flexibilidade para demandas não rotineiras.
- Dificuldade de adaptação para mudanças internas e externas.
- Centralização do poder decisório nos escalões mais altos.
- Padronização no atendimento a demandas, desconsiderando necessidades específicas.
- Excesso de formalismo e morosidade de ação.
- Pouca ou nenhuma importância dada ao ambiente externo ao sistema de gerenciamento.
- A autoridade pública se torna ineficiente e politicamente frágil, perante os grupos de pressão interessados em concessões e autorizações.

2.6.2. Modelo Econômico-financeiro

Criado na década de 1930 nos EUA, o modelo econômico-financeiro se baseia na análise custo/benefício, com o emprego de instrumentos econômicos e financeiros pelo poder público, para promoção do desenvolvimento econômico e indução à obediência às disposições legais vigentes. São reconhecidas as demandas e limitações do meio, e estabelecidos planos estratégicos para consecução da missão. Seus princípios básicos são:

- Prioridades setoriais do governo, com programas de investimentos em setores usuários das águas, como saneamento, irrigação, etc., tendo as autarquias e empresas públicas como entidades privilegiadas.
- Desenvolvimento integral e multissetorial da bacia (visão mais moderna); as principais críticas a este modelo são:
 - Adoção de concepção relativamente abstrata como suporte à solução de problemas contingenciais: o ambiente é mutável e dinâmico, exigindo grande flexibilidade do sistema de gerenciamento.
 - Necessidade de criação de entidades multissetoriais de grande porte.
 - Dificuldade de criação de um sistema integrado, que compatibilize as intenções espaciais e temporais de uso e proteção das águas, levando à definição de sistemas parciais relativamente fechados, ao desequilíbrio de uso dos recursos hídricos, à apropriação excessiva por certos setores, à intensificação do uso setorial não integrado e aos conflitos inter e intrasetoriais.
- Perdas de investimentos quando realizados em usos setoriais que não serão mais privilegiados no futuro ou que necessitem de controle devido à degradação ambiental.

- Sub ou superdimensionamento da questão ambiental no processo de planejamento integrado da bacia.

Por outro lado, este modelo é elogiado em termos dos avanços em relação ao modelo anterior, possibilitando o planejamento estratégico da bacia, pelo menos setorialmente, e canalizando recursos financeiros para implantação dos respectivos planos diretores.

2.6.3. Modelo Sistêmico de Integração Participativa ou Análise Multiobjetivo

Esse modelo moderno é baseado em estrutura sistêmica, através de matriz institucional de gerenciamento, com funções gerenciais específicas, e deve buscar:

- Organizar melhor as informações e o papel de cada participante nas etapas decisórias.
- Evidenciar os conflitos entre objetivos e quantificar o grau de compromisso existente entre eles.
- Tratar cada objetivo na unidade de mensuração mais adequada, sem a distorção introduzida pela simples conversão em unidades monetárias, como é feito na análise custo/benefício.

2.7. Instrumentos de Gestão

São instrumentos de gestão os seguintes itens:

- Planejamento estratégico por bacia hidrográfica.
- Conhecimento ou hipotetização dos planos setoriais de longo prazo, quantificando e hierarquizando as intenções de uso e proteção, e permitindo a elaboração de um plano multissetorial de longo prazo.
- Estudo de cenários alternativos futuros de uso e proteção da água, permitindo o plano de longo prazo; em um ambiente mutável, é preciso antecipar-se às demandas, evitando-se o comprometimento da eficiência e a inviabilização de soluções rápidas e práticas.
- Estabelecimento de metas alternativas específicas de desenvolvimento sustentável na bacia, como crescimento econômico, equidade social e sustentabilidade ambiental.
- Definição de prazos, meios financeiros e instrumentos legais requeridos.
- Ênfases no ambiente em que se insere a organização, em como suas demandas mutáveis e diversificadas agem sobre a dinâmica da organização, e a resultante rede de relações formadas, em decorrência das demandas surgidas e das respostas emitidas.
- Tomada de decisão através de deliberações multilaterais e descentralizadas.

- Processo de planejamento por negociação, constituindo-se colegiados por bacia hidrográfica, com a participação de representantes de instituições públicas e privadas, de classes políticas e empresariais, de usuários e de comunidades.
- Estabelecimento de instrumentos legais e financeiros, como planos diretores, enquadramentos dos cursos de água, outorga, cobranças pelo uso da água, rateios de custo das obras, etc..

2.8. Princípios das Modernas Abordagens de Gestão dos Recursos Hídricos

Alguns princípios de gestão de recursos hídricos vêm sendo defendidos em encontros e debates nacionais e internacionais. Estes princípios são considerados essenciais para a busca de uma gestão, na perspectiva do desenvolvimento sustentável. Dentre eles, destacamos:

- A água é um recurso natural finito, estratégico, essencial à vida, ao ambiente e ao desenvolvimento.
- O acesso aos recursos hídricos é direito de todos, com prioridade para o abastecimento humano. O interesse público deve prevalecer sobre o privado. A crescente utilização e degradação dos recursos hídricos acentuam a incompatibilidade da gestão das águas com sua propriedade privada. Alguns governos não defendem que a água é um direito, mas, sim, uma necessidade e isso têm implicações políticas e sociais importantes, pois a concepção da água como necessidade não obriga o poder público garantir o seu acesso à população, como seria no caso da concepção da água como um direito.
- A autoridade em matéria de gestão dos recursos hídricos deve pertencer ao Estado. Na definição de uma política de gestão das águas devem participar todas as entidades com intervenção nos problemas da água, em todas as etapas do processo de busca de objetivos. Todavia, a responsabilidade pela execução dessa política deve competir a um único órgão, que coordene, em todos os níveis, a atuação daquelas entidades em relação aos problemas de água.
- A avaliação dos benefícios para a coletividade resultantes da utilização da água deve ter em conta as variáveis da qualidade de vida e qualidade do ambiente.
- A bacia hidrográfica é a mais adequada unidade de gestão das águas superficiais, como foi indicado, já nos anos 1970, na **Conferência de Caracas** (1976). Tem sido enfatizada a necessidade de se suplantarem os limites políticos e administrativos nos estudos hidrográficos, adotando-se unidades físicas.
- A gestão eficaz dos recursos hídricos deve levar em conta o desenvolvimento em todas as suas dimensões: ecológica, econômica e social. Tem sido enfatizada a necessidade de abordagens sistêmicas e integradoras, envolvendo o desenvolvimento e o manejo integrado dos recursos naturais, bem como a integração do gerenciamento dos recursos hídricos com o planejamento socioeconômico e ambiental.

- Deve-se buscar a integração da gestão da oferta com a gestão da demanda de recursos hídricos. O comportamento passivo, de aguardar a manifestação da demanda para então procurar atendê-la, deixa a sociedade vulnerável, compromete a eficiência e, muitas vezes, inviabiliza soluções rápidas e práticas, exigindo maior montante de recursos para corrigir desvios que poderiam ser evitados. Em um ambiente mutável é preciso antecipar-se às demandas. Quando há grupos de interesses conflitantes é preciso, ainda, antecipar-se à própria necessidade para poder atendê-la no menor tempo possível.
- A gestão de recursos hídricos deve envolver o estabelecimento de programas de proteção de bacias hidrográficas, prevenção da poluição e conservação, alocação e reaproveitamento da água.
- A política e a gestão dos recursos hídricos deve otimizar sua utilização, de modo que os benefícios possam atingir o maior número de pessoas.
- A gestão de recursos hídricos é uma atividade de caráter interdisciplinar, devendo ser realizada por pessoas de diferentes formações e concepções.
- O instrumento de outorga de uso dos recursos hídricos deve ser aplicado nos processos de gestão. Todos os usos de recursos hídricos, com exceção dos correspondentes à captação direta de água de caráter individual para a satisfação de necessidades básicas, devem estar sujeitas à autorização do Estado.
- Devem-se privilegiar os usos múltiplos dos recursos hídricos em corpos d'água, minimizando conflitos e favorecendo a otimização dos esforços e investimentos de gestão.
- É imprescindível considerar os atributos qualidade e quantidade de recursos hídricos como indissociáveis, sendo um relacionado ao outro.
- A gestão deve abranger tanto as águas interiores superficiais e subterrâneas como as águas marítimas costeiras, buscando-se, sempre que possível, um processo integrado e sistêmico de gestão.
- O instrumento da cobrança pelo uso da água deve ser aplicado nos processos de gestão, adotando-se o princípio usuário/poluidor/pagador. A cobrança é defendida, porque pode gerar receitas para aplicação na própria bacia onde são gerados (viabilizando ações em prol da coletividade); pode mudar ou reduzir comportamentos sociais inadequados de usos das águas como o desperdício e a poluição; e pode frear as externalidades negativas geradas por usuários das águas que comprometem a qualidade ambiental da sociedade como um todo.

Tem sido ressaltado o valor econômico da água cuja utilização implica em custos e preços aos usuários. Na maior parte dos países, o preço da água potável cobrado aos usuários corresponde apenas aos custos de captação (incluindo a energia elétrica para

bombeamento) e distribuição. Defende-se, portanto, a consideração da água como recurso econômico ao qual deve ser atribuído justo valor.

Nessa concepção, as autoridades nacionais devem esforçar-se para promover a internalização dos custos de proteção ao meio ambiente e o uso dos instrumentos econômicos, levando em conta o conceito de que o poluidor deve, em princípio, assumir o custo da poluição, tendo em vista o interesse público.

Tem sido cada vez mais aceito que os agentes econômicos não podem mais socializar os custos ambientais dos seus processos produtivos. Geralmente, os custos destes danos não são incorporados aos custos privados, como deveriam ser, mas, sim, compartilhados com a sociedade. É evidente que a sociedade não deve pagar o custo da reparação de danos ambientais, quando apenas uma parte ou um segmento é responsável por este custo. Nesse sentido, o instrumento da cobrança pelo uso da água, associado ao princípio usuário/pagador ou poluidor/pagador, tem sido amplamente aplicado no mundo, visando gerar recursos para investimentos nas bacias hidrográficas, mas também contribuir para a internalização dos custos ambientais dos processos produtivos.

Outras questões importantes são:

- O desenvolvimento e a gestão dos recursos hídricos devem basear-se em abordagens descentralizadas, participativas e colegiadas que congreguem usuários, planejadores e autoridades. Para pôr em prática uma política de gestão das águas é essencial assegurar a participação das populações, através de mecanismos devidamente institucionalizados.
- A formação de colegiados decisórios participativos e deliberativos de gestão da água tem sido enfatizada. No Brasil, o principal exemplo decorre dos **Comitês de Bacia Hidrográfica – CBH**. São colegiados que agregam membros do poder público (municípios, estados e União), dos usuários da água e da sociedade civil organizada. Os CBH visam, dentre outros, elaborar o **Plano de Bacia**, definir as diretivas de ação e votar os valores da cobrança.
- As mulheres têm papel fundamental no abastecimento, gestão e proteção da água, devido a sua representatividade como núcleos irradiadores de educação, conscientização e formação cidadã das futuras gerações.

2.9. Alguns Aspectos Estratégicos na Gestão da Água

Merecem ser destacados como aspectos estratégicos associados à gestão da água:

- A água é um elemento estruturador do espaço, condicionando a organização e a localização das atividades humanas. Nesse sentido, a água influencia diretamente a distribuição espacial de processos e fluxos humanos e, conseqüentemente, a formação de redes sociais.
- Como as bacias hidrográficas são as unidades espaciais que vêm atraindo mais atenção na gestão dos recursos hídricos superficiais, deve-se atentar para a

importância da gestão conjunta de bacias internacionais, a partir de programas integrados entre os países envolvidos. Como alerta, a **Carta Européia da Água de 1968** (Parlamento de Strasburgo), uma bacia hidrográfica não tem fronteiras no que se refere à sua gestão.

- Quando se adota cursos d'água como limites políticos entre países, estados ou municípios, corre-se o risco do surgimento de problemas devido à instabilidade dos canais. Principalmente em condições climáticas ou de intervenções antrópicas que favoreçam a instabilidade das margens fluviais e a migração rápida dos leitos, os canais podem apresentar uma dinâmica desfavorável à sua adoção como limites político-administrativos.
- Igualmente, a utilização de cursos d'água como limites político-administrativos apresenta o desafio da delimitação e definição correta do canal fluvial, com o mútuo reconhecimento das partes envolvidas. A delimitação pode variar dependendo do critério adotado, como as margens, a linha média do canal, o talvegue, alguma linha arbitrária, etc.. A definição do principal canal de uma bacia também não é um processo normalmente fácil e consensual.
- A dinâmica espacial das águas apresenta o desafio da compatibilização de usos entre trechos à montante e à jusante em uma bacia hidrográfica. Usos à montante podem comprometer usos à jusante em termos da quantidade e/ou qualidade das águas. A utilização excessiva de água e a poluição são bons exemplos, podendo inviabilizar usos à jusante e até mesmo destruir processos e redes sociais que dependem da água. Diversos exemplos internacionais podem ser citados quanto à vulnerabilidade hídrica de países que apresentam trechos fluviais à jusante de outros países, como: o Rio Nilo é praticamente o único rio perene do Egito e passa pelo Sudão; a Síria recebe o Rio Eufrates da Turquia; a Hungria recebe o Rio Danúbio da Áustria; a Holanda recebe o Rio Reno que antes passa por vários países.
- Em caso de conflitos e guerras, um rio pode tornar-se uma arma em termos de destruição de atividades sociais e econômicas (caso seja represado ou impedido de fluir para jusante) ou de transporte de armas químicas poluentes em suas águas.



CAPÍTULO 3

3.1. Dados de Disponibilidades e Demandas

3.1.1. Disponibilidades

Segundo Freitas e Santos (1999), a disponibilidade de águas doces em cursos d'água no Brasil é de 182.170 m³/s ou 5.744 km³ ano. Esse potencial corresponde a 53% das vazões médias anuais da América do Sul e 12% do total mundial. A Bacia Amazônica concentra 73% dos recursos hídricos superficiais do país.

Esses números são parecidos com os apresentados por Shiklomanov (1998, *apud* ANA, 2005). Para o autor, a vazão média anual dos rios que nascem no Brasil é de 179 mil m³/s (5.660 km³/ano), correspondendo a 12% da disponibilidade mundial de recursos hídricos, que é de 1,5 milhões de m³/s (44.000 km³/ano). Se considerarmos as vazões oriundas da região amazônica e de países vizinhos (Amazônica – 86.321 m³/s; Uruguai – 878 m³/s; e Paraguai – 595 m³/s e), a disponibilidade hídrica total atinge 267 mil m³/s (8.427 km³/ano), ou seja, 18% da disponibilidade mundial.

A região hidrográfica da Amazônica detém 73,6% dos recursos hídricos superficiais do Brasil, representando quase três vezes mais que a soma das vazões das outras regiões hidrográficas (ANA, 2005). Vem a seguir, a região do Tocantins/Araguaia, com 13.624 m³/s (7,6%), e a região do Paraná, com 11.453 m³/s (6,4%). No lado oposto, as bacias com menor vazão são: Parnaíba, com 763 m³/s (0,4%), Atlântico Nordeste Oriental, com 779 m³/s (0,4%), e Atlântico Leste, com 1.492 m³/s (0,8%).

Apesar da disponibilidade hídrica relativamente elevada (12% da água doce do globo), o país é apenas o 23º em disponibilidade hídrica superficial *per capita*. A disponibilidade hídrica é de mais de 2.000 m³/hab./ano, na maior parte das unidades da federação (000 é o limite de escassez estabelecido pela ONU e 2.000 é o limite para condições adequadas de vida).

Estudos da ONU de 2006 indicam que, entre 1950 e 2000, a disponibilidade hídrica *per capita* decresceu cerca de 400% no Brasil, enquanto na Europa este índice foi treze vezes menor (ONU, 2006). O mesmo trabalho projeta que o Brasil apresentará, em 2025, um índice de disponibilidade hídrica *per capita* de 29.183 m³/hab./ano, incluindo-se a Bacia Amazônica, e 5.930 m³/hab./ano, excluindo-se a Bacia Amazônica. Estes dados são bem superiores aos limites hídricos de estresse e escassez adotados por Engelman e Leroy (1993), a saber:

- **Limite hídrico de estresse:** disponibilidade hídrica inferior a 1.000 m³/hab./ano.

- **Limite hídrico de escassez:** disponibilidade hídrica inferior a 1.667 m³/hab./ano.

Apesar dos números favoráveis, a desigualdade espacial da disponibilidade hídrica resulta em regiões mais desfavorecidas, como o semiárido nordestino, onde há uma disponibilidade de 1.320 m³/hab./ano. As desigualdades espaciais entre as regiões também são grandes. A região Norte tem cerca de 7 % da população do país e 68 % da água doce de superfície disponível. A região Sudeste apresenta quase 1/3 da população brasileira e apenas 3,3 % da água doce de superfície disponível. Porém, mesmo naquelas regiões e estados mais desfavorecidos, a disponibilidade ainda é importante se comparada a outros países.

Trabalho de Rebouças (1994) demonstra que um pernambucano dispõe, em média, de mais água disponível (1.320 m³/hab./ano) do que um alemão (1.160 m³/hab./ano), enquanto um baiano (3.028 m³/hab./ano) tem água disponível em números semelhantes a um francês (3.030 m³/hab./ano). No caso de um piauiense (9.608 m³/hab./ano), a disponibilidade hídrica equivale a de um norte-americano (9.940 m³/hab./ano). Além dos números absolutos de água disponível, também se deve levar em conta que grande parte da água no Nordeste não é usada, em comparação com os países desenvolvidos. O consumo total *per capita* em grande parte dos países mais desenvolvidos fica em torno de 24 a 92% dos seus potenciais, enquanto na maioria dos estados da região Nordeste os consumos *per capita* são inferiores a 10% dos seus potenciais de águas fluviais (REBOUÇAS, 1994).

Os dados de disponibilidade hídrica anual não refletem as grandes flutuações sazonais e interanuais que caracterizam o regime de chuvas e o regime fluvial tropical, bem como a qualidade das águas. Nesse sentido, uma elevada disponibilidade hídrica, em termos absolutos, não representa necessariamente uma elevada disponibilidade de água para os usos necessários.

A disponibilidade hídrica também deve levar em conta as águas subterrâneas. No Brasil, as reservas de água subterrânea são estimadas em 112.000 km³, até uma profundidade de 1.000 m (REBOUÇAS, 1997). Esse volume representa cerca de 20 vezes a descarga média anual dos rios no país e uma disponibilidade *per capita* de cerca de 5.000 m³/hab./ano. Em termos de vazões, as reservas renováveis do país atingem 42.289,2 m³/s (1.333,6 km³/ano), correspondendo a 24% do escoamento dos rios em território nacional e 49% da vazão de estiagem (ANA, 2005). A disponibilidade hídrica subterrânea total (reserva explotável) corresponde a 20% desse total, ou seja, 8.457,8 m³/s.

Da população brasileira, 61% é abastecida por água subterrânea para fins domésticos, sendo 6% por poços rasos, 12% por fontes e 43% por poços profundos (ANA, 2005). Entre os estados com cidades abastecidas total ou parcialmente por água subterrânea, destacam-se o Piauí (80 %), São Paulo (72 %), Maranhão, Ceará, Rio Grande do Norte, Pará, Amazonas, Paraná e Rio Grande do Sul (70 %). Das residências brasileiras apenas 15,6% utilizam exclusivamente água subterrânea (ANA, 2005).

As Tabelas 3.1. a 3.4. ilustram a disponibilidade hídrica superficial no Brasil:

Tabela 3.1. Disponibilidade Hídrica por Região	
REGIÃO	DISPONIBILIDADE (M3/HABITANTE/ANO)
Norte	387.267 (68,5 %)
Nordeste	4.384 (3,3 %)
Sudeste	5.333 (6,0 %)
Sul	16.521 (6,5 %)
Centro Oeste	79.899 (15,7 %)

Fonte: Diário do Senado Federal, Ofício 44/99; 23 de Março de 1999.

Tabela 3.2. Distribuição Espacial da Produção Hídrica no Sudeste do País por Estado e por Bacia							
UNIDADE/ REGIÃO	VAZÃO (L/S/ KM2)	VAZÃO (M3/S)	SÃO FRANCISCO	LESTE (1)	LESTE (2)	PARANÁ	ATLÂNTICO SUDESTE
Minas Gerais	11	6.145	2.297	22	1.903	1.923	-
Espírito Santo	13	596	-	-	596	-	-
Rio de Janeiro	21	938	-	-	938	-	-
São Paulo	12	2.912	-	-	241	2.193	478
Total	11	10.591	2.297	22	3.677	4.116	478
Brasil	21	177.764	3.042	670	3.710	11.217	4.563

Fonte: Barth (1987); (1) Pardo (MG) (2); do Jequitinhonha (MG) ao Paraíba do Sul (SP/MG/RJ).

Tabela 3.3. Maiores Bacias Fluviais do Brasil							
BACIA	ÁREA (1.000 KM2)	%	POPULAÇÃO 1991	%	HAB./KM2	M3/S	M3/HAB./ ANO
Amazonas	3.900	46	6.245.597	4	1.6	120.000	606.379
Tocantins	757	9	3.271.674	2	4.3	11.800	113.828
São Francisco	634	7	10.958.888	7	17.3	2.850	8.208
Alto Paraguai	368	4	1.700.168	1	4.6	1.290	23.946
Paraná	877	10	46.622.840	32	53.1	11.000	7.446
Uruguai	178	2	3.584.152	2	20.1	4.150	36.543
Atlântico Norte	76	1	3.424.511	2	45.0	3.660	33.730
Atlântico NE	953	11	25.761.672	18	27.0	5.390	6.603
Atlântico Leste 1	242	3	10.909.302	7	45.0	680	1.967
Atlântico Leste 2	303	4	22.598.203	15	74.5	3.670	5.125
Atlântico SE	224	3	11.605.507	8	51.8	4.300	11.693
Brasil	8.512	100	146.682.514	100	17.2	168.790	36.317

Fonte: Adaptado de SRH-MMA (1998) *apud* Benevides (1995).

Tabela 3.4. Comparação entre a Disponibilidade Hídrica dos Estados Brasileiros e alguns Países da Europa				
M³/HABITANTE/ANO	PAÍS	M³/HABITANTE/ ANO*1	ESTADO	M³/HABITANTE/ ANO*2
Abundância > 20.000	Finlândia	22.600	Rondônia	132.818
	Suécia	21.800	Acre	369.305
	-	-	Amazonas	878.929
	-	-	Roraima	1.747.010
	-	-	Pará	217.058
	-	-	Amapá	678.929
	-	-	Tocantins	137.666
	-	-	R. Grande do Sul	20.798
	-	-	M. Grosso Sul	39.185
	-	-	Mato Grosso	258.242
	-	-	Goiás	39.185
Muito rico > 10.000	Irlanda	14.000	Maranhão	17.184
	Luxemburgo	12.500	Minas Gerais	12.325
	Áustria	12.000	Paraná	13.431
			Santa Catarina	13.662
Rico > 5.000	Países Baixos	6.100	Piauí	9.608
	Portugal	6.100	Espírito Santo	7.235
	Grécia	5.900		
Normal 2.500 a 5.000	França	3.600	Bahia	3.028
	Itália	3.300	-	-
	Espanha	2.900	-	-
Pobre < 2.500	Reino Unido	2.200	Ceará	2.436
	Alemanha	2.000	R. Grande do Norte	1.781
	Bélgica	1.900	Alagoas	1.751
	-	-	Sergipe	1.743
	-	-	Rio de Janeiro	2.315
	-	-	Distrito Federal	1.752
Situação crítica < 1.500	-	-	Paraíba	1.437
	-	-	Pernambuco	1.320

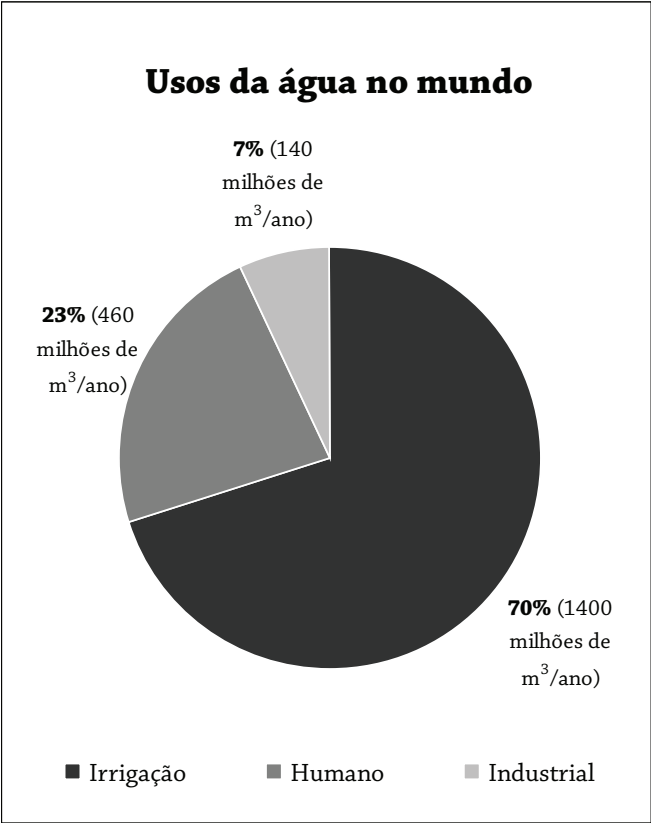
Fonte: Barraqué (1995) e Thame (2000)

3.1.2. Demandas

Um panorama geral das demandas de água no Brasil pode ser encontrado em ANA (2005). Tendo como referência o ano de 2000, a vazão de retirada para usos consuntivos no país foi de 1.592 m³/s, sendo que 53% desse total (841 m³/s) é efetivamente consumido e 751 m³/s retornam às bacias hidrográficas. A região hidrográfica do Paraná é responsável por 30% das retiradas de água no país, ou seja, quase duas vezes mais que a região do Atlântico Sul (15%), a segunda colocada. Vêm a seguir, as regiões hidrográficas Atlântico Nordeste Oriental e Atlântico Sudeste, São Francisco e Uruguai. As retiradas de menor valor estão nas bacias do Atlântico Nordeste Ocidental, Parnaíba, Paraguai, Amazônica e Araguaia/Tocantins. Em termos de consumo (diferença entre a água que é retirada e a água que retorna aos rios), os maiores volumes estão nas regiões Paraná, Atlântico Sul, Uruguai, São Francisco e Atlântico Nordeste Oriental.

Tradicionalmente, as maiores demandas de água no mundo derivam da irrigação com 70 % da água utilizada (Gráfico 3.1.). Fonte: adaptação de dados IEPA¹.

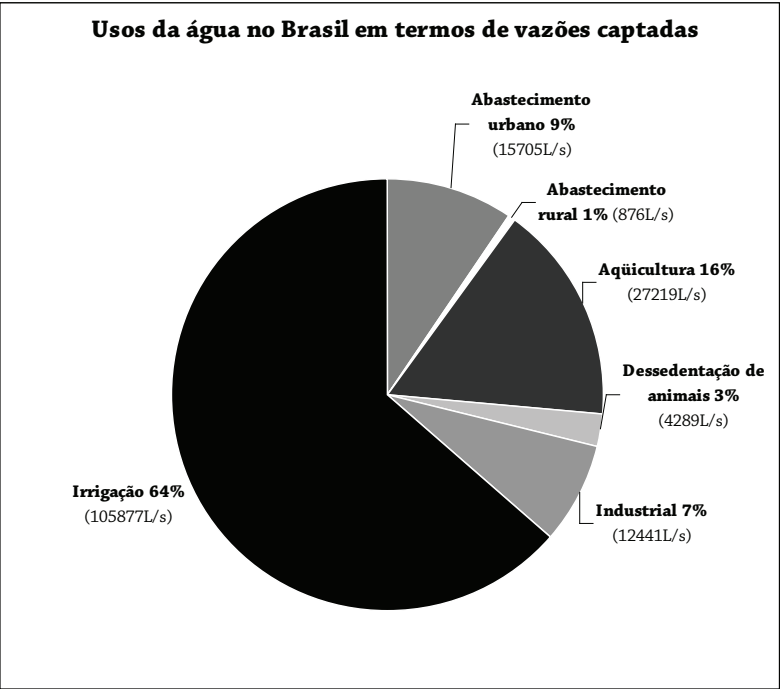
GRÁFICO 3.1.
Usos Gerais da Água no Mundo



1 Disponível em: <<http://www.iepa.ap.gov.br/pnpg/Oficinas/Qualidade%20de%20Agua/figura/agua3.gif>>.

No Brasil, 64% das vazões captadas são destinadas à irrigação, enquanto 9% é destinado ao abastecimento urbano, 7% voltado para a indústria, 3% para a dessedentação animal e apenas 1% para o abastecimento rural (Gráfico 2). Porém, no caso das regiões hidrográficas da Amazônica, Atlântico Nordeste Ocidental, Atlântico Leste, Atlântico Sudeste e Paraná, predomina o uso urbano, enquanto na região hidrográfica Paraguai predomina o uso animal (ANA, 2005).

GRÁFICO 3.2.
Usos da Água no Brasil em termos de Vazões Captadas.



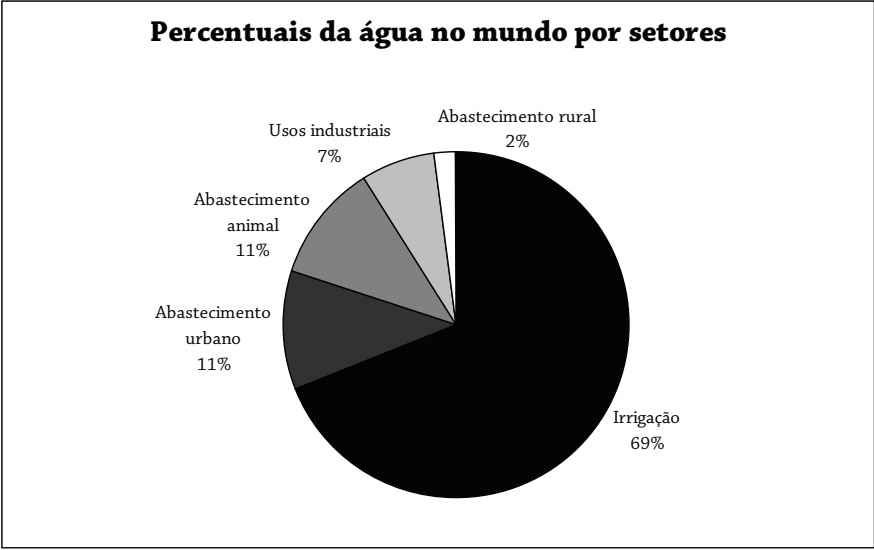
Fonte: adaptação de SIRHSC²

Dados da **Agência Nacional de Águas – ANA** – também confirmam que a irrigação responde pelo maior percentual de vazões efetivamente consumidas (69%), seguido de abastecimento urbano (11%), abastecimento animal (11%), usos industriais (7%) e abastecimento rural (2%). Este quadro é modificado nas regiões hidrográficas do Atlântico Nordeste Ocidental e Paraguai, onde predomina o consumo animal (ANA, 2005).

Os números de usos e consumo de água podem variar segundo a fonte bibliográfica consultada, mas proporcionalmente não deixam dúvidas quanto à importância da quantidade de água usada e consumida na irrigação. As retiradas para irrigação no país totalizam 717,1 m³/s, sendo consumidos 589,5 m³/s (ANA, 2005).

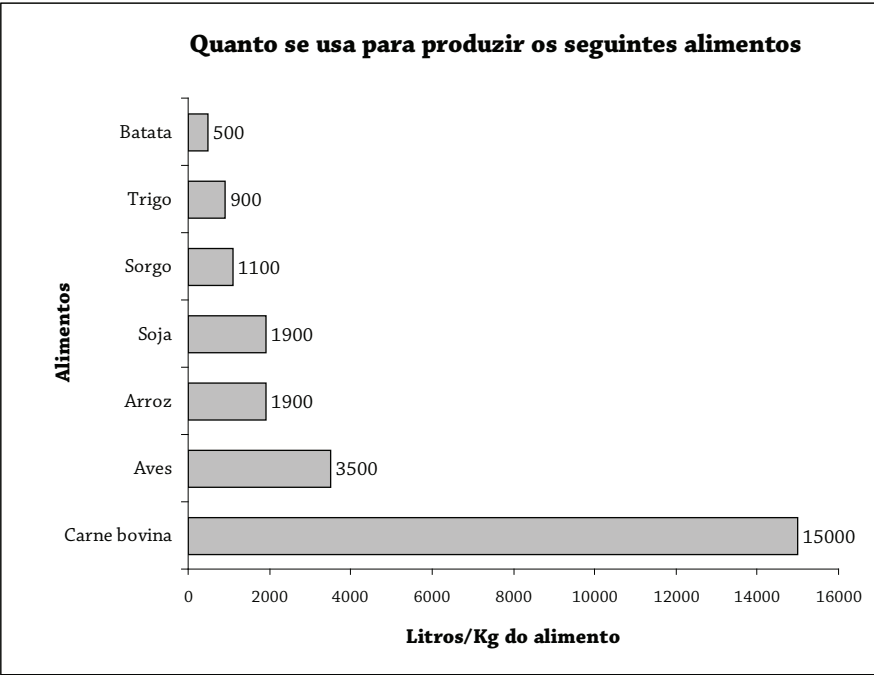
² Disponível em: <http://www.aguas.sc.gov.br/sirhsc/imagens_upload/729/Grafico%20PERH.JPG>.

GRÁFICO 3.3.
Percentuais da Água no Mundo por Setores



Fonte: ANA, 2005.

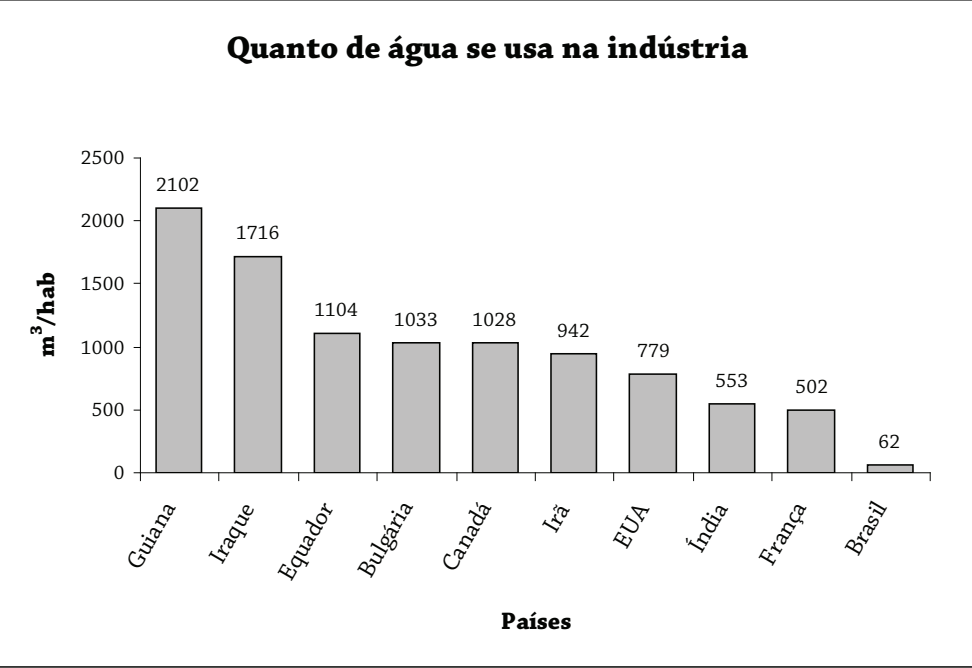
GRÁFICO 3.4.
Volume de Água Consumido para a Produção de Alimentos



Fonte: adaptação de Revista Escola³

³ Disponível em: <<http://revistaescola.abril.com.br/img/plano-de-aula/ensino-fundamental/usos-da-agua.jpg>>.

GRÁFICO 3.5.
Volume de Água per capita utilizado na Indústria.



Fonte: adaptação de Revista Escola4.

A demanda média de água *per capita* no Brasil, considerando todos os usos, é de 1.134 l/hab./dia, valor ainda abaixo dos padrões adequados (1.535 l/hab./dia) e da média mundial (2.736 l/hab./dia). A oferta de 100 m³/hab./ano para usos urbanos é considerada adequada (ANA, 2005).

Como mostra a Figura 9, cerca de 61% da população brasileira se auto-abastece com água subterrânea, sendo 43 % por meio de poços tubulares, 12% por meio de fontes ou nascentes e 6 % por meio de poços escavados ou cacimbas (IBAMA, 2002).]

Tabela 3.5. Municípios Brasileiros Abastecidos por Tipo de Manancial	
MANANCIAL	% DE MUNICÍPIOS
Rios	51
Poços Profundos	43
Lagos	20
Minas e Fontes	12
Açudes e Reservatórios	10
Poços Rasos	6

Fonte: IBAMA (2002).

A gestão das águas envolve o conhecimento do quadro das disponibilidades hídricas e das demandas, visando compatibilizá-las, atender às necessidades do desenvolvimento e evitar ou minimizar conflitos pelo uso da água. Outro problema que os processos de gestão se veem confrontados é o do desperdício de água. Estima-se que, na média, 40% da água distribuída no país, via rede geral, seja perdida nos processos de distribuição, por vazamentos.

As técnicas ultrapassadas de uso da água também contribuem para o desperdício. No Nordeste são gastos, em média, 18.000.000 de litros de água/ano para irrigar um hectare por técnicas convencionais de aspersão, ou seja, 30 vezes mais que em Israel onde as técnicas modernas de gotejamento economizam água (SENADO FEDERAL, 1999). Nas capitais dos estados brasileiros, os vazamentos na rede de distribuição causam perdas de 45% do total retirado diariamente dos mananciais, representando 6,14 milhões de litros ou 2.457 piscinas olímpicas (ISA, 2007).

3.2. Principais Problemas na Gestão de Recursos Hídricos no Brasil

A partir de informações divulgadas na literatura sobre gestão de recursos hídricos no Brasil, bem como em eventos, podemos destacar os principais problemas apontados pelos estudiosos no que se refere à gestão das águas no país:

- Ineficiência de políticas, ações e investimentos – a crise da água também envolve uma crise de eficiência. Muitas vezes o problema não é a falta de água, mas a falta de organização e eficiência nos processos de gestão e nos padrões culturais e comportamentais relacionados ao uso da água. Devem-se buscar padrões que agreguem éticas e eficiência do poder decisório e dos usuários na gestão e utilização da água.
- A eficiência dos meios e dos resultados em todas as dimensões das políticas públicas deve ser buscada em termos da relação quantidade/qualidade/custos/benefícios dos produtos oferecidos ou dos resultados alcançados. Ela envolve, necessariamente, a obtenção de maior produtividade e benefícios sociais com a menor quantidade de água e os menores custos possíveis.
- Paradigma do aumento contínuo da oferta de água em quantidade e qualidade, principalmente pela aplicação dos tradicionais modelos estruturais e de captações de água cada vez mais distantes – com técnicas de captação, distribuição e tratamento de grande porte, complexas e em distâncias maiores, a água torna-se cada vez mais cara e com qualidade nem sempre garantida. As tarifas elevadas e pouco compreendidas pela população tornam-se pouco aceitas socialmente. Além disso, a falta de participação social no processo de definição das tarifas agrava a rejeição. Há um atraso na aplicação da lógica de gestão da demanda ao invés apenas da gestão da oferta.

- Modelo de gestão paternalista e burocrático baseado na lógica da água como recurso de sobrevivência (áreas com escassez de água), ao invés da água como capital social, ecológico e econômico, cuja meta é a eficiência do seu uso e a proteção de sua quantidade e qualidade.
- Falta de planos de ação e de metas plurianuais que sejam elaborados com rigor técnico e informações adequadas, e que sejam efetivamente aplicados, monitorados e fiscalizados.
- Lógica de gestão baseada em obras e investimentos de grande porte (medidas estruturais), tidas como de maior impacto social, mais prestígio político (políticas de duração dos mandatos) e que exigem vultosos investimentos oriundos, muitas vezes de empréstimos externos e/ou subsídios públicos. O modelo de gestão TVA (*Tennessee Valley Authority*), criado nos EUA em 1933, influenciou esta lógica no Brasil, principalmente a partir dos anos de 1950.
- Padrão cultural ultrapassado em relação às questões hídricas, que são vistas socialmente como de competência exclusiva do Estado, fomentando a utilização ineficiente da água pela população.
- Ênfase nos balanços entre oferta e demanda de água. Esta relação não é suficiente para a gestão da água. As demandas são sempre superestimadas no sentido em que incorporam os desperdícios e a ineficiência do setor de abastecimento de água, incluindo perdas por vazamentos (média de 40 a 60% nas unidades da Federação, enquanto a média aceitável internacionalmente é de 10%). Deve-se buscar a gestão da demanda e o estabelecimento de metas e planos de ação que enfoquem medidas preventivas de qualidade ambiental e de busca de eficiência econômica, ecológica e social.
- Subvalorização das águas subterrâneas nas políticas públicas e nas ações de saneamento básico.

Comparativamente, a captação de água subterrânea é mais barata e prática do que a captação de águas superficiais (tidas como geradoras de mais prestígio político devido às grandes obras que envolvem). As águas subterrâneas são utilizadas por grande parcela da população brasileira, mas de forma ilegal e inadequada, sem controle e fiscalização. Há certo preconceito em relação à água subterrânea em áreas do Nordeste, devido às históricas políticas de abertura indiscriminada de poços sem o rigor técnico exigido, levando, muitas vezes, ao abandono dos poços devido à salinização.

Os investimentos no setor de abastecimento de água subterrânea são oriundos principalmente do setor privado, que obtém lucros pelo retorno relativamente rápido do capital em relação aos sistemas de abastecimento de águas superficiais.

Em zonas de escassez hídrica podem ser formados bancos de água subterrânea por meio de poços de injeção artificial (recarga artificial) de águas pluviais, esgotos tratados, dentre outros. As águas subterrâneas favorecem a perenização de canais, a redução de

perdas por evaporação e a autodepuração da água poluída. Porém, deve-se atentar para a elevada fragilidade dos aquíferos e aos riscos de superexploração e poluição das águas subterrâneas, que são bem mais difíceis de tratar em relação às águas superficiais.

Dentre os obstáculos à utilização das águas subterrâneas no Brasil, destacam-se a carência de informações hidrogeológicas e a carência e ineficiência de controle/fiscalização dos usos da água, que dependem da efetivação do princípio da outorga.

- Fragmentação dos investimentos públicos e não consideração de interdependência entre organismos públicos e setores usuários. As dificuldades de um processo de gestão integrada entre os órgãos gestores das águas e os demais organismos ambientais são sentidas em quase todos os países do mundo. Há uma tendência para o isolamento e a setorização da gestão.
- Inexistência de compreensão social dos processos decisórios, modelos e políticas de gestão (ações, investimentos, custos, tarifas, etc.). A população pouco compreende e pouco acompanha os processos e critérios de gestão.
- Falta de participação efetiva dos usuários no processo decisório, levando ao questionamento do modelo participativo-representativo.
- Políticas públicas e de investimentos que negligenciam a relação entre gestão de recursos hídricos, qualidade ambiental, saúde e qualidade de vida.
- Subutilização das águas pluviais e dos esgotos tratados. As águas de qualidade inferior devem ser aproveitadas para usos menos exigentes, como a irrigação de certos cultivos, a lavagem de estruturas e equipamentos, etc.

A gestão das águas envolve uma adequada gestão do setor de saneamento, dado que a principal causa de poluição das águas nos países em desenvolvimento, como o Brasil, decorre do lançamento de esgotos domésticos e industriais não tratados e de resíduos sólidos nos cursos d'água. Os pontos críticos da gestão da água no Brasil, em relação ao setor de saneamento, foram destacados por Rebouças (2004):

- Elevadas perdas de água entre os processos de captação e distribuição da água. Ocorrem, em média, perdas entre 40 e 60 % da água tratada devido a vazamentos, desperdício ou ineficiência burocrática/gerencial.
- Abastecimento de água irregular (rodízios, falta de água) e qualidade de água não garantida (apesar da maior parte da população urbana ser atendida por água tratada).
- Cerca de 50 % da população urbana e mais de 60 % da população total não é atendida por coleta de esgoto e 90 % do esgoto coletado é lançado sem tratamento nos cursos d'água e outros receptores.
- Apenas 72 % dos domicílios são atendidos por coleta de lixo, sendo 90 % do lixo depositado a céu aberto em lixões.
- Apesar da abundância de água doce em grande parte do país, prevalece a estratégia da escassez para obtenção de verbas ou financiamentos privilegiados.

3.3. Estrutura Legal e Institucional da Gestão da Água no Brasil

3.3.1. Marcos Históricos

- **1934: Decreto do Código de Águas** (Decreto Federal n. 24.645 de 10 de julho de 1934). O Código foi o primeiro instrumento legal de uso nacional destinado à gestão das águas. Foi um Código moderno para a sua época, vislumbrando, de forma indireta, alguns instrumentos de gestão, como a cobrança e a outorga. Porém, o Código referendou e consolidou a primazia do setor elétrico na gestão da água no país.
- **1983:** Início das discussões sobre elaboração de um modelo de gestão adequado ao país no Seminário Internacional sobre Gerenciamento de Recursos Hídricos em Brasília, organizado pela **Associação Brasileira de Recursos Hídricos**.
- **1988:** Constituição Federal – proposição do **Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos**, atribuição de valor econômico à água, estabelecimento da bacia hidrográfica como base para o planejamento regional, extinção do domínio privado da água (todos os corpos d’água passaram a ser de domínio público). A Constituição também estabeleceu dois domínios da água no país:
 - Domínio da União – rios ou lagos que banhem mais de uma unidade federada ou que sirvam de fronteira entre essas unidades, ou de fronteira entre o território do Brasil e países vizinhos, deles provenham ou para eles se dirijam.
 - Domínio dos estados – águas superficiais ou subterrâneas, fluentes, emergentes e em depósito, ressalvadas as decorrentes de obras da União.
- **1988: Acordo Brasil-França** de gerenciamento dos recursos hídricos, visando o treinamento de recursos humanos no país para a gestão integrada de bacias e preparação de planos de ação técnicos, a descentralização da gestão da água e do ambiente, a democratização das decisões com a participação de todos os usuários, e a implantação da cobrança pelo uso e poluição da água.
- **1991:** Projeto de lei nº 2.249/91 – proposição da **Política Nacional de Recursos Hídricos** e do **Sistema Nacional de Recursos Hídricos**, para ordenamento das ações e segmentos atuantes no gerenciamento.
- **1992:** Criação do **Ministério do Meio Ambiente**.
- **1994:** O estado de Minas Gerais aprova a **Política Estadual de Recursos Hídricos**, modificada em 1999.
- **1995:** O Ministério do Meio Ambiente passa a incorporar a pasta de recursos hídricos.
- **1997: Lei das Águas** n. 9.433/97 – criação da **Política Nacional de Recursos Hídricos** e do **Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos**.

- **1999:** Criação do **Fórum Nacional de Comitês de Bacia Hidrográfica**.
- **2000:** Criação da **Agência Nacional de Águas – ANA**.
- **2002:** o Conselho Nacional de Recursos Hídricos – CNRH – aprova valores e define critérios da cobrança na bacia do Paraíba do Sul.
- **2004:** o CNRH delega à Associação Pró-Gestão das Águas da Bacia Hidrográfica do Paraíba do Sul as competências para exercer função de Agência de Águas.
- **2009:** o CNRH aprova o início da cobrança pelo uso da água na bacia do São Francisco.

3.3.2. Lei n. 9.433 de 08 de janeiro de 1997

A Lei das Águas foi concebida com base na experiência francesa de gestão de águas, iniciada em 1964. Com a Lei, foi instituída a Política Nacional de Recursos Hídricos e criado o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos.

a) Princípios de Gestão

- Adoção da bacia hidrográfica como unidade de planejamento – a Lei das Águas considera a bacia hidrográfica como a unidade espacial primordial para a implementação da Política Nacional de Recursos Hídricos e atuação do Sistema de Gerenciamento de Recursos Hídricos, dada a sua particularidade de concentrar todos os fluxos superficiais pluviais e fluviais entre os trechos hidrográficos de montante (nascentes, zonas de cabeceiras, alto das encostas) e os trechos de jusante (foz do rio principal da bacia).

Por outro lado, apesar da importância das bacias, deve-se salientar que há outras unidades espaciais de gestão que podem ser adotadas quando os objetivos forem justificados. Partindo deste princípio, o Conselho Nacional de Recursos Hídricos definiu a **Divisão Hidrográfica Nacional**, adotada no Plano Nacional de Recursos Hídricos – PNRH –, por meio da Resolução do CNRH nº 32, de 15 de outubro de 2003; nesta divisão, o país foi dividido em doze regiões hidrográficas (Figura 1).

Uma região hidrográfica é “o espaço territorial brasileiro compreendido por uma bacia, grupo de bacias ou sub-bacias hidrográficas contíguas com características naturais, sociais e econômicas homogêneas ou similares, com vistas a orientar o planejamento e gerenciamento dos recursos hídricos” (ANA, 2005). Visando facilitar o planejamento, as regiões hidrográficas foram divididas em 83 unidades (nível 2) e 332 unidades hidrográficas de referência (nível 3).

FIGURA 3.1.
Divisão Hidrográfica Nacional.



Fonte: adaptação de Resolução CNRH n. 32 de 20035.
Elaboração: Joyce Bonna.

5 Disponível em: <<http://www.ana.gov.br/gestaoRecHidricos/InfoHidrologicas/mapasSIH/4-RHidrograficas.pdf>>.

Tabela 3.6. Detalhamento das Regiões Hidrográficas Brasileiras			
REGIÕES HIDROGRÁFICAS	ÁREA (Km2)	PRINCIPAIS RIOS	POPULAÇÃO
Amazônica	6.974.410	Amazonas	7.609.424
Tocantins-Araguaia	967.059	Tocantins	7.890.714
Atlântico Nordeste Ocidental	254.100	Gurupi, Pericumã, Mearim, Itapecuru, Munim	4.742.431
Parnaíba	344.112	Parnaíba	3.630.431
Atlântico Nordeste Oriental	344.112	Jaguaribe, Piranhas ou Açu, Paraíba	21.606.881
São Francisco	638.324	São Francisco	12.823.013
Atlântico Leste	374.677	Mucuri, Pardo, Jequitinhonha, Contas, Paraguaçu, Itapicuru, Vaza-barris	13.641.045
Atlântico Sudeste	229.8727	Paraíba do Sul, Doce	25.644.396
Paraná	879.860	Paraná, Grande, Paranaíba	54.639.523
Paraguai	363.445	Paraguai	1.887.401
Uruguai	174.612	Uruguai	3.834.654
Atlântico Sul	185.856	Itajaí, Capivari	11.592.481

Fonte: adaptação de Resolução CNRH n. 32 de 20036.

No caso de Minas Gerais, além das bacias hidrográficas, o governo do estado, por meio do **Instituto Mineiro de Gestão das Águas – IGAM** –, adotou as **Unidades de Planejamento e Gestão de Recursos Hídricos de Minas Gerais**, as quais não coincidem exatamente com as bacias (Figura 2). Estas unidades visam facilitar a gestão das águas no estado, a partir da identificação de regiões homogêneas quanto a critérios geográficos.

6 Adaptação de Resolução CNRH n. 32 de 2003.

FIGURA 3.2.
Mapa de Unidades de Planejamento e Gestão de Recursos Hídricos de Minas Gerais



Fonte: adaptação de UPGRHMG7.
Elaboração: Joyce Bonna.

- A água é um bem de domínio público, não sendo possível sua apropriação como um bem privado.
- O uso da água tem que ser autorizado através do instrumento da outorga, ou seja, licença de utilização concedida pelo poder público.
- Priorização dos usos múltiplos da água, pela qual todos os setores usuários têm igual acesso ao uso dos recursos hídricos; na teoria, há o término da hegemonia anterior do setor elétrico sobre o processo de gestão das águas superficiais.
- Reconhecimento da água como um bem finito e vulnerável, visando combater a lógica de apropriação insustentável da água como um bem infinito e inesgotável.
- Reconhecimento do valor econômico da água, que deve ser passível de cobrança pelo seu uso.
- Defesa da gestão descentralizada e participativa a partir dos comitês de bacia hidrográfica ou outros colegiados decisórios participativos;

7 Disponível em <http://aguas.igam.mg.gov.br/aguas/imagens/mapa_upgrh2.jpg>.

- Em caso de escassez, o uso prioritário dos recursos hídricos é o consumo humano e dessedentação de animais;
- Deve haver articulação da gestão dos recursos hídricos com a do uso do solo.

b) Instrumentos de Gestão

- **Plano Nacional de Recursos Hídricos** – documento programático para o setor; são planos diretores que visam fundamentar e orientar a implementação da Política Nacional de Recursos Hídricos e o gerenciamento dos recursos hídricos, e devem ser elaborados por bacia hidrográfica, por estado e para o país.
- Outorga de direito de uso dos recursos hídricos – o usuário recebe uma autorização, uma concessão ou uma permissão.
- Cobrança pelo uso da água.
- Compensação a municípios.
- Enquadramento dos corpos d’água em classes de uso.
- **Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos** – encarregado de coletar, organizar e difundir dados relativos aos recursos hídricos, provendo os gestores, os usuários e a sociedade civil.

c) Organismos Institucionais de Gestão (Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos)

- **Conselho Nacional de Recursos Hídricos – CNRH** – órgão mais elevado na hierarquia do Sistema Nacional de Recursos Hídricos, a quem cabe decidir sobre as grandes questões do setor.
- **Conselhos de Recursos Hídricos** dos Estados e Distrito Federal.
- **Comitês de Bacias Hidrográficas – CBH** – organizações participativas que congregam representantes do poder público, dos usuários da água e da sociedade civil organizada; são destinados a agir como fóruns de decisão no âmbito de cada bacia.
- **Agências da Água** – representam os organismos executivos dos CBH, possuindo a função, entre outros, de gerir e aplicar os recursos oriundos da cobrança pelo uso da água.
- **Organizações civis de recursos hídricos** – entidades da sociedade civil organizada.

Os **Comitês de Bacias Hidrográficas** são compostos por representantes do poder público (União, estados e municípios no caso dos CBH federais, e estados e municípios no caso dos CBH estaduais), dos usuários das águas e das entidades civis de recursos hídricos com atuação comprovada na bacia. As funções dos Comitês são:

- Promover o debate das questões relacionadas a recursos hídricos e articular a atuação das entidades intervenientes.
- Arbitrar, em primeira instância administrativa, os conflitos relacionados aos recursos hídricos.
- Aprovar o Plano de Recursos Hídricos da bacia.
- Acompanhar a execução do Plano de Recursos Hídricos da bacia.
- Estabelecer os mecanismos de cobrança pelo uso de recursos hídricos e sugerir os valores a serem cobrados.
- Estabelecer critérios e promover o rateio de custo das obras de uso múltiplo, de interesse comum ou coletivo.

As Agências de Água possuem a função de secretaria executiva dos Comitês de Bacias Hidrográficas. Sua criação é autorizada pelo Conselho Nacional de Recursos Hídricos ou pelos Conselhos Estaduais de Recursos Hídricos, mediante solicitação dos Comitês, sendo suas funções:

- Manter balanço atualizado da disponibilidade de recursos hídricos em sua área de atuação.
- Manter o cadastro de usuários de recursos hídricos.
- Efetuar a cobrança pelo uso dos recursos hídricos.
- Analisar e emitir pareceres sobre projetos e obras a serem financiados com recursos gerados pela cobrança.
- Acompanhar a administração financeira dos recursos arrecadados com a cobrança pelo uso da água.
- Gerir o Sistema de Informações sobre Recursos Hídricos em sua área de atuação.
- Promover os estudos necessários para a gestão dos recursos hídricos em sua área de atuação.
- Elaborar o Plano de Recursos Hídricos para apreciação do Comitê.
- Propor ao Comitê o enquadramento dos corpos d'água nas classes de uso (para encaminhamento ao Conselho Nacional ou aos Conselhos Estaduais de Recursos Hídricos, de acordo com os respectivos domínios), os valores a serem cobrados pelo uso de recursos hídricos, o plano de aplicação dos recursos e o rateio de custo das obras de uso múltiplo, de interesse comum ou coletivo.

A **Secretaria de Recursos Hídricos** do Ministério do Meio Ambiente é voltada à formulação de políticas para o setor.

A **Agência Nacional de Águas**, que funciona como secretaria executiva do Conselho Nacional de Recursos hídricos, tem como objetivos:

- Elaborar o Plano Nacional de Recursos Hídricos.
- Administrar o Sistema Nacional de Informações sobre os Recursos Hídricos do país.
- Fornecer outorgas de direito de uso da água de mananciais de domínio da União.
- Articular com os estados e o distrito federal a implantação e funcionamento dos Comitês de bacias e agências da água.
- Treinar e capacitar técnicos do Brasil para o setor de recursos hídricos.

3.4. Os Planos Diretores de Bacias Hidrográficas

A elaboração do plano diretor da bacia hidrográfica é considerada, por muitos, o principal instrumento para gestão dos recursos hídricos. Constitui-se em um instrumento técnico de apoio ao planejamento das ações governamentais em relação ao aproveitamento, gestão e conservação dos recursos hídricos, direcionado ao desenvolvimento regional. Sua elaboração compreende um processo participativo, que visa propor as diretrizes básicas de ação governamental refletindo os anseios da sociedade organizada.

Um plano diretor de bacia é um instrumento de planejamento dinâmico, com visão de longo prazo, definido em cenários que permitam uma gestão compartilhada dos recursos hídricos. A sua elaboração envolve várias etapas:

1. **Diagnóstico:** serve de base para o Plano Diretor, sendo elaborado a partir da definição de uma metodologia interdisciplinar que explique o eixo de integração entre os componentes físicos, bióticos, sociais, econômicos e institucionais, capaz de identificar as relações entre as estruturas do meio antrópico e natural.
2. **Plano Diretor** (propriamente dito): planejamento e proposição de prioridades de ação escalonadas no tempo-espço, com as respectivas avaliações de custo para compor o modelo de gerenciamento integrado de recursos hídricos na bacia, sob a ótica do desenvolvimento sustentado.
3. **Proposta:** modelo de gerenciamento integrado dos recursos hídricos da bacia, visando estabelecer um equilíbrio dinâmico no uso da água, satisfazendo as necessidades do homem, da fauna e da flora, e devendo contemplar a organização de um sistema institucional que compatibilize as ações dos diversos órgãos e entidades públicas e privadas. Deve também possibilitar o controle de fenômenos críticos como secas e inundações.

3.5. Enquadramento de Corpos d'água em Classes de Uso (Resolução Conama nº. 357/2005)

O enquadramento estabelece o nível de qualidade (ou classe) a ser alcançado e/ou mantido em um segmento de corpo d'água ao longo do tempo. É o estabelecimento da meta ou objetivo de qualidade da água (classe) a ser, obrigatoriamente, alcançado ou mantido em um corpo d'água ou aquífero, ou porção destes, de acordo com os usos preponderantes pretendidos ao longo do tempo (Resolução Conama nº. 357/2005)

As etapas do enquadramento são:

1. Levantamento dos usos atuais e futuros das águas da bacia
2. Etapa de classificação dos cursos d'água em classes de uso – envolve a definição da classe a qual cada rio ou trecho de rio deve pertencer, ou seja, a qualidade da água necessária para atender aos usos prioritários encontrados; a qualificação é “a qualificação das águas superficiais ou subterrâneas em função de padrões de qualidade que possibilitem o seu enquadramento” (Resolução Conama nº. 396/2008); neste sentido, a condição de qualidade representa a qualidade apresentada pelas águas superficiais ou subterrâneas, num determinado momento, frente aos requisitos de qualidade dos usos (Resolução Conama nº. 396/2008)
3. Avaliação da qualidade atual das águas, através de coleta e análises de amostras, verificando-se se o rio pertence realmente à classe que atende aos seus usos prioritários.
4. Efetivação do enquadramento – a busca da meta final do enquadramento a partir de um plano de ação, visando que a qualidade das águas atenda aos usos existentes; são propostas ações como o tratamento de esgotos, destinação de resíduos sólidos urbanos e industriais, proteção de mananciais de captação de água e controle dos efluentes industriais e minerários.

3.6. Classes de Uso Preponderante das Águas Territoriais Brasileiras

São classes de uso preponderantes das águas territoriais brasileiras:

- Abastecimento doméstico
- Preservação do equilíbrio natural das comunidades aquáticas
- Proteção às comunidades aquáticas
- Harmonia paisagística
- Recreação
- Irrigação
- Criação natural e/ou intensiva de espécies destinadas à alimentação humana

- Navegação
- Usos menos exigentes

Há nove classes de águas superficiais no Brasil (*vide* Resolução Conama nº. 357/2005):

especial; classes 1 a 4 para água doce; classes 5 e 6 para águas salinas; e classes 7 e 8 para águas salobras. As águas de classe especial são as de melhor qualidade e destinam-se ao abastecimento doméstico, sem prévia ou simples desinfecção e preservação do equilíbrio natural das comunidades aquáticas.

No caso do enquadramento das águas subterrâneas, há seis classes: classe especial e classes 1 a 5 (*vide* Resolução Conama nº. 396/2008).

Em função das classes são definidos limites de lançamento de resíduos pelos órgãos competentes. Podem ser limites absolutos, como no caso da classe especial para águas superficiais em que “não são tolerados lançamentos de águas residuárias, domésticas e industriais, lixo e outros resíduos sólidos, substâncias potencialmente tóxicas, defensivos agrícolas, fertilizantes químicos e outros poluentes, mesmo tratados”. Nos demais casos são tolerados lançamentos desde que, além de atenderem uma série de restrições no que tange à qualidade do efluente, “não venham a fazer com que os limites estabelecidos para as respectivas classes sejam ultrapassados”.

Não há impedimento no aproveitamento de águas de melhor qualidade em usos menos exigentes, desde que tais usos não prejudiquem a qualidade estabelecida para estas águas.

3.7. Cobrança pelo Uso da Água

A cobrança é um instrumento de gestão que parte do princípio que a água é um recurso mineral finito e que possui peso econômico associado ao seu valor (por sua vez, associado ao aspecto da abundância ou da raridade) e aos custos necessários para sua disponibilização em quantidade e qualidade. Nesse sentido, determinar o valor da água é algo complexo.

A adoção do **princípio usuário-pagador** visa mudar comportamentos sociais insustentáveis (como o desperdício da água) e permitir a geração de recursos financeiros que viabilizem ações nas bacias onde eles são cobrados. As receitas podem viabilizar a operacionalização das decisões, levando a obras como estações de tratamento de água, estações de tratamento de esgotos, etc.. A cobrança pode evitar que toda a sociedade pague, através de impostos, os benefícios instaurados em cada bacia hidrográfica, ou seja, que toda a sociedade pague as externalidades negativas geradas pelos usuários de cada bacia.

Porém, a cobrança é um instrumento que gera discussões e críticas em função de ser associada, muitas vezes, a um imposto ou tarifa a mais na conta de água. Para tanto, não se deve confundir tal cobrança com o pagamento dos serviços relacionados ao saneamento, ou seja, aos processos de captação, distribuição e tratamento da água que chega aos domicílios. Neste caso, o usuário está pagando, via conta de água, por serviços oferecidos pelas companhias de saneamento estaduais ou por serviços autônomos municipais.

A Política Nacional do Meio Ambiente concebe a cobrança, como princípio básico, quando apresenta a “imposição ao poluidor e ao predador, da obrigação de recuperar e/ou indenizar os danos causados e, ou usuário, da contribuição pela utilização de recursos ambientais com fins econômicos”.

O Código de Águas, estabelecido pelo Decreto Federal nº 24.645, de 10 de julho de 1934, já previa que “que o uso comum das águas pode ser gratuito ou retribuído, conforme leis e regulamentos da circunscrição administrativa a que pertencerem”, sendo interpretado como uma autorização aos estados para estabelecerem leis ou regulamentos de cobrança.

Podem ser enumeradas as seguintes racionalidades para a cobrança:

- 1. **Financeira:** recuperação de investimentos e pagamento de custos operacionais e de manutenção; geração de recursos para a expansão dos serviços.
- 2. **Econômica:** estímulo ao uso produtivo do recurso cobrado.
- 3. **Distribuição de renda:** transferência de renda de camadas mais privilegiadas economicamente para as menos privilegiadas, a partir da cobrança proporcional à capacidade de pagamento.
- 4. **Equidade social:** contribuição pela utilização de recurso ambiental para fins econômicos.

Há diversas formas de medição do volume de água utilizada ou consumida, para fins de cobrança, como por exemplo:

- Medição direta do volume captado por meio de medidores.
- Cálculo em função da energia consumida pela estação de bombeamento.
- Cálculo em função da vazão máxima da estação de bombeamento e do período de operação, indicados por medidores.
- Cálculo em função da vazão máxima da estação de bombeamento e de estimativa do seu tempo de funcionamento.
- Estimativas do volume utilizado em função da área irrigada, conforme o tipo de cultura e técnicas de irrigação.
- Cálculo do volume utilizado em função da tonelagem de material extraído para projetos de extração de depósitos aluviais de leitos de rios.

3.8. Outorga do Uso da Água

A outorga é fundamentada legalmente no Artigo 42 do Código de Águas de 1934, sendo considerado na Constituição Federal no que tange às suas normas. A outorga é um instrumento que assegura legalmente os direitos do usuário da água e, ao mesmo tempo, permite controlar e proteger os recursos hídricos. É um instrumento jurídico pelo qual o

Poder Público, entendido como o órgão que possui a devida competência legal, confere ao administrado a possibilidade de usar privativamente a água. Pressupõe-se o uso privativo de um bem público e trata-se de um ato administrativo sujeito ao exercício do Poder de Polícia. Este poder é uma faculdade da administração pública para restringir ou controlar as atividades particulares, através de regulamentos ou de instrumentos específicos que, no caso dos recursos hídricos, refere-se à regulamentação, concessão de outorgas, fiscalização e imposição de penalidades.

A outorga pelo uso da água vem sendo aplicada com a fixação de um valor de referência que limita a utilização superior do recurso. Em estados como Minas Gerais, este valor tem sido fixado em função da vazão mínima média, com sete dias consecutivos de duração e tempo de retorno de dez anos ($Q_{7,10}$).

A outorga é fornecida pela ANA no caso de rios federais, e pelos órgãos estaduais de gestão de recursos hídricos (ou de gestão ambiental) no caso dos estados da Federação.

O Código de Águas estabelece as águas públicas de uso comum ou dominicais. Se a utilização das águas públicas de uso comum implicar uma restrição ao direito de uso dos demais, surge a necessidade do exercício do Poder de Polícia, através da regulamentação, concessão e fiscalização das outorgas.

É o uso privativo do bem público que enseja a necessidade de outorga. Se as águas públicas são de domínio da União ou dos Estados, estes devem delegar a órgãos públicos da administração a competência para conceder outorgas de direito de uso.

Segundo o Código Civil (art. 65), os bens públicos (incluindo águas públicas) são de domínio nacional, pertencentes à União, aos Estados ou aos Municípios, sendo classificados de acordo com sua destinação: uso comum, especial e dominical. O uso comum pressupõe que qualquer pessoa pode usar os bens públicos, desde que cumpra os regulamentos aplicáveis. Não há necessidade de manifestação do Poder Público.

De acordo com a Constituição Federal (1988), os titulares do domínio das águas públicas no Brasil são a União e os Estados, não existindo, no direito em vigor, águas municipais.

3.9. Empreendimentos e Usos da Água Sujeitos a Outorga (Lei Federal nº 9.433 de 08/01/97)

- 1- Derivação ou captação de água em um corpo d’água para consumo, inclusive abastecimento público e irrigação, ou insumo de processo produtivo.
- 2- Extração de água de aquífero subterrâneo para consumo ou insumo de processo produtivo.
- 3- Lançamento, em corpo d’água, de esgotos ou outros resíduos líquidos ou gasosos, tratados ou não, com a finalidade de sua diluição, transporte ou disposição final.
- 4- Aproveitamento de potencial hidrelétrico.

- 5- Outros usos que alterem o regime, a quantidade ou a qualidade da água.
- 6- Execução de tipos de obras que interferem com os recursos hídricos: barramentos e açudes; perfuração de poços tubulares profundos; modificações do curso, leito e margens dos rios; construção de estruturas de transposição de níveis ou travessias; construção de diques e desvios de cursos d’água; canalização de córregos e obras de drenagem de várzeas; construção de estrutura de lançamento ou disposição de resíduos; instalação de turbinas ou equipamentos assemelhados; levantamentos, pesquisas, monitoramento; e outras.

3.10. Independentes de Outorga pelo Poder Público

- 1- O uso de recursos hídricos para a satisfação das necessidades de pequenos núcleos populacionais.
- 2- Derivações, captações e lançamentos de resíduos considerados insignificantes.
- 3- Acumulações de água consideradas insignificantes.

A Tabela 5 sintetiza as concepções dos tipos de outorga aplicadas no Brasil.

Tabela 3.7 – Tipos de outorga de água	
TIPOLOGIA	CONCEITO
Conceção	Quando as obras, serviços ou atividades forem desenvolvidos por pessoas jurídicas de direito público, ou quando se destinarem à finalidade de utilidade pública.
Autorização	Quando as obras, serviços ou atividades forem desenvolvidos por pessoa física ou jurídica de direito privado, e quando não se destinarem à finalidade de utilidade pública.
Permissão	Quando as obras, serviços ou atividades forem desenvolvidos por pessoa física ou jurídica de direito privado, sem destinação de utilidade pública e quando produzirem efeitos insignificantes nas coleções hídricas.
Vazão Insignificante	Aquela que produz efeitos insignificantes nas coleções hídricas. Adota-se, geralmente, como limite máximo para outorga, 30 % da $Q_{7,10}$, podendo ser suspensa quando o curso fluvial apresentar vazões mínimas inferiores a este limite.
Derivação	Qualquer utilização do recurso hídrico, com ou sem barramento ou lançamento de efluentes.

3.11. Estudos de Impacto Ambiental

A avaliação de impactos ambientais é um dos instrumentos da Política Nacional do Meio Ambiente e compreende a prévia avaliação de impactos causados por um empreendimento, visando sua aprovação ou proibição. Tal estudo permite a minimização dos impactos e a internalização de pelo menos parte dos custos ambientais dos projetos, através de medidas como modificações nas obras e monitoramento ambiental.

A avaliação de impactos ambientais foi introduzida inicialmente na legislação brasileira pela Lei nº 6.803 de 1980, que mencionou uma avaliação de impacto obrigatória para a localização de polos petro, cloro e carboquímicos, além de instalações nucleares. Em 1981, a Política Nacional do Meio Ambiente determinou como um de seus instrumentos.

As diretrizes para implementação foram estabelecidas em 1986, através da Resolução nº 1 do Conama, complementada pelas Resoluções nº 6 e nº 11 do mesmo ano. Segundo o Conama, o licenciamento de atividades modificadoras do meio ambiente depende da elaboração de estudo de impacto ambiental e respectivo relatório, a serem submetido à aprovação do órgão estadual competente, entre as quais, diz respeito diretamente aos recursos hídricos: barragens para quaisquer fins hidrelétricos acima de 10 MW, de saneamento ou de irrigação; abertura de canais de navegação, drenagem e irrigação; retificação de cursos de água; abertura de barras e embocaduras; transposição de bacias; e diques. O Artigo 225 da Constituição estabeleceu a sua exigência para atividades potencialmente degradadoras do ambiente.

A elaboração de um **Estudo de Impacto Ambiental – EIA** – pode passar pelas seguintes etapas:

- Caracterização do empreendimento
- Diagnóstico ambiental
- Caracterização dos meios físico, biótico e socioeconômico e cultural
- Prognóstico ambiental (análise da evolução do meio ambiente com a caracterização dos impactos positivos e negativos, sem e com o empreendimento)
- Análise dos impactos ambientais diagnosticados e prognosticados
- Plano de Controle Ambiental com a definição de medidas e ações

O **Relatório de Impacto Ambiental – Rima** – deverá conter, no mínimo:

- Objetivos e justificativas do projeto.
- Descrição do projeto e suas alternativas tecnológicas e de locação.
- Diagnóstico ambiental da área de influência do projeto.
- Descrição dos impactos ambientais analisados.
- Caracterização da qualidade ambiental futura da área de influência.

- Descrição dos efeitos esperados das medidas mitigadoras previstas em relação aos impactos negativos.
- Programa de acompanhamento e monitoramento dos impactos.

O **Zoneamento Ambiental** é um instrumento para a formulação das diretrizes para o planejamento ambiental, baseado no levantamento das características ambientais de dada porção do espaço, incluindo os aspectos do quadro físico e humano e os impactos ambientais. Compreende a associação entre o ordenamento do espaço físico de dada região e as diretrizes a serem implementadas em cada área proposta no ordenamento, de forma a respeitar-se a vocação da área e a conservação dos recursos ambientais, visando à manutenção ou à melhoria da qualidade de vida.

É elaborado a partir do levantamento multidisciplinar integrado dos recursos ambientais e da situação socioeconômica e cultural, baseado na integração dos conhecimentos sobre a estrutura e o funcionamento dos sistemas naturais.

A **Alocação de Usos Múltiplos** envolve a organização lógica dos usos no espaço, compatibilizando-se as necessidades e as implicações dos usos de montante a jusante, e minimizando-se os conflitos (redução da disponibilidade hídrica, poluição, etc.). Em situações graves, em que não adianta a realocação de usos, há a necessidade de eliminação de usos segundo as prioridades. São fatores considerados na alocação de usos múltiplos:

1. Benefícios coletivos
2. Relações interusos
3. Escala geográfica e econômica
4. Custos e interesse
5. Riscos



A dinâmica da água no espaço e no tempo é um processo de forte conotação geográfica. Mais do que por sua geometria, é por sua geografia que uma bacia hidrográfica deve ser compreendida. A geografia permite uma análise mais apurada do espaço e do tempo hidrológico, e uma melhor compreensão do funcionamento de cada sistema hidrológico e das interações entre fenômenos hidrológicos.

Pode-se afirmar que a hidrologia é, por essência, uma área da geografia. O ciclo hidrológico é um dos níveis de organização do espaço que não se desenvolve sobre, mas no espaço geográfico. Hidrologia e espaço não podem ser dissociados. A compreensão dos fatos hidrológicos passa necessariamente pela compreensão da estrutura e dos processos espaciais e o progresso da hidrologia passa pelo progresso da geografia, e vice versa (LAMBERT, 1996).

A dinâmica da água em termos espaciais envolve o que é denominado de ciclo hidrológico (Figura 4.1.). Este é concretizado pela dinâmica da água ao longo de três ramos hidrológicos: atmosférico, terrestre e oceânico. As variáveis principais do ciclo são:

- precipitação (P)
- interceptação (In)
- infiltração (I)
- evaporação (E)
- transpiração (T)
- escoamento superficial (Es)
- escoamento subterrâneo (Esu)
- armazenamento hídrico (A)

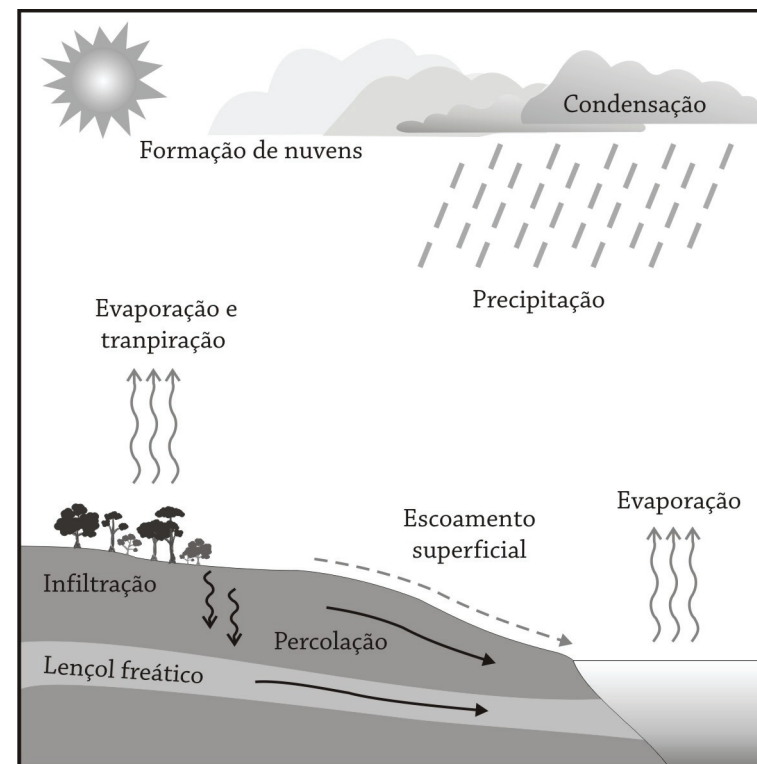
Em cada uma dessas etapas a água adquire características próprias em termos físicos, químicos e biológicos. A quantificação dos valores hídricos presentes ao longo do ciclo é realizada pelo balanço hidrológico, cuja versão simplificada pode ser entendida como:

$$P - E : Es$$

sendo **P**: precipitação, **E**: evaporação e **Es**: escoamento superficial

Essa simplificação é muitas vezes utilizada devido à dificuldade de se quantificar os volumes de água envolvidos no ciclo hidrológico.

FIGURA 4.1.
Ciclo Hidrológico



Elaboração: Breno Marent e Joyce Bonna

4.1. Elementos do Ciclo Hidrológico

4.1.1. Umidade do Ar

A umidade do ar é uma das variáveis que determinam as variações climáticas do globo, já que também influencia a temperatura do ar, e vice versa. Seus valores são determinados pelas taxas de evaporação da água. A medição da umidade pode ser realizada por:

- **Psicrômetros:** aparelho constituído de dois termômetros, um de bulbo seco, que mede a temperatura do ar **T**; e o outro com o bulbo envolto em gaze permanentemente umedecida pela capilaridade, cuja leitura determina a temperatura do bulbo úmido **Tw**.
- **Higrômetros:** tem por base o princípio de que o aumento da umidade relativa ocasiona a dilatação de fibras higroscópicas. O higrômetro de cabelo utiliza um feixe de cabelo humano ligado a um dispositivo que indica a umidade relativa do ar.
- **Higrógrafo de cabelo:** semelhante ao higrômetro de cabelo, mas possuindo o mecanismo registrador da variação da umidade relativa do ar com o tempo.
- **Higrotermógrafo:** aparelho que fornece o registro da umidade relativa e da temperatura do ar.

4.1.2. Precipitação

A atmosfera pode ser considerada um enorme reservatório de água, contendo 12 vezes mais água que os rios, um coletor de calor que absorve uma pequena parte da radiação solar direta e a maior parte da radiação terrestre, e um imenso sistema de transporte e repartição da água atmosférica. O jogo alternado de precipitação e evaporação coloca a atmosfera como grande fornecedora e consumidora de água (LAMBERT, 1996).

a) Parâmetros Básicos das Chuvas: duração, intensidade, altura e frequência

O período de retorno determina o tempo no qual uma chuva de certa intensidade irá cair novamente. Há numerosos métodos de estimativa do período de retorno, mas o **Método Hazen** é comumente usado pelo *Soil Conservation Service (USA)*. Suas etapas são:

- Obtenção dos totais pluviométricos anuais de interesse.
- Lista dos valores anuais em ordem decrescente, obtendo-se um *ranking*.
- **Fa : 100 (2n - 1)/2y : 100/período de retorno**, onde **Fa** é a probabilidade de ocorrência (%) para cada evento, **y** é o número total de eventos e **n** é a posição no *ranking* de cada evento.
- Período de retorno : **100/Fa**.
- Totais anuais plotados em papel gráfico de log-probabilidade, obtendo-se uma linha através dos pontos plotados.
- Total pluviométrico dos eventos desejados obtidos para um período de retorno, através do gráfico.

O regime hietométrico determina a repartição temporal das precipitações, ou seja, os volumes precipitados em cada período de tempo. São fatores condicionantes do comportamento hietométrico das chuvas: a natureza das chuvas (sólida ou líquida) e seus impactos no espaço; a intensidade/duração; o período das chuvas; o local e a situação de ocorrência; o ritmo sazonal; e a variabilidade interanual. A medição das precipitações pode ser realizada por meio de pluviômetros para medições pontuais, e pluviógrafos para medições contínuas.

A distinção entre ano chuvoso e ano seco é difícil, porque o total pluviométrico anual é um dado bruto que não tem grande significado fora dos anos extremos, tornando-se mais objetiva se forem consideradas as necessidades não satisfeitas, como déficit de escoamento. Já a distinção entre ano chuvoso e ano seco torna-se mais viável quando a análise é realizada em uma série histórica de dados que permite fazer comparações interanuais. Para um hidrólogo, um ano seco é um ano de seca prolongada, marcado por série prolongada de episódios sem chuvas; um ano úmido é aquele de escoamento abundante ligado a uma série prolongada de episódios chuvosos e de saturação dos solos.

É a seguinte a classificação mais tradicional das chuvas, comumente usada na geografia (os livros de climatologia e hidrologia trazem o detalhamento dessas características):

- **Chuvas orográficas**, cuja condensação do ar é determinada pelo relevo.
- **Chuvas convectivas**, cuja condensação é determinada pela forte evaporação do ar no nível do solo em períodos quentes.
- **Chuvas frontais**, cuja condensação ocorre devido ao encontro de massas de ar de densidades e níveis de umidade diferentes.

Outra maneira de se classificar as chuvas refere-se aos processos hidrológicos associados:

- **Chuvas de interceptação** são tão fracas que apenas umedecem a superfície do solo e das plantas, reevaporando pouco após a queda.
- **Chuvas de umedecimento** atingem o solo, sendo absorvidas pela capacidade de retenção capilar; agrônomos consideram ideais as chuvas de 1mm\h, porque podem ser facilmente retidas pelo solo, mas não são muito úteis em termos de contribuição hídrica para os cursos d'água.
- **Chuvas de infiltração** atingem o solo já úmido, com capacidade de retenção capilar já saturada; a água infiltra-se e percola através dos vazios do solo.
- **Chuvas de escoamento** alimentam o escoamento fluvial através do escoamento superficial direto ou chuva eficaz, definida como parte da precipitação que alimenta diretamente e rapidamente o débito, gerando uma cheia (LAMBERT, 1996).
- **Precipitações ocultas** são nevoeiros e orvalhos, pouco registrados por pluviômetros; as folhas das plantas podem interceptar a umidade do ar, concentrando-a em gotas.

b) Balanço Climático

O **Diagrama Ombrotérmico de Bagnouls e Gaussen**, criado em 1957, propõe a classificação dos climas em função dos regimes ombrotérmicos, envolvendo o ritmo das estações quentes ou frias, secas ou úmidas. O diagrama considera como seco todo mês em que as chuvas médias são inferiores a duas vezes a temperatura média do mês: **p < 2t**.

Lambert (1996) também propõe a definição dos tipos de aridez com base na relação entre precipitação (**p**) e temperatura (**t**):

- Se **p < 4t**, há uma aridez atmosférica.
- Se **pm** (média mensal) : **4tm**, há uma aridez atmosférica com frequência de 0,5 (um ano a cada dois).
- Se **pm < 4tm**, há uma aridez atmosférica com **f > 0,5**.
- Se **pm : 3tm**, há uma aridez pedológica com esgotamento da **RFU** (reserva facilmente utilizável) e uma **f** de cerca de 0,5.
- Se **pm < 3tm**, há uma aridez pedológica com esgotamento da **RFU** e seca potamológica (aridez hidrográfica) com **f > 0,5**.

- Se **pm : 2tm**, há uma aridez atmosférica climática com **f** de cerca de 0,8 (oito anos em dez); aridez climática é uma aridez regular, anual e com frequência próxima de 1.
- Se **p < 2t**, há uma aridez atmosférica regular com **f > 0,8**, bastante pronunciada a ponto de provocar aridez pedológica e aridez freática, com o esgotamento da **RU** (reserva útil).

Lambert (1996) propôs critérios para a normalização do diagrama ombrotérmico: usar a mesma escala (período de dois meses equivalendo a 10 mm de chuva e a 5°C); começar o diagrama por julho no hemisfério sul; incluir a relação **p : 3t** (para verificar aridez pedológica de **f >: 0,5**) e **p : 4t** (para verificar aridez atmosférica de **f >: 0,5**); e demarcar os limites térmicos característicos de cada estação.

Apesar da tradicional separação entre estações seca e úmida, por meio da relação entre precipitação e temperatura, o conceito de aridez deve ser relacionado à escassez de água disponível.

4.1.3. *Interceptação da Água pela Vegetação*

A interceptação contribui para a redução dos impactos da chuva no solo (amortecimento das gotas), para o armazenamento de água pela vegetação e para o redirecionamento dos fluxos no solo. A interceptação pode ocorrer pela estrutura física das plantas e pela cobertura morta (liteira) ou outros materiais.

Há autores que negligenciam o efeito da interceptação, mas o conjunto das folhas de uma mata chega a interceptar em média de 10 a 25 % da chuva, podendo reter até 100 % dos chuviscos de pequena duração.

A interceptação está mais relacionada à duração do que à quantidade de chuva, já que períodos de chuva separados por períodos de insolação provocam elevação da evaporação, devido à elevação da temperatura. Em geral, a interceptação pode ser representada pelas seguintes fórmulas simplificadas:

$$I:C + L$$

sendo **I**: interceptação total, **C** : interceptação pelas copas e **L**: interceptação pela liteira (serrapilheira)

$$Pe:P - I : P - (C + L)$$

sendo **Pe**: precipitação eficaz ou aquela que atinge o solo

$$I: P - (Pe + S - L)$$

sendo **S** : o escoamento superficial

A medição da interceptação ocorre por meio de interceptômetros, que são recipientes que armazenam água cujo nível é medido com escala métrica. Também pode ser realizada por meio da medição do armazenamento hídrico da liteira, técnica proposta por Lowdermilk, em 1930, a saber:

- Imersão de amostras da liteira em água por 90 minutos.
- Colocação das amostras em bandejas para remoção do excesso de umidade por 30 minutos.
- Secagem em estufa (110°C) e pesagem.
- A capacidade de retenção será **PI - PF\PF x100**, sendo **PI**: peso inicial e **PF**: peso final.

4.1.4. *Evaporação*

A evaporação é o processo de passagem de moléculas de água da fase líquida para a fase de vapor. Uma deficiência de pressão no vapor do ar em relação à pressão na superfície da água é necessária para ocorrer evaporação. As causas de tal deficiência são: baixa temperatura do ar e redução do vapor do ar em relação à pressão de saturação (déficit de saturação); influência direta dos fluxos de energia (variações de temperatura); e grau de mistura do ar acima da superfície evaporante. Cada grama de água evaporada consome cerca de 2400 joules de energia.

Há uma diferença da evaporação de superfícies livres de água para a de solos. Nos solos insaturados, em que parte dos poros está preenchida por ar e outra parte por água, o efeito capilaridade (tensão superficial) retarda a transferência das moléculas de água por evaporação e reduz as trocas de calor. Nos solos, as variações de temperatura são mais rápidas que na água.

A vegetação pode aumentar a evaporação pelo efeito da interceptação ou diminuí-la pela redução da insolação incidente, pela facilitação da percolação da água gravitacional (devido ao aumento da porosidade do solo) e pela forte umidade relativa do ar em áreas florestadas.

Em lagos profundos, o processo de evaporação ocorre comumente com forte diferenciação entre o verão e o inverno:

- Inverno: as águas superficiais resfriam-se primeiro que as águas profundas devido à influência da temperatura do ar; ocorre, então, fluxo de calor em direção à superfície, com a continuidade da evaporação, às vezes, com taxas superiores às do verão.
- Verão: as águas superficiais se aquecem primeiro que as águas profundas, provocando um fluxo de calor inverso em direção às águas profundas.

A medição da evaporação pode ser realizada por meio dos seguintes aparelhos e técnicas:

- **Evaporímetros:**
 - **Atmômetros:** equipamentos que dispõem de um recipiente com água, conectado a uma placa porosa, onde ocorre a evaporação; os mais conhecidos são os de Piché, bola preta e branca e Bellani.

- **Tanques de evaporação** ou **tinhas evaporimétricas**: recipientes que podem ser do tipo enterrado, superficial, fixo ou flutuante; deve-se salientar que tinhas evaporimétricas com superfícies livres de água geralmente não retratam a realidade da água nas bacias hidrográficas, devendo incorporar solo e vegetação.
- **Modelo de Thornthwaite** é uma das técnicas mais usadas para cálculo do balanço hídrico, sendo representado pela seguinte fórmula simplificada:

$$E: (10 T \setminus I) a$$

sendo **T**: temperatura média mensal, **a**: albedo,

I: índice de calor anual, **I**: somatório dos índices de calor mensal (I)

(somatório dado por **I: (Ti)1,5\5**, sendo **Ti**: temperatura média mensal)

- **Balanço hidrológico** é um balanço hidrológico simplificado, dado por:

Ve (volume evaporado): (volume afluente + volume precipitado - volume efluente - volume infiltrado - variação do volume armazenado)

4.1.5. Evapotranspiração (ETp)

A evapotranspiração é o processo que envolve todas as perdas de água líquida por transformação em vapor, incluindo a transpiração das plantas e a evaporação das superfícies, e está condicionada pelo estado do ar (temperatura, umidade, etc.), estado do solo e estado da vegetação (espécie, estado vegetativo, estação vegetativa, etc.). A evapotranspiração real ou efetiva (**ETR**) não atinge jamais o poder evapotranspirante total da atmosfera, situação que é considerada a evapotranspiração potencial.

A evapotranspiração potencial (**ETP**) é considerada a evapotranspiração de um solo coberto por vegetação em pleno crescimento vegetativo, estando o solo sempre bem alimentado de água. Enquanto o agrônomo prefere o termo evapotranspiração real, o hidrólogo utiliza o termo déficit de escoamento (**D**), que é a diferença anual entre a lâmina de água precipitada e a lâmina de água escoada.

A evapotranspiração pode ser dada de modo simplificado por:

$$D: P - Q$$

sendo **D**: déficit de escoamento, **P**: precipitação e **Q**: vazão

$$P - Q: ETR: D$$

O cálculo da **ETp** pode ser realizada por meio das seguintes técnicas:

- **Tinhas evaporimétricas**.
- **Evapotranspirômetros** ou **lisímetros**: recipiente de dimensões métricas

contendo solo gramado, cultivado ou desnudo, onde se mede regularmente o peso e, por consequência, o volume de água contido (a conexão do lisímetro com o tanque de água é desligada e a **ETp** é medida pela queda do peso do lisímetro no tempo).

- **Fórmulas (Thornthwaite, Turc, etc.)**.

Os equipamentos fornecem **ETp** fisiológica, válida para pequenas áreas e curto período, enquanto as fórmulas fornecem **ETp** climática, mais voltada a grandes áreas e extensos períodos.

O método de **Thornthwaite** envolve a correlação entre **T** e **ETp**. A definição de evapotranspiração potencial de **Thornthwaite** supõe um solo sempre úmido e vegetado, não importando a autorregulação das plantas aos rigores ambientais, bem como suas fases vegetativas. O método permite definir como período seco climaticamente todo período em que a precipitação seja inferior às necessidades da vegetação. De qualquer maneira, as fórmulas de **ETp** ignoram o comportamento da vegetação, sendo, portanto, muito genéricas e dando apenas uma ordem de grandeza ao fenômeno.

A fórmula de **Turc** (1961) também é usada para o cálculo da **ETp**:

$$ETR \text{ (evapotranspiração real): } P \setminus \text{raiz de: } 0,9 + (P^2 \setminus L^2)$$

sendo **P**: precipitação, **L**: reservas lacustres: **0,05 t³ + 25 t** e **t**: tempo

A **Transpiração (T)** é causada pelo gradiente de pressão de vapor entre as folhas saturadas e a atmosfera seca, fenômeno denominado **demanda evaporativa da atmosfera**. A **T** é determinada pela capacidade de conservação de temperatura pelas plantas e animais, sendo comum que 98% da água absorvida pelas plantas seja transpirada.

As plantas podem regular a transpiração em condições de estiagem, a partir do fechamento dos **Estômatos**, da redução da cobertura foliar atingida pela insolação (por meio da orientação das folhas paralelamente ao sentido dos raios solares) e da queda precoce das folhas.

Os estômatos são as células de evaporação e possuem baixa atividade quando em baixa luminosidade, baixa aeração das raízes, baixa umidade, elevada concentração de CO₂ no ar e doenças. A resistência externa das folhas à transpiração pode ocorrer quando há uma fina camada limite de vapor aderente à folha. Esta resistência é reduzida pelo vento.

Há geralmente aumento de **T** em função da permeabilidade das raízes e do aumento da rugosidade superficial, pois o atrito vento-superfície foliar aumenta a turbulência do ar e o transporte de vapor.

Perdas por evapotranspiração (**ETp**) são geralmente inferiores à evaporação de superfícies livres de água, já que o albedo é superior nas plantas.

O ponto de murchamento é o momento em que a água retida pelo solo não pode mais ser extraída pelas plantas, devido à exigência de elevada sucção. Estudos mostram que a **ETp** prossegue à taxa potencial até o ponto de murchamento, quando então cai próximo de 0.

A produção de uma tonelada de matéria vegetal seca exige, geralmente, o consumo de 500 vezes seu peso em água através de transpiração (LAMBERT, 1996).

4.1.6. Infiltração, Percolação e Drenagem Superficial

A compreensão dos processos de infiltração, percolação e drenagem superficial depende da compreensão das forças atuantes sobre a água:

- **Força de inércia** ou **energia cinética** ocorre se a molécula de água estiver em movimento.
- **Pressão hidrostática** é atuante sobre a água quase imóvel.
- **Força gravitacional.**
- **Força de tensão capilar** é resultante da atração de toda parede sólida sobre as moléculas de água.
- **Força de tensão osmótica** é exercida sobre uma solução pouco salina em relação a uma mais salina. O potencial osmótico resulta da habilidade das moléculas de água de passarem ao longo de membrana semipermeável, sendo função da diferença na qualidade química entre a água do solo e da planta. Os tecidos das plantas funcionam como membrana semipermeável que permite a passagem de moléculas de água, mas não as moléculas de outras substâncias, como sais (cuja maior concentração é nas plantas). Portanto, há tendência de maior fluxo de moléculas de água do solo para as plantas. Quanto maior a concentração de sais e outras soluções, maior o potencial osmótico, ou seja, menor a habilidade das moléculas de atravessarem a membrana. O potencial osmótico induz o fluxo de água do solo para as plantas e a transpiração nas folhas condiciona o potencial nas raízes. Se a água do solo for mais salina que a seiva das plantas, a água do solo tende a sugar a seiva, desidratando a planta.
- **Tensão do vapor d'água** ocorre no contato da água com o ar não saturado e aumenta com a redução da umidade do ar.
- **Tensão higroscópica** é a atração de toda parede sólida sobre as moléculas de água em contato direto com ela. Atinge 16 bares ou 160 m de água. Para separar a água dos sólidos é preciso centrifugar ou submeter o material a temperaturas superiores a 105°C. A tensão higroscópica está associada às forças de adsorção, ou seja, forças de coesão e adesão nas interfaces de moléculas de fases diferentes, devido às forças eletrostáticas ou iônicas (forças segundo a polaridade das moléculas). As forças de adsorção tornam-se mais importantes que o efeito capilaridade (movimentação da água no solo devido à atração iônica que as partículas exercem sobre as moléculas de água), à medida que a umidade do solo diminui, já que há aumento da força de retenção em lugar das forças de movimentação das moléculas de água.

O solo apresenta zonas de propagação da umidade:

- **Zona de saturação:** todos os poros estão preenchidos por água.
- **Zona de transição:** há grande variação de umidade.
- **Zona de transmissão:** não saturada, com teor de umidade uniforme, e onde parte dos poros está preenchida por água e parte por ar.
- **Zona de umedecimento:** há aumento progressivo da umidade.

A percolação da água diminui com a aproximação da capacidade de campo, também conhecida como limite superior de água disponível. Este termo corresponde à quantidade máxima de água que um solo pode reter em condições normais de campo, quando a quantidade de água com movimento descendente por drenagem natural é muito pequena em relação à quantidade absorvida pelo sistema radicular.

No perfil de solo, o *front* de umidade desloca-se por gravidade e quanto há influência do peso da coluna de água. A medição da percolação da água no solo pode ser realizada por meio de aparelhos que medem taxas de infiltração, tais como lisímetros, infiltrômetros e tensiômetros.

4.2. Corpos d'Água e Domínios Hidrológicos Superficiais

Uma bacia hidrográfica é um sistema geograficamente definido e delimitado a partir da configuração da rede de drenagem, sendo constituída por dimensões físicas, biológicas, econômicas, sociais e culturais. A bacia é drenada por um ou mais cursos de água permanentes ou temporários, sendo toda a vazão confluenta em uma única saída (seção de referência).

A Lei das Águas brasileira (Lei n. 9.433/97) consolidou a consideração da bacia hidrográfica como a unidade espacial primordial para o planejamento e a gestão das águas. A Resolução n. 32 do Conselho Nacional de Recursos Hídricos estabeleceu a Divisão Hidrográfica Nacional¹.

Os divisores hidrográficos, divisores de águas ou interflúvios podem ser superficiais ou freáticos. Os divisores superficiais são configurados pela morfologia (relevo) e suas partes mais elevadas marcam os interflúvios. Os divisores freáticos são configurados pela organização geológica, ou seja, pelas características litológicas e estruturais do substrato.

O estudo da rede de drenagem envolve o conhecimento das variáveis morfométricas dos elementos e unidades espaciais hidrográficas. A seguir são apresentados os principais elementos morfométricos da rede de drenagem.

1 Para visualizar a Divisão Hidrográfica Nacional, rever Figura 3.1..

4.2.1. Morfometria Fluvial

As variáveis morfométricas mensuram as dimensões quantitativas e geométricas dos elementos da rede hidrográfica. Para sua melhor compreensão, serão analisadas, inicialmente, as leis de composição de bacias hidrográficas de Horton (1945, *apud* VESTENA *et al*, 2006):

- **Lei do número de canais:** o número de segmentos de ordens sucessivamente inferiores de uma dada bacia tende a formar uma progressão geométrica, que começa com o único segmento de ordem mais elevado e cresce segundo uma taxa constante de bifurcação.
- **Lei do comprimento de canais:** o comprimento médio dos segmentos de ordens sucessivos tende a formar uma progressão geométrica cujo primeiro termo é o comprimento médio dos segmentos de primeira ordem e tem por razão uma relação de comprimento constante.
- **Lei da declividade de canais:** em uma determinada bacia, há uma relação definida entre a declividade média dos canais de certa ordem e a dos canais de ordem imediatamente superior, geometricamente inversa, na qual o primeiro termo é a declividade média dos canais de primeira ordem, e a razão é a relação entre os gradientes dos canais.
- **Lei da área da bacia de canais:** as áreas médias das bacias de segmentos de canais de ordem sucessivos tendem a formar uma progressão geométrica, cujo primeiro termo é a área média das bacias de primeira ordem, e cuja razão de incremento constante é a taxa de crescimento da área.

As Leis de Horton nos auxiliam a compreender os elementos morfométricos da drenagem. A seguir, serão abordadas as principais variáveis morfométricas, com base nos trabalhos de Cherem (2008) e Barros (2009).

4.2.1.1. Elementos Morfométricos de Classe Linear

a) Perímetro (P)

O perímetro de uma bacia hidrográfica representa o comprimento total da linha que serve como divisor de águas da bacia, ou seja, o divisor topográfico. O aumento do perímetro de uma bacia hidrográfica está diretamente ligado ao seu desenvolvimento, o que expressa que quanto maior o perímetro maior a área da bacia. O perímetro também pode ser calculado por técnicas de geoprocessamento.

b) Comprimento de curso d’água

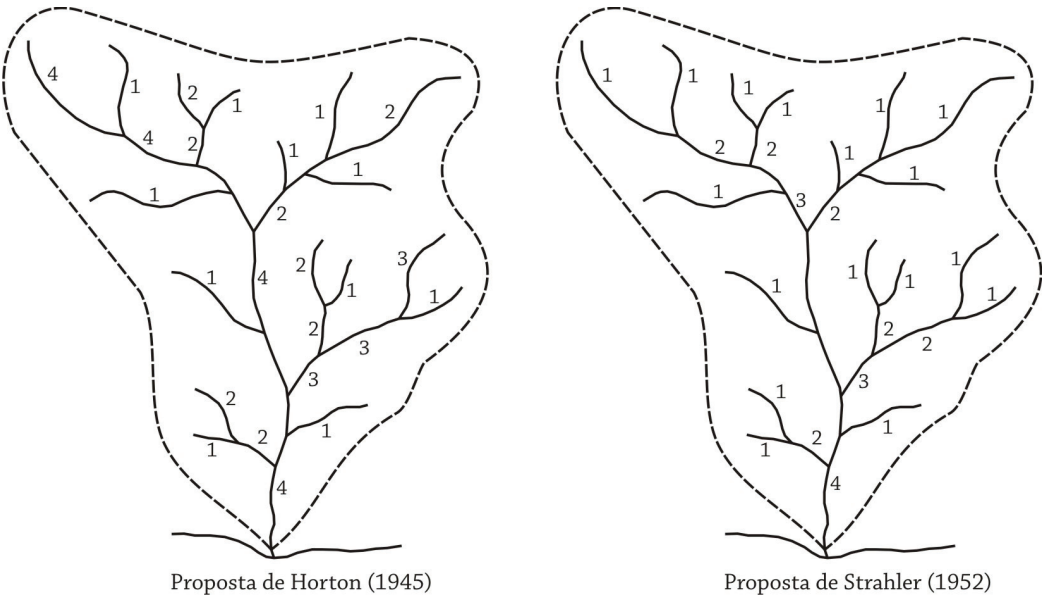
O comprimento de curso d’água pode ser obtido pela maior distância entre a foz e o seu ponto mais distante ao longo do perímetro. Por meio de *softwares* ou de curvímetro, pode-se obter a distância real do curso d’água e, não, em linha reta. O comprimento de uma bacia pode ser obtido por meio da distância em linha reta ao longo do rio principal, entre a nascente principal e a foz.

c) Hierarquia fluvial (Hf)

A hierarquia fluvial corresponde à ordenação dos canais fluviais dentro de uma bacia hidrográfica. As duas propostas mais utilizadas são as de Strahler (1952) e Horton (1945), apresentadas na Figura 4.2.. Na proposta do primeiro, os canais de primeira ordem são aqueles que não apresentam tributários, ou seja, são canais de cabeceiras de drenagem. Os canais de segunda ordem originam-se da confluência de dois canais de primeira ordem e, assim, sucessivamente. A confluência com canais de ordem hierárquica menor não altera a hierarquização da rede.

Já na proposta de Horton, os canais sem afluentes também são considerados de 1ª ordem e apenas na confluência de dois rios de igual ordem acrescenta-se mais um à ordenação, ou seja, dois canais de mesma ordem hierárquica formam um canal de ordem hierárquica superior. Entretanto, não são todas as cabeceiras que correspondem aos canais de primeira ordem, visto que os canais de maior hierarquia estendem-se até a cabeceira de maior extensão. Como alerta Cherem (2008), em ambas as classificações os segmentos de canais (trechos entre confluências) contíguos (para montante ou jusante) podem ter a mesma ordem.

FIGURA 4.2.
Propostas de Hierarquia Fluvial de Horton e Strahler

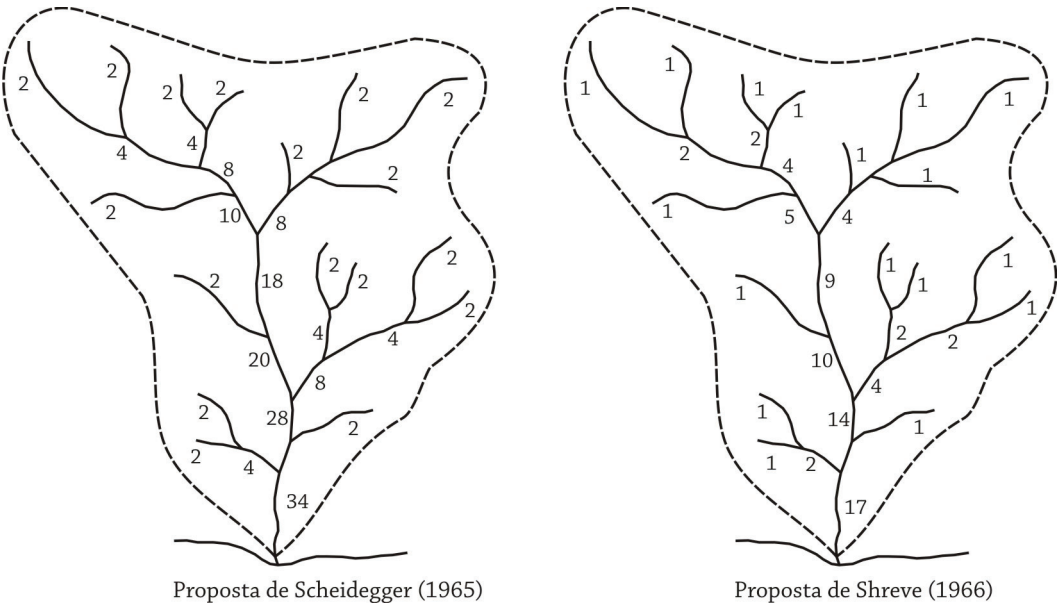


Fonte: Adaptação de Christofoleti (1980, p. 107)
Elaboração: Joyce Bonna

d) Magnitude Fluvial (M)

Assim como a hierarquia fluvial, a magnitude também envolve o ordenamento de canais. Porém, todos os canais de cabeceira assumem a mesma ordem hierárquica: a ordem 1 para Shreve (1966) e a ordem 2 para Scheidegger (1965), como mostra a Figura 4.3.. O aumento de ordem dos canais corresponde à soma das ordens dos canais a montante da confluência; assim, o canal principal tem ordem igual ao somatório de todos os canais de primeira ordem. O que distingue a hierarquia fluvial da magnitude é a consideração dos princípios hidrológicos na segunda, visto que a cada confluência as características dos canais são alteradas (CHEREM, 2008). Entretanto, ambas são amplamente utilizadas por caracterizarem a composição da rede de drenagem de maneiras diversas.

FIGURA 4.3.
Magnitude Fluvial definida por Scheidegger Shreve



Fonte: Adaptação de Christofoleti (1980, p. 107)
Elaboração: Joyce Bonna

e) Relação de Bifurcação (Rb)

A **Rb** foi definida primeiramente por Horton (1945) e reformulado por Strahler (1952). Expressa a relação entre o número total de canais de certa ordem e o número total de canais de ordem imediatamente superior, cujos valores, dentro de uma mesma bacia, devem ser constantes e jamais inferiores a dois (CHEREM, 2008). França (1968, *apud* CHEREM, 2008) verifica que este índice está intimamente relacionado ao comportamento hidrológico dos solos, sendo maior para os solos menos permeáveis, e menor para os solos mais permeáveis. Strahler (1952) comenta que, apesar desse parâmetro ser altamente estável, varia de acordo com o controle estrutural.

A equação utilizada para o cálculo é dada por:

$$R_b = \frac{N_w}{N_{w+1}}$$

onde **Nw** é o número total de canais de determinada ordem e **Nw+1** corresponde ao número total de canais de ordem imediatamente superior

(SANTA CATARINA, 1997, *apud* CHEREM, 2008)

f) Número de Canais Fluviais (N)

O número de canais fluviais é representado por ordem hierárquica, tendo em vista a proposta de Strahler (1952) e o número total de canais fluviais da bacia.

g) Relação entre o Comprimento Médio dos Canais de cada Ordem (RLm)

O **RLm** apresenta a relação de normalidade de uma dada bacia hidrográfica. O comprimento médio dos canais se ordena segundo uma série geométrica direta, cujo primeiro termo é o comprimento médio dos canais de primeira ordem, e cuja razão é a relação entre os comprimentos médios (CHEREM, 2008).

A equação utilizada para o cálculo é dada por:

$$R_m = \frac{L_u}{L_{u-1}}$$

onde **Lmu** é o comprimento médio dos canais de determinada ordem e **Lmu-1** é o comprimento médio dos canais de ordem imediatamente inferior (Santa Catarina, 1997, *apud* CHEREM, 2008), **RLm** é o índice de relação do comprimento médio entre duas ordens subsequentes e **Rb** é o índice de relação de bifurcação entre as mesmas duas ordens subsequentes

h) Relação entre os Gradientes dos Canais (Rgc)

O **Rgc** é a representação matemática da terceira lei de Horton e verifica o grau de normalidade de uma dada bacia hidrográfica, relacionando a declividade média dos canais de cada ordem com a declividade dos canais de ordem imediatamente superior (Christofoletti, 1980 *apud* CHEREM, 2008). Esta relação é dada pela seguinte equação:

$$R_g = \frac{G_w}{G_{w+1}}$$

onde **Gcw** é a declividade média dos canais de determinada ordem de canais e **Gcw + 1** é a declividade média dos canais de ordem imediatamente superior

Este parâmetro possibilita a leitura isolada da normalidade da declividade dos canais de uma dada bacia, por ordem, e pode servir para correlacionar o grau de normalidade entre bacias adjacentes (CHEREM, 2008).

i) Índice de Sinuosidade (Is)

O parâmetro **Is** demonstra o grau de divagação de um curso fluvial, sendo apresentado inicialmente por Horton (1945) e descrito por Alves e Castro (2003, *apud* CHEREM, 2008) como sendo uma das formas de representar a influência da carga sedimentar e a compartimentação litológica e estrutural. Este parâmetro é obtido através da relação entre o comprimento real do curso principal da bacia (**L**) – maior extensão dada pela distância entre a nascente do curso e sua foz – e o comprimento do seu vetor (**Dv**) – maior distância medida entre a cabeceira e a foz, acompanhando-se a direção vetorial do canal principal.

A equação é dada por:

$$I_s = \frac{L}{d_v}$$

onde **L** é o comprimento do canal principal e **dv** é a distância vetorial entre os pontos extremos do canal, sendo que os valores próximos de 1 indicam elevado controle estrutural ou alta energia, e valores acima de 2 indicam baixa energia, sendo os valores intermediários relativos a formas transicionais entre canais retilíneos e meandantes (CHEREM, 2008)

Segundo Horton (1945), o canal mais longo constitui-se como sendo a nascente do rio principal da bacia. Quanto mais próximo da unidade for o índice de sinuosidade, menos sinuoso é o canal e, conseqüentemente, mais rápido corre o fluxo d’água (Feltran Filho e Lima, 2007 *apud* BARROS, 2009). Valores próximos a 1 indicam um canal próximo ao retilíneo, com possibilidade de elevado controle estrutural ou alta energia, enquanto valores acima de 2 indicam baixa energia, sendo os valores intermediários relativos a formas transicionais entre canais retilíneos e meandantes (Alves e Castro, 2003 *apud* BARROS, 2009).

4.2.1.2. Elementos Morfométricos de Classe Zonal

a) Área de drenagem

O cálculo da área de uma bacia hidrográfica ou de outra unidade hidrográfica pode ser feito por meio de *softwares* de geoprocessamento.

b) Forma de bacia hidrográfica

Áreas circulares são mais eficientes na concentração do fluxo, já que este tende a atingir simultaneamente a seção de referência (ponto de saída das águas da bacia), a partir de todos os pontos da bacia. Várias técnicas e fórmulas de cálculo de forma são listadas na literatura, podendo-se destacar:

- **Coeficiente de compacidade ou índice de Gravelius** – este parâmetro é dado pela fórmula:
Kc:0,282 x P\raiz de A

sendo **Kc**: coeficiente de compacidade, **P**: perímetro e **A**: área

Kc é > ou: a 1

se **Kc: 1** representa área com forma de círculo, quanto mais próximo de 1 maior a susceptibilidade da área às cheias; para áreas alongadas, o **Kc** é bem superior a 1.

- **Fator de forma, coeficiente de forma ou índice de conformação** (HORTON, 1932) – este parâmetro é dado pela fórmula:

$$K_f:A\backslash L^2 \text{ ou } I\backslash L$$

sendo **Kf**: fator de forma, **A**: área, **L**:comprimento do curso de água mais longo desde a seção de referência até a cabeceira mais distante, **I**: largura média da área

Kf próximo ou maior que 1 indica área mais arredondada (mais circular e curta), com maior probabilidade de cheias e **Kf** menor que 1 indica área mais estreita e alongada (mais retangulares), com menor possibilidade de cheias já que as contribuições afluentes ocorrem em vários pontos do canal.

- **Índice de circularidade** (MILLER, 1953) – inicialmente proposto por Miller, em 1953, seu cálculo é dado pela seguinte equação:

$$I_c = \frac{A}{A_c}$$

onde **A** é a área da bacia e **Ac** é a área de um círculo que tenha o perímetro idêntico ao da bacia considerada, sendo o valor máximo igual a 1,0

Possíveis interpretações dos valores do **Ic** são dadas por Alves e Castro (2003), como citado por Barros (2009):

Ic: 0,51 – escoamento moderado e pequena probabilidade de cheias rápidas;

Ic > 0,51 – bacia circular favorecendo os processos de inundação (cheias rápidas);

Ic < 0,51 – bacia mais alongada favorecendo o escoamento.

O índice de circularidade varia de acordo com a forma da bacia, apresentando um valor adimensional. Quanto mais irregular for a forma da bacia, maior será o **Ic** e menores são as tendências de ocorrência de enchentes. Quando este índice é igual ou próximo de 1,0, a bacia hidrográfica apresenta forma circular (BARROS, 2009). Além da relação com a velocidade do fluxo de água, este parâmetro representa também a transmissividade do escoamento superficial concentrado, isto é, se o tempo de concentração da bacia é lento ou rápido (CHEREM, 2008).

- **Retângulo equivalente de Roche** – usado para analisar as influências dos aspectos físicos da área sobre o escoamento, é um retângulo de área similar à

da área estudada, sendo que **l** (largura) é o lado menor e **L** (comprimento) é o lado maior.

$$L: Kc \times \text{raiz de } A \sqrt{1,12 \times [1 + \text{raiz de } 1 - (1,12 \backslash Kc)2]}$$

$$l: P \sqrt{2 - L} \text{ ou } l: Kc \times \text{raiz de } A \sqrt{1,12 \times [1 - \text{raiz de } 1 - (1,12 \backslash Kc)2]}$$

sendo que **l**: largura do retângulo, **L**: comprimento do retângulo, **P**: perímetro da área estudada, **Kc**: índice de Gravelius e **A**: área

Formas retangulares caracterizam boa dinâmica do escoamento, enquanto formas próximas de um círculo caracterizam tendência a cheias.

- **Densidade de drenagem (Dd)** – é a densidade de canais de drenagem como resultado da relação entre o comprimento total ou por ordem hierárquica dos cursos d’água com a sua respectiva área de ocorrência, sendo definido por Horton pela seguinte equação:

$$Dd = \frac{L_t}{A}$$

onde **L_t** é o comprimento total dos canais e **A** é a área total da bacia

Este parâmetro retrata as influências do clima, da litologia e da estrutura geológica (lineamentos, acamamentos, falhamentos, fraturas, por exemplo) no comportamento da infiltração e da formação de canais superficiais (Chistofolletti, 1970 *apud* CHEREM, 2008).

Christofolletti (1980) comenta que a **Dd** apresenta relação inversa à densidade hidrográfica (**Dh**), visto que, segundo o autor, quanto mais canais existirem, menos extensos eles serão.

A densidade depende da escala dos mapas utilizados, já que quanto mais detalhe apresentar o mapa, maior a tendência de aumento da **Dd**. A **Dd** apresenta relação inversa com a extensão do escoamento superficial.

Pode-se apontá-lo, portanto, como um indicador da eficiência da drenagem na área da bacia fluvial. Como menciona Barros (2009, citando VILLELA e MATTOS, 1975), embora existam poucas informações sobre a densidade de drenagem em bacias hidrográficas, pode-se afirmar que este índice varia entre 0,5 para bacias com drenagem pobre e 3,5 para bacias muito bem drenadas.

d) Densidade de rios (Dr), ou densidade hidrográfica (Dh)

Esse parâmetro foi proposto por Horton (1945) e estabelece a relação entre o número de cursos d’água e a área de uma dada bacia, sendo dado pela seguinte equação (CHEREM, 2008):

$$Dd = \frac{N}{A}$$

onde **N** é o número total de rios e **A** é a área da bacia.

A **Dh** expressa, portanto, o número de canais existentes em cada quilômetro quadrado da bacia hidrográfica, indicando o potencial hídrico da região. Este parâmetro, quando gerado para os canais de primeira ordem de hierarquia fluvial, representa o comportamento hidrográfico das bacias, já que em bacias com alta densidade hidrográfica pode-se inferir uma maior capacidade de gerar canais, independentemente de suas extensões.

Feltran Filho e Lima (2007 *apud* BARROS, 2009) afirmam que, por meio desse índice, é possível comparar a frequência ou quantidade de canais em uma determinada área padrão, que, no caso, equivale a 1km². A maior ou menor concentração de canais tem relação direta com os processos de escoamento, que, por sua vez, estão relacionados com as características ambientais da área analisada.

e) Relação entre as áreas das bacias (R_A)

Esse parâmetro correlaciona o tamanho médio das bacias para cada um dos canais de uma determinada ordem às bacias de ordem sucessivamente inferior, representando matematicamente a quarta lei de Horton (CHEREM, 2008). O parâmetro é dado pela seguinte equação:

$$R_A = \frac{A_w}{A_{w-1}}$$

onde **A_w** é a área média das bacias de determinada ordem e **A_{w-1}** é a área média das bacias de ordem imediatamente inferior

Este parâmetro expressa o grau de normalidade da composição da bacia apresentado por Horton, fato confirmado por Schumm (1956 in CHEREM, 2008).

f) Coeficiente de manutenção (Cm)

Conforme definem Pizarra *et al* (2004 in BARROS, 2009), o coeficiente de manutenção representa uma estimativa da área mínima que é exigida para que o canal de drenagem possa se implementar e desenvolver. Esse parâmetro corresponde à área necessária para a formação de um canal com fluxo perene. Inicialmente proposto por Shumm (1956), sua fórmula matemática corresponde à razão inversa da densidade de drenagem da bacia (**Dd**), como mostra a seguinte equação:

$$Cm = \frac{1}{Dd} \times 1.000$$

g) Classe hipsométrica

A classe hipsométrica abrange os atributos de declividade da bacia (média, máxima e mínima) e de altimetria (média, máxima, mínima e variação altimétrica dos canais, com base nas curvas de nível), para a extração dos seguintes parâmetros:

- Índice de Rugosidade (Ir)
- Declividade Média (Dm)
- Gradiente do Canal Principal (Gcp)

Barros (2009) sintetiza esses parâmetros na Tabela 4.1.:

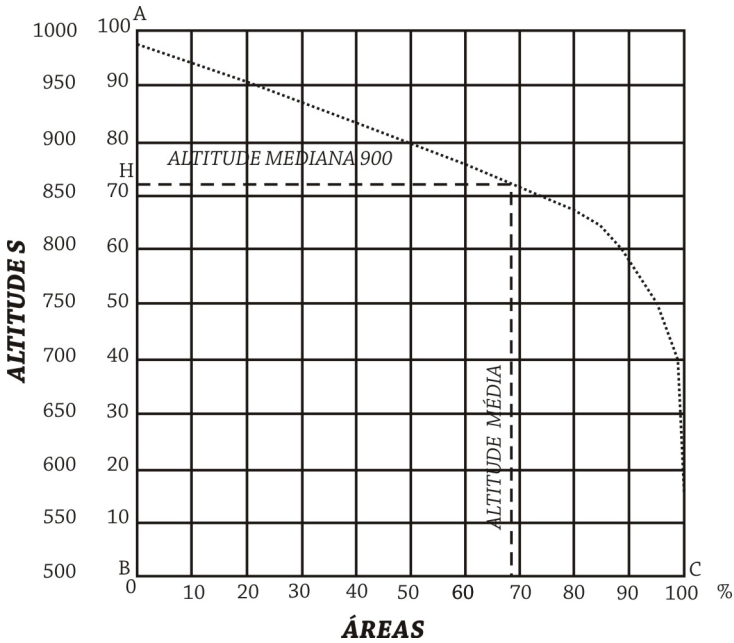
Tabela 4.1. Atributos e Parâmetros Morfométricos Hipsométricos (BARROS, 2009)					
	Tipo	Equação	Definição	Fonte	Significado
Atributos	Declividade (D)	Cálculo automático ArcGIS 9.2	----	----	
	Altimetria	Cálculo automático ArcGIS 9.2		----	
Parâmetro	Índice de rugosidade (Ir)	$Ir : H \times Dd$	H – Amplitude altimétrica Dd – densidade de drenagem	Strahler (1958)	Valores elevados indicam maior potencial para ocorrência de cheias na bacia e/ou pode indicar que as bacias apresentam alta transmissividade hidráulica
	Declividade média (Dm)	Cálculo automático Arc.Gis	----	----	Expressa a energia e a intensidade de atuação dos processos morfogenéticos, incluindo a dinâmica dos escoamentos superficiais concentrados e difusos nas vertentes
	Gradiente do canal principal (Gcp)	$Gcp : (Acp / Ccp) \times 1000$	Acp - amplitude altimétrica do canal principal Ccp - comprimento do canal principal	Christofo-letti (1980)	Reflete o potencial de energia no canal fluvial

Como menciona Cherem (2008), a **curva hipsométrica (Ch)** foi definida por Strahler (1952) como curva resultante do cruzamento entre faixas altimétricas da bacia e suas áreas representadas, onde as abscissas correspondem à altimetria, e as ordenadas às

áreas acumuladas em porcentagem, para possibilitar a comparação entre bacias. Esta curva demonstra a composição do relevo, isto é, como a variação altimétrica (**H**) se comporta dentro de uma determinada área.

A **integral hipsométrica (Ih)** é a área dentro da curva hipsométrica e corresponde à composição do relevo da área de estudo (Figura 4.4.). Esse parâmetro é usado em estudos de composição do relevo em estudos regionais que pretendem comparar o comportamento do relevo de um grupo de bacias frente a processos erosivos. Walcott e Summerfield (2007, in CHEREM, 2008) utilizam o parâmetro para comparar as bacias do Sudeste da África, que drenam sobre uma mesma unidade litológica, e verificar a aplicabilidade da metodologia em estudos que utilizem diferentes tamanhos de bacias hidrográficas.

FIGURA 4.4.
Integral Hipsométrica da Bacia do Rio Uberabinha



sendo **AC**: curva hipsométrica, **ABC**: curva integral hipsométrica

Fonte: Feltran Filho e Lima (2007, p. 77 in CHEREM, 2008)

O **índice de rugosidade (Ir)** corresponde ao produto da amplitude altimétrica pela densidade de drenagem, sendo, portanto, um valor adimensional. Como salienta Christofoletti (1980, p.121):

Se a Dd aumenta enquanto o valor de H permanece constante, a distância horizontal média entre a divisória e os canais adjacentes será reduzida, acompanhada de aumento na declividade das vertentes. Se o valor de H aumenta enquanto a Dd permanece constante, também aumentarão a

declividade e as diferenças altimétricas entre o interflúvio e os canais. Os valores extremamente altos do índice de rugosidade ocorrem quando ambos os valores (Dd e H) são elevados, isto é, as vertentes são longas e íngremes.

Bacias hidrográficas com **Ir** elevado têm maior potencial para ocorrência de cheias, visto que são bacias de alta energia (dada à elevada amplitude altimétrica), e/ou são bacias com alta transmissibilidade hidráulica, já que todos os pontos da bacia estão mais próximos da rede de drenagem, convertendo o fluxo de vertente em fluxo fluvial em menor tempo. Esse parâmetro é dado pela seguinte equação:

$$I_r = \frac{H}{D}$$

O **Ir** foi aprimorado por Strahler (1958), que observou que os valores da rugosidade do relevo aumentam quando a amplitude topográfica ou a densidade de drenagem apresentam valores elevados, ou seja, quando as vertentes são longas e íngremes.

A **declividade média** expressa a energia e a intensidade de atuação dos processos morfogenéticos, incluindo a dinâmica dos escoamentos superficiais concentrados e difusos (laminar) nas vertentes (CHEREM, 2008). Quando associada à declividade máxima, possibilita comparações sobre energia máxima e média dentro das bacias hidrográficas. A declividade tem sido mais comumente calculada por meio de SIGs, clinômetros e técnicas topográficas, mas há algumas outras fórmulas na literatura:

a) **Índice de declividade de Roche:** índice de declividade médio para uma bacia

$$I_p: Z_0 - Z_{100} \backslash L$$

sendo **Z0**: cota mais elevada da bacia, **Z100**: cota mais baixa da bacia e

L: comprimento do retângulo equivalente

b) **Índice de declividade de Dubreiul ou índice de declive global**

$$I_d: D \backslash L: D_5 - D_{95} \backslash L \times 1000$$

sendo **D**: variação de altitude na bacia, **L**: comprimento do retângulo equivalente, **D5**: altitude a 5 % na curva hipsométrica e **D95**: altitude a 95 % na curva hipsométrica

c) **Gradiente orográfico (yo)**

$$y_o: Z \backslash l$$

sendo **Z**: variação da altitude e **l**: distância

Gradiente forte >: 0,1 ou 10 %

(front orográfico)

d) **Curva clinométrica** relaciona as áreas com as suas respectivas declividades. Sua técnica da amostragem é a seguinte: criar uma malha quadrática para amostragem de pontos na bacia; verificar a declividade em cada local amostrado; transformar a frequência de pontos (e, por consequência, as classes de declividade) em % de área da bacia; construir gráficos relacionando declividade (abscissa) x superfície da bacia (ordenada superior) x % de superfície da bacia (ordenada inferior).

O **gradiente do canal principal (Gcp)**, como destaca Barros (2009) citando Christofolletti (1980), é descrito como a relação entre a diferença máxima de altitude entre o ponto de origem e o término do segmento fluvial (amplitude altimétrica do canal principal), com o comprimento do mesmo.

Esse parâmetro reflete o potencial de energia no canal fluvial, haja vista que sua finalidade é indicar a declividade dos cursos de água, podendo ser medido para o rio principal e para todos os segmentos de qualquer ordem. O gradiente do canal principal pode ser obtido por meio da equação:

$$G_{cp} = \frac{A_{cp} \times 1000}{C_{cp}}$$

onde **Acp** representa a amplitude altimétrica do canal, **Ccp** o comprimento do canal e **1000** representa a unidade de transformação de metros em quilômetros

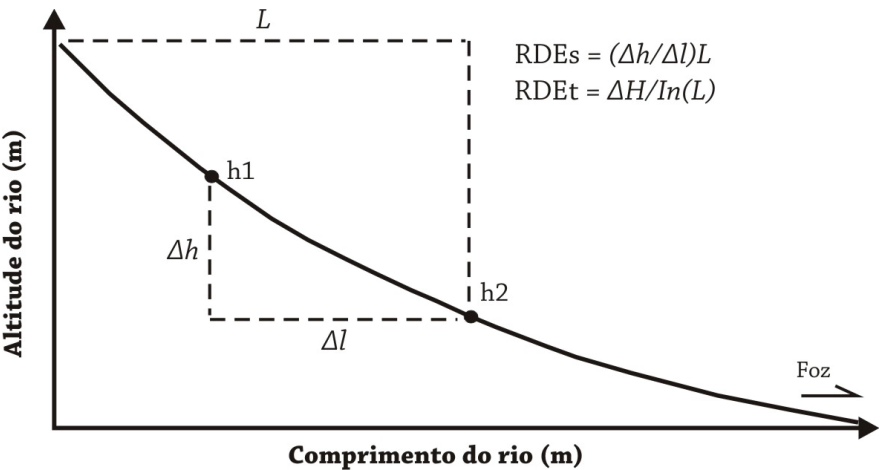
h) **Índice de Hack – relação declividade/extensão (RDE)**

O Índice de Hack (1973) também é conhecido como Índice de Declividade/Extensão (**RDE**). Representa a relação entre a declividade de um trecho, multiplicada pela sua distância até a nascente (BARROS, 2009). O índice busca auxiliar na identificação de possíveis anomalias na concavidade natural do perfil longitudinal, e é descrito por uma linha reta em gráfico semilogarítmico da elevação (normal) pela distância (logarítmico). Conforme descreve Etchebehere *et al* (2006), o **RDE** é expresso pela seguinte equação:

$$RDE: (\Delta H / \Delta L) \times L$$

onde ΔH é a diferença altimétrica entre dois pontos extremos de um segmento ao longo do curso d’água, ΔL é a projeção horizontal da extensão do referido segmento ($\Delta H / \Delta L$ corresponde ao gradiente da drenagem naquele trecho) e **L** corresponde à distância entre o segmento para o qual o índice **RDE** está sendo calculado, dado pelas curvas de nível e a nascente da drenagem

FIGURA 4.5.
Parâmetros utilizados no Cálculo do Índice RDE para Segmentos de Drenagem



Fonte: adaptação de Etchebehere *et al*, 2004

Caso o RDE seja calculado para toda a extensão de um rio (**RDEt**), o cálculo segue conforme a equação a seguir:

RDEt: $\Delta H / \ln(L)$

onde ΔH corresponde à amplitude altimétrica total, ou seja, a diferença topográfica (em metros) entre a cota da cabeceira e a cota da foz, e $\ln(L)$ corresponde ao logaritmo natural de toda sua extensão

Em um caso ideal, o perfil longitudinal descreve a forma côncava com diminuição suave da declividade e valores de **RDE** homogêneos. Em caso de anomalias, o perfil apresenta algumas discontinuidades. A determinação de setores anômalos é feita por meio da razão entre o **RDEs** (trechos) e **RDEt** (total). Dessa forma, Seeber e Gornitz (1983, *apud* Etchebehere *et al* 2006) chegaram à seguinte relação:

- **RDEs/RDEt: 2** – indica o limiar da faixa de anomalias
- **2 < RDEs/RDEt > 10** – classificado como anomalia de 1ª ordem
- **RDEs/RDEt > 10** – classificado como anomalia de 2ª ordem

As anomalias podem ser indicadores de áreas com atividade neotectônica, como salientam Etchebehere *et al*. (2006, p.275):

Os índices RDEs são indicadores sensíveis de mudanças na declividade de um canal fluvial, que, por sua vez, pode estar associada a desembocaduras de tributários de caudal expressivo, a diferentes resistências erosão hidráulica do substrato lítico e/ou à atividade tectônica. O índice cresce onde o rio flui por sobre rochas mais resistentes e decresce onde percorre um substrato mais macio.

A Tabela 4.2. apresenta as variáveis morfométricas definidoras do Índice de Hack:

Tabela 4.2. Características Morfométricas do Índice de Hack (BARROS, 2009)			
SÍMBOLO	EQUAÇÕES	DEFINIÇÃO	SIGNIFICADO
RDE : RDEs / RDEt	RDEs : $(\Delta H / \Delta L) \times L$	ΔH - diferença altimétrica entre dois pontos extremos de um segmento ao longo do curso d'água ΔL - projeção horizontal da extensão do referido segmento L - distância deste segmento e a nascente da drenagem.	Representa a forma de equilíbrio de um determinado perfil longitudinal do curso d'água.
	RDEt : $\Delta H / \ln L$	ΔH - amplitude altimétrica total (diferença topográfica entre a cota da cabeceira e a da foz) $\ln L$ - logaritmo natural de toda sua extensão.	Permite conhecer pontos anômalos dentro da bacia que apresentam potencial à erosão RDEs/RDEt : 2 indica o limiar da faixa de anomalias; 2 < RDEs/RDEt > 10 é classificado como anomalia de 1ª ordem; e RDEs/RDEt > 10 é classificado como anomalia de 2ª ordem

4.2.2. Vales e Planícies Fluviais

a) Vales

Os vales fluviais são esculpidos pelos cursos d'água ao longo do tempo, principalmente a partir de dois conjuntos de processos: o encaixamento fluvial e a migração lateral dos canais a partir da dinâmica das margens (erosão e deposição). Os processos de encostas (erosão e sedimentação, movimentos de massa) complementam a gênese dos vales, conferindo o seu modelado.

Os vales são constituídos por talwegues, vertentes convergentes e topos das elevações morfológicas. Os fundos dos vales constituem-se em zonas de fluxos convergentes de água e sedimentos. As vertentes ou encostas são formas tridimensionais geradas por processos de erosão e sedimentação, e que conectam os topos dos interflúvios aos fundos dos vales. São zonas de fluxo geral divergente em direção aos vales. As encostas apresentam geralmente zonas convexas (noses), nas quais há divergência do fluxo, e zonas côncavas (que recebem diversas denominações como *hollows*, *dells*, *dambos*, *rampas*, *circos*), marcadas pela convergência dos fluxos de água e sedimentos.

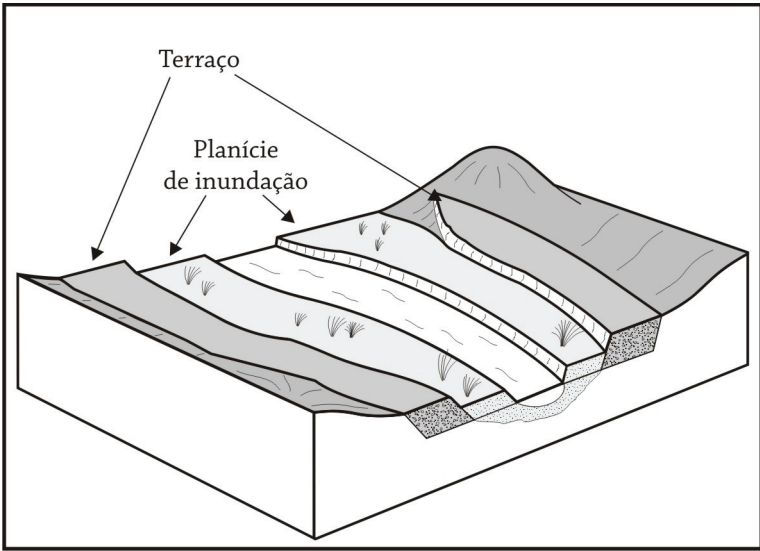
Os vales não canalizados ou bacias de ordem 0 são concavidades existentes nas porções superiores das bacias de drenagem, geralmente zonas de cabeceiras. Não apresentam

canais perenes, mas apenas fluxos efêmeros ou intermitentes. São feições importantes para manter o equilíbrio de fluxos e processos na rede de drenagem perene. Diversos autores estudaram concavidades sem canais em cabeceiras, no qual os principais fluxos d'água superficiais e subsuperficiais convergem para a rede de drenagem canalizada.

b) Planícies fluviais

As planícies fluviais funcionam como **zonas tampão**, ou seja, ambientes fluviais que permitem o armazenamento de água durante as inundações, minimizando possíveis efeitos negativos das cheias à jusante dos canais (Figura 4.6.). Desse modo, as planícies auxiliam a perenização dos canais fluviais, já que contribuem para a estabilização das margens dos canais e para a lenta liberação de água armazenada.

FIGURA 4.6.
Planície de Inundação e Terraço Fluvial



Elaboração: Breno Marent

As áreas inundáveis também são importantes devido à:

- Retenção de sedimentos (principalmente em suspensão) e minerais associados, facilitando sua retenção pela vegetação e bactérias fixadoras. Os vegetais podem transformar os nitratos profundos em **N** orgânico em sua constituição, disponibilizando-o, posteriormente, para a mineralização e denitrificação à superfície (folhas, galhos, etc.).
- Denitrificação, ou seja, a transformação do **N** na forma de nitrato (**NO³⁻**), em gases (**N₂O** e **N₂**) e posterior eliminação na atmosfera².

² A denitrificação ocorre em condições de redução (sedimentos anaeróbios e lençol freático em nível elevado, por exemplo) e presença de bactérias denitrificantes; tende a provocar a acumulação de amônia e, em águas bem oxigenadas, a concentração de amônia tende a ser baixa.

- Complexação e retenção de metais pesados, pesticidas e **P** agregado aos sedimentos (o **P** dissolvido é dificilmente removido, mas pode ser adsorvido em partículas de argila e compostos de **Fe** e **Al**).

Devido à sua grande mobilidade, os compostos nitrogenados não são facilmente absorvidos pelos minerais. Planícies fluviais podem apresentar hidromorfismo, ou seja, excesso de água no perfil (saturação), com baixa aeração e oxigenação, lenta decomposição da matéria orgânica e ambiente de redução.

Cabe identificar dois tipos de leitos dos canais em função das inundações:

- **Leito Menor ou álveo** – área do canal onde há escoamento durante os períodos de estiagens e águas médias. Compreende a área do canal propriamente dito durante o período sem chuvas.
- **Leito maior** – superfície por onde escoam as águas após extravasamento do leito menor. As águas extravasam o canal e inundam a planície.
- **Zona de inundação da cheia padrão** – área inundada adotada para um projeto, como, por exemplo, enchente de 100 anos de período de retorno.

As matas ciliares também são conhecidas como matas-galeria. Porém, certos autores estabelecem diferenças. Para Martins (2001), mata-galeria é aquela formação mesofítica, de qualquer grau de caducidade, que orla uma ou ambas as margens de um curso d'água, em uma situação em que a vegetação original de interflúvio não seja a de floresta (cerrado, caatinga, etc.). A mata ciliar seria mais estreita, orlando os cursos d'água, em situações em que a vegetação de interflúvio também é florestal.

A vegetação ribeirinha pode ser subdividida de acordo com a hidrologia: formação vegetal com influência fluvial permanente (solo permanentemente encharcado), formação vegetal com influência fluvial sazonal, e formação vegetal sem influência fluvial.

A Resolução Conama n. 303/02 determina, com base no Código Florestal (Lei n. 4.771/65), as áreas de preservação permanente, onde a vegetação ciliar não pode ser retirada, como mostra a Tabela 4.3..

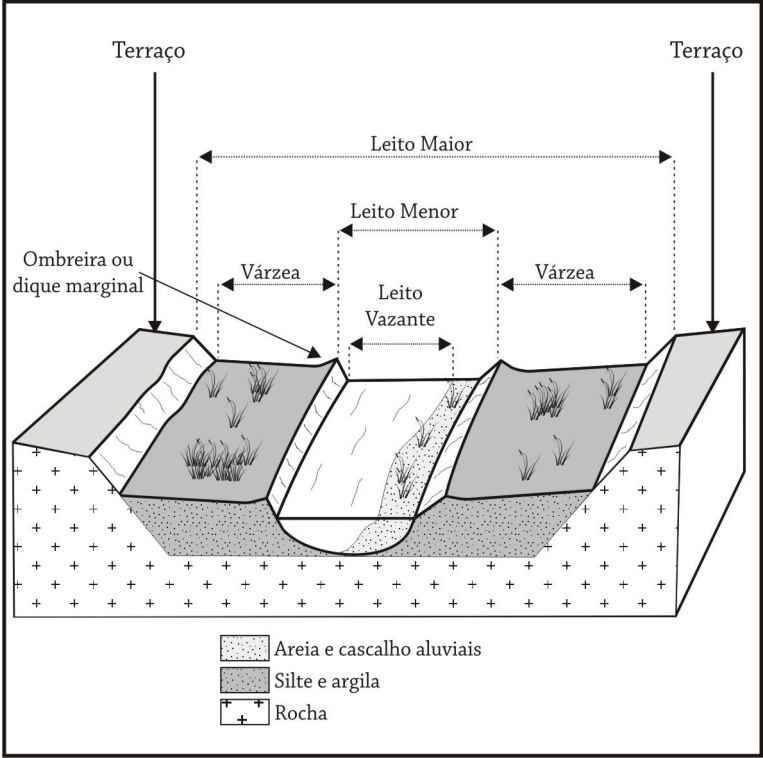
Tabela 4.3. Áreas de Preservação Permanente	
Largura mínima da faixa marginal w(medida a partir do nível mais alto, em projeção horizontal)	Situação
30 m em cada margem	Rios com menos de 10 m de largura
50 m em cada margem	Rios com 10 a 50 m de largura
100 m em cada margem	Rios com 50 a 200 m de largura
200 m em cada margem	Rios com 200 a 600 m de largura
500 m em cada margem	Rios com largura superior a 600 m
Raio de 50 m	Nascentes
30 m ao redor do espelho d'água	Lagos ou reservatórios em áreas urbanas
50 m ao redor do espelho d'água	Lagos ou reservatórios em zona rural com área inferior a 20 há
100 m ao redor do espelho d'água	Lagos ou reservatórios em zona rural com área igual ou superior a 20 há.
100 m ao redor do espelho d'água	Represas hidrelétricas
50 m ao redor de veredas	Vereda, a partir do limite do espaço brejoso e encharcado.

Fonte: Resolução Conama n. 303/2002.

A proteção da vegetação ribeirinha é justificada por diversos fatores. A vegetação tende a reduzir o escoamento superficial e a erosão, já que favorece a infiltração da água no solo. Também aumenta a interceptação da água da chuva, reduzindo a erosão. A cobertura morta (folhas, galhos, etc.) aumenta a infiltração e retarda a velocidade do fluxo superficial, equilibrando os fluxos hídricos no solo. Por sua vez, a matéria orgânica incorporada ao solo influencia a estrutura, a permeabilidade e a capacidade de retenção de umidade pelo solo.

Assim como as planícies, os terraços fluviais (ambientes fluviais deposicionais que não estão mais em processo de formação) também são importantes para a proteção dos cursos d'água, quando estão presentes às suas margens (Figuras 4.6. e 4.7.). Em função das características dos sedimentos, podem auxiliar a infiltração das águas superficiais e equilibrar a erosão marginal dos cursos d'água, devido à sua resistência.

FIGURA 4.7.
Terraços, Várzea e Leitos Fluviais



Elaboração: Breno Marent

4.2.3. Cursos d'Água

Os cursos d'água são elementos hidrológicos lóticos, definidos como ambientes de águas continentais em movimento. Um curso d'água é um sistema dinâmico formado a partir de duas fases: uma fase líquida representada por um escoamento básico com superfície livre, turbulento e regido pelas leis da hidráulica e da mecânica dos fluidos; e uma fase sólida determinada pelo fluxo de partículas sólidas (sedimentos). Estas duas fases resultam em um processo de retroalimentação, em que o escoamento modifica a geometria do canal e as características dos sedimentos transportados, e a nova geometria modifica as características do escoamento e dos sedimentos da calha.

Para melhor compreensão do comportamento dinâmico dos cursos d'água, é conveniente relembrarmos algumas noções básicas de hidráulica em ambientes lóticos:

- **Volume de água em dado espaço (a.z)**, sendo **a**: área e **z**: distância.
- **Princípio da continuidade**, com variações na área da seção do canal inversamente proporcionais às variações de velocidade ao longo do eixo do movimento; o aumento da área gera queda proporcional da velocidade.
- **Umidade movida através do potencial hidráulico**, com dois componentes principais: potencial gravitacional e pressão potencial (razão entre poro pressão e pressão atmosférica).
- **Fluxo** fluindo das zonas de alto potencial hidráulico para as zonas de baixo potencial hidráulico:

$$d: F. dz$$

sendo d: diferença de energia potencial entre dois pontos, **F**: força aplicada (taxa de mudança de potencial com a distância) e **dz**: distância

Diferença de potencial gravitacional entre dois pontos:

$$d: m.g.dz$$

$$F: m. g$$

sendo **F**: força necessária ao transporte de um corpo d’água, **m**: massa de um volume de água e **g**: gravidade

Pode-se observar que os valores absolutos não são importantes em potenciais, importando a diferença entre dois pontos – gradiente potencial.

- **Condições hidrostáticas** referem-se à água estática e ocorrem quando o potencial hidráulico entre dois pontos é 0.
- **Condições hidrodinâmicas** referem-se à água em movimento.
- **Fluxo da água** entre dois pontos de mesmo potencial hidráulico (potencial hidráulico nulo) ocorre devido à variação de pressão, que, por sua vez, reflete as relações entre poro pressão e pressão atmosférica.
- **Convergência do fluxo** gera aceleração e a **divergência** gera desaceleração do mesmo.
- Maior parte da **energia do escoamento** em um canal é despendida no interior do próprio fluxo; a energia é inicialmente convertida em turbulência e, depois, em calor, facilmente dissipado por condução/convecção.
- **Maiores velocidades do fluxo** tendem a ocorrer logo abaixo da superfície do canal (à superfície, o atrito com o ar reduz velocidade e turbulência).
- **Linhas de fluxo** com elevadas velocidades convergem quando encontram um obstáculo, acelerando-se (aceleração convectiva) e elevando-se (*pinnacle flow*),

podendo gerar pequena onda superficial em que a velocidade será maior e a pressão mais baixa que a média. Tal efeito será precedido por fluxo não uniforme desacelerado (*backwater flow*).

- **Moléculas de água** são atraídas umas às outras por forças de coesão (forças de atração entre substâncias de mesma fase) e são atraídas pelas moléculas dos sólidos circundantes por forças de adesão (forças de atração de substâncias de fases diferentes); por isto, a interface ar/água (menisco) nos tubos inseridos em zona saturada ou na zona insaturada do solo é côncava (voltada para o ar), devido à intensa força de adesão; já na condição de forte coesão (como no mercúrio), o menisco é convexo.
- **Força total vertical** nos tubos inseridos em zona saturada (força responsável pela elevação da água no tubo): **2. 3,14 (pi) . r. T**, sendo **r**: raio do tubo e **T**: tensão superficial.
- **Superfícies rugosas** tendem a formar fluxos mais profundos e lentos.
- **Forças do fluxo atuantes nas partículas**: *lift force* (componente vertical auxiliada por zonas de baixa pressão no topo dos sedimentos) e *drag force* (horizontal).
- **Fluxo uniforme** em que a superfície da água tem a mesma inclinação que o leito.
- **Baixas descargas** onde o fluxo é controlado pela topografia principal do leito, mas a topografia é criada em elevadas descargas, que mobilizam sedimentos e erodem o leito.
- **Estreita relação entre variações de velocidade do fluxo e processos de deposição/erosão no leito**, quando as variações de velocidade são minimizadas por ajustes na seção do canal; baixas velocidades favorecem a deposição que, por sua vez, reduzem a seção do canal aumentando a velocidade; elevadas velocidades geram erosão do leito, aumentando a seção e diminuindo a velocidade.
- **Maior transporte de sedimentos no canal**, principalmente sedimentos finos, maior o efeito de amortecimento da turbulência, aumentando a influência das forças viscosas e do coeficiente de viscosidade da mistura.

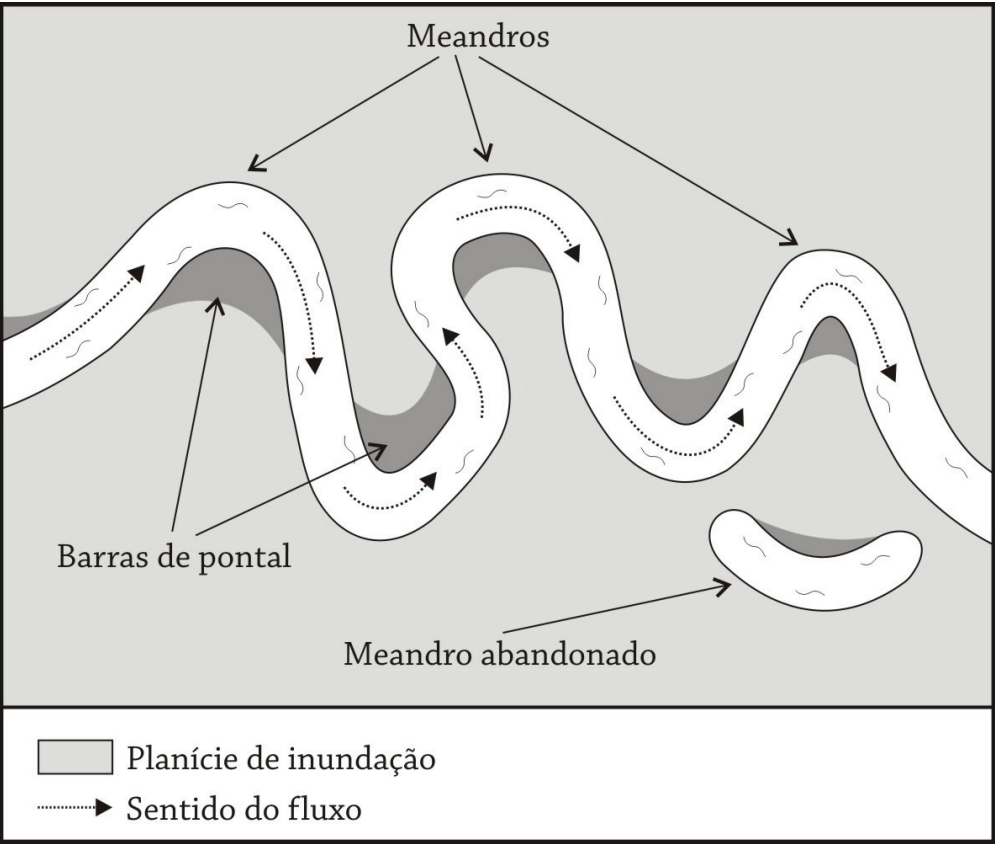
4.2.4. Tipos de Canais Fluviais

Em relação ao critério de continuidade do escoamento, os canais podem ser classificados em perenes, intermitentes e efêmeros. Os canais efêmeros apresentam fluxo com ausência de nascentes e de calhas fixas e estáveis. Os canais intermitentes apresentam fluxos temporários e nascentes que mudam de posição em função das oscilações do nível d’água subterrâneo. Os canais perenes são ativos durante todo o tempo. O fluxo que pereniza os canais origina-se do nível subterrâneo (fluxo de base), mas o fluxo insaturado que se origina do solo e escoar para os canais também pode ser importante nos períodos entre as chuvas.

Os canais fluviais também podem ser classificados segundo o padrão fluvial e sua dinâmica sedimentar:

- **Canais meandrant**es são canais individuais estáveis, com elevada sinuosidade refletida nos meandros (Figura 4.8.). Possuem geralmente baixa declividade e margens geralmente coesas. São típicos de áreas úmidas e vegetadas, com abundância de sedimentos finos, estabilidade tectônica e desenvolvimento de planícies. Porém, podem ocorrer em outros ambientes, inclusive semiáridos e áridos. Com a dinâmica espaço/temporal dos processos de meandramento (Figura 4.9.), há a tendência para que surjam os **meandros abandonados** nas planícies.

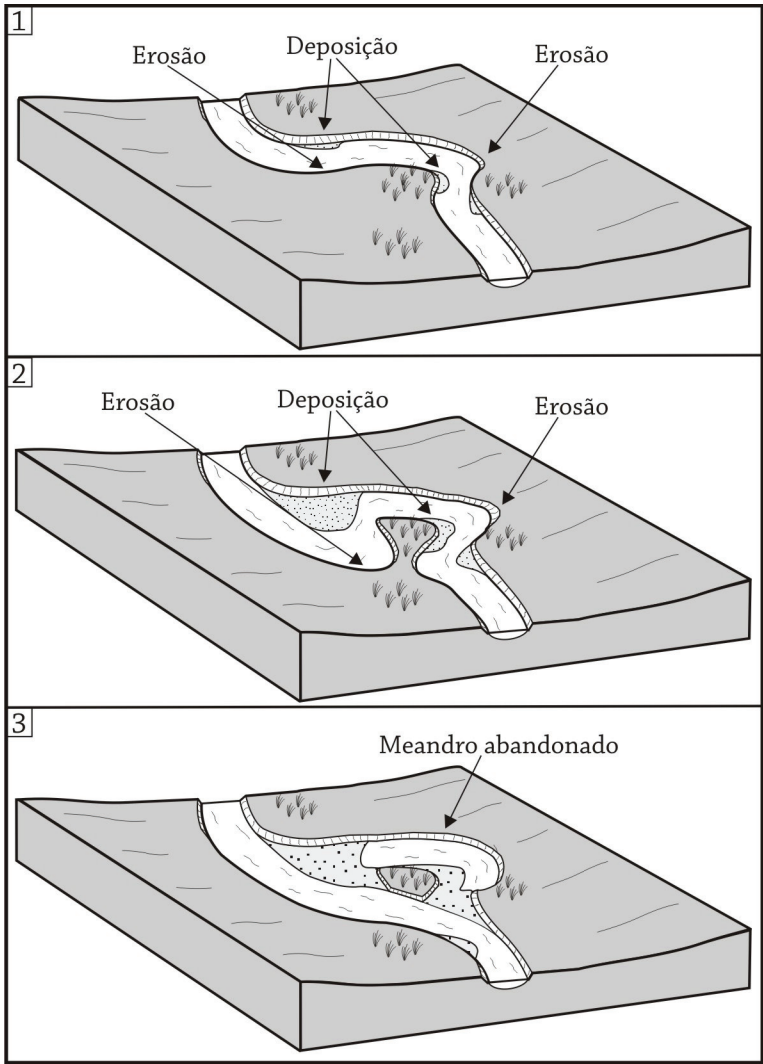
FIGURA 4.8.
Canal Meandrante



Elaboração: Breno Marent.

FIGURA 4.9.
Processos de erosão/deposição em canais meandrant

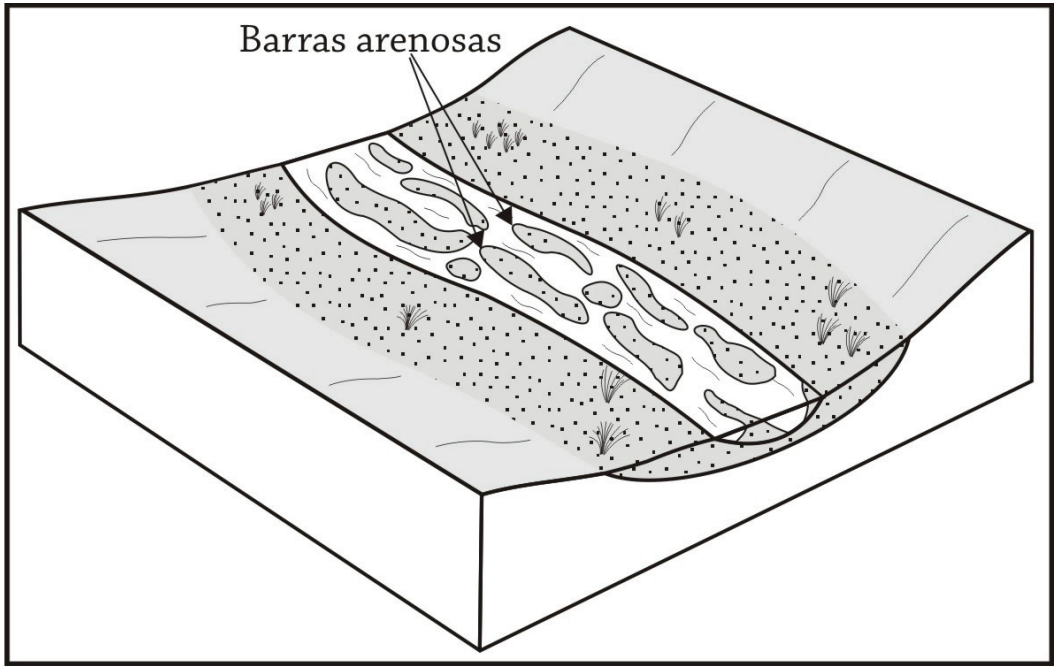
es e formação de meandros abandonados



Elaboração: Breno Marent.

- **Canais entrelaçados** são formados por um conjunto de múltiplos canais instáveis, separados por barras sedimentares de diferentes formas e caracterizados pela elevada razão largura/profundidade (geralmente maior que 40, podendo comumente exceder 300), com predomínio de carga de leito. Como fatores ambientais favoráveis destacam-se a abundância de carga de leito, grandes oscilações de descarga ao longo do ano, margens pouco coesas e escassas coberturas vegetais (Figura 4.10.).

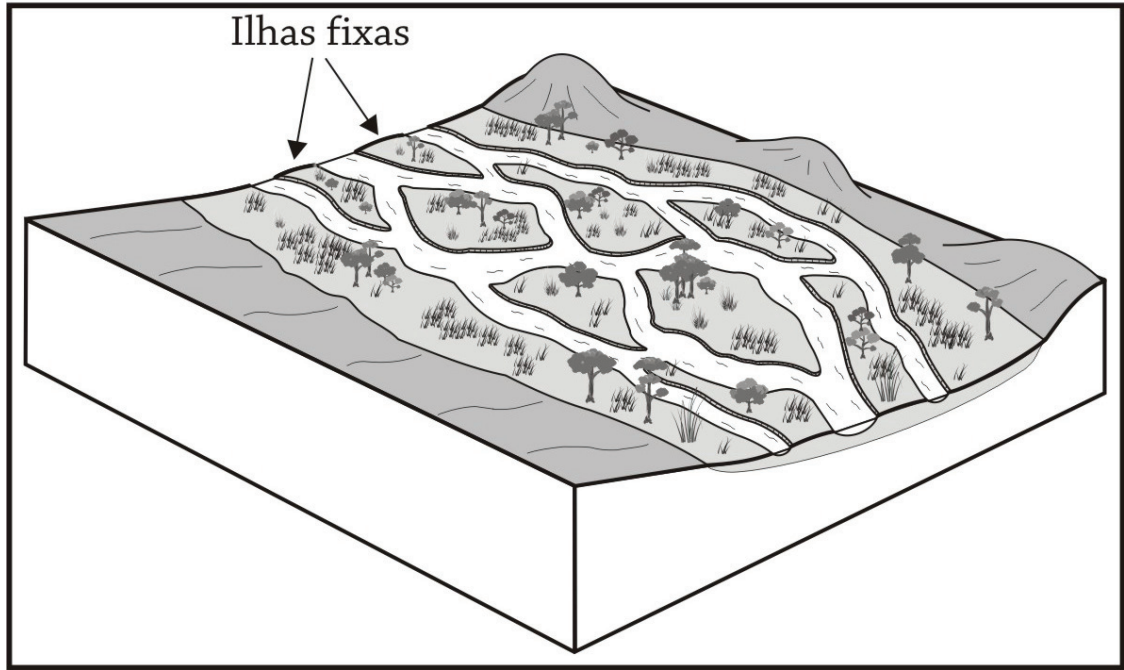
FIGURA 4.10.
Canais entrelaçados



Elaboração: Breno Marent.

- **Canais anastomosados** são complexos de canais de baixa energia, interconectados (dois ou mais canais estáveis), atravessando regiões úmidas e alagadas, separados por ilhas alongadas e comumente vegetadas (SMITH e PUTNAM, 1980). Eles apresentam baixa razão largura/profundidade (pode ser <10), margens coesas devido à carga e à vegetação, elevada sinuosidade (>2), predomínio de carga em suspensão e baixa declividade. É comum a ocorrência de turfeiras, pântanos e planícies de inundação ao longo dos ambientes marginais destes canais. Um dos fatores mais favoráveis à ocorrência dos canais anastomosados é a presença de áreas de subsidência tectônica (grabens), que criam ambientes de baixa energia e favorecem a retenção de sedimentos finos (Figuras. 4.22. e 4.23.). No Brasil, o Rio Amazonas apresenta vários trechos anastomosados, com presença de ilhas vegetadas, sendo um bom exemplo da existência deste padrão fluvial no país.

FIGURA 4.11.
Canais Anastomosados



Elaboração: Breno Marent.

Até meados da década de 1970, no Brasil, os canais eram agrupados em anastomosados (*anastomosed*/*braided*), meandrantos (*meandering*) e retilíneos (*straight*). A partir dos anos 1980, consolidou-se a separação entre canais entrelaçados (*braided*) e anastomosados (*anastomosed*).

Um dos critérios de separação entre os padrões morfológicos fluviais é o grau de sinuosidade dos canais, compreendido como o grau com que o curso d'água afasta-se de uma reta.

O **índice de sinuosidade** é calculado com base na relação entre a extensão do curso d'água e a extensão do seu vale. A sinuosidade tende a aumentar com o aumento da resistência das margens e tende a diminuir com o aumento da declividade. A vegetação favorece a formação de sinuosidades pelo efeito estabilizador das árvores e a resistência à erosão lateral. Uma única árvore pode provocar desvio. Deve-se salientar que um canal sinuoso não é necessariamente meandrante.

Vários índices de sinuosidade, meandramento e entrelaçamento foram propostos na literatura:

- a) **Índice de Leopold & Wolman (1957)** – canais meandrantos são aqueles com índice de sinuosidade < 1.5 (relação entre o comprimento do vale e o comprimento do talvegue).

- b) **Índice de sinuosidade de Schum** (1963) – canais retilíneos possuem índice de sinuosidade:1, enquanto canais sinuosos possuem $I_s:1.5$ e canais meandrantess possuem $I_s > 1.5$.
- c) **Índice de sinuosidade de Brice** (1964) – canais sinuosos possuem I_s entre 1 e 1.3 e canais meandrantess possuem $I_s > 1.3$.
- d) **Índice de Leopold & Miller** (1964) – canais retilíneos possuem $I_s:1$, canais sinuosos ($I_s:1.3$), canais meandrantess ($I_s > 1.3$); os canais retilíneos seriam aqueles cujo comprimento não excede em 10 vezes sua largura.
- e) **Índice de entrelaçamento** (BRICE, 1964) – $IE:2l\backslash m$, sendo l: soma do comprimento de ilhas ou barras em dada extensão e m: distância entre as margens; valores $>1,5$ representariam canais entrelaçados.
- f) **Parâmetro de entrelaçamento** (RUST, 1978) – baseado nos parâmetros sinuosidade e índice de entrelaçamento; o cálculo é realizado tomando-se o número de ramificações (braços) no canal, dividido pelo comprimento de onda do canal medido ao longo do talvegue; as ramificações são as linhas medianas dos canais que bordejam cada barra; o valores $> 1,5$ representam canais entrelaçados, enquanto 1 a 1,5 indicam canais anastomosados e valores < 1 indicam canais meandrantess.

As Tabelas 4.4. e 4.5. ilustram alguns dos estudos de Rust (1978) sobre a separação de padrões fluviais.

Tabela 4.4. Grau de Entrelaçamento e Sinuosidade		
Grau de Entrelaçamento	Sinuosidade	
	Baixa (< 1,5)	Alta (> 1,5)
< 1 (canal único)	Retilíneo	Meandrante
< 1 (canais múltiplos)	Entrelaçado	Anastomosado

Fonte: Adaptado de Rust (1978).

Tabela 4.5. Relação entre Largura e Profundidade		
Tipo	Morfologia	Razão Largura/Profundidade
Retilíneo	Canais individuais com barras longitudinais	< 40
Entrelaçado	Dois ou mais canais com barras de canal.	> 40, chegando freqüentemente a > 300.
Meandrante	Canais individuais	< 40
Anastomosado	Dois ou mais canais com ilhas estáveis	Em geral, < 10

Fonte: Adaptado de Rust (1978).

Os canais meandrantess são comumente encontrados em ambientes tropicais úmidos. O processo de meandramento é o resultado de um conjunto de fatores hidrossedimentológicos. Destacam-se alguns fundamentos do fluxo em canais meandrantess:

- Há tendência de maiores velocidades da água na margem côncava. Em canais retilíneos, as maiores velocidades ocorrem no centro do canal, logo abaixo da superfície. Os canais meandrantess tendem a erodir mais nas margens côncavas e depositar nas convexas.
- Há superelevação do fluxo na margem côncava, causada por forças centrífugas em um meandro. Tal superelevação cria um gradiente superficial, provocando um fluxo direcional que mergulha próximo ao meio do canal.
- A circulação transversal do fluxo é considerada essencial ao meandramento. Pelos princípios da física, canais mais estreitos e profundos favorecem o meandramento por meio da manutenção de uma seção que propicia uma circulação secundária baseada em células duplas. Quando o canal alarga-se e torna-se menos profundo, o numero de células aumenta, desfavorecendo o meandramento.
- A circulação secundária nos meandros (válida para canais retilíneos com talvegue meandrante) ocorre devido ao fluxo que se dirige ao banco exterior em superfície e ao banco interior em profundidade. Apesar das células de circulação secundária poder emitir fluxo ascendente em ambas as margens (do fundo para a superfície), a maior erosão nas margens côncavas decorre dos vetores compressionais do fluxo nestas margens. A circulação secundária é responsável por oscilações de velocidade. O número de células secundárias reflete a relação largura-profundidade do canal
- A migração de um canal resulta da interação direta entre processos de atrito superficial, erosão subsuperficial e colapsos na margem côncava (quedas). Segundo Chitale (1970), a erosão de margens côncavas está concentrada no ápice dos meandros se a seção é estreita e profunda. Se a seção é mais larga e rasa, a erosão estará concentrada logo a jusante do ápice, gerando curvas assimétricas (explicação para meandros assimétricos).
- Quanto mais fechado o meandro, menor a área em que a força total é exercida e maior a força por unidade de área.
- O meandramento é um mecanismo de redução do excesso de gradiente e energia, já que as sinuosidades dissipam a energia através do aumento da rugosidade nas curvaturas. O crescimento da amplitude dos meandros tende a continuar, até que a própria resistência extra da curvatura dissipe o excesso de energia, inibindo a migração. Apesar disto, os meandros continuam a migrar mesmo após a dissipação do excesso de energia: a erosão prossegue desde que o fluxo se choque diretamente com a margem côncava (SHULITS, 1955).

- A resposta de um canal ao excesso de gradiente e energia não é o meandramento, mas a erosão. O meandramento é a resposta natural da reação entre fluxo corrente e o transporte aluvial (CRICKMAY, 1974).
- Experimentos de laboratório indicam que mesmo após o início da erosão das margens, um canal só torna-se meandrante após o fornecimento de argila. Sob carga arenosa, o canal alarga-se devido à pouca coesão das margens (SCHUMM & KAHN, 1972).

Assim como o meandrante, o processo de **entrelaçamento** também vem sendo estudado há décadas por geomorfólogos, interessados em desvendar as suas causas. O entrelaçamento é favorecido por situação de elevada energia do fluxo, elevados gradientes, grande variabilidade de descarga, predomínio de carga de leito e margens pouco coesas.

Canais largos e rasos com margens pouco coesas tendem a se tornar entrelaçados, pois as seções largas e rasas favorecem múltiplas células de circulação secundária, com barras sendo formadas nos pontos de convergência do fluxo em profundidade. Tais pontos são marcados por maior velocidade nos fluxos elevados. As barras divergem o fluxo causando erosão das margens e alargando o canal, provocando a redução das velocidades e a nova formação de barras (*feedback* positivo).

A energia necessária para que ocorra o entrelaçamento aumenta com o aumento da granulometria da carga de leito. Vários canais múltiplos são hidraulicamente menos eficientes que um único canal, pois a ineficiência permite que o excesso de energia seja dissipado. A largura combinada dos canais múltiplos é maior e a profundidade combinada é menor do que um canal único. Nesse caso, o aumento da fricção é compensado pelo aumento do gradiente para manter velocidades comparáveis.

O entrelaçamento pode ocorrer como necessidade de dissipação de energia dos múltiplos canais. A manutenção da energia do canal necessária ao transporte sedimentar demanda aumento do gradiente e o ajuste de múltiplas variáveis hidráulicas, compensando os baixos fluxos. Sabendo-se que o transporte de carga de leito e a formação de barras (e *riffles*) são fatores necessários ao desenvolvimento dos meandramentos e entrelaçamentos, a variação deve relacionar-se à granulometria da carga.

A energia disponível por unidade de comprimento do canal é máxima em canais retilíneos. Canais meandantes ou entrelaçados reduzem o gradiente e dissipam a energia.

4.2.5. Tipos de Transporte Sedimentar

Os sedimentos são transportados pelos fluxos fluviais de diferentes maneiras:

- **Solução** – em solução são transportadas substâncias geradas principalmente pelo intemperismo químico, como carbonatos, sulfatos, óxidos, etc. A matéria orgânica pode representar 10-15 % dos materiais dissolvidos em climas úmidos e menos de 2 % em climas áridos (CRICKMAY, 1974).

- **Suspensão** – por suspensão são transportadas as partículas sustentadas por forças eletrostáticas (coesão) e de turbulência. Cerca de 8 a 10 % de partículas de argila podem suportar grãos de areia por longos períodos através da coesão (CRICKMAY, 1974). Através da suspensão, a velocidade média das partículas fica próxima da do escoamento e há predomínio de argila e silte concentrados, principalmente próximo ao leito. O transporte de seixos em suspensão temporária é possível com velocidades extremamente elevadas, através de forças macroturbulentas denominadas (*lift forces*).
- **Saltação** – na saltação há projeção de partículas do leito (subcamada viscosa) na camada *buffer* ou na camada externa (fluxo turbulento). Há a sustentação provisória das partículas pelas forças tangenciais, processo que atinge principalmente areia e grânulos. A formação de **baixa pressão** no topo de uma partícula, em função da viscosidade do fluxo, pode ser suficiente para desprendê-la do leito (*lift force*).
- **Arraste ou tração** – representa o rolamento ou escorregamento das partículas, havendo predomínio de areia, grânulos e seixos. Não há perda de contato com o leito.
- **Fluxo de detritos** – neste caso, os sólidos e a água movem-se juntos como um único corpo viscoso, à mesma velocidade. Os sólidos podem chegar a 70-90 % do peso total. Quando o material é depositado, não há separação de fases sólida e líquida.

A quantidade de carga sedimentar transportada por um canal pode ser calculada a partir de diferentes fórmulas existentes na literatura³. Para a carga de arrasto (leito), as fórmulas baseiam-se principalmente na vazão sólida de arrasto (Fórmula de **Meyer-Peter**), na energia do escoamento (Fórmula de **Bagnold**) e na natureza probabilística do transporte por arrasto (Fórmula de **Einstein**, Fórmula de **Sayre e Hubbell**).

Para o cálculo da vazão sólida em suspensão destacam-se os métodos de **Einstein** e de **Bagnold**. No caso da vazão sólida total (arrasto e suspensão), destacam-se os métodos de **Einstein**, **Bagnold**, **Toffaletti** e **Yang**.

A compreensão dos processos de transporte sedimentar também pode ser auxiliada pelas seguintes informações complementares:

- A redução do peso das partículas é inicialmente rápida, à medida que partículas angulares quebram-se ao longo dos planos de clivagem, e diminui gradualmente à medida que a abrasão atua sobre partículas menores e mais esféricas (KRUMBEIN, 1941).
- Seixos elipsoidais, imbricados na direção da corrente, contribuem mais para a estabilidade do leito do que seixos arredondados.
- O impacto das gotas de chuva no fluxo aumenta sua capacidade de transporte.

³ SILVA, R. C. V. e WILSON JR, G. Hidráulica Fluvial. Rio de Janeiro: Coppe/UFRJ, 2005. v. II.

- A capacidade de um canal é aumentada pela mistura de detritos de diferente granulometria.
- Em situações de redução da energia do fluxo, como em poços naturais ou represamentos, uma parte significativa da carga sedimentar mais grosseira tende a ficar retida. Por consequência, a redução da carga à jusante permite o aumento da energia disponível para o transporte sedimentar e a erosão. Um efeito possível é o encouraçamento do leito (*armouring*), ou seja, a remoção dos sedimentos mais finos à jusante, permanecendo os mais grosseiros no leito. Como as vazões não conseguem remover a carga mais grosseira ocorre a formação de um nível de proteção, como uma couraça.
- Um rio com abundância de material em suspensão não grada necessariamente para um fluxo de lama. Grande quantidade de argila só pode ser adicionada ao canal por grande turbulência (como em deslizamentos), já que a erosão normal do leito e margens adiciona apenas pequena quantidade de argila ao fluxo, devido à baixa turbulência. Se isto ocorrer, os canais podem por curtos períodos funcionar como fluxos de lama (CRICKMAY, 1974).

4.2.6. Lagos

Os lagos são ambientes lênticos, ou seja, em que as águas não são correntes (figura 44). A limnologia é a ciência que estuda a estrutura e o funcionamento dos ecossistemas aquáticos continentais lênticos, principalmente quanto aos processos biológicos de produção, consumo e decomposição.

Três processos biológicos em relação à matéria orgânica são característicos dos lagos, devendo ser compreendidos:

- **Produção** é realizada pelos organismos que sintetizam matéria orgânica a partir de CO_2 , sais minerais e energia solar. Cerca de 40 % da produção primária é imediatamente metabolizada por bactérias na água. A matéria orgânica extracelular dissolvida (MOD), produzida pelas algas autotróficas (capacidade de sintetizar substâncias orgânicas com base em inorgânicas), é convertida em matéria orgânica particulada (MOP), tornando-se novamente disponível para a cadeia alimentar. O conteúdo de clorofila a (*fitoplâncton*) pode ser previsto a partir das quantidades de P, pois este é um dos principais fatores limitantes para a produtividade.
- **Consumo** é a energia obtida por organismos a partir da matéria orgânica sintetizada pelos produtores primários.
- **Decomposição** é realizada por bactérias e fungos, podendo reduzir a matéria orgânica, os sais minerais, H_2O e CO_2 .

O principal componente ecológico em ambientes lênticos é a importação de energia a partir da radiação solar. À medida que a água tem uma elevada capacidade de absorção

de ondas longas, a transformação de energia luminosa em calor é muito rápida. O resultado é o armazenamento de calor; a redução do peso específico da água e a estratificação de massas hídricas em epilimnio (estrato mais quente), hipolimnio (mais frio) e termoclínio (intermediário).

Como a radiação solar é restrita às partes superiores do corpo d'água, é nesta porção que ocorre a transformação de elementos inorgânicos em orgânicos (foto-litotrofia). O consumo de CO_2 na fotossíntese (síntese de substâncias orgânicas mediante a fixação do gás carbônico do ar através da ação da radiação solar) pode levar à precipitação de carbonato de cálcio, aumento de pH, e saturação em oxigênio.

A trofia é o nível de nutrição de um corpo d'água, por unidade de tempo. Os corpos d'água podem ser classificados de acordo com os seus níveis de trofia:

- **Oligotrófico** – pobre em nutrientes minerais, com baixa produtividade. Geralmente são corpos d'água profundos com hipolímio mais espesso e elevada transparência. Os sedimentos são pobres em matéria orgânica, o oxigênio é abundante, há ausência de explosão de algas, e os bentos profundos são pouco numerosos.
- **Mesotrófico** – a produtividade é intermediária.
- **Eutrófico** – ambiente rico em nutrientes minerais, com elevada produtividade. Geralmente são corpos d'água rasos, com transparência limitada, abundância de sedimentos orgânicos, oxigênio reduzido, fitoplâncton abundante, comuns explosões de algas e grande biomassa de bentos profundos. Porém, são pobres em espécies. Em geral, mais de 80 % da produção primária é decomposta nos cinco metros superficiais.
- **Distrófico** (água marrom) – há altas concentrações de ácidos húmicos dissolvidos, mas escassez de nutrientes minerais.

Quando os lagos apresentam problemas de excesso de nutrientes minerais e redução do oxigênio disponível, os especialistas sugerem algumas técnicas que podem aumentar o oxigênio no hipolímio (aeração/circulação da água), remover o fósforo e o nitrogênio da água, remover a água mais pobre em oxigênio, e reduzir a liberação de nutrientes pelos sedimentos, dentre outros.

FIGURA 4.12
Lago da Represa da Pampulha em Belo Horizonte – MG



Fonte: Arquivo pessoal de Magalhães Júnior.

4.2.7. Noções de Hidrometria Fluvial

A vazão é a quantidade de água que passa em dada seção do canal fluvial, em certo período de tempo (l/s , m^3/s). É nas estações hidrológicas ou hidrometeorológicas onde se efetuam os registros de níveis d'água e vazões. Elas podem ser utilizadas para planejamento e projetos de obras hidráulicas (barragens, diques, desvios), ou para a gestão de bacias hidrográficas, incluindo a gestão de riscos hidrológicos.

Podemos destacar alguns parâmetros característicos das vazões:

- **Tempo de retardamento da bacia** – intervalo entre o máximo de P (precipitações) e o pico do hidrograma.
- **Tempo de recorrência ou período de retorno** – é o intervalo de tempo estimado para a ocorrência de um evento: equação: $Tr: 1/P$, sendo Tr: tempo de recorrência, e P: probabilidade de um evento ser igualado ou ultrapassado.
- **Tempo de concentração** – tempo necessário para que toda a bacia contribua para dada seção. Pode ser obtido pela Fórmula de Kirpich (mais utilizada): t_c

: $(0,294 L/I^{1/2})^{0,77}$, sendo t_c : tempo de concentração, L: comprimento do talvegue e I: declividade média do talvegue em %.

A relação entre o nível da água e a vazão permite a construção de uma curva que facilita o cálculo das vazões futuras, com base simplesmente na obtenção das cotas. O conhecimento dessa curva chave permite substituir a medição contínua das descargas por uma medição contínua das cotas (níveis da água).

Chevallier (2004) destaca que para estabelecer a curva chave existem vários métodos que podem ser classificados em duas categorias: os métodos teóricos, que usam as equações gerais da hidráulica; e os métodos experimentais, que estabelecem a curva chave a partir de vários pares cota/descarga, medidos experimentalmente com uma distribuição regular.

Geralmente o nível da água é determinado com a instalação de uma régua vertical na seção para observar a variação do nível, mas também pode ser obtido por meio de linígrafos. A escolha do local ideal para a instalação da régua ou do linígrafo deve ser feita levando-se em consideração as características locais do canal fluvial. O ideal é escolher um trecho relativamente homogêneo, sem sinuosidades ou meandramentos, com uma seção transversal, onde a velocidade do fluxo é estável a qualquer cota, tanto na estiagem como na cheia.

As determinações de vazão são feitas com base na velocidade da corrente, utilizando um hidrômetro fluviométrico ou molinete fluviométrico. Molinete é um aparelho empregado para determinar a velocidade local da água, mediante a medida do número de revoluções da hélice, que gira quando é colocada no sentido do fluxo da água. O princípio utilizado para calcular o número de revoluções da hélice é o da rotação em torno do eixo que abre e fecha um circuito elétrico. Contando o número de voltas da hélice durante um intervalo de tempo fixo, obtém-se a velocidade de rotação que está relacionada com a velocidade do fluxo, através da fórmula:

$$V: a N + b$$

sendo **V**: velocidade do fluxo, **N**: velocidade de rotação e **a** e **b**: constantes características da hélice

As constantes **a** e **b** são fornecidas pelo fabricante do aparelho. O valor **a**, denominado passo da hélice, é a distância percorrida pelo fluxo em uma volta. Para contar os impulsos gerados pelo molinete utiliza-se um conta-giros.

Segundo Chevallier (2004), o princípio da determinação da descarga líquida numa seção de um rio é, por definição, o volume da água que atravessa esta seção durante a unidade de tempo. Ou seja, a descarga **dQ** que atravessa a área **dS** a uma velocidade V:

$$dQ: V dS$$

Para obter a descarga que vai atravessar a seção total, é necessário fazer a dupla integração da fórmula elementar sobre a área total da seção. O conhecimento da

velocidade do fluxo em todos os pontos de uma seção permite calcular a vazão. O método mais utilizado para calcular a vazão é o método da integração por vertical realizado graficamente, também conhecido como **método seção-velocidade: Q : VS**, sendo **V**: velocidade média e **S**: profundidade X distância da margem.

Esse método propõe a construção de gráfico de velocidade para cada vertical, em função da profundidade. Para isso, deve-se interpolar a curva das velocidades e medir com um planímetro a área assim delimitada **q**, que é a vazão média por unidade de largura no lugar da vertical. O segundo passo é construir a curva dessas vazões por unidade de largura, ao longo da largura do rio, delimitando a área **Q** que representa a descarga líquida do rio (CHEVALLIER, 2004).

Segundo BARTH (1987), a distância recomendada entre as verticais é de 0,30 m para rios com largura menor ou igual a 3 m; de 0,5 m para rios com largura entre 3 e 6; de 1,0 m para rios com largura entre 6 e 15 m; e de 2,0 m para rios com largura entre 15 e 50 metros. Definidas as linhas verticais na seção controle, devem ser medidas as velocidades a 20% e a 80% de profundidade de cada vertical. A partir de então, determina-se a velocidade média de cada vertical, utilizando a seguinte equação:

$$V_m : (V_{0,2} + V_{0,8})/2$$

A velocidade média da vertical, multiplicada por uma área de influência igual ao produto da profundidade na vertical pela soma das semidistâncias às verticais adjacentes, fornece a vazão parcial **Q_i** de cada vertical. O somatório das vazões parciais resultou na vazão total na seção transversal em estudo, ou seja:

$$Q_i: V_i \cdot b_i \cdot h_i,$$

sendo **V_i**: velocidade média da vertical, **b_i**: largura da vertical e **h_i**: altura da vertical

Alguns estudos também medem as vazões por meio de **medidores de diluição** ou **elementos-traço**, a partir da seguinte equação:

$$Q:q \text{ Ci - Cd}\backslash \text{Cd - Cb},$$

sendo **q**: taxa de injeção da solução, **Ci**: concentração da solução, **Cd**: concentração da amostra e **Cb**: concentração da base do canal.

Outros estudos medem as vazões por meio de estruturas hidráulicas fixas, como comportas, vertedouros ou canais artificiais. O princípio básico destas estruturas é o conhecimento do volume de água que passa a cada unidade de tempo. A fórmula racional também pode ser aplicada para o conhecimento dos deflúvios, a saber:

$$Q: \text{CiA}$$

sendo **C**: coeficiente de deflúvio, **i**: intensidade de **P** e **A**: área

Mais informações sobre técnicas de medição de vazões podem ser obtidas em Santos *et al* (2001) ou outros livros de hidrometria.

A apresentação dos resultados do monitoramento de vazões pode ser realizada por meio das seguintes técnicas:

- **Curvas chave:** altura (m) x vazão (m³\ s).
- **Hidrogramas:** gráficos que expressam as vazões ao longo do tempo.

Nos hidrogramas, podemos diferenciar o **escoamento de base**, do **escoamento direto** (precipitação útil). A forma do hidrograma também indica o regime fluvial e possíveis influências humanas (curvas de crescimento e depleção).

4.2.8. Tratamento de Dados Hidrológicos

Os principais dados hidrológicos de interesse ambiental são precipitações, vazões e cotas (nível d’água). Os parâmetros hidrométricos mais usados são duração, frequência, intensidade (duração x frequência), valores médios, máximos e mínimos, valores específicos, valores regionalizados, período de recorrência de dado evento, probabilidade de ocorrência de dado evento, desvio padrão, médias de longo termo, etc.

O coeficiente de escoamento superficial (C), dado em %, é muito utilizado para a gestão de águas em áreas ocupadas. O coeficiente reflete a altura escoada/altura precipitada em certa unidade de tempo. Há tabelas padronizadas para o C em diferentes tipos de usos do solo (Tabela 4.6.). Outra técnica de cálculo de C é por meio da **Equação de Manning**, a saber:

$$Q_{max} : \text{CIA} / 360 \text{ (m}^3 \text{ s}^{-1}\text{)}$$

onde **C**: Coeficiente de Escoamento Superficial, **I**: intensidade de **P** e **A**: área

Tabela 4.6. Exemplo de Referencial de Coeficientes de Escoamento Superficial (C)							
		Classes de Declividade (%)					
Cobertura do solo	Tipo de solo	Plana 0-2,5	Suave ondulado 2,5-5	Ondulado 5-10	Forte ondulado 10-20	Amorrido 20-40	Montanhoso > 40
Culturas anuais	Argiloso Arenoso	0,50 0,44	0,60 0,52	0,58 0,59	0,76 0,66	0,85 0,73	0,95 0,81
Culturas permanentes	Argiloso Arenoso	0,40 0,34	0,48 0,41	0,54 0,46	0,61 0,52	0,67 0,56	0,75 0,64
Pastagens	Argiloso Arenoso	0,31 0,27	0,38 0,32	0,43 0,37	0,48 0,41	0,53 0,45	0,59 0,50
Capoeiras	Argiloso Arenoso	0,22 0,19	0,26 0,23	0,29 0,25	0,33 0,28	0,37 0,32	0,41 0,35
Matas	Argiloso Arenoso	0,15 0,13	0,18 0,15	0,20 0,18	0,22 0,20	0,25 0,22	0,28 0,24

Fonte: adaptado de Pires e Souza (2003).

4.8.2.1. Separação do Hidrograma

As técnicas de separação do escoamento direto (devido às chuvas) do escoamento de base (água oriunda do nível subterrâneo) nos hidrogramas permitem estimar os valores absolutos. A separação é feita, geralmente, por meio de *softwares* especializados. São exemplos de produtos obtidos: vazão total de cheia, vazão do escoamento direto e de base, valores percentuais, vazão específica.

A curva de permanência das vazões indica a percentagem de tempo em que um valor de vazão foi igualado ou ultrapassado. Os valores de vazões são plotados nas abscissas e o % do tempo nas ordenadas.

4.8.2.2. Ponderação Espacial dos Dados de Precipitação

Os dados hidrológicos não são zonais e sim pontuais no tempo e no espaço. Muitas vezes, necessitamos de médias hidrométricas que abrangem áreas e, neste caso, precisamos regionalizar os dados. No caso das precipitações, os métodos mais usados são os Polígonos de Thiessen e as isoietas.

- **Polígonos de Thiessen** – é um método apropriado para regiões relativamente planas, com estações não uniformemente espaçadas. Implica em dar pesos aos totais precipitados em cada estação pluviométrica, proporcionais à área de influência de cada uma. O método foi proposto para as regiões de relevo suave do norte da Alemanha, considerando chuvas regulares entre duas estações. Deve ser, portanto, usado com cautela para áreas acidentadas, seguindo os passos:

- Plotar no mapa as estações pluviométricas e fluviométricas.
- Unir os postos adjacentes da estação fluviométrica estudada, três a três, através de retas, e traçar normais ao meio dos segmentos, formando polígonos.
- Qualquer ponto contido no interior do polígono está influenciado pelo referido posto.
- A precipitação ponderada para cada estação será:

Pm: $1/A \times (\text{somatório de } A_i \cdot P_i)$

sendo **Pm**: precipitação média ponderada, **A**: área total da bacia (Km²), **Ai**: área de influência da estação pluviométrica (Km²), e

Pi: precipitação registrada na estação.

- **Método das Isoietas** – este método que permite considerar indiretamente os efeitos da topografia, através dos seguintes passos:
 - Traçar linhas de igual precipitação (isoietas) a partir dos dados pontuais.

- Medir as áreas entre as isoietas, expressando-as em porcentagem da área total.
- Multiplicar os dados percentuais pela altura média de chuva estimada para a região entre as isoietas correspondentes.
- Somar estes produtos, obtendo-se a precipitação média da bacia.
- A tabela final apresenta: 1ª coluna: isoietas (intervalo de classe); 2ª coluna: área; 3ª coluna: área percentual; 4ª coluna: isoietas médias para cada intervalo de classe; 5ª coluna: média ponderada (mm).

• **Relações de Dados Fluviométricos e Pluviométricos**

Devem ser construídos hidrogramas para cada ano hidrológico (outubro a setembro), plotando-se a vazão nas abscissas (m³/s) e a escala temporal nas ordenadas. Na parte superior do hidrograma, plota-se os dados de precipitação ponderada e transformam-se os dados mensais de precipitação e vazão em % anual, construindo histogramas. É possível construir gráficos com as descargas anuais nas abscissas e as precipitações anuais nas ordenadas, traçando-se uma curva através dos anos e analisando-se o comportamento temporal da relação descarga x precipitação.

4.8.2.3. Conversão de Dados de Vazão e Precipitação

Muitas vezes é preciso transformar as unidades de medida ou comparar os dados de vazões e precipitações e, para isto, precisamos padronizar as unidades de medida:

- Transformação de vazão de m³/s para m³/dia:
 $m^3/s \times 60 \text{ (segundos)} \times 60 \text{ (minutos)} \times 24 \text{ (horas)}$
- Transformação de vazão em m³/dia para l/dia:
 $1 \text{ m}^3 : 1000 \text{ litros}$
- Transformação de vazões em m³/dia para mm:
 $y \text{ m}^3/\text{área (m}^2\text{)} : y \text{ m}; y \text{ m} \times 1000 : y \text{ mm}$
- Transformação de precipitações em vazões:
 $1 \text{ mm} : 0,001 \text{ m}$

Como o volume é igual à base x altura, 0,001 m (altura) x 1 m² (base é a unidade espacial tomada como referência para a conversão) : 0,001 m³ : 1 l/m². Cada mm de chuva em 1 m² de área corresponde a 0,001 m³ ou a 1 l de água:

1 mm : 0,001 m³ ou 1 l/ m² (0,001 l/km²)

Se 1 mm em 1 m² equivale a 1 l, em 1000 m² equivalem a 1000 mm ou 1000 l, então em 1 km²:

1000 l : 1 mm

x: 5 mm (precipitação média diária hipotética)

x: 5.000 l/dia ou 5 m³/dia de água

4.8.2.4. Medidas Indiretas de Parâmetros Hidrológicos

As vazões máximas suportadas por canais sem que ocorram inundações é:

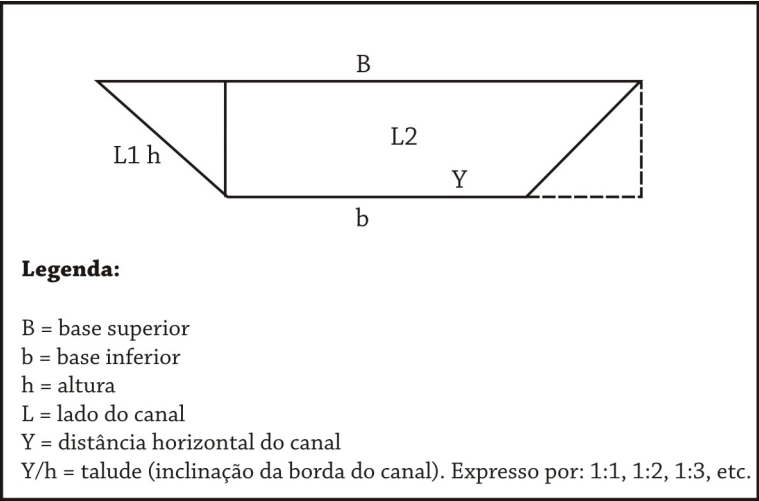
Q_max : S x V

sendo Q: vazão em m³/s, V: velocidade máxima do escoamento em m/s e

S: área em m²

A área (seção) é calculada segundo a forma geométrica da seção do canal (trapezoidal, triangular ou parabólica), conforme a Figura 4.13.

FIGURA 4.13. Forma Geométrica da Seção do Canal.



Seção (S): (B + b) / 2 x h ou (bh + 2Y x h) / 2

A velocidade de acordo com a Fórmula de Manning é:

V_max : (R^{2/3} x I^{1/2}) / n

sendo R: raio hidráulico, I: inclinação do canal em m/m (1 % : 0,01) e n: coeficiente de atrito ou de rugosidade

R: divisão da área da seção (S) pelo perímetro molhado (PM), ou seja:

R : (B + b) / 2 x h
B + 2 (Y² + h²)^{1/2}

A Tabela 4.7. mostra os coeficientes de rugosidade por tipo de canal:

Tabela 4.7. Coeficiente de Rugosidade	
Tipo de Canal	n
Concreto mal acabado	0,015
Concreto bem acabado	0,013
Madeira aplainada	0,012
Madeira não aplainada	0,013
Tijolos rejuntados	0,013
Canais de terra, fundo limpo, vegetação baixa nas laterais	0,022
Canais de terra, fundo limpo, arbustos nas laterais	0,035
Canais de terra, fundo e laterais com vegetação densa	0,100

Fonte: Beasley (1972), citado por Pires e Souza (2003).

A intensidade máxima de precipitação (P) – I_max: na ausência de dados brutos de P, pode-se adotar o valor de lâmina d’água de uma chuva intensa de 100 mm h⁻¹, ou seja, 0,1 m. Alguns princípios básicos devem ser levados em consideração:

- Chuvas de longa duração são de baixa intensidade, e chuvas de curta duração são de alta intensidade.
- O máximo escoamento superficial ocorre quando toda a área produz água simultaneamente.
- O tempo de concentração refere-se ao tempo que a água leva para percorrer os dois extremos de uma área.
- Quando o tempo de duração da chuva é igual ao tempo de concentração, o escoamento superficial será máximo (toda a área contribui com o escoamento simultaneamente e com intensidade máxima).

A Tabela 4.8. apresenta os tempos de concentração para bacias de comprimento aproximadamente igual ao dobro da largura média e topografia ondulada.

Tabela 4.8. Tempos de concentração para bacias de comprimento aproximadamente igual ao dobro da largura média e topografia ondulada (5 % média)	
Área (ha)	Tempo Mínimo de Concentração (min.)
1	2,7
3	3,9
5	4,0
8	4,7
10	6,1
15	9,5
20	11,8
25	13,5
30	14,9
40	17
50	19
75	22
100	26
150	34
200	41
250	48
300	56
400	74
500	96

Fonte: Pires e Souza (2003).

Para casos em que o comprimento seja diferente ao dobro da largura média, adota-se fatores de correção como mostra a Tabela 4.10.:

Tabela 4.10. Fatores de correção				
C / L	1:1	2:1	3:1	4:1
Fator de correção	0,71	1,0	1,22	1,41

Fonte: Pires e Souza (2003).

Para declividades (d) diferentes de 5 % (0,05 m/m), pode-se corrigir o tempo de concentração: $d / 0,22 : x$; $T_c / x : T_c$ corrigido.

A Tabela 4.11. apresenta as intensidades aproximadas de chuva possíveis de ocorrer nas regiões sudeste e sul do Brasil:

Tabela 4.11. Intensidades aproximadas de P em mm/h, possíveis de ocorrer nas regiões Sudeste e Sul do Brasil					
Duração da Chuva ou Tempo de Concentração (minutos)	Regiões de P média anual inferior a 1.400 mm				
	F 5 anos	10 anos	25 anos		
			Regiões de P média anual superior a 1.400 mm		
			5 anos	10 anos	25 anos
0,5	263	290	320	350	386
0,7	255	281	310	341	375
1	246	270	300	330	360
1,5	230	257	382	310	340
2	220	247	272	297	325
3	203	225	252	275	300
5	177	200	223	250	270
7	160	180	205	225	250
10	141	160	181	202	223
15	117	137	155	173	193
20	104	120	138	155	172
30	85	98	115	130	146
40	72	85	100	114	127
50	64	77	89	101	115
60	58	68	80	93	103
80	49	58	68	79	90
100	43	51	60	69	80
120	38	46	54	63	72

Fonte: Pires e Souza (2003).

4.2.8.5. Balanço Hídrico – Método de Thornthwaite e Mather (1955)

O balanço hídrico é um método de cálculo de disponibilidade de água no solo para a vegetação, por meio da quantificação da precipitação em relação à evapotranspiração, considerando a capacidade de armazenamento de água do solo. A disponibilidade de água no solo é um fator mais correlacionado com a distribuição espacial da vegetação do que com a precipitação e com o tipo de solo. A capacidade de armazenamento de água no solo é a máxima quantidade de água utilizável pelas plantas, que pode ser armazenada na sua zona radicular.

O crescimento do sistema radicular das plantas é inversamente proporcional à capacidade de armazenamento de água por unidade de volume de solo. Nos solos de baixa capacidade de armazenamento, o sistema radicular das plantas desenvolve-se mais. Os valores do armazenamento mais comumente usados são entre 100 mm e 125 mm para as espécies vegetais – algodão, café, laranja, cana de açúcar, mamona, mandioca, soja, banana, abacaxi, citrus, cacau, dentre outros. Já para as espécies de eucaliptos, coníferas, latifoliadas nativas e seringueiras são usados 300 mm.

A **evapotranspiração real** ocorre em relação à precipitação e à diminuição do armazenamento de água no solo. Enquanto não ocorre deficiência de água no solo, a evapotranspiração real (ETR) é igual à evapotranspiração potencial (ETP). Ocorre **excedente** de água sempre que a precipitação for superior à quantidade necessária para alimentar a ETP e completar o armazenamento máximo no solo. Já a **deficiência hídrica** ocorre quando o solo não consegue fornecer água para atender a ETP (máxima), complementando o volume de precipitação.

São as seguintes as etapas do cálculo do balanço hídrico:

- Temperaturas (T) médias mensais, obtidas em tabelas de normais climatológicas do município desejado.
- ETP não corrigida⁴
- Fator de correção, segundo a latitude⁵
- ETP corrigida (ETp x fator de correção)
- P mensais (normais climatológicas)
- P - ETp (define estações seca e úmida)
- Negativa acumulada: início quando P - Etp é negativo; é a soma dos valores negativos de P – Etp; preencher a coluna 8 (armazenamento) simultaneamente; quando surgir o primeiro valor positivo de P - ETp, obtém-se o armazenamento primeiro, somando-se tal valor positivo ao armazenamento do mês anterior e, então, obtém-se a negativa

4 MOTA, F. S. Meteorologia Agrícola. São Paulo: Ed. Nobel, 1985. p. 268-270.

5 Iden, ibden, tabela p. 271.

acumulada⁶.

- Armazenamento⁷.
- Alteração: armazenamento do mês menos o valor do mês anterior.
- 10 - ER: igual a ETp: quando o armazenamento é total e quando P - ETp for positivo.; quando P - ETp for negativo, somar P + alteração (desconsiderar o sinal).
- Deficiência: ETp - ER (apenas para P < ETp).
- Excedente: sempre zero quando não há armazenamento máximo, caso contrário, é igual a (P - ETp) – alteração.

O balanço hídrico pode ser representado em um gráfico cartesiano, onde o eixo “X” representa os meses do ano, e o eixo “Y” representa os valores de P e ETP, em mm. A Tabela 4.12. deve ser preenchido à medida que se obtém as variáveis do método.

6 Iden, ibden, tabela p. 289.

7 Iden, ibden, tabela p. 289.

Tabela 4.12. Quadro esquemático do balanço hídrico de Thortwaite e Matter (1955)											
MESES	P	ETP	P-ETP	NEG. ACUM.	ARM	ALT. ARMAZ.	ETR	DEF	EXC	ESC	
		Cálculo de ETP pela equação ETP : p. ETN, onde: p : fator de ajustamento da ETP, determinada pelo nomograma, obtido na p. 290 da bibliografia citada. ETN : ETP mensal determinada pelo nomograma da p. 288. ETP : Evapotranspiração Potencial		Cálculo da NEG. ACUM. É a soma do P-ETP atual mais a do mês anterior para os valores negativos. O primeiro valor da NEG. ACUM. é igual ao primeiro valor negativo de P-ETP. Quando aparecer um valor positivo depois de uma série negativa, a NEG. ACUM. é obtida da seguinte forma: 1. calcula-se o valor do ARM. do mês anterior (col. 5) através do valor da NEG. ACUM. daquele mês (tabelas p.309-313); 2. calcula-se o ARM atual somando-se o ARM acima calculado (mês anterior) com P-ETP do mês atual. 3. Obtém-se o valor da NEG. ACUM. em questão pelas tabelas das páginas 309-313, através do ARM atual calculado no item 2. OBS: Quando o valor do ARM é maior ou igual ao valor máximo (ARM atual calculado pelo item 2), a NEG ACUM é zero, conforme indicado nas tabelas das p. 309-313.	Cálculo do Armazenamento. Começa-se a preencher a coluna pelo 1o mês em que aparece a NEG. ACUM. Os campos restantes do ARM. são preenchidos olhando-se a NEG. ACUM das tabelas das p. 309-313. Quando a soma do ARM. do mês anterior mais P-ETP for superior ao Armazenamento Máximo (100, 125, 150, etc.), o valor do ARM. é o próprio ARM. máximo.	Cálculo da ALT. do Armazenamento. ALT (atual) : ARM (atual) - ARM (anterior).	Cálculo de ETR. ETR (atual) : P (atual) + ALT (atual). Quando ARM : máximo, ETR : ETP.	Déficit Hídrico: DH : ETP (atual) - ETR	Excedente Hídrico: ocorre sempre que a P > ETP e também completar o armazenamento. Se ARM < ARM máximo, então EXC : 0; EXC : { P - ETP (atual) - ALT (atual)}	Escoamento ESC : ½ . {EXC (atual) + ESC (anterior)} No início admite-se um valor provisório igual a zero para um mês situado após vários meses de excedente zero. Calculado o balanço hídrico, podem ser obtidos os índices climáticos característicos: Índice de aridez: Ia:DH\ETp, onde Ia: Índice de aridez; DH: déficit hídrico; ETp: evapotranspiração potencial. Índice de umidade: Iu: SH\ETp, onde Iu: índice de umidade; SH: superávit hídrico; ETp: evapotranspiração potencial. Índice hídrico: Ih: Iu - 0,6 Ia	

4.3. Águas Subterrâneas

As águas subterrâneas são aquelas que ocorrem naturalmente ou artificialmente no subsolo (Resolução Conama n. 396/2008). Os domínios nos quais ocorrem as águas subterrâneas são chamados de aquíferos.

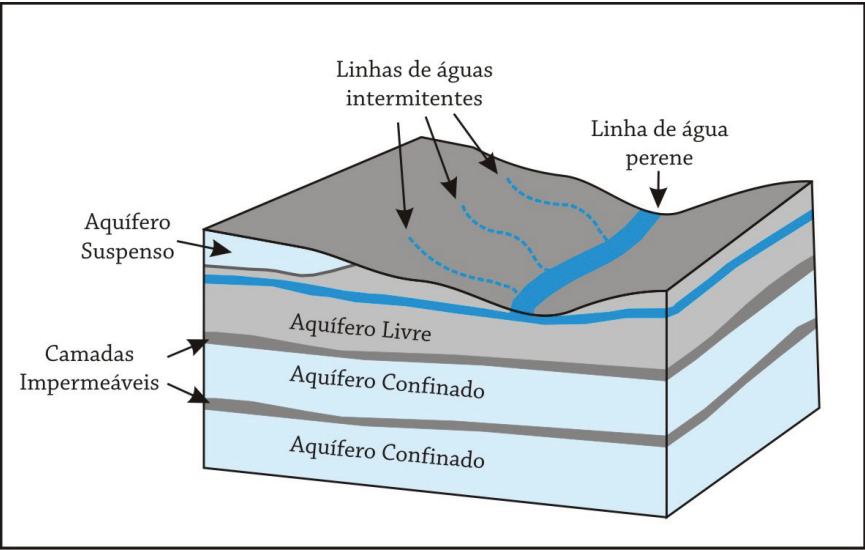
4.3.1. Aquíferos

Um aquífero é um corpo hidrogeológico com capacidade de acumular e transmitir água através dos seus poros, fissuras ou espaços, resultantes da dissolução e carreamento de materiais rochosos (Resolução Conama n. 396/2008). Dentre os aquíferos, destacam-se as formações superficiais recentes, as rochas muito deformadas ou fraturadas e as rochas muito intemperizadas. Um aquífero não deve ser avaliado somente pelo critério de acumulação de água, mas principalmente pela sua capacidade de permitir o escoamento da água. A recarga é o processo pelo qual se incorporam a um aquífero as águas procedentes do seu exterior. Os principais tipos de aquíferos são:

Quanto à dinâmica da água subterrânea (Figura 4.13.):

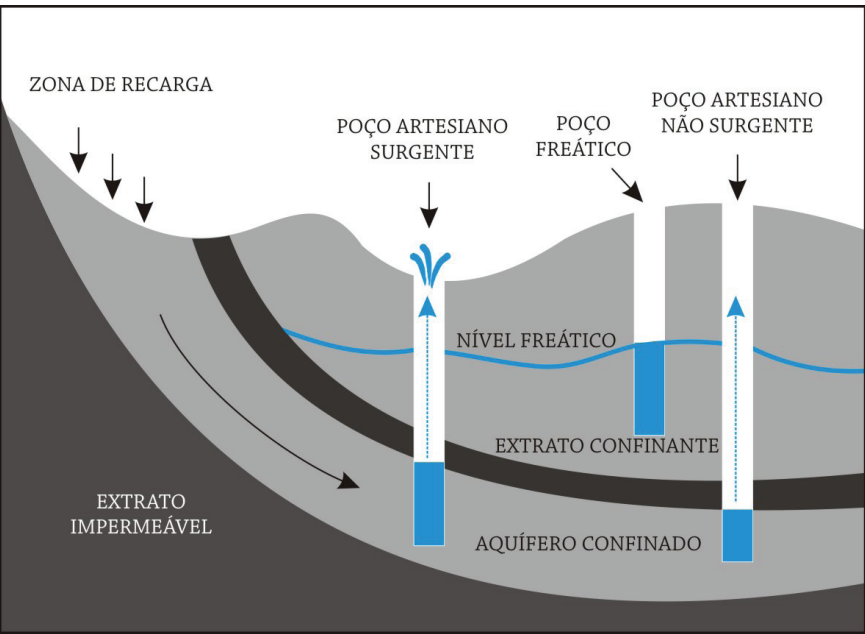
- **Freático ou livre:** são aquíferos permeáveis, parcialmente saturados de água, nos quais as águas subterrâneas ficam armazenadas em poros resultantes do intemperismo ou dos contatos entre sedimentos. Deste modo, a água não possui obstáculos para sua migração ascendente, possuindo uma dinâmica livre. O topo do aquífero é limitado pela própria superfície livre da água, também chamada de superfície freática, a qual está sob a pressão atmosférica. Em períodos de chuvas, quando a recarga aumenta, o nível de água subterrâneo tende a subir. Ao contrário dos aquíferos artesianos, as águas não ficam retidas neles, com elevada pressão natural, devendo ser bombeadas para sua extração.
- **Cativo, confinado ou artesiano:** são aquíferos saturados de água onde o confinamento da água é resultante de fatores geológicos (estruturas, camadas impermeáveis) ou de materiais gerados pelo intemperismo (camadas endurecidas com ferro, por exemplo). A água fica relativamente aprisionada em partes de rochas subterrâneas, as quais são limitadas, em suas porções superiores (tecto) e inferiores (piso), por rochas relativamente impermeáveis. O confinamento faz com que surja um meio saturado, onde todos os poros são preenchidos por água e de onde as águas escoam lentamente por alguma saída. A pressão natural existente é superior à pressão atmosférica, fazendo com que a água possa ser extraída naturalmente com uma perfuração, sem a necessidade de bombeamento (aquífero artesianos).

FIGURA 4.14.
Tipos de Aquíferos quanto à Dinâmica da Água Subterrânea



Elaboração: Joyce Bonna

FIGURA 4.15.
Aquíferos e Diferentes Tipos de Poços

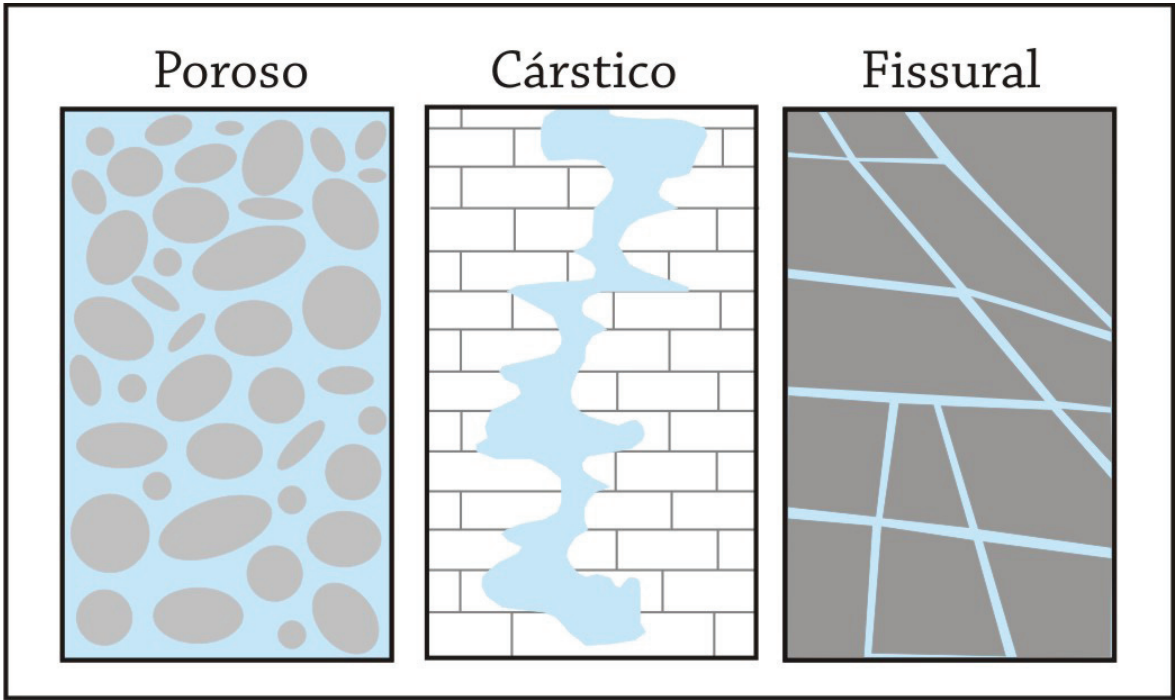


Elaboração: Joyce Bonna

Quanto ao tipo de porosidade em que ocorre o armazenamento e a circulação da água subterrânea (Figura 4.14.):

- **Poroso** – a água fica armazenada nos poros derivados do intemperismo (manto de intemperismo) ou nos poros entre as partículas sedimentares. São aquíferos normalmente do tipo livre. Destacam-se, nesta categoria, os aquíferos areníticos e conglomeráticos, como os costeiros, os vulcânicos (a água fica armazenada nas cinzas e outros materiais piroclásticos) e os aquíferos aluviais.
- **Fissural, fraturado ou estrutural** – a porosidade é derivada de descontinuidades geológicas como falhas e fraturas. Estas estruturas geológicas representam uma porosidade secundária. São geralmente aquíferos do tipo confinado ou semiconfinado, onde a água fica armazenada com pressão. Os aquíferos fissurais mais eficientes são as rochas ígneas e metamórficas deformadas tectonicamente.
- **Cárstico** – a água circula entre as cavidades de dissolução da rocha, ou seja, entre as cavidades cársticas das rochas. Dentre estas cavidades estão as dolinas de abatimento, as grutas e cavernas, e quaisquer outras aberturas de dissolução. Os aquíferos cársticos mais comuns são os calcários e os dolomitos.

FIGURA 4.16.
Tipos de Porosidade Possíveis na Circulação da Água Subterrânea.



Elaboração: Joyce Bonna

Quanto à transmissividade de água do aquífero:

- **Artesiano** – a água sobe naturalmente por pressão, sem a necessidade de bombeamento.
- **Aquitardo** – este tipo de aquífero contém água, mas a transmissão é muito lenta.
- **Aquicludo** – este tipo de aquífero contém água, mas não a transmite, pois a água está aprisionada.
- **Aquifugo** – não contém água.

Seguem alguns exemplos de aquíferos:

- **Aquíferos costeiros** – podem sofrer concentração de sais devido ao excesso de bombeamento de águas doces. O rebaixamento do nível freático pode permitir a intrusão salina das águas oceânicas, formando uma cunha nas águas doces. São comuns em Lima (Peru), Rio Grande (RS), Natal (RN), Mar del Plata (Uruguai), dentre outros.
- **Aquíferos vulcânicos** – quando a lava contém muito gás dissolvido, está sujeita a fenômenos de contração ou flui através de materiais pouco consolidados, podendo formar aquíferos de grande produtividade. São comuns na cidade do México (México), que fornecem cerca de 80 % da água consumida pela população, cidade da Guatemala (Guatemala), fornecendo 70 % da água consumida, Manágua (Nicarágua), 100 % da água, Quito (Equador), 40 % da água, La Paz (Bolívia), San Jose (Costa Rica), etc.
- **Aquíferos aluviais** – são comuns na América Latina, representando as grandes acumulações aluviais dos maiores rios. Destacam-se os aquíferos aluviais de Santiago (Chile), Assunção (Paraguai), Montevidéu (Uruguai), etc.
- **Aquíferos cársticos** – as cidades de Havana (Cuba), Mérida (México) e Miami (EUA) dependem quase que exclusivamente de água subterrânea extraída de aquíferos carbonatados. Apesar da grande capacidade de armazenamento destes aquíferos, eles possuem problemas de poluição, já que a rápida percolação da água não permite sua adequada purificação.
- **Aquíferos areníticos e conglomeráticos** – pela textura grosseira, estes aquíferos apresentam grande capacidade de armazenamento. Destaque para os aquíferos da Bacia Amazônica e da Bacia do Paraná. Este último engloba o aquífero Guarani, que se estende do Mato Grosso ao Uruguai, constituindo-se em um dos maiores aquíferos do mundo, com 1,6 milhão de Km² (equivalendo ao tamanho da Inglaterra, França e Espanha, juntas) e 45.000 Km³ de área. Somente a utilização de 25 % de suas recargas (160 km³/ano) é suficiente para abastecer uma população superior a 15.000.000 de habitantes por ano. Se considerado apenas o consumo doméstico de 100 m³/hab./ano, o aquífero poderia abastecer 400.000.000 de pessoas. A água é suficiente para abastecer toda a população atual do mundo até o ano de 2400 (FREITAS, 1997).

No Brasil estão 2/3 dos aquíferos do mundo (840.000 km²), abrangendo seis estados: São Paulo, Minas Gerais, Mato Grosso do Sul, Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul. As águas do aquífero Guarani são, geralmente, potáveis e de boa qualidade. Apesar de muito produtivo e de caráter artesiano em grande extensão, a perfuração do aquífero Guarani é difícil e cara devido à cobertura basáltica (mais de 1000 m em certos lugares).

Nos Estados Unidos, perfuram-se em média de 800.000 a 900.000 poços/ano e no Brasil entre 8.000 e 9.000 poços/ano. São Paulo é o estado que mais usa água subterrânea no país: 70 % de seus núcleos urbanos e cerca de 90 % de suas indústrias são abastecidas parcial ou totalmente por poços profundos (FREITAS, 1997).

A **superfície piezométrica** indica o nível de pressão do aquífero, ou seja, o nível em que a água atinge no piezômetro, quando o potencial hidráulico é o mesmo ao longo de todo o tubo (do topo à base). A altura atingida indica a pressão na base do tubo. As **poropressões** são as pressões nas descontinuidades ou poros das rochas, correspondendo à altura que a água atinge no interior de um piezômetro. A pressão exercida será o produto entre a massa específica da água e a altura alcançada.

Os poços subterrâneos devem atender a especificações técnicas específicas: características dos terrenos, eficiência hidráulica dos mananciais e dos equipamentos, selos e perímetros de proteção da qualidade da água (REBOUÇAS, 2004).

Os aquíferos podem apresentar mais de um nível freático. Um nível d'água suspenso está em posição elevada em relação ao nível d'água subterrâneo mais profundo, surgindo a partir daí condicionantes topográficos e estratigráficos que dificultam a continuidade da percolação da água.

As **águas conatas** são as águas marinhas aprisionadas em aquíferos ao longo do tempo geológico, principalmente por razões tectônicas.

4.3.2. Noções da Dinâmica Hidrológica Subsuperficial e Parâmetros Hidrogeológicos

A compreensão da dinâmica hidrológica subsuperficial envolve o conhecimento de certos princípios e conceitos:

- **Zona saturada** – parte do aquífero em que todos os poros são preenchidos por água; a zona insaturada (vadosa) é aquela em que parte dos poros está preenchida por água e parte por ar.
- **Forças de coesão** – são aquelas que envolvem a atração entre substâncias de mesmo tipo, como, por exemplo, a água atraindo água; forças de adesão envolvem a atração entre substâncias diferentes, como sólidos atraindo água.
- **Água de retenção capilar** – envolve toda a água retida nos vazios capilares do solo por forças de coesão ou adesão.
- **Água de constituição ou de hidratação** – aquela que penetra nas partículas minerais passando a constituir o elemento.

- **Água de adsorção ou água higroscópica** – água de atração molecular fixada nas superfícies sólidas por tensão de 16 atmosferas, sendo inacessível aos vegetais, já que o potencial osmótico⁸ atinge comumente apenas 5 atmosferas⁹.
- **Água de adesão** – água pelicular que somente pode ser extraída pelas plantas com tensão osmótica superior a 10 atmosferas; representa, em média, cerca de 40 a 45 % da água retida pelas argilas.
- **Zona hiporrêica** – zona de transição entre as águas superficiais e as águas subterrâneas.

a) **Capilaridade**

A capilaridade é a tensão superficial resultante da ação de forças moleculares entre as partículas do solo e as moléculas de água. É a força necessária para manter estendida a superfície de separação ar/água, que se comporta como membrana elástica (menisco). O menisco nos tubos inseridos em zona saturada ou insaturada é côncavo devido à intensa força de adesão, e convexo em condição de forte coesão, como no mercúrio. A capilaridade envolve forças de sucção, coesão e adesão. Quanto menor o raio intersticial, menor o raio dos meniscos e maior a influência das forças de adesão e maior a capilaridade.

Podemos compreender a força total vertical exercida nos tubos inseridos em zona saturada (força responsável pela elevação da água no tubo) como sendo o resultado da seguinte equação:

$$F = 2 \cdot \pi \cdot r \cdot T$$

sendo **r**: raio do tubo e **T**: tensão superficial

Os materiais ideais, em termos hidrológicos, são considerados aqueles que possuem a mesma proporção de poros capilares, que aumentam a retenção de água, e não capilares, que melhoram a drenagem e a aeração. Porém, a palavra ideal depende de cada objetivo. Por exemplo: um solo utilizado para fins agrícolas não deve possuir, necessariamente, a mesma quantidade de água que um solo usado para fins de preservação ambiental. Além disto, cada tipo de cultura agrícola exige certo percentual de água no solo.

A capilaridade responde pelo fluxo insaturado no solo e este pode ser uma importante fonte de descarga de água para os canais fluviais nos períodos de estiagem. A água fica retida no solo nos períodos de chuva e vai sendo liberada lentamente ao longo do ano.

⁸ A osmose é a passagem do solvente de uma solução através de membrana impermeável ao soluto. O soluto é o componente que, em uma solução, possui fração molar (1 mol é igual a uma unidade de massa molecular) muito pequena ou menor que a de outro componente (solvente). Em termos práticos, uma planta tende a succionar água do solo se este possuir concentração de sais mais elevada.

⁹ Atmosfera: unidade de medida de pressão igual a 1,01325 x 10⁵ Pa (Pascal); é equivalente à pressão exercida por uma coluna de mercúrio de 760 mm de altura e de massa volumétrica igual a 13,5951g/cm³, sujeita à aceleração normal da gravidade (980,665cm/s²); atmosfera normal).

b) **Permeabilidade**

A permeabilidade é a habilidade de um material de transmitir água ou a propriedade de um material de se deixar atravessar pela água. Materiais muito porosos, como a argila, não são muito permeáveis devido à elevada superfície específica, ou seja, a argila tem muitos poros, mas todos muito pequenos. Os materiais mais permeáveis são aqueles que possuem grande porosidade aberta (poros intercomunicantes), considerando o volume e o tamanho dos poros.

A microporosidade envolve poros menores que 2 microns de diâmetro. A porosidade capilar refere-se a poros inferiores a 2 mm de diâmetro. A macroporosidade refere-se a poros maiores que 2 mm de diâmetro, sendo a porosidade gravitacional.

c) **Condutividade hidráulica**

A condutividade hidráulica (Ch) é a capacidade de um material transmitir água a partir de um dado gradiente hidráulico (gradiente de sucção capilar). Ela é considerada o parâmetro quantitativo da permeabilidade. Há forte relação entre condutividade hidráulica (CH) e sucção capilar, a saber:

- Materiais finos apresentam maior Ch em fluxo insaturado, devido à ação das forças de capilaridade.
- Materiais grosseiros apresentam maior Ch em fluxo saturado, já que as forças de capilaridade não têm uma ação destacada, e os poros maiores facilitam a percolação do fluxo saturado. Por outro lado, materiais grosseiros podem funcionar como camadas de impedimento em fluxo insaturado.

Comparando-se materiais argilosos e arenosos, observa-se:

- **Material argiloso** P fluxo negligenciável para os canais durante as chuvas, mas duradouro devido à contínua liberação de água retida por capilaridade.
- **Material arenoso** P fluxo elevado, mas pouco duradouro. A elevada condutividade hidráulica permite a fácil percolação da água.

O fluxo subsuperficial acompanha o padrão das linhas equipotenciais (linhas de mesmo potencial hidráulico) e a variabilidade na condutividade hidráulica acompanha a direção e profundidade. A rede hidrológica subsuperficial é baseada no cruzamento entre linhas equipotenciais e linhas de fluxo. O fluxo flui das zonas de alto potencial hidráulico para as zonas de baixo potencial hidráulico, segundo a seguinte equação:

$$d = F \cdot dz$$

sendo **d**: diferença de energia potencial entre dois pontos, **F**: força aplicada (taxa de mudança de potencial com a distância) e **dz**: distância

A diferença de potencial gravitacional entre dois pontos é dada pela seguinte equação:

$$d : m.g.dz$$

sendo **m** : massa de água, **g**: gravidade e **dz**: distância

A força necessária para o transporte de uma massa de água é dada por:

$$F : m. g.$$

Os valores absolutos não são importantes em potenciais, importando a comparação e a diferença entre dois pontos, ou seja, o gradiente potencial. O fluxo da água entre pontos de mesmo potencial hidráulico (potencial hidráulico nulo) ocorre devido à variação de pressão, a qual também é importante para a movimentação da água.

Quando há convergência do fluxo em subsuperfície, há aceleração e, nos casos de divergência do fluxo, há desaceleração do mesmo. No caso de material superior menos permeável sobre material inferior mais permeável ocorre a deflexão do fluxo na interface entre ambos. Se a permeabilidade (K) é muito superior no material subjacente, o fluxo pode tornar-se horizontal.

No sistema encostas/canais, o fluxo depende da configuração morfológica do sistema. Em encostas com base de contorno convexo o fluxo é divergente, enquanto em encostas com base de contorno côncavo o fluxo é convergente.

d) Parâmetros característicos dos fluxos subsuperficiais e dos aquíferos

Armazenamento específico – volume de água que pode ser liberado por unidade de volume do aquífero.

- **Coeficiente de armazenamento** – volume de água que pode ser liberado por um prisma vertical do aquífero, cuja área e altura são iguais a uma unidade. É representado pela seguinte equação:

$$S : \hat{e}V / A . \hat{e}h$$

onde $\hat{e}V$ é o volume de água liberado pelo aquífero, **A** é a área e $\hat{e}h$ é a carga hidráulica

- **Tempo de residência** – quociente entre o volume estocado e sua taxa de recarga ou perda anual (parâmetro importante para lagos).
- **Transmissividade** – volume de água transmitido (filtrado) através de uma porção vertical do terreno, de altura igual à porção saturada, por unidade de área e unidade de altura. Em termos horizontais é definida como o produto da condutividade hidráulica pela espessura do aquífero.
- **Homogeneidade e Isotropia** – homogeneidade é a qualidade de um aquífero de apresentar as mesmas propriedades hidráulicas em todos os pontos, enquanto isotropia refere-se à mesma permeabilidade em todos os pontos.
- **Taxa de renovação de aquíferos** – capacidade de um aquífero manter o volume de água ao longo do tempo.

As medições de fluxos subterrâneos são normalmente mais difíceis que as dos fluxos superficiais. A altura do nível d'água subterrâneo pode ser medido em piezômetros, que são poços nos quais são inseridos medidores graduados. Outras técnicas envolvem elementos-traço, análise de isótopos¹⁰ estáveis (trítio -3H, deutério - 2H, oxigênio 18 - 18 O), análise das trocas hídricas entre lagoas e aquíferos, determinação dos volumes de recarga, etc. Para mais informações consultar os livros de hidrometria.

Uma das tendências de gestão de aquíferos é a recarga artificial de aquíferos (*aquifer storage recovery*) por meio de poços de injeção de águas pluviais, efluentes tratados, excedentes sazonais de rios, dentre outros. A água pode ser bombeada, quando necessário, para a produção de água não potável. A percolação da água no aquífero permite a sua depuração, já que possíveis poluentes vão sendo retidos pela matéria mineral e orgânica.

Os poços podem ser usados como poços de produção de água em períodos de escassez hídrica. Em Nova York (EUA), cerca de 200.000 m³/dia de águas pluviais são injetados em cerca de 1.000 poços para o abastecimento de 2.500.000 habitantes. Em Phoenix (EUA), onde as precipitações atingem apenas 200 mm/ano, cerca de 1,8 milhão de m³/ano de águas pluviais são utilizadas para recarga de aquíferos, permitindo a economia de cerca de 40 % do custo de uma unidade de tratamento convencional de água superficial (REBOUÇAS, 2004).

4.4. Exploração de Águas Subterrâneas no Brasil

O primeiro poço perfurado e registrado no Brasil ocorreu no estado do Ceará em 1888, visando atenuar o flagelo da seca, sendo seguido por poços em São Paulo e Rio Grande do Sul para a produção de cerveja e uísque. Até 1930 o uso era quase exclusivamente para consumo humano familiar, sendo que após a II Guerra Mundial o consumo industrial acelerou-se. Nos anos 1970, com a criação do Plano Nacional de Abastecimento, as águas subterrâneas passaram a ter maior participação no abastecimento público, principalmente em localidades de pequeno e médio porte (500 a 10.000 hab.).

A Constituição brasileira de 1988 determina que as águas subterrâneas são de dominialidade dos Estados e do Distrito Federal, fazendo uma distinção clara entre as águas subterrâneas e recursos minerais do subsolo, que são de competência da União. A legislação também deixa claro que deve haver diferença entre a água subterrânea para consumo e água subterrânea para aproveitamento mineral (água mineral, água potável de mesa, águas termais).

A Constituição também determina, no artigo 26, inciso I, que “incluem-se entre os bens dos estados: as águas superficiais ou subterrâneas, fluentes, emergentes e em depósito, ressalvadas, neste caso, na forma da lei, as decorrentes de obras da união”. No artigo 176 está posto que “as jazidas, em lavra ou não, e demais recursos minerais e os potenciais de energia hidráulica constituem propriedade distinta da do solo, para efeito

¹⁰ Átomo caracterizado por um número de massa e um número atômico determinado, e que tem vida média suficientemente longa para permitir a sua identificação com um elemento químico.

de exploração ou aproveitamento, e pertencem à união, garantida ao concessionário a propriedade do produto da lavra”.

A Lei n. 9.433/97 incorporou a dominialidade das águas subterrâneas entendida pela Constituição de 1988, e reconhece que as captações de águas subterrâneas são obras de engenharia que necessitam de autorização (outorga).

A Resolução n. 15 de 2001, do Conselho Nacional de Recursos Hídricos, reconhece a interação entre água superficial e subterrânea e a indissociabilidade da sua gestão. Também reconhece que os limites de um aquífero não necessariamente coincidem com os de bacias hidrográficas e estados. Este aspecto é importante, pois, apesar da Constituição determinar que as águas subterrâneas são de domínio dos estados, um aquífero pode ter os seus limites abrangendo vários estados, exigindo, portanto, uma gestão conjunta de caráter interestadual e federal. A mesma resolução dispõe sobre as diretrizes a serem observadas na aplicação de instrumentos de gestão no gerenciamento das águas subterrâneas.

Apesar das águas subterrâneas não serem objeto de tantos instrumentos legais de gestão como são as águas superficiais, a situação vem melhorando no Brasil. Como exemplo, a Resolução Conama n. 396, de 03/04/2008, dispõe sobre a classificação e diretrizes ambientais para o enquadramento das águas subterrâneas, vindo complementar o enquadramento das águas superficiais.

Há autores que pensam que, como as águas subterrâneas influenciam e são influenciadas pelo escoamento superficial, e a exploração de uma afeta restringe a exploração do outro, não há razão para se elaborar uma lei de águas subterrâneas, como se estas formassem um compartimento estanque que nada tivesse a ver com o ciclo hidrológico e com os cursos d’água superficiais. Para eles, o que deve haver é uma lei de águas ou de recursos hídricos, onde o domínio de uma é o domínio de outra.

4.5. Águas Minerais

Águas minerais “são aquelas provenientes de fontes naturais ou artificialmente captadas, que possuem composição química ou propriedades físicas ou físico-químicas distintas das águas comuns, com características que lhes confirmam uma ação medicamentosa”¹¹.

Outras definições internacionais incluem:

- São águas com 1000 mg\l de substâncias dissolvidas (EUA).
- São águas com resíduo seco maior que 1 g\l (Espanha).
- São águas naturais dotadas de propriedades terapêuticas particulares (França).
- São águas com 1 g\l de sais dissolvidos (Inglaterra e Suíça).

11 Código de Águas Minerais – Decreto Lei n. 7.841d, de 08/08/1945.

Em condições específicas de pressão e temperatura, as águas minerais adquirem características de unidades geológicas peculiares, podendo tornar-se gasosas em função dos gases emanados por magmas profundos. Nesse sentido, as águas minerais são classificadas quanto ao seu conteúdo em gases e quanto à temperatura¹²:

Quanto aos gases

a) Fontes radioativas:

- **fracamente radioativas** – as que apresentam, no mínimo, uma vazão gasosa de 1 litro por minuto, com um teor em radônio compreendido entre 5 e 10 unidades Mache por litro de gás espontâneo, a 20°C e 760mm de Hg de pressão;
- **radioativas** – as que apresentam, no mínimo, uma vazão gasosa de 1 litro por minuto, com um teor compreendido entre 10 e 50 unidades Mache, por litro de gás espontâneo, a 20°C e 760mm de Hg de pressão;
- **fortemente radioativas** – as que apresentam, no mínimo, uma vazão gasosa de 1 litro por minuto, com teor em radônio superior a 50 unidades Mache, por litro de gás espontâneo, a 20°C e 760mm de Hg de pressão.

b) Fontes Toriativas – as que apresentam, no mínimo, uma vazão gasosa de 1 litro por minuto, com um teor em torônio, na fonte, equivalente, em unidades eletrostáticas, a 2 unidades Mache por litro.

c) Fontes Sulfurosas – as que possuïrem, na fonte, desprendimento definido de gás sulfídrico.

Quanto à temperatura:

- a) **Fontes frias** – quando sua temperatura for inferior a 25°C.
- b) **Fontes hipotermiais** – quando sua temperatura estiver compreendida entre 25 e 33°C.
- c) **Fontes mesotermiais** – quando sua temperatura estiver compreendida entre 33 e 36°C.
- d) **Fontes isotermiais** – quando sua temperatura estiver compreendida entre 36 e 38°C.

No Brasil, a aplicação do Código de Águas e do Código de Mineração é de competência do Departamento Nacional de Produção Mineral – DNPM. A qualidade das águas minerais engarrafadas é fiscalizada pela Agência Nacional de Vigilância Sanitária – ANVISA e pelas Secretarias de Saúde dos Estados.

12 Código de Águas Minerais, de 1945.

Já os danos ao meio ambiente causados pela exploração das águas minerais são de competência dos órgãos ambientais. A fiscalização da qualidade da água mineral na fonte, a classificação das águas e sua comercialização, e a instalação ou funcionamento de estâncias hidrominerais obedecem ao disposto na Lei n. 7.841, de 1945, referente ao Código de Águas Minerais. A pesquisa e a lavra das águas minerais, termais, gasosas, de mesa ou destinadas a fins balneários são reguladas pela Lei n. 227, de 1967, referente ao Código de Mineração.



5.1. Funções e Utilização da Água

As águas apresentam diversificadas funções, ou seja, potenciais ou capacidades conferidas pelas suas propriedades, por suas características físico-químicas, pela distribuição no espaço e pelo potencial energético.

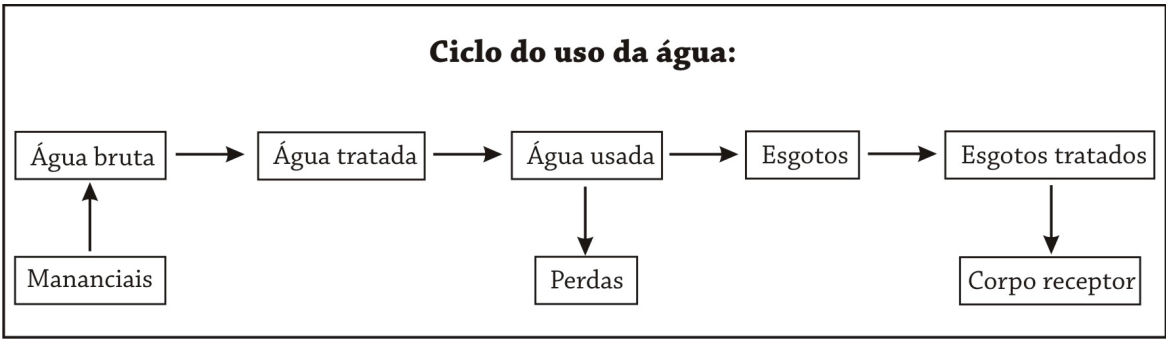
Dentre as funções da água, destacam-se:

- **Biológica:** a água é constituinte da matéria viva.
- **Ecológica:** a água é formadora de biótopos aquáticos.
- **Hidráulica:** função hidrostática (água como suporte) e hidrodinâmica (água como vetor de transporte e transmissão).
- **Térmica:** a água apresenta a função de condução de calor (aquecimento ou resfriamento).
- **Química:** a água possibilita reações químicas de várias substâncias.
- **Simbólica:** significado da água no contexto sócio-cultural; a percepção do papel da água como agente vivo e sua importância para o homem, que lhe confere aspectos morais, estéticos e idiológicos (símbolos de fecundidade, beleza, pureza); a importância da definição de valor da água.

A água também pode ser apropriada para diversos usos. O uso da água é o ato de aplicar suas funções para se obter um efeito. Esta aplicação, por meio do uso, modifica as características da água, degradando ou destruindo o potencial correspondente, ou seja, o uso diminui ou aniquila o potencial da função. No uso da água há restituição do meio, enquanto seu consumo não envolve a restituição.

O consumo da água refere-se à diferença entre o total utilizado e o total restituído ao meio, ou seja, é a parte da água que não retorna ao local que foi retirada. A Figura 5.1. ilustra o ciclo do uso da água.

FIGURA 5.1.
Ciclo do Uso da Água



Elaboração: Antônio Magalhães Jr. e Joyce Bonna

Os usos da água podem ser consuntivos e não consuntivos. Os usos consuntivos: são aqueles que diminuem a vazão do rio no ponto de aproveitamento, havendo perdas entre o que é derivado e o que retorna ao curso natural.

Dentre os usos consuntivos destacam-se a irrigação e os usos domésticos e industriais. No Brasil, 46% das vazões captadas são destinadas à irrigação, enquanto 26% destinam-se ao abastecimento urbano (usos domésticos), 18% à indústria, 7% à dessedentação e à criação animal e 3% ao abastecimento rural (ANA, 2005). Já em relação à quantidade de água efetivamente consumida nos diversos usos (água que não volta aos cursos d'água), os valores são: irrigação (69 %), abastecimento urbano (11 %), dessedentação e criação (11 %), indústria (7 %) e abastecimento rural (2 %). Estes números mostram que a irrigação responde por uma quantidade desproporcional de água efetivamente consumida no país. De um total retirado para irrigação de 717,1 m3/s, são consumidos 589,5 m3/s (ANA, 2005). Isto se explica pelo fato de quase toda a água irrigada infiltrar-se ou evaporar-se.

Os usos da água para abastecimento doméstico ocorrem para dessedentação humana, higiene e demais necessidades residenciais. O consumo doméstico médio é extremamente variável em função do tipo de clima, do país e das condições socioeconômicas da população. É aceitável que, para uma família de cinco pessoas, há necessidade de pelo menos 500 l/dia de água (ONU, 2006). Por outro lado, a Agenda 21 (Rio 92) propõe um fornecimento de 40 litros de água tratada/dia por habitante.

As Tabelas 5.1. a 5.3. ilustram os valores de referência para o consumo médio de água das aglomerações urbanas e as necessidades domésticas de água.

Tabela 5.1. Parâmetros de Referência para Consumo Médio de Água		
<i>Dimensão</i>	<i>População (hab.)</i>	<i>l/hab/dia</i>
<i>Povoado rural</i>	< 5.000	90 – 140
<i>Vila</i>	5.000 – 10.000	100 – 160
<i>Pequena localidade</i>	10.000 – 50.000	110 – 180
<i>Cidade média</i>	50.000 – 250.000	120 – 220
<i>Cidade grande</i>	> 250.000	150 – 300

Fonte: Von Sperling (1996), adaptado de várias publicações.

Tabela 5.2. Retiradas Médias por Habitante e por Faixa Populacional		
	<i>Retirada l/hab/dia</i>	
<i>Faixa Populacional</i>	Máximo	Mínimo
< 10.000	120	320
10.000 a 100.000	150	340
100 a 500.000	180	360
> 500.000	200	380

Fonte: ANA, 2005

Tabela 5.3. Necessidades de Água para Usos Domésticos	
<i>ATIVIDADE DOMÉSTICA (por unidade)</i>	<i>NECESSIDADE HÍDRICA (litros)</i>
<i>Banho de ducha</i>	40 – 80
<i>Banho de banheira</i>	150 – 200
<i>Lavar louça</i>	5 – 15
<i>Máquina de lavar roupa</i>	80 – 120

Fonte: Armand, 1998, citado por Freitas, 1999.

No caso do abastecimento de água para fins industriais, a água pode ser usada nos diferentes processos produtivos: produção, refrigeração, fornecimento de vapor, solvente, diluente, transporte e remoção de dejetos, etc. No setor têxtil, a água é utilizada em todas as etapas do processo produtivo, principalmente na desengomagem e tinturaria. O setor de curtumes caracteriza-se, no Brasil, por indústrias tecnologicamente atrasadas, de alto consumo de água, variando de 30 a 100 l por Kg de pele tratada. O setor frigorífico consome grande quantidade de água, principalmente nas etapas de lavagem.

Na determinação da demanda animal, a ANA (2005) adota o parâmetro de unidade de equivalente animal, que corresponde ao total da pecuária em bovino equivalente, adotando-se o consumo igual a 50 l/dia, bem como o valor do coeficiente de consumo para aves – 0,4 l/ave/dia.

O uso da água na indústria vem sendo reduzido no Brasil em função dos seguintes fatores:

- Internalização das exigências ambientais para as indústrias.
- Aumento do custo da água nas regiões metropolitanas.
- Aumento dos custos de energia para captar, tratar e bombear água.
- Introdução de programas para reduzir custos e controlar os processos industriais, visando reduzir o consumo de energia.
- Implementação da cobrança pelo uso da água em certas bacias.

A Tabela 5.4. ilustra as vazões específicas médias necessárias para a produção de diversos alimentos e materiais.

Tabela 5.4. Exemplos de Vazões Específicas Médias Industriais			
<i>Ramo</i>	<i>Tipo</i>	<i>Unidade</i>	<i>m3/unidade</i>
<i>Alimentícia</i>	Frutas e legumes em conservas	1 ton	4 – 50
	Doces	1 ton	5 – 25
	Açúcar de cana	1 ton	0,5 – 10
	Matadouros	1 boi ou 2,5 porcos	0,3 – 0,4
	Laticínios (leite)	1000 l de leite	1 – 10
	Laticínios (queijo/manteiga)	1000 l de leite	2 – 10
	Margarina	1 ton	20
	Cervejaria	1000 l	5 – 20
	Padaria	1 ton	2 – 4
	Refrigerantes	1000 l	2 – 5

Têxtil	Algodão	1 ton	120 – 750
	Lã	1 ton	500 – 600
	Rayon	1 ton	25 – 60
	Nylon	1 ton	100 – 150
	Polyester	1 ton	60 – 130
	Lavanderia de lã	1 ton de lã	20 – 70
	Tinturaria	1 ton	20 - 60
Couros e curtumes	Curtume	1 ton de pele	20 – 40
	Sapato	1000 pares	5
Polpa e papel	Fabricação de polpa	1 ton	15 – 200
	Embranquecimento da polpa	1 ton	80 – 200
	Fabricação de papel	1 ton	30 – 250
	Polpa e papel integradas	1 ton	200 – 250
Química	Tinta	1 empregado	110 l/dia
	Vidro	1 ton	3 – 30
	Sabão	1 ton	25 – 200
	Ácido, base, sal	1 ton cloro	50
	Borracha	1 ton	100 – 150
	Borracha sintética	1 ton	500
	Refinaria de petróleo	1 barril (117 l)	0,2 – 0,4
	Detergente	1 ton	13
	Amônia	1 ton	100 – 130
	Dióxido de carbono	1 ton	60 – 90
	Gasolina	1 ton	7 – 30
	Lactose	1 ton	600 – 800
	Enxofre	1 ton	8 – 10
	Produtos farmacêuticos (vitaminas)	1 ton	10 – 30
Manufaturados	Mecânica fina, ótica e eletrônica	1 empregado	20 – 40 l/dia
	Cerâmica fina	1 empregado	40 l/dia
	Máquinas	1 empregado	40 l/dia

Metalurgia	Fundição	1 ton gusa	3 – 8
	Laminação	1 ton produto	8 – 50
	Forja	1 ton produto	80
	Deposição eletrolítica de metais	1 m³ de solução	1 – 25
	Chapas, ferro e aço	1 empregado	60 l/dia
	Ferro	1 m³ minério lavado	16
Mineração	Carvão	1 ton carvão	2 – 10

Fonte: Von Sperling (1996), baseando-se em diversas fontes.

A irrigação é considerada o uso que mais consome água em termos globais (cerca de 70 %) e que apresenta os maiores valores não retornados aos cursos d’água devido aos processos de evaporação e infiltração. No Brasil, 64% das vazões captadas são destinadas à irrigação (ANA, 2005). Grande parte da água captada se perde como resultado de sistemas ineficazes de irrigação. Estes sistemas também exigem um consumo de água bem superior a sistemas mais eficientes.

Como exemplo, a irrigação por aspersão, muito comum no Brasil, consome muito mais água do que o sistema de irrigação por gotejamento, muito usado em Israel. No processo de aspersão, a água é lançada para o alto antes de chegar às plantas, fazendo com que uma grande parte não caia diretamente nos vegetais e, sim, no solo. Além deste processo ineficaz de umidificação do solo, a aspersão motiva a evaporação de grande parte das moléculas de água, principalmente em áreas mais quentes e secas.

A Tabela 5.5. ilustra as demandas estimadas de diversos produtos agrícolas.

Tabela 5.5. Demandas Estimadas de Diversos Produtos Agrícolas	
PRODUTO	DEMANDA DE ÁGUA POR UNIDADE
PÃO	1000 litros/kg
ARROZ	1.910 l/kg 1
TRIGO	900 l/kg
MILHO	1.400 l/kg1
TOMATE	30 l/unidade
AÇÚCAR	75 m³/ton; 100 l/kg1
CONSERVAS	20 m³/ton
CARNE DE VACA	100.000 l/kg1
CARNE DE FRANGO	3.500 l/kg1

Fontes: Barth (1987), Embrapa (1994), Freitas (1999)

Os usos não consuntivos não envolvem perdas entre o que é derivado e o que retorna aos cursos d’água, sendo menos impactantes aos mananciais hídricos. Destacam-se, no Brasil, os usos não consuntivos de geração de energia elétrica e navegação.

O Brasil possui, no total, 2.200 empreendimentos para geração de energia em operação, gerando 107.011.352 kW de potência (ANEEL, 2009). Deste total, 165 empreendimentos são usinas hidrelétricas, respondendo por 75.639.099 kW de potência fiscalizada (70,68 % do total), e 1.322 empreendimentos são usinas termelétricas, respondendo por 25.551.817 kW de potência fiscalizada (23,88 %).

Em termos de navegação, o Brasil possui 26.000 km de vias navegáveis interiores, com potencial de aproveitamento de 17.000 novas vias. 14% do transporte de carga no Brasil são realizados por hidrovias. A Tabela 5.6. apresenta as principais hidrovias brasileiras.

Tabela 5.6. Principais Hidrovias Brasileiras	
HIDROVIA	EXTENSÃO (Km)
Amazonas	1.650
Solimões	480
Madeira	1.056
Tapajós-Teles Pires	345
Paraguai (de Corumbá à foz do Rio Apa)	610
Tocantins	1.152
Araguaia	1.230
Rio das Mortes (região do Tocantins)	580
Pindaré-Mearim (região hidrográfica do Atlântico NE Ocidental)	646
Parnaíba	1,175
Tietê-Paraná	1.168
São Francisco	573

Fonte: Rosa, 2005.

Outros usos não consuntivos da água englobam a pesca, a recreação e harmonia paisagística, o controle de poluição (papel da água na diluição, assimilação e transporte de esgotos e resíduos líquidos), a reprodução e conservação de vida animal e vegetal, os reservatórios de múltiplos usos, a flotabilidade, a barreira física e de proteção contra incêndios, dentre outros. A Tabela 5.7. sintetiza os usos da água e seu potencial consuntivo no Brasil.

Tabela 5.7. Usos da Água e Potencial Consuntivo no Brasil			
Tipo	Uso da água	Consumo de água	Efeitos
Com derivação de água	Abastecimento urbano (uso doméstico)	Baixo – em torno de 10%	Poluição orgânica e bacteriológica
	Abastecimento industrial	Baixo – abaixo de 10%	Poluição orgânica, substâncias tóxicas, elevação da temperatura
	Irrigação	Alto – cerca de 70%	Carreamento de agrotóxicos e fertilizantes
	Abastecimento doméstico e dessedentação de animais	Baixo – inferior a 10 %	Alterações de qualidade
	Aquicultura (peixes, etc)	Baixo – inferior a 10%	Carreamento de matéria orgânica
	Geração hidrelétrica	Baixo	Alteração no regime e qualidade da água
	Navegação fluvial	Baixo	Lançamento de óleos e combustíveis
Sem derivação de água	Recreação, lazer e harmonia paisagística	Não há	Poluição e lixo
	Pesca	Não há	Alterações na qualidade após mortandade de peixes
	Assimilação de esgotos	Não há	Poluição orgânica, física, química e bacteriológica
	Usos ecológicos	Não há	Melhoria da qualidade da água

Os usos da água podem representar um importante conjunto de pressões humanas sobre a disponibilidade hídrica. Os processos de gestão da água devem buscar equilibrar e compatibilizar as demandas com a disponibilidade de recursos hídricos. Os trabalhos da ANA (2005) e de Magalhães Jr (2007) indicam vários indicadores apropriados para o estudo das pressões sobre a disponibilidade hídrica, como por exemplo:

- Densidade populacional total, urbana, rural (hab/km²).
- Índice de vazão média *per capita* (m3/hab/ano).
- Índice de relação entre vazão média de retirada para usos consuntivos e vazão média disponível (%).

- Índice de relação entre a vazão de retirada para usos consuntivos e disponibilidade hídrica¹
- Índice de relação entre a vazão de retirada de água subterrânea para os usos consuntivos (demanda potencial), a área de recarga do aquífero e a vazão explotável.
- Índice de áreas agrícolas irrigadas (% de área ocupada por cada tipo de uso).
- Índice de pressão da pecuária (nº reses/km²).
- Índice de captação de água por setor usuário (% dos estoques hídricos).
- Índice de consumo médio de água fornecida via rede geral (m3/hab. servido).
- Índice de captação de água para abastecimento público urbano e rural (m3/per capita).
- Índice de consumo dos estoques hídricos (%/ano).
- Índice de captação de água subterrânea por tipo de poço (m3/ano/hab.; m3/ano/km2; % do vol. médio anual de recarga dos aquíferos).
- Índice de captação de águas superficiais e subterrâneas (% dos estoques hídricos).
- Índice de captação de água para irrigação (m3/ha).
- Índice de área irrigada (% do total ou da área cultivada).
- Índice de perdas de água na irrigação (% do volume produzido ou m3/ha/ano).
- Índice de captação de água para uso industrial (m3/ano e % dos estoques hídricos).
- Índice de derivação de águas entre bacias (m3/ano e % dos estoques hídricos).

5.2. Qualidade da Água

5.2.1. Poluição e Contaminação

“A ninguém é lícito conspurcar ou contaminar as águas que não consome, com prejuízo de terceiros.” (Códigos das Águas, 1934)

A noção do objetivo de qualidade da água deve ser bem esclarecida. Há dois tipos de objetivos:

- **Objetivos ideais** – relacionam-se às exigências desejáveis e adequadas no estado atual dos conhecimentos (objetivos de referência). São objetivos voltados à busca e/ou à manutenção de um estado ideal do ambiente ou da água.

1 Em rios sem regularização, considera-se a vazão de estiagem, ou seja, a vazão com permanência de 95%; em rios com regularização, considera-se a vazão regularizada somada ao incremento de vazão com permanência de 95%.

- **Objetivos operacionais** – constituem os objetivos realistas passíveis de serem atendidos em um período dado, considerando o estado atual do meio. São objetivos voltados à busca e/ou à manutenção do estado possível, real, operacional. Estes objetivos são úteis quando sabemos que todo uso de um recurso conduz inevitavelmente a uma transformação do ambiente, ou seja, a um impacto. Desde que há seres humanos no planeta, devemos lidar com os impactos e minimizá-los dentro do possível, mas não é possível eliminá-los. Na prática, admitir o nível zero de poluição, por exemplo, seria proibir o uso e produção em vários casos. Os objetivos de qualidade devem abranger a qualidade ecológica da água (proteção dos ecossistemas) e a satisfação das necessidades dos usos da água.

Para a melhor compreensão dos aspectos relacionados à degradação da qualidade da água, é preciso considerar que os ambientes aquáticos naturais de água doce apresentam características peculiares:

- Alta capacidade de solubilização de compostos orgânicos e inorgânicos, possibilitando aos organismos autotróficos² a absorção de nutrientes.
- Gradientes verticais e horizontais, com distribuição desigual de luz, nutrientes, temperatura, oxigênio dissolvido e gás carbônico, trazendo consequências na distribuição dos organismos.
- Baixo teor de sais dissolvidos, fazendo com que os organismos se adaptem para que seja mantido o equilíbrio osmótico entre o meio e seus líquidos internos.
- Alta densidade e viscosidade fazendo com que os organismos sofram adaptações morfológicas e físicas para a redução da resistência do meio à sua locomoção.

a) Poluição e contaminação das águas

A palavra poluição deriva do latim *polluere* ou *pollutus*, que significa sujar. Entende-se por poluição a “degradação da qualidade ambiental resultante de atividades que direta ou indiretamente:

- prejudiquem a saúde, a segurança e o bem-estar da população;
- criem condições adversas às atividades sociais e econômicas;
- afetem desfavoravelmente a biota;
- afetem as condições estéticas ou sanitárias do meio ambiente; e
- lancem matérias ou energia em desacordo com os padrões ambientais estabelecidos”³.

2 Organismos capazes de sintetizar substâncias orgânicas com base em inorgânicas.

3 Lei n. 6.938/81, que criou a Política Nacional de Meio Ambiente.

A poluição pode ser pontual ou difusa. No primeiro caso, a poluição origina-se principalmente do lançamento de esgotos nas águas e em depósitos de resíduos sólidos. No caso da poluição difusa, a origem é principalmente de agroquímicos.

Deve-se salientar que, na natureza, não há água pura constituída apenas de oxigênio e hidrogênio. Há sempre mistura de gases, dióxido de C e N, sais e sólidos. A contaminação envolve a presença, na água, de organismos patogênicos, substâncias tóxicas e/ou radioativas em teores prejudiciais à saúde do homem. O foco aqui é a saúde.

Em todos os indicadores relativos a efluentes domésticos ou industriais, a contribuição de cada unidade poluidora, em uma unidade de tempo, é denominada de **unidade de carga**, a saber:

$$\text{carga (kg/tempo)} = c \cdot Qd \cdot Dt$$

sendo c (g/m³) = concentração do poluente na água, Qd = descarga hídrica, Dt = intervalo de tempo

A concentração de poluentes é igual a:

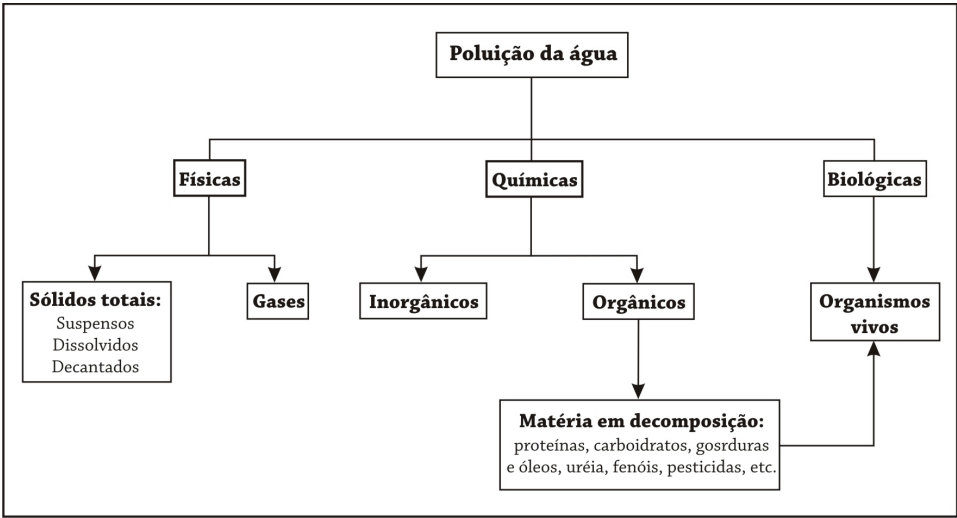
$$\text{carga (kg/d)} / \text{vazão (m}^3\text{/d)}$$

A carga poluidora pode ser medida em várias unidades (Von Sperling, 1996):

- Carga poluidora *per capita* (g/hab/dia)
- Concentração (g/m³/dia)
- Contribuição por unidade produzida (kg /unid produzida)
- Contribuição por unidade de área (kg/km²/dia)

A Figura 5.2. ilustra os tipos de substâncias poluidoras da água.

FIGURA 5.2.
Principais Substâncias Poluidoras da Água



Fonte: adaptado de Von Sperling (1996)
Elaboração: Antônio Magalhães Jr. e Joyce Bonna

Os estudos de poluição hídrica devem considerar a capacidade de resiliência e autodepuração dos corpos d'água. A resiliência é a capacidade de um meio de retornar ao estado natural de excelência, superando uma situação crítica e absorvendo os impactos. No caso da água, é a capacidade do meio aquático de voltar à sua condição de equilíbrio natural, após algum tipo de impacto negativo. Já a autodepuração é a capacidade de um corpo de água recuperar o seu estado de equilíbrio e suas qualidades ecológicas e sanitárias, após receber uma carga poluidora. A autodepuração envolve uma série de processos físicoquímicos e biológicos naturais, com os quais o corpo d'água elimina parte ou toda a poluição recebida.

b) O princípio da precaução: é melhor prevenir do que remediar

Tratando-se de poluição da água, é melhor prevenir do que remediar. O princípio da precaução está associado ao pensamento de que, se uma ação ou iniciativa não tem as suas conseqüências ambientais bem conhecidas e previstas, é melhor que não seja empreendida para evitar possíveis impactos e danos futuros. Atualmente, se gasta muito mais dinheiro no tratamento de água do que na prevenção.

Essas idéias são válidas para águas superficiais e subterrâneas, mas para as últimas a precaução deve ser ainda mais reforçada. Depois de poluído, recuperar um aquífero é praticamente inviável em função do alto custo. Quase não se consegue fazer com que um aquífero volte às suas condições anteriores, e os impactos permanecem por muitos anos. Enquanto a circulação do ar na atmosfera atinge a velocidade de km/hora e os rios fluem a velocidades de m/s, nos aquíferos subterrâneos a água flui a velocidades de cm\dia. Desse modo, a poluição nos aquíferos torna-se praticamente irreversível a médio e curto prazos.

A aplicação do princípio da precaução envolve, no caso da água, a redução das fontes de poluição, em lugar do constante combate aos seus impactos. Concomitantemente, deve-se buscar a reciclagem e o reuso dos recursos hídricos, evitando-se o aumento contínuo de sua exploração. O tratamento da água vem buscar despoluir as águas cujos procedimentos de gestão não puderam evitar a poluição.

O meio líquido apresenta duas características importantes que condicionam a qualidade da água: capacidade de dissolução e capacidade de transporte. A capacidade de dissolução determina a quantidade e a concentração de substâncias dissolvidas, enquanto a capacidade de transporte influencia a quantidade de substâncias carregadas pela água.

Rios e lagos que não sofreram influências significativas de atividades humanas e mantêm praticamente as mesmas características naturais são chamados **prístinos**.

A qualidade das águas é analisada segundo parâmetros físicos, químicos e bacteriológicos. Para os esgotos domésticos, os órgãos ambientais têm priorizado padrões de certos parâmetros como: pH, turbidez, DBO (Demanda Bioquímica de Oxigênio), OD (Oxigênio Dissolvido), sólidos dissolvidos, coliformes fecais, nitratos, fosfatos e amônia. O Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA –, por meio da

Resolução n. 357/05, determina as diretrizes da qualidade das águas dos rios no país, baseando-se na definição de limites de concentração de lançamentos de efluentes e de parâmetros de qualidade da água.

Um dos problemas verificados na legislação é que praticamente não há menção à relação entre concentração de efluentes e vazões de referência. A única menção é feita para a DBO, quando o CONAMA, na referida resolução, dispõe que “os limites das classes de água 2 ou 3 poderão ser aumentados caso seja verificado (...) que os teores mínimos de OD não serão ultrapassados caso ocorra a $Q_{7,10}$ ”, isto é, vazão mínima de sete dias consecutivos e dez anos de recorrência.

Alguns parâmetros possuem limites, em algumas classes, muito rigorosos para a realidade nacional, como é o caso do fósforo total (0,0025 mg/l nas classes de água 1 a 3). Alguns estudos demonstram que com as técnicas de tratamento de esgotos utilizadas atualmente não é possível atingir os limites exigidos. Von Sperling (1998) verificou que o limite de 0,025 mg/l para o fósforo, nas classes 1 a 3, é muito restritivo para países tropicais. O limite foi determinado para evitar a eutrofização das águas em países temperados.

No caso da potabilidade da água no Brasil, a Resolução n. 1469/01, do Ministério da Saúde, define as exigências de qualidade para que uma água possa ser considerada potável. Os parâmetros de qualidade da água podem ser medidos pelas seguintes unidades:

- mg/l: miligrama por litro – reflete a relação peso-volume, ou seja, o peso de certo elemento ou composto dissolvido num litro de solução.
- ppm: partes por milhão – reflete a relação peso a peso, correspondendo a 1 mg de soluto dissolvido em 1 kg da solução; para águas com até 10.000 mg/l de sólidos totais dissolvidos, esta unidade é equivalente ao mg/l.
- mol/L: molaridade – é a razão da quantidade de soluto em moles por volume da solução em litros; o número de moles é igual ao peso da substância dividido pelo peso molecular.
- meq/L: miliequivalente por litro ou peso equivalente – leva em consideração não somente a concentração do soluto iônico em peso, mas também a equivalência química; as somas dos equivalentes químicos dos cátions e ânions devem ser iguais para que a solução esteja equilibrada.

A sensibilidade das águas à poluição é inversamente proporcional às seguintes propriedades:

- **Diluição** – representa a relação entre o volume de descarga do poluente e o volume do corpo recipiente.
- **Difusão turbulenta** – representa a capacidade do corpo recipiente em misturar uma descarga poluente.

- **Dispersão** – é um fenômeno que ocorre em rios, resultante dos processos de convecção ou advecção, cujo resultado é um aumento da eficiência dos processos de mistura.
- **Autodepuração** – é um fenômeno relativo a rios e reservatórios, que representa a eficiência do corpo recipiente em transferir o oxigênio dissolvido da atmosfera para a água.

Vários índices de qualidade da água (IQA) já foram propostos no mundo, sendo o IQA da agência norteamericana *National Sanitation Foundation* – NSF – um dos mais conhecidos. O índice foi criado em 1970 e resulta da ponderação de nove parâmetros, selecionados por meio da aplicação de um painel de especialistas, nos EUA (**Técnica Delphi**):

- OD
- DBO_5
- coliformes fecais
- temperatura,
- pH
- nitrogênio total
- fosfato total
- sólidos totais e
- turbidez.

Em Minas Gerais, o governo mineiro, através do Instituto Mineiro de Gestão das Águas – IGAM – adota o IQA multiplicativo da NSF no monitoramento da qualidade das águas do estado. Mais informações sobre os IQA e suas técnicas de construção podem ser obtidas em Magalhães Jr (2007).

5.2.2. Parâmetros de Qualidade das Águas

A Tabela 5.8. mostra os principais constituintes físicos, químicos e biológicos das águas.

Tabela 5.8. Principais Constituintes das Águas				
Característica	Parâmetro	Sólidos em Suspensão	Sólidos Dissolvidos	Gases Dissolvidos
Físicos	Cor		X	
	Turbidez	X		
	Sabor e odor	X	X	X
Químicos	pH		X	X
	Alcalinidade		X	
	Acidez		X	
	Dureza		X	
	Fe e Mn	X	X	
	Cloretos		X	
	N	X	X	
	P	X	X	
	OD			X
	Matéria orgânica	X	X	
	Metais Pesados	X	X	
	Micropoluentes orgânicos		X	
Biológicos	Coliformes	X		
	Algas	X		
	Bactérias	X		

Fonte: Von Sperling (1996)

5.2.2.1. Parâmetros físico-químicos

• Cor

Unidade: uH – Unidade Hazen (padrão de platina-cobalto)

A cor é o resultado das substâncias dissolvidas. A cor natural resulta da decomposição de matérias orgânicas (ácidos húmicos e fúlvicos) e minerais, como o ferro e o manganês oxidados. A água avermelhada é rica em ferro oxidado, enquanto a água negra é rica em manganês e a água amarelada é rica em ácidos húmicos. O ferro no estado ferroso (Fe+2) forma compostos solúveis, principalmente hidróxidos. Em ambientes oxidantes o Fe+2

passa a Fe+3, originando o hidróxido férrico, que é insolúvel e se precipita, tingindo fortemente a água. Dessa forma, água com alto conteúdo de Fe, ao saírem do poço, são incolores, mas ao entrarem em contato com o oxigênio do ar fica amarelada, o que lhe confere uma aparência nada agradável.

A cor artificial resulta da poluição (resíduos domésticos, industriais, agrícolas, etc.). A medição é feita comparando-se a amostra com uma solução padrão de Pt-Co ou disco colorido, sendo ppm de Pt-Co a unidade mais usada.

• Turbidez

Unidade: uT – Unidade de Turbidez

A turbidez é considerada o inverso da transparência. Indica o nível de interferência ou atenuação que a luz sofre ao passar pela água, devido aos sólidos e colóides em suspensão (argila, matéria orgânica, etc.). O aumento da turbidez da água reduz a penetração da luz e, portanto, a produção primária dos ecossistemas aquáticos, ou seja, a fotossíntese (base do ciclo biológico aquático). Além de partículas removidas para os corpos d’água pela erosão, a turbidez também pode ser gerada por esgotos domésticos e fluentes industriais e agrícolas ou mesmo elevada concentração de microorganismos, como algas plantônicas. A medição da turbidez é realizada com turbidímetro, colorímetro ou espectrofotômetro.

• Transparência

A transparência é uma qualidade determinada pela cor e turbidez da água. É medida *in loco* através de um disco de porcelana que se mergulha na água (**Disco de Secchi**).

• Odor e Sabor

A interação entre odor e gosto (salgado, doce, etc.) origina o sabor. Ambos são determinados por sólidos em suspensão, sólidos dissolvidos e gases dissolvidos. A Tabela 5.9. apresenta os principais sais e gases que dão sabor à água. Por exemplo: águas com mais de 300 mg/l de Cl⁻ (cloretos) têm gosto salgado, enquanto águas com mais de 400 mg/l de SO₄⁻² (sulfatos) têm gosto salgado e amargo.

Tabela 5.9. Principais Sais e Gases que dão Sabor à Água		
Sais e Gases	Fórmula química	Sabor
Cloreto de sódio	ClNa	Salgado
Sulfato de sódio	SO ₄ Na ₂	Ligeiramente salgado
Bicarbonato de sódio	CO ₃ Hna	Ligeiramente salgado a doce
Carbonato de sódio	CO ₃ Na ₂	Amargo e salgado
Cloreto de cálcio	Cl ₂ Ca	Fortemente amargo
Sulfato de cálcio	SO ₄ Ca	Ligeiramente amargo
Sulfato de magnésio	SO ₄ Mg	Ligeiramente amargo em saturação
Cloreto de magnésio	Cl ₂ Mg	Amargo e doce
Gás carbônico	CO ₂ livre	Picante

Fonte: CPRM, 1997

Para medir o odor da água, dilui-se a água amostrada com água destilada até que nenhum odor seja perceptível. O resultado é expresso pelo número de maior diluição que ainda dá odor. O sabor é medido diluindo-se a água amostrada com água destilada e sendo experimentada até que nenhum sabor seja perceptível. O resultado é expresso em número de maior diluição que ainda dá um sabor.

• **Temperatura**

A elevação da temperatura reduz a solubilidade dos gases na água e aumenta a taxa das reações químicas e biológicas, pois eleva a atividade bacteriana consumidora de oxigênio. Também pode provocar a liberação de gases e outros constituintes. O fósforo, por exemplo, é liberado quando ocorre o processo de redução do ferro, passando de ferro férrico (Fe³⁺) para ferro ferroso (Fe²⁺). A temperatura é um dos principais fatores favoráveis à liberação do P.

A legislação ambiental brasileira incorpora a temperatura como padrão de qualidade da água. A Resolução CONAMA n. 357/05 determina, como padrão de emissão de

efluentes, a temperatura máxima de 40º C, tanto para lançamentos na rede pública de esgotos como para lançamentos diretos nas águas naturais.

• **Condutividade elétrica – CE**

É a medida da facilidade da água em conduzir a corrente elétrica, estando diretamente ligada ao teor de sais dissolvidos na forma de íons em solução. O substrato geológico influencia naturalmente na condutividade elétrica das águas que o drenam, uma vez que composições litológicas distintas fornecem diferentes quantidades de íons em solução. Fatores antrópicos também alteram esse parâmetro. Níveis de condutividade superiores a 100 µS/cm indicam, em geral, ambientes impactados (CETESB, 2005), que podem estar sendo poluídos por efluentes domésticos ou industriais, por águas pluviais urbanas ou agrícolas.

A CE também tende a aumentar com a temperatura. Para águas doces, a CE varia, normalmente, entre 100 a 2.000 mS/cm. A medição da CE é realizada com condutivímetro e as unidades são expressas em Mho.

• **pH**

É a medida da concentração hidrogeniônica da água ou solução (concentração de íons hidrogênio). Sua medição ocorre normalmente com peagâmetro portátil ou peagâmetro de bancada. Os valores variam de 1 a 14, sendo neutro com o valor 7. A mudança de uma unidade significa um aumento de dez vezes na concentração do íon hidrogênio.

O pH ideal para os seres vivos aquáticos é entre 6,5 e 7,5. Valores de pH inferiores a 7 significam um estado de acidez, quando predominam íons H⁺ na água. As soluções neutras possuem pH = 7. Na situação de soluções alcalinas (ou básicas), o pH é superior a 7, situação em que predominam os íons OH.

A acidez dos corpos d’água tem origem na dissolução de rochas, absorção de gases da atmosfera, oxidação da matéria orgânica e fotossíntese, além de esgotos e despejos domésticos e industriais (VON SPERLING, 1996). Pode levar à corrosividade e à agressividade das águas de abastecimento, redução da biota aquática e impedimento de alguns usos.

O aumento do pH intervém geralmente nas águas nos períodos de forte produção primária. Com pH elevado (> 9,5), a precipitação de PO₄⁻³ juntamente com os carbonatos é efetiva. Por isso, valores elevados podem levar a incrustações nos sistemas de abastecimento de água. Nos sedimentos, a elevação do pH diminui o poder de retenção do fósforo pelos hidróxidos de Fe e Al e favorece sua liberação.

• **Alcalinidade**

É a quantidade de íons na água necessários para neutralizar os íons hidrogênio (ácidos), sendo função direta da presença e/ou ausência de carbonatos (CO₃²⁻), bicarbonatos (HCO₃⁻) e hidróxidos (OH⁻). A alcalinidade é expressa em grau francês (ºF) ou em CaCO₃ (mg/l).

Valores de pH > 9,4 indicam presença de hidróxidos e carbonatos. Para valores de pH entre 8,3 e 9,4 ocorrem carbonatos e bicarbonatos. Em valores entre 4,4 e 8,3 há a tendência de apenas bicarbonatos (VON SPERLING, 1996).

O aumento da alcalinidade é utilizado para gerar processos de coagulação, redução da dureza e prevenção da corrosão em sistemas de abastecimento de água.

• **Acidez**

Os parâmetros acidez, alcalinidade e pH estão interrelacionados. A acidez é a capacidade da água em resistir às mudanças de pH geradas pelas bases. Esta capacidade está ligada principalmente à presença de CO₂ livre absorvido da atmosfera, resultante da decomposição de matéria orgânica ou de despejos e esgotos (pH entre 4,5 e 8,2).

Em situações de pH > 8,2 não há CO₂ livre; para pH entre 4,5 e 8,2 ocorre acidez carbônica e para pH < 4,5 há forte acidez (VON SPELING, 1996).

• **Sólidos em suspensão**

São cargas sólidas em suspensão depois de seca e pesada (mg/l). Pode ser separada por simples filtração.

• **Sólidos Totais Dissolvidos (STD)**

No que se referem à sua qualidade, as águas são classificadas principalmente quanto ao parâmetro de sólidos Totais Dissolvidos (STD), a saber:

- Águas doces: STD inferiores a 1.000 mg/l
- Águas salobras: STD entre 1.000 e 10.000 mg/l
- Águas salgadas: acima de 10.000 mg/l

Alguns estudos utilizam os teores de salinidade, mas as substâncias em solução não são necessariamente sais. A Resolução CONAMA n. 357/05 classifica as águas nacionais de acordo com a salinidade, a saber:

- Água doce: salinidade igual ou inferior a 0,5 % (500 ppm)
- Água salobra: entre 0,5 e 30 % (500 e 30.000 ppm)
- Água salina: acima de 30 %

Os teores acima de 1.000 ppm são geralmente expressos em mg/l.

Os STD representam o peso total dos constituintes minerais presentes na água, por unidade de volume, representando a concentração de todo o material dissolvido, seja ou não volátil. Nesse caso, os STD serão um pouco superior ao resíduo seco devido ao HCO₃ (bicarbonato), que, quando expostos a temperaturas superiores a 100°C, se decompõe em parte como CO₃⁻² e em parte como CO₂, se volatilizando e se evaporando. Os STD são aproximadamente iguais ao resíduo seco mais ½ de HCO₃

em mg/l: STD = RS + HCO₃/2.

As argilas têm elevado poder absorvente de vários poluentes como metais pesados e detergentes.

• **Dureza**

A dureza é a concentração de cátions multimetálicos em solução. É também concebida como o poder da água em neutralizar o sabão pelo efeito de cátions, como o cálcio, magnésio, Fe, Mn, Cu, Ba, etc (CPRM, 1997). Os cátions divalentes Ca²⁺ e Mg²⁺ são os principais elementos associados à dureza. Quando ocorre supersaturação, estes cátions reagem com certos ânions na água, formando precipitados químicos. As águas duras, portanto, são incrustantes.

Os valores de dureza podem ser expressos em mg/l de CaCO₃ (Tabelas 5.10. e 5.11.) ou em graus:

- 1º grau francês (ºF): 10 mg/l de CaCO₃
- 1º grau americano: 17,16 mg/l
- 1º grau russo: 2,50 mg/l
- 1º grau alemão: 17,86 mg/l

Tabela 5.10. Dureza Total em CaCO3 segundo Custódio e Llamas (1983)	
Tipo	Concentração de CaCO ³ (mg/L)
Branda	0 a 50
Pouco dura	50 a 100
Dura	100 a 200
Muito dura	> 200 até a saturação

Fonte: Custódio e Llamas (1983).

Tabela 5.11. Dureza Total em CaCO3 segundo Von Sperling (1996)	
Tipo	Concentração de CaCO ³ (mg/L)
Mole	< 50
Moderada	50 a 150
Dura	50 a 300

Muito dura	> 300
------------	-------

Fonte: Von Sperling (1996).

• **Resíduo seco a 110°C (mg/l)**

Resíduo seco é o peso dos sais resultantes da evaporação de um litro d’água, após filtragem para remoção de materiais em suspensão. A soma de todos os cátions, ânions e coloides e subtraídos de metade do bicarbonato deve ser, aproximadamente, igual ao resíduo seco, ou seja, o somatório de cátions + somatório de ânions + somatório de colóides = ½ HCO₃ = RS.

A Tabela 5.12. expressa a classificação das águas quanto ao resíduo seco.

Tabela 5.12. Classificação das Águas quanto ao Resíduo Seco	
Tipos de água	RS (mg/l)
Doce	0-2000
Salobra	2000=5000
Salgada	5000-40000
Salmoura	> 40000 até a saturação

Fonte: Custódio e Llamas (1983).

A Resolução CONAMA n. 357/05 classifica as águas brasileiras em águas doces (salinidade < 0,5 %), salobras (salinidade entre 0,5 e 30 %) e salinas (salinidade > 30 %). A classificação resulta em nove classes, segundo seus usos preponderantes.

• **Oxigênio Dissolvido (OD)**

Indica a redução das substâncias orgânicas e a intensidade de autodepuração. Sua medição é realizada com oxímetro, mas o seu cálculo também pode ser realizado por técnicas de titulação. O oxigênio possui baixa solubilidade na água em relação ao ar e em condições normais de pressão e temperatura (9 e 270 mg/l, respectivamente). As águas subterrâneas apresentam geralmente OD em quantidades inferiores às das águas superficiais (em média 1 a 5 mg/l), fato devido ao contato restrito com o ar e à baixa concentração de seres vivos (FREITAS, 1997).

Dependendo de sua concentração, os metais pesados podem comprometer a presença de microorganismos que decompõem a matéria orgânica nas águas. Nesse caso, elevadas concentrações de OD não significariam, necessariamente, uma água de qualidade adequada, já que o OD estaria em concentrações elevadas justamente em função da redução dos organismos decompositores.

No mesmo sentido, uma água eutrofizada pode apresentar elevadas concentrações de OD devido à fotossíntese de algas. A fotossíntese libera oxigênio e consome gás carbônico, mas à noite ela logicamente não ocorre. Por isto, com o tempo, o OD tende a diminuir em razão do consumo de oxigênio pelas algas à noite e à perda do oxigênio das camadas superiores para a atmosfera. Pois o OD tende a ficar concentrado próximo à superfície devido à dificuldade de penetração da luz em maiores profundidades, por causa da turbidez gerada pelas algas.

• **Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO)**

A demanda bioquímica de oxigênio (em mg\l) é relativa à demanda em uma unidade de tempo. É usado para medir a quantidade de oxigênio necessária para estabilizar (oxidar) a matéria orgânica carbonácea contida na água, mediante processos bioquímicos aeróbicos. Quanto mais abundante o carbono orgânico biodegradável, maior a presença de bactéria decompositora e maior o consumo de oxigênio na respiração. Conseqüentemente, maior será a DBO.

Os processos de oxidação da matéria orgânica na água ocorrem por respiração dos microorganismos (as bactérias convertem a matéria orgânica a compostos inertes como água e CO₂), por demanda bentônica e por nitrificação⁴, consumindo O na água. Já os processos de produção de O na água podem ocorrer por fotossíntese (considerada menos significativo)⁵ e/ou reação atmosférica, este último dependendo do déficit de oxigênio da água, das dimensões do corpo hídrico, do seu grau de turbulência, da sua temperatura e da natureza dos poluentes.

A estabilização completa do carbono orgânico leva, em média, 20 dias no caso dos esgotos domésticos; esta é a Demanda Última de Oxigênio (DBOu). A oxidação bioquímica é um processo lento e teoricamente se completa em um tempo infinito. Usualmente, permite-se que a reação se prolongue por cinco dias antes da determinação do oxigênio residual. Portanto, para efeitos práticos, o tempo de referência mais usual é de cinco dias: DBO₅. A relação entre a DBO₅ e a DBO_u é a DBO padrão, ou seja, DBO₅²⁰, para esgotos domésticos⁶.

ADBO₅ média para águas superficial, não poluída é de cerca de ~0,7 mgO₂/L, consideravelmente menor que a concentração de saturação de oxigênio em água (~8,3 mgO₂/L), ao contrário dos valores para efluentes que podem chegar a várias centenas de mgO₂/L.

As reações bioquímicas envolvidas no cálculo da DBO baseiam-se em alterações das cadeias de moléculas orgânicas, que se transformam em simples e estáveis elementos, como dióxido de carbono, fosfatos e nitratos. Geralmente, estas reações envolvem os seguintes processos: 1. os carboidratos são decompostos em dióxido de carbono e água; e 2. as proteínas são decompostas em aminoácidos, que, por sua vez, decompõem-se em NH₄ (amônia), NO₂ (nitritos), NO₃ (nitratos), sulfatos e fosfatos.

4 Nitrificação é a transformação biológica de compostos nitrogenados de um estado reduzido para outro mais oxidado.
5 Fotossíntese = CO2 + H2O + energia luminosa = matéria orgânica + O2.
6 Diversos autores adotam o valor de referência de 1,46 para a relação DBOu/ DBO5 (1,46 x DBO5 = DBOu).

A matéria orgânica biodegradável presente nos esgotos, composta principalmente de proteínas (40 a 60%), carboidratos (25 a 50%) e gorduras (10%), é mensurada normalmente em termos de DBO, que mede o oxigênio dissolvido usado por microorganismos na oxidação bioquímica da mesma.

O limite, geralmente aceito, para água de consumo humano é de 3 mgO₂/L. Em esgotos domésticos brutos, a concentração média é de 300 – 350 mgO₂/L.

A DBO é medida da seguinte forma: uma amostra de água é armazenada com uma quantidade de OD fixa, durante cinco dias, a 20°C; após 5 dias, mede-se a redução da taxa de oxigênio e a diferença é a DBO₅. Para esgotos domésticos, cerca de 70 a 80 % da DBO é obtida em cinco dias⁷. O valor médio para esgotos domésticos é de 300 mg/l de DBO, ou seja, 1 l de esgoto consome cerca de 300 mg de O em cinco dias.

• **Demanda Química de Oxigênio (DQO)**

A DQO é compreendida como a quantidade de oxigênio necessária à oxidação química da matéria orgânica, por meio de um oxidante químico forte (dicromato de potássio), em meio ácido. É um parâmetro indicado para medir o teor de matéria orgânica oxidável e de substâncias capazes de consumir oxigênio: Fe⁺², Mg⁺², NH₄⁺, dentre outros.

Em relação à DBO, tem a vantagem de poder ser medida de duas a três horas. Quanto maior a relação DQO/DBO, maior a fração inerte na amostra. Esta relação varia, em média, entre 1,7 a 2,4 nos esgotos domésticos (VON SPERLING 1996). A DQO mede, portanto, tanto a parte biodegradável do efluente, quanto a parte inerte.

Águas subterrâneas não contaminadas com matéria orgânica apresentam valores médios entre 1 e 5 mg/l, chegando no máximo a 15 mg/l.

• **Carbono Orgânico Total (COT)**

O carbono orgânico total COT é usado para caracterizar a matéria orgânica dissolvida e em suspensão em água. Ao contrário da DBO e DQO, o COT é independente do estado de oxidação da matéria orgânica e não sofre a interferência de outros átomos ligados à estrutura orgânica, tais como o nitrogênio, hidrogênio e espécies inorgânicas como Fe (II), Mn (II), sulfeto e cloreto. O COT é um parâmetro complementar à DBO, mas que não o substitui.

O COT é medido diretamente, ao contrário da DBO e da DQO, e se mostra adequado para amostras com pequenas quantidades de carbono orgânico. As formas inorgânicas do carbono devem ser previamente removidas ou deduzidas nos cálculos, como o CO₂, por exemplo.

O valor habitual de COT para águas subterrâneas (não contaminadas!) é de aproximadamente 1 mgC/L, enquanto que para águas superficiais é em média de 5

⁷ Se o O da amostra for consumido totalmente antes de cinco dias, tornam-se necessárias diluições para a redução da concentração da matéria orgânica. Dessa forma, o consumo do O em cinco dias nunca deve ser inferior à quantidade total de O presente na amostra.

mgC/L. Pântanos e lamaçais podem atingir valores da ordem de 50 mgC/L de carbono. Nos casos de esgoto não tratado, os valores podem atingir centenas de mgC/L.

5.2.2.2. Parâmetros biológicos

• **Coliformes termotolerantes**

Segundo a ONU (2002), doenças derivadas de contaminação fecal de águas têm sido apontadas como sendo responsáveis por cerca de 80 % das mortes em países em desenvolvimento. Em termos de saúde pública, o grupo de bactérias coliformes, especialmente os **coliformes termotolerantes**, são os parâmetros mais utilizados no mundo para estudos de contaminação das águas. As bactérias do grupo coliforme vivem, geralmente, no sistema intestinal dos animais de sangue quente. São, portanto, indicadores de contaminação da água por matéria fecal e são termotolerantes porque capazes de fermentar a lactose em temperaturas de -44,5 +- 0,2° C em um período de 24 horas. O gênero *Escherichia* é o mais comum e abundante, vindo, secundariamente, os gêneros *Citrobacter*, *Klebsiella* e *Enterobacter*.

A denominação **coliforme fecal**, muitas vezes usada, não é apropriada pelo fato de haver certos gêneros de coliformes termotolerantes que podem ser naturalmente encontrados nos solos, nas águas e nas plantas (gêneros *Llebsiella* e *Enterobacter*). Por outro lado, o termo **coliforme total** engloba uma ampla gama de bactérias aeróbias ou anaeróbias.

Os esgotos são as principais fontes de coliformes para as águas superficiais. A bactéria *Escherichia coli* (*E. coli*) é considerada o mais eficiente coliforme termotolerante como indicador de contaminação fecal das águas, podendo viver até 90 dias na água (LIBÂNIO, 2005). Os *Estreptococos fecais* tendem a ser utilizados como indicadores suplementares de poluição fecal humana e animal

Na realidade, a detecção laboratorial de agentes patogênicos em água torna-se complicada devido a suas baixas concentrações. Mesmo não causando doenças graves, os coliformes termotolerantes (também conhecidos como coliformes fecais) são bons indicadores de contaminação fecal e de potencial contaminação da água por outros agentes patogênicos.

A relação entre coliformes fecais (CF) e estreptococos fecais (EF) é um indicador de contaminação:

- CF/EF > 4 – Contaminação predominantemente humana
- CF/EF < 1 – Contaminação predominantemente de outros animais de sangue quente
- CF/EF > 1 e < 4 – Interpretação duvidosa

Calcula-se que metade do peso seco do lixo humano seja constituída de bactérias, principalmente coliformes fecais (IBAMA, 2002).

Segundo a Lei de Chick, a taxa de mortalidade bacteriana é diretamente proporcional à concentração de bactérias:

$DN/dt = - K_b N$

sendo **N** o nº de coliformes (NMP/100 ml), **K_b** o coeficiente de decaimento bacteriano (dia⁻¹) e **t** o tempo (dia)

O modelo de Chick exige, portanto, dados de coliformes fecais no corpo d’água, coliformes fecais no esgoto, coeficiente de decaimento bacteriano e tempo de percurso.

Von Sperling (1996) aponta algumas vantagens na utilização do grupo coliformes como indicadores de contaminação fecal:

- Presença abundante nas fezes humanas, aumentando a probabilidade de sua detecção.
- Presença apenas no sistema intestinal dos animais de sangue quente (encontrados também nas fezes de animais de sangue frio deixam de ser bons indicadores de poluição).
- Resistência dos coliformes ao ambiente é similar à maior parte das bactérias patogênicas intestinais; sua presença na água é, portanto, um bom indicador de riscos de presença de organismos patogênicos.
- Técnicas para a detecção dos coliformes são rápidas e econômicas.

As condições ambientais de desenvolvimento e as condições de incubação, natureza e idade do corpo hídrico podem influenciar a análise microbiológica e os resultados. Isso indica que deve haver uma padronização nos métodos de coleta e análise laboratorial. Os padrões são estabelecidos pela *International Organization of Standardization* (ISSO), *American Public Health Association* (APHA) e *Guidelines for Drinking-Water Quality* (WHO).

• **Outros bioindicadores**

Outros bioindicadores de destaque no monitoramento da qualidade das águas incluem: algas, cianobactérias (algas cianofcias ou algas azuis) e organismos bentônicos (organismos que vivem nos leitos dos corpos d’água). A Tabela 5.13. sintetiza os principais microorganismos de interesse na gestão das águas.

Tabela 5.13. Principais Microorganismos de Interesse na Gestão das Águas	
Microorganismo	Características
Bactérias	Organismos unicelulares, com várias formas e dimensões. São os principais responsáveis pela estabilização da matéria orgânica. Algumas bactérias são patogênicas. As cianobactérias (também conhecidas como algas azuis) são indicadores muito usados para detecção de processos de desoxigenação da água.

Algas	Organismos fotossintetizantes (utilizam a luz como fonte de energia), contendo clorofila. São importantes na produção de oxigênio na água. Em situações de proliferação excessiva podem levar à deterioração da qualidade da água e processos de desoxigenação, aumentando a turbidez e dificultando a penetração da luz solar nas maiores profundidades, comprometendo os processos de fotossíntese.
Bactérias	Organismos unicelulares, com várias formas e dimensões. São os principais responsáveis pela estabilização da matéria orgânica. Algumas bactérias são patogênicas.
Algas	Organismos fotossintetizantes (utilizam a luz como fonte de energia), contendo clorofila. São importantes na produção de oxigênio na água. Em situações de proliferação excessiva podem levar à deterioração da qualidade da água.
Fungos	Organismos aeróbios, não fotossintéticos, importantes na decomposição da matéria orgânica. São favorecidos por condições de baixo pH.
Protozoários	Organismos unicelulares principalmente aeróbios. Alimentam-se de bactérias, algas e outros microorganismos. São importantes nos processos de tratamento biológico para a manutenção do equilíbrio entre diferentes grupos. Alguns são patogênicos. As amebas são tipos de protozoários.
Vírus	Organismos parasitas que causam doenças.
Helmintos	Vermes intestinais cujos ovos podem causar doenças.

Fonte: Adaptado de Von Sperling (1996).

5.2.2.3. Principais constituintes iônicos das águas

• **Cátions**

Sódio (Na+)

O sódio possui solubilidade elevada, sendo o principal responsável pelo aumento da salinidade das águas naturais. Os minerais-fonte do sódio são: feldspatos plagioclásios, feldspatóides (nefelina e sodalina), anfibólios, piroxênios.

A concentração mais comum de sódio é entre 0,1 e 100 mg/l nas águas subterrâneas e entre 1 e 150 mg/l em águas doces , atingindo 11.100 mg/l nas águas do Oceano Atlântico, podendo chegar a 100.000 mg/l nas salmouras naturais. O padrão de aceitação para consumo humano, segundo a Portaria n. 518/2004 do Ministério da Saúde (OMS), éde 200 mg/l.

Concentrações elevadas de sódio e valores altos de razão de adsorção do sódio (SAR) são prejudiciais às plantas por reduzir a permeabilidade do solo, principalmente quando as concentrações de Ca e Mg são baixas. Também pode aumentar o potencial osmótico, desidratando as plantas.

O sódio pode indicar contaminação urbana e industrial.

Potássio (K⁺)

É raro ou ausente nas águas subterrâneas devido à sua intensa participação em trocas iônicas, além da facilidade de ser adsorvido pelas argilas e por sua grande utilização pelos vegetais. Os minerais-fonte são feldspatos potássicos, micas e leucitas.

As concentrações naturais de K são: águas meteóricas: 0,1 a 4 mg/l; águas subterrâneas: < 10 mg/l, sendo mais frequentes entre 1 e 5 mg/l; e Oceano Atlântico: 400 mg/l.

O potássio é importante para o desenvolvimento dos vegetais (funciona como fertilizante) e para a saúde humana, regulando os batimentos cardíacos, controlando os impulsos nervosos e as contrações musculares. Sua carência provoca fadiga, baixa de açúcar no sangue e insônia, e o seu excesso provoca câimbra, fadiga, paralisia muscular e diarreia.

O potássio pode indicar contaminação industrial, minerária e agrícola.

Cálcio (Ca⁺²)

É o elemento mais abundante da maioria das águas naturais. Os seus minerais-fonte são calcita, aragonita, dolomita, plagioclásio, apatita. Os sais de cálcio possuem moderada a elevada solubilidade, sendo comum precipitarem como carbonato de cálcio.

Suas concentrações naturais são: águas meteóricas: 0,1 a 10 mg/l; águas subterrâneas: 10 a 100 mg/l; Oceano Atlântico: 480 mg/l. O cálcio é importante no crescimento dos vegetais, na regulação do excesso de sódio e na saúde humana.

Magnésio (Mg⁺)

O Mn possui propriedades similares ao cálcio, porém é mais solúvel e mais difícil de precipitar. Quando em solução, tende a permanecer na água, resultando no seu enriquecimento nos oceanos. Os minerais-fonte são magnesita, biotita, granada, hornblenda, clorita, alanita, olivina.

Juntamente com o cálcio, o magnésio é responsável pela dureza da água, produzindo gosto salobro.

Suas concentrações são: águas meteóricas: 0,4 a 1,6 mg/l; águas subterrâneas: 1 a 40 mg/l; Oceano Atlântico: 1.410 mg/l (valor médio).

O Mn é importante na agricultura, sendo um dos principais componentes da clorofila, e na saúde humana, contribuindo para a conversão do açúcar em energia.

Ferro (Fe)

A forma solúvel do Fe (Fe²⁺) ocorre na ausência de OD. Quando a água entra em contato com o ar, o Fe²⁺ (ferro ferroso) sofre oxidação e se torna insolúvel (Fe³⁺), passando a ferro férrico. Esse mesmo comportamento é apresentado pelo Mn.

O Fe ocorre geralmente em baixas concentrações na água, geralmente abaixo de 0,3 mg/l. Os minerais-fonte são os minerais ferromagnesianos como piroxênios, olivinas,

biotita. O aumento anômalo de sua concentração indica contaminação por indústrias metalúrgicas ou de processamento de metais.

O Fe é importante para a saúde humana, como na formação da hemoglobina, que transporta o oxigênio dos pulmões para os tecidos. Sua carência pode levar à anemia, e seu excesso pode provocar problemas cardíacos e diabetes.

O padrão de aceitação para consumo humano, segundo a Portaria n. 518/2004 do Ministério da Saúde, é de, no máximo, 0,3 mg/L de ferro na água.

Alumínio (Al)

O Al está presente comumente nas rochas, mas não ocorre em grandes quantidades nas águas devido à sua liberação somente em condições específicas de pH.

Estudos sugerem uma influência do alumínio em doenças neurodegenerativas, como Mal de Parkinson e Mal de Alzheimer. Deficiências nutricionais crônicas de cálcio e magnésio possivelmente aumentam a absorção do Al, resultando em sua deposição nos neurônios, o que interfere na estrutura destas células e nas funções cerebrais. Lesões cerebrais características do Mal de Alzheimer podem estar associadas a concentrações acima de 0,01 mg/litro de Al na água.

Segundo a Portaria n. 518/2004 do Ministério da Saúde (OMS), as águas de consumo humano não podem ter mais de 0,2 mg/L de Al.

• **Ânions**

Cloretos (Cl⁻)

Os cloretos originam-se do processo de lixiviação de sais, como no caso do cloreto de sódio, de águas de irrigação ou de despejos e esgotos domésticos e industriais. Estão presentes em todas as águas naturais, com concentrações entre 10 e 250 mg/l nas águas doces. Os valores atingem geralmente < 100 mg/l nas águas subterrâneas e 18.000 a 21.000 mg/l nas águas dos mares, chegando até 220.000 mg/l nas salmouras naturais. Não são prejudiciais ao homem em concentrações até 1.000 ppm.

O padrão de aceitação para consumo humano, segundo a Portaria n. 518/2004 do Ministério da Saúde, é de, no máximo, 250 mg/L de cloretos na água.

Os clorestos são muito solúveis e muito estáveis em solução, precipitando-se dificilmente. Não oxidam nem se reduzem em águas naturais.

Os cloretos são bons indicadores de poluição por esgotos, aterros sanitários e lixões. Altas concentrações inibem o crescimento vegetal e conferem corrosividade à água.

Sulfatos (SO₄⁻²)

São sais moderadamente solúveis a muito solúveis, exceto os sulfatos de estrôncio e de bário. Originam-se da oxidação do enxofre e da lixiviação de compostos sulfatados

(gipsita e anidrita). Ocorrem comumente devido ao lançamento de esgotos domésticos e efluentes industriais.

As concentrações mais comuns de sulfatos são: águas subterrâneas: < 100 mg/l; Oceano Atlântico: 2810 mg/l (média); águas salinas, que pode chegar a até 7200 mg/l.

Os sulfatos aumentam a salinidade dos solos. Em termos de saúde humana, seu excesso (> 400 mg/l) pode causar efeitos laxativos e na presença de íons de Mg e Na pode causar distúrbios gastrointestinais. Também são fatais se consumidos puros, por crianças, em quantidades acima de 7,8g.

Os sulfatos podem indicar contaminação de origem urbana, industrial e agrícola. O padrão de aceitação para consumo humano, segundo a Portaria n. 518/2004 do Ministério da Saúde é de, no máximo, 250 mg/L de cloretos na água.

Bicarbonato (HCO₃⁻)

O bicarbonato não se oxida nem se reduz em águas naturais, mas pode facilmente precipitar-se como carbonato de cálcio. Suas concentrações ficam entre 50 a 350 mg/l em águas doces, podendo chegar a até 800 mg/l; e 100 mg/l nas águas dos mares.

Carbonato (CO₃⁻²)

A concentração relativa dos carbonatos é função do pH. Em águas naturais doces, sua concentração é muito baixa em relação aos bicarbonatos, somente excedendo a concentração destes últimos quando o pH for igual ou superior a 10. O carbonato de sódio é indesejável em águas para irrigação, sendo tóxico para os vegetais.

Nitratos, Nitritos, Amônia (NO₃⁻)

O nitrogênio ocorre em diversas formas nas águas (diferentes estágios de oxidação): nitrogênio molecular (N₂), que escapa para a atmosfera; N orgânico (dissolvido e em suspensão); amônia (NH₄⁺); nitrito (NO₂⁻) e nitrato (NO₃⁻).

Os nitritos e nitratos são as formas oxidadas, enquanto a amônia e o nitrogênio orgânico são as formas reduzidas. O predomínio de formas reduzidas de nitrogênio na água indica focos de poluição próximos ao ponto de amostragem, ao passo que o predomínio de formas oxidadas indica uma maior distância do foco poluidor. Portanto, a citada sequência indica a idade relativa da poluição (os nitratos indicam poluição mais antiga, pois representam o estágio final de oxidação da matéria orgânica). A oxidação de amônia para nitritos e a oxidação de nitritos para nitratos (nitrificação) ocorre na presença de bactérias e implica no consumo do oxigênio dissolvido. No processo de denitrificação, ocorre a sequência inversa (oxidação de amônia em nitritos, de nitritos em nitratos e de nitratos em N gasoso).

A presença de íons nitrogenados nas águas é influenciada, principalmente, pela poluição por efluentes sanitários, que adicionam às águas nitrogênio orgânico, presente nas proteínas e nitrogênio amoniacal, devido à hidrólise sofrida pela uréia na água. O

escoamento pluvial superficial em áreas urbanas e rurais também pode carrear íons nitrogenados aos canais fluviais.

Os esgotos domésticos, sem tratamento, apresentam predomínio do N orgânico e da amônia, os quais são medidos em laboratório pelo Método Kjeldahl, formando o N Total Kjeldahl (NTK):

NTK = amônia + N orgânico ; NT = NTK + NO₂⁻ + NO₃⁻

sendo **NT**: nitrogênio total

Os nitratos estão entre os maiores poluentes das águas, geralmente associados a esgotos domésticos ou a produtos agroquímicos. Os resíduos de produtos protéicos provenientes de esgotos são ricos em N e se decompõem em nitratos quando da presença de oxigênio.

Devido à sua carga negativa e elevada mobilidade, os nitratos não formam fortes ligações com as partículas do solo. Mas os compostos nitrogenados presentes nos esgotos são atacados por bactérias nitrificantes presentes no solo, mineralizando-os.

As concentrações médias de nitratos nas águas subterrâneas são de 0,1 a 10 mg/l, podendo chegar a 1.000 mg/l em águas poluídas. Na água do mar, a concentração média é de 1 mg/l.

Concentrações acima de 5 mg/l indicam contaminação da água por atividade humana (esgotos, fossas sépticas, lixo, cemitérios, adubos nitrogenados, resíduos de animais, etc.). Altas concentrações de nitratos podem provocar problemas gástricos, intoxicação ou morte de crianças. No sistema digestivo, o nitrato é reduzido para nitrito, podendo restringir a transferência de oxigênio para os pulmões.

As águas de consumo humano devem obedecer aos seguintes valores máximos permitidos, segundo a Portaria n. 518/2004 do Ministério da Saúde: nitrato: 10 mg/L; nitrito: 1mg/L.

Fosfatos (PO₄⁻³)

O fósforo ocorre na água de diferentes formas:

- **Ortofosfatos** – estão diretamente disponíveis para o metabolismo biológico sem a necessidade de conversões; a forma em que se apresentam depende do pH (HPO₄²⁻; H₂PO₄⁻; H₃PO₄).
- **Polifosfatos** – possuem duas ou mais moléculas de fósforo.
- **Fósforo orgânico** – é menos comum em esgotos domésticos; em processos de tratamento de esgotos, o P orgânico é convertido a ortofosfatos.

Os fosfatos ocorrem comumente em concentrações entre 0,01 e 1 mg/l. Valores acima de 1 mg/l são indicativos de águas poluídas (esgotos, detergentes, sabões, agrotóxicos).

Elevadas concentrações podem levar à proliferação de algas e à eutrofização.

O Ca^{+2} limita a concentração do fosfato e o CO_2 dissolvido a favorece. Os hidróxidos de Fe e Al, os carbonatos (calcita, aragonita), os minerais argilosos e a matéria orgânica têm grande afinidade química com os fosfatos.

5.2.2.4. Principais Constituintes Secundários das Águas⁸

Os constituintes secundários são aqueles com concentração inferior a 1% em relação aos constituintes principais em águas naturais. Porém, em águas contaminadas sua concentração pode atingir valores compatíveis com a dos constituintes principais. Muitos constituintes secundários são micropoluentes inorgânicos, dentre os quais muitos são tóxicos. A sua detecção é geralmente difícil e cara, exigindo técnicas e equipamentos mais especializados.

Boro (B^{+3})

O boro encontra-se na natureza geralmente na forma de H_3BO_3 . As concentrações médias em águas subterrâneas são de < 0,1 mg/l, podendo chegar a 10 mg/l em casos extremos. Na água do mar, os valores médios são de 4,6 mg/l.

Em concentração elevada, o boro é relativamente tóxico aos vegetais, aos animais e ao homem.

Brometo (Br)

O brometo possui comportamento químico similar ao do cloreto (Cl^-). Suas concentrações natuais são geralmente < 0,01 mg/l em águas doces e em torno de 65 mg/l nas águas marinhas.

Compostos fenólicos

Os compostos fenólicos mais comuns são os hidróxidos derivados do benzeno, que são agentes poluentes derivados de rejeitos de águas industriais, oxidação de pesticidas, degradação microbiana de herbicidas, dentre outros. Provocam cheiro e sabor desagradáveis na água potável em concentrações de 50 a 100 ppb.

Manganês (Mn)

Assemelha-se ao Fe em termos de comportamento químico, mas apresenta concentração muito inferior nas águas naturais (< 0,2 mg/l). Sua concentração favorece a coloração da água, tornando-o indesejável em águas de consumo, de indústrias de alimentos e de tecelagens.

As águas de consumo humano devem apresentar no máximo 0,1 mg/L de Mn, segundo a Portaria n. 518/2004 do Ministério da Saúde.

⁸ Para saber mais sobre os parâmetros e os respectivos limites de concentração indicados para as águas de consumo humano, consultar o site da Organização Mundial da Saúde (OMS), bem como a Portaria 518/2004 do Ministério da Saúde, que estabelece os limites de concentração dos parâmetros para a água potável no Brasil.

Sílica (SiO_2)

Apresenta geralmente baixa concentração devido à sua elevada estabilidade química na maioria dos minerais, além da baixa solubilidade dos compostos que forma através do intemperismo das rochas. Em solução, apresenta-se como H_4SiO_4 , em parte dissolvido e em parte coloidal. As fontes principais de sílica são o intemperismo de minerais de argila e os feldspatos.

Suas concentrações médias são inferiores a 20 mg/l. Nos oceanos variam entre 1 e 30 mg/l. Sua presença pode ser prejudicial para fins industriais, devido à formação de incrustações, principalmente em caldeiras.

Zinco (Zn^{+2})

O Zn é o metal pesado mais solúvel. Suas concentrações são geralmente inferiores a 10 microgramas/l nas águas subterrâneas. É tolerado para consumo humano até o limite de 5 mg/l.

O zinco é um metal pesado utilizado na fabricação de revestimentos para prevenção da ferrugem, em baterias e nas ligas de latão e bronze. A contaminação da água ocorre via tubulações galvanizadas, fertilizantes, lixiviação de aterros ou despejos industriais. Nos despejos, é normalmente encontrado sob a forma de cloreto de zinco, óxido de zinco, sulfato de zinco e sulfito de zinco.

Compostos de zinco têm várias aplicações industriais tais como tintas, borracha, tinturas, entre outros. Os impactos do zinco na biota aquática (peixes) podem ser classificados em três categorias: bloqueio da biossíntese de determinadas proteínas, remoção de metais essenciais das biomoléculas e modificação da conformação ativa das biomoléculas.

A Portaria n. 518/2004 do Ministério da Saúde (OMS) determina um limite máximo de 5 mg/L de Zn nas águas de consumo humano.

a) Principais constituintes tóxicos e carcinóginos

Arsênio (As)

O arsênio pode ser liberado em jazidas de metais (arsenita) ou por inseticidas, herbicidas e resíduos industriais à base de arsênio. Suas concentrações naturais nos solos e águas subterrâneas são comumente inferiores a 0,1 mg/l; mas em águas de poços petrolíferos e águas minerais podem chegar a 4 mg/l.

A Portaria 518/2004 do Ministério da Saúde (OMS) determina um limite máximo de 0,01 mg/L nas águas de consumo humano.

Bário (Ba^{+2})

O Ba é mais tóxico quando na forma solúvel (organo-complexos) em água ou ácidos. A ingestão de 550 a 600 mg torna-o fatal. O seu excesso afeta o sistema nervoso e/ou aumenta a pressão sanguínea por vasoconstrição.

A Portaria n. 518/2004 do Ministério da Saúde (OMS) determina um limite máximo de 0,7 mg/L de Ba nas águas de consumo humano.

Cádmio (Cd⁺²)

O cádmio é altamente móvel nos meios aquáticos e muito tóxico para a saúde humana. O seu excesso pode provocar hipertensão arterial, anemia, retardamento de crescimento e morte. Torna-se fatal em concentrações de 0,8 a 0,9 g.. O Cd é normalmente associado à ocorrência de Zn, Pb e Cu, já que é um subproduto do processamento industrial destes minerais, além da combustão do carvão.

A contaminação por cádmio pode ser provocada pela corrosão de canos galvanizados, resíduos de galvanoplastia e tintas, baterias, pigmentos para materiais cerâmicos e agentes de estabilização do PVC.

Outras formas de poluição por cádmio são a deposição atmosférica de Cd, águas residuais de minas, lama residual de fertilizantes/fungicidas, pesticidas e efluentes industriais.

A Portaria n. 518/2004 do Ministério da Saúde (OMS) determina um limite máximo de 0,005 mg/L de Cd nas águas de consumo humano.

Chumbo (Pb)

As águas subterrâneas têm quantidades médias de 20 microgramas/l de chumbo. Concentrações elevadas podem indicar poluição por indústrias de baterias, tintas, pigmentos, PVC e plásticos de revestimentos, cabos elétricos, mineração e fungicidas para uso na agricultura. O chumbo é mais nocivo em sua forma dissolvida (iônica), gerada quando da reação com oxigênio em meio ácido.

Em geral, é tolerado para consumo humano até 0,5 mg/l. Teores acima deste valor podem causar intoxicação, danos cerebrais e morte. O chumbo inorgânico pode atuar no sistema nervoso, sistema renal, trato gastro-intestinal, aparelho reprodutor e causar anemia. A intoxicação pelo chumbo, denominada de **Saturnismo**, pode ocorrer pelas vias inalatórias, pela pele e pelo trato intestinal.

A Portaria n. 518/2004 do Ministério da Saúde (OMS) determina um limite máximo de 0,01 mg/L de Pb nas águas de consumo humano.

Cobre (Cu⁺)

O Cu apresenta baixa solubilidade e suas concentrações na natureza são geralmente inferiores a 1 micrograma/l. Geralmente, é tolerado para consumo humano até o limite de 0,05 mg/l. A água contendo mais de 1 mg/l de cobre possui um sabor desagradável para a maioria das pessoas, sendo altamente tóxica para as crianças e adultos com problemas de metabolismo.

O cobre é um metal encontrado em depósitos naturais de minério, em refinarias e incineradores, ocorrendo na água em baixas concentrações naturais.

A Portaria n. 518/2004 do Ministério da Saúde (OMS) determina um limite máximo de 2 mg/L de Cu nas águas de consumo humano.

Cromo (Cr)

O cromo origina-se do metal denominado cromita, estando presente nas indústrias de tinta, ligas de aço e níquel. Apesar de possuir funções biológicas importantes é tóxico na forma solúvel, podendo ocasionar patologias respiratórias, gastrointestinais, nos rins e no fígado.

A Portaria n. 518/2004 do Ministério da Saúde (OMS) determina um limite máximo de 0,05 mg/L de Cr nas águas de consumo humano.

A principal fonte de fluoretos em rochas ígneas é o mineral fluorita. Os fluoretos possuem solubilidade limitada e ocorrem em concentrações médias de 0,1 a 1,5 mg/l nas águas naturais, podendo chegar a 50 mg/l nas águas muito sódicas com pouco cálcio. Nos oceanos, os fluoretos ocorrem em concentrações entre 0,6 a 0,7 mg/l.

Até a 1,5 mg/l o flúor é benéfico ao homem na prevenção de cáries, mas acima deste teor torna-se prejudicial, causando manchas nos dentes (fluorose dental) e deformação nos ossos, podendo até levar à morte. O aumento de sua concentração pode se dar devido a águas de despejo de indústrias químicas, de vidro e de beneficiamento de minérios.

A Portaria n. 518/2004 do Ministério da Saúde (OMS) determina um limite máximo de 1,5 mg/L de fluoretos nas águas de consumo humano.

Mercúrio (Hg)

O tipo de mercúrio usado para amalgamar o ouro nas minerações é o tipo elementar, ou seja, o mercúrio metálico em sua forma líquida, com estado zero de oxidação. Nesta forma, o mercúrio não é muito tóxico. A primeira forma tóxica surge durante a queima do amálgama, quando o Hg é transformado em vapor, sendo absorvido na respiração (PIVELI e KATO, 2005).

O Hg metálico, na forma líquida ou em vapor, pode ser facilmente oxidado nas águas, nos sedimentos fluviais, no solo ou no processo de respiração. Quando oxidado, o Hg⁺ é produzido e, mais tarde, é gerado o Hg⁺⁺, uma forma inorgânica e tóxica do mercúrio que atinge o sangue, formando compostos solúveis que se combinam com as proteínas.

O mercúrio tem a propriedade de formar ligações covalentes com o carbono, gerando produtos extremamente tóxicos, como o dimetilmercúrio (CH₃HgCH₃), etilmercúrio (C₂H₂Hg⁺) e metilmercurio (CH₃Hg⁺). Tais formas são conhecidas como mercúrio orgânico.

Um dos principais problemas da contaminação por mercúrio é a bioacumulação ou biomagnificação, processo no qual os organismos retêm os contaminantes mais rapidamente do que podem eliminá-los. O mecanismo pelo qual o mercúrio penetra na cadeia alimentar ainda permanece desconhecido. Muitos cientistas acreditam que quanto menor o pH (maior acidez) e o Carbônico Orgânico Dissolvido – COD – da água, maior é a mobilidade do mercúrio no meio ambiente e mais fácil sua entrada na cadeia alimentar.

O ciclo do mercúrio em ambientes aquáticos é bastante complexo tendo em vista que as suas várias formas podem ser convertidas de uma para outra, sendo que a conversão mais importante e a forma mais tóxica, é em metilmercúrio (CH_3Hg^+). O metilmercúrio sintetizado por microorganismos e bactérias pode acumular-se nos peixes, entrando na cadeia trófica. O metilmercúrio afeta o sistema nervoso central, podendo causar danos irreversíveis ao cérebro. Despejado nas águas, o mercúrio acaba sendo lentamente oxidado e organificado, tornando-se tóxico contaminante da biota.

As fontes naturais de mercúrio são depósitos vulcânicos, depósitos naturais de mercúrio e a volatilização do mercúrio dos oceanos (posteriormente precipitável). As fontes antrópicas são principalmente a combustão de carvão, processos de cloro alcalino, incineração de resíduos e processos metálicos. Geralmente os limites de concentração do mercúrio nas águas de consumo humano são de 0,001 mg/l.

A Portaria n. 518/2004 do Ministério da Saúde (OMS) determina um limite máximo de 0,001 mg/L de Hg nas águas de consumo humano.

Níquel (Ni)

O Ni destaca-se pela propriedade do magnetismo, que o transforma em um ímã em contato com campos magnéticos. É um metal pesado de relativa resistência à oxidação e à corrosão, usado principalmente na fabricação de aço inoxidável, superligas de Ni, outras ligas metálicas, baterias recarregáveis, aramados, fundição, refinarias e cunhagem de moedas. Os principais minerais fornecedores de Ni são: garnierita, millerita, pentlandita e pirrotita.

Selênio (Se)

O Se é um elemento muito raro na natureza, com comportamento químico semelhante ao do enxofre. Nas águas subterrâneas, sua concentração é geralmente de 1 micrograma/l. É tóxico para homens e animais em concentrações acima de 0,01 mg/l e seu excesso provoca aumento de incidência de cáries dentárias e é carcinógeno.

A Portaria 518/2004 do Ministério da Saúde (OMS) determina um limite máximo de 0,01 mg/L de Se nas águas de consumo humano.

a) Principais gases dissolvidos na água

A solubilidade dos gases varia no sentido inverso da temperatura e aumenta proporcionalmente com a pressão. Estas condições podem determinar a precipitação dos elementos químicos, levando a problemas de corrosão de revestimentos e filtros metálicos de poços tubulares, bem como à deposição de materiais incrustantes.

OD - Oxigênio dissolvido (O_2)

O oxigênio possui baixa solubilidade na água em relação ao ar em condições normais de pressão e temperatura (9 e 270 mg/l, respectivamente). O OD na água é essencial para a oxidação da matéria orgânica. Dependendo de sua concentração, o oxigênio pode oxidar e corroer materiais metálicos. A concentração de OD varia com a temperatura e com a altitude.

Valores elevados de OD (acima do ponto de saturação) indicam a presença de algas (fotossíntese), enquanto valores bem abaixo do ponto de saturação indicam a presença de esgotos. Valores entre 4 e 5 mg/l levam à morte os peixes mais exigentes, enquanto 2 mg/l faz com que todos os peixes morram. As concentrações médias de OD das águas subterrâneas ficam em torno de 0 a 5 mg/l.

O OD é um dos principais parâmetros de avaliação da poluição das águas por esgotos. É também um dos integrantes do Índice de Qualidade da Água – o IQA – criado pela agência americana *National Sanitation Foundation* – NSF – e aplicado pelos sistemas de monitoramento das águas em vários estados do Brasil.

Gás Carbônico (CO_2)

A presença do CO_2 associa-se geralmente à decomposição da matéria orgânica do solo. As concentrações médias oscilam entre 1 e 30 mg/l. O CO_2 é um dos principais elementos que conferem acidez às águas.

Gás Sulfídrico (H_2S)

O gás sulfídrico forma um ácido fraco, tornando a água corrosiva.

5.2.2.5. Índices de Qualidade da Água – IQA

Dentre os vários elementos químicos, físicos e biológicos que compõem a água, alguns são selecionados pelos programas de monitoramento da qualidade da água para a verificação da sua conformidade em relação aos objetivos de uso. Nesse sentido, vários parâmetros são agregados em índices de qualidade da água, os IQA.

Os índices de qualidade da água (IQA) são, ainda hoje, os indicadores sobre águas mais conhecidos mundialmente (MAGALHÃES JR, 2007). O primeiro IQA foi proposto por Horton em 1965, mas os mais utilizados foram desenvolvidos nos anos 70, pela agência americana *National Sanitation Foundation* – NSF.

O IQA da NSF foi criado com nove parâmetros, cujos pesos foram obtidos por meio de um painel de especialistas denominado **técnica Delphi** (Tabela 5.14.) e os seus valores finais são classificados em faixas de qualidade da água (Tabela 5.15.). Em Minas Gerais o Instituto Mineiro de Gestão das Águas adota o IQA multiplicativo da NSF no monitoramento das águas.

O IQA multiplicativo da NSF pode ser calculado pela seguinte equação:

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

sendo **IQA** = índice de qualidade de água variando de 0 a 100; **qi** = qualidade do parâmetro **i** obtido por meio da curva média específica de qualidade; **wi** = peso atribuído ao parâmetro em função de sua importância na qualidade da água, entre 0 e 1.

Tabela 5.16. Índices de Qualidade da Água	
<i>IQA</i>	<i>Observações</i>
<i>Horton (1965)</i>	Foi o primeiro IQA e destinado a Ohio River Valley Water Sanitation Commission – ORSANCO (EUA). O autor selecionou oito parâmetros, aos quais foram dados pesos de acordo com sua importância relativa: tratamento de esgoto, OD, pH, coliformes, cond. elétrica, CCE, alcalinidade, cloretos.
<i>IQA Aditivo com peso National Sanitation Foundation (USA) – Brown et al. (1970)</i>	É um dos índices mais utilizados no mundo e com o auxílio do método Delphi foram escolhidos nove parâmetros e seus respectivos pesos, os quais foram obtidos após operações estatísticas: OD (0,17), coliformes fecais (0,15), pH (0,12), DBO5 (0,10), nitratos (0,10), fosfatos (0,10), temperatura (0,10), turbidez (0,08), STD (sólidos em suspensão + sólidos dissolvidos) (0,08).
<i>IQA aditivo sem peso National Sanitation Foundation (USA) – Brown et al. (1970)</i>	Os parâmetros são os mesmos do IQA aditivo com peso, diferindo apenas no fato de que este atribui a cada parâmetro seu peso de 1/9 ou 11 % de influência no valor final do índice.
<i>IQA Europeu aditivo sem peso ou Índice Implícito de Poluição de Prati Prati et al. (1970)</i>	Parâmetros: pH, OD, DBO, DQO, teor de permanganato, sólidos em suspensão, NH3, NO ₃ ⁻ , Cl ⁻ , Fe, Mn, ABS e CCE. Todos os parâmetros têm pesos iguais. O IQA varia de 1 (excelente) a > 8 (altamente poluído).
<i>IQA Geométrico Deininger & Landwehr (1971)</i>	O índice incorpora pesos geométricos dos parâmetros.
<i>Índice de Poluição de Rios McDuffie (1973)</i>	Baseado em oito variáveis poluentes, permitindo a inclusão de outras variáveis dependendo da disponibilidade dos dados. Os subíndices para cada variável se baseiam na razão entre o valor medido e o nível teórico normal da variável em águas não poluídas. Para variar os subíndices desde 10 (níveis naturais) até 100 (níveis de elevada poluição), a razão do valor medido para o nível natural é multiplicado por um fator de escala (usualmente 10). Podem ser calculados os seguintes subíndices: déficit de oxigênio, matéria orgânica biodegradável, matéria orgânica refratária, sólidos suspensos não voláteis, coliformes, excesso médio de nutrientes, sais dissolvidos, temperatura.
<i>IQA Multiplicativo Deininger & Landwehr (1974)</i>	É um modelo não linear, função do produto dos níveis de qualidade dos parâmetros individuais. Quando qualquer parâmetro tem valor zero, o índice torna-se zero também. Os pesos são aplicados exponencialmente: quando são aplicados aos valores extremos, a contribuição dos parâmetros ao valor final do índice é muito menor (quando qi se aproxima de zero), ou muito maior (quando qi se aproxima de 100) do que quando aplicado a valores médios de qi. Os parâmetros são os mesmos do método de Brown et al., devido à existência de curvas de avaliação de qualidade somente para os nove parâmetros. Os autores sugeriram que mudanças deviam ser feitas: substituição de STD (sólidos dissolvidos + sólidos em suspensão) por sólidos dissolvidos (evitando-se a redundância entre sólidos em suspensão e turbidez); substituição de nitratos medidos por nitrogênio total; inclusão da temperatura como parâmetro independente. Este índice é o mais usado no mundo, principalmente nos EUA.

<i>IQA Multiplicativo com pesos iguais Deininger & Landwehr (1974)</i>	As propriedades são iguais às do IQAM, com exceção dos pesos.
<i>IQA de Harkins (1974)</i>	Harkins, contrário à linha da NSF, desenvolveu um IQA que não chegou a atingir tanta notoriedade como o anterior. Escolhe-se um valor, máximo ou mínimo, como ponto de partida para cada parâmetro de qualidade usado. Este vetor de valores é a observação de controle, da qual distâncias padronizadas serão calculadas. Calcula-se a variância dos postos para cada parâmetro e, então, se faz o cálculo da distância padronizada para cada membro ou vetor – observação usando equações.
<i>Índice de Disponibilidade de Água (México) Cisneros (1996)</i>	Este índice pode ser aplicado quando as informações disponíveis são escassas e não uniformes.
<i>Índice de Dinius</i>	Inclui onze variáveis poluentes e escala decrescente com valores expressos na forma de %: a água ótima corresponde ao valor 100% e a água imprópria recebe o valor 0. O índice é calculado como uma média ponderada e, assim como as funções dos subíndices, os pesos são baseados na importância de cada variável poluente.

Fonte: Mattos (1998) e Silva *et al* (1999) in Magalhães Jr. (2007)

5.2.3. Padrões de Qualidade das Águas

O objetivo principal do estabelecimento de padrões de qualidae é o de resguardar a qualidade das águas do corpo receptor para os usos a que se destina. No Brasil, os padrões de qualidade das águas são definidos de acordo com os usos prioritários a que as águas se destinam, por meio dos instrumentos de classificação e enquadramento dos corpos d’água em classes de uso (RESOLUÇÃO CONAMA nº. 357/05).

Como menciona o IGAM (2009), o enquadramento dos corpos de água em classes, segundo os usos preponderantes, é um dos instrumentos das políticas nacional e estaduais de recursos hídricos, visando estabelecer metas de qualidade para os corpos de água e assegurar os usos preponderantes estabelecidos.

Esse instrumento está relacionado com as metas de qualidade de água pretendidas para um corpo hídrico – o rio que queremos – e não necessariamente com as suas condições atuais – o rio que temos. Para atingir a qualidade futura – ou seja, o rio que queremos – devem ser propostas medidas de mitigação dos impactos instalados, a fim de obter uma qualidade de água compatível com os usos estabelecidos e pretendidos em uma região.

A identificação das condições atuais da qualidade da água e dos usos preponderantes da bacia auxilia na definição das metas, ou seja, do caminho que se deve trilhar até se atingir a qualidade de água desejável. De acordo com a Resolução CONAMA n. 357/2005, o enquadramento deve ser feito de forma participativa e descentralizada, estando de acordo com as expectativas e necessidades dos usuários. A aprovação da proposta de

enquadramento é de responsabilidade do respectivo comitê de bacia hidrográfica e a sua implantação deve ser efetuada no âmbito da bacia.

Em relação à importância do enquadramento, o IGAM (2009) ressalta:

O enquadramento dos corpos de água possibilita compatibilizar os usos múltiplos dos recursos hídricos superficiais, de acordo com a qualidade ambiental pretendida para os mesmos, com o desenvolvimento econômico, auxiliando no planejamento ambiental de bacias hidrográficas e no uso sustentável dos recursos naturais. Além disso, fornece subsídios aos outros instrumentos da gestão de recursos hídricos, tais como a outorga e a cobrança pelo uso da água, de maneira que, quando implementados, tornam-se complementares, proporcionando às entidades gestoras de recursos hídricos mecanismos para assegurar a disponibilidade quantitativa e qualitativa das águas.

Os critérios e diretrizes básicas para a realização do enquadramento de corpos d’água são especificados na Resolução CNRH n. 12/2000 e determinadas as etapas metodológicas: diagnóstico e prognóstico do uso e ocupação do solo; elaboração da proposta; e aprovação do enquadramento e respectivos atos jurídicos.

Nos termos de padrões de qualidade das águas, são considerados pela Resolução Conama n. 357/2005:

a) Padrões de lançamentos de efluentes no corpo receptor

O objetivo é a melhoria ou a manutenção da qualidade dos corpos d’água. A fiscalização ocorre nas fontes de emissão e os padrões são expressos apenas em termos de concentração e, não, de carga total (volume de poluentes).

As normas para qualidade ambiental visam a proteção da saúde pública e o controle de substâncias potencialmente prejudiciais à saúde humana, como microorganismos patogênicos, substâncias tóxicas ou venenosas e elementos radioativos. No caso do Brasil, a legislação baseia-se em usos da água e seus limites de aceitação de poluição e/ou contaminação.

O CONAMA classifica as águas territoriais brasileiras de acordo com os objetivos de usos preponderantes. Há cinco classes de águas doces (especial, 1, 2, 3 e 4), duas classes de águas salinas (5 e 6) e duas classes de águas salobras (7 e 8). A distinção entre estas águas ocorre da seguinte maneira:

- Águas doces: salinidade < 0,05 %
- Águas salobras: salinidade entre 0,05 e 3 %
- Águas salinas: salinidade superior a 3 %

A Tabela 5.17. apresenta as classes de uso preponderante das águas doces brasileiras de acordo com a Resolução CONAMA n. 357/05 e os respectivos usos a que se destinam.

Tabela 5.17. Classes de Águas Doces Brasileiras segundo o CONAMA		
CLASSE	COR	USOS POSSÍVEIS
ESPECIAL		Abastecimento para consumo humano com desinfecção. Preservação do equilíbrio natural das comunidades aquáticas. Preservação dos ambientes aquáticos em unidades de conservação de proteção integral.
I (UM)		Abastecimento para consumo humano após tratamento simplificado. Proteção das comunidades aquáticas. Recreação de contato primário (natação). Irrigação de hortaliças consumidas cruas e de frutas desenvolvidas rentes ao solo. Proteção das comunidades aquáticas em terras indígenas.
II (DOIS)		Abastecimento para consumo humano após tratamento convencional. Proteção das comunidades aquáticas. Recreação de contato primário. Irrigação de hortaliças, plantas frutíferas, parques, jardins, campos de esporte e lazer, onde o público tem contato direto com a água. Aquicultura e atividade de pesca.
III (TRÊS)		Abastecimento para consumo humano após tratamento convencional ou avançado. Irrigação de culturas arbóreas, cerealíferas e forrageiras. Pesca amadora. Recreação de contato secundário. Dessedentação de animais.
IV (QUATRO)		Navegação. Harmonia paisagística.

Fonte: CONAMA, 2009º.

Em função das classes de qualidade são definidos limites de lançamento de resíduos, que podem ser absolutos, como no caso da classe especial, em que “não são tolerados lançamentos de águas residuárias, domésticas e industriais, lixo e outros resíduos sólidos, substâncias potencialmente tóxicas, defensivos agrícolas, fertilizantes químicos e outros poluentes, mesmo tratados”. Nos demais casos são tolerados lançamentos desde que, além de atender a uma série de restrições no que tange à qualidade do efluente, “não venham a fazer com que os limites estabelecidos para as respectivas classes sejam ultrapassados”.

Não há impedimento no aproveitamento de águas de melhor qualidade em usos menos exigentes, desde que tais usos não prejudiquem a qualidade estabelecida para essas águas.

9 Disponível em: <www.mma.gov.br>

b) Padrões de qualidade das águas do corpo receptor

São padrões relacionados aos padrões anteriores e o controle ocorre nos corpos d’água (análise de parâmetros de qualidade).

c) Padrões de qualidade segundo o uso a que se destina a água

Os padrões de potabilidade, por exemplo, são determinados pela Portaria n. 1469/00 do Ministério da Saúde.

Nas abordagens de qualidade de água, uma solução muitas vezes defendida é a adoção de padrões de lançamento por cargas (massa por unidade de tempo) e, não, por concentração, permitindo um tratamento diferenciado entre o grande e o pequeno poluidor, e reduzindo a dificuldade de relação entre a qualidade do efluente e a qualidade do corpo receptor (VON SPERLING, 1998).

5.2.4. Exemplos de Critérios ou Padrões de Qualidade das Águas segundo seu Uso

• Potabilidade

No caso da potabilidade, o critério essencial é a proteção contra a contaminação das pessoas por microorganismos patogênicos e contra a poluição por substâncias tóxicas ou venenosas.

As características de uma água potável (consideradas internacionalmente) devem englobar os seguintes parâmetros:

- Aspecto: deve ser límpida e transparente
- Cor: deve ser incolor
- Odor: deve ser inodora
- Sabor: deve ser agradável ao paladar; sabor indefinível, mas que permita distingui-la de qualquer outro líquido
- Temperatura: deve ser fresca, sensação que depende da temperatura ambiente
- Turbidez: 0,2 - 10 ppm
- Não deve conter organismos patogênicos (que causem doenças)

No Brasil, os limites máximos permitidos para os parâmetros de qualidade da água potável são determinados pela Portaria do Ministério da Saúde n. 1469, de 29 de dezembro de 2000 (Tabela 5.18.).

Para a garantia da qualidade microbiológica da água, em complementação às exigências relativas aos indicadores microbiológicos, a Portaria n. 518/2004 determina o padrão de turbidez, como expresso na Tabela 5.19..

Tabela 5.18. Parâmetros Microbiológicos da Água Potável	
Parâmetro	VMP (1)
Água para consumo humano (2)	
Escherichia coli ou coliformes termotolerantes (3)	Ausência em 100 ml
Água na saída do tratamento	
Coliformes totais	Ausência em 100 ml
Água tratada no sistema de distribuição (reservatórios e rede)	
Escherichia coli ou coliformes termotolerantes (3)	Ausência em 100 ml
Coliformes totais	Sistemas que analisam 40 ou mais amostras por mês: ausência em 100 ml em 95% das amostras mensais. Em sistemas que analisam menos de 40 amostras/mês apenas uma poderá apresentar resultado positivo em 100ml

Fonte: Portaria n. 518/2004, Ministério da Saúde (OMS)

Notas:

- *Escherichia coli*: bactéria do grupo dos coliformes termotolerantes cujo *habitat* exclusivo é o intestino humano e de animais homeotérmicos.
- Coliformes termotolerantes: bactérias presentes em fezes humanas e de animais homeotérmicos, solos, plantas ou outras matrizes ambientais não contaminadas por material fecal.
- (1) Valor máximo permitido
- (2) Água para consumo humano em qualquer situação, incluindo fontes individuais como poços, nascentes, etc.
- (3) Detecção de *Escherichia coli* deve ser preferencialmente adotada.

Tabela 5.19. Padrão de turbidez para água pós-filtração ou pré-desinfecção	
Tratamento da água	VMP(1)
Desinfecção (água subterrânea)	1,0 UT(2) em 95% das amostras
Filtração rápida (tratamento completo ou filtração direta)	1,0 UT(2)
Filtração lenta	2,0 UT(2) em 95% das amostras

Notas:

- (10) Valor máximo permitido.
- (2) Unidade de turbidez.
- Entre os 5% de valores de turbidez permitidos acima dos VMP estabelecidos, o limite máximo para qualquer amostra pontual deve ser de 5,0 UT, assegurado, simultaneamente, o atendimento ao VMP de 5,0 UT em qualquer ponto da rede no sistema de distribuição.

• Irrigação

Os critérios de qualidade da água para irrigação são determinados pela concentração de íons como sódio, potássio, cloreto, sulfato e borato, e parâmetros como os sais dissolvidos, condutividade elétrica e concentração total de cátions. Geralmente, indica-se utilizar a água com condutividade elétrica inferior a 2000 microMho/cm. A classificação das águas para irrigação é dada no **Gráfico de Wilcox** (segundo a condutividade elétrica e percentagem de sódio da amostra).

A classificação do *United States Salinity Laboratory* (USSL) tem sido a mais aceita, baseada na razão de adsorção de sódio (RAS) e na condutividade elétrica da água (SANTOS, 1997).

• Pecuária

No caso da pecuária, os critérios de qualidade são, geralmente, função dos sais totais dissolvidos ou do resíduo seco.

• Indústria

Os critérios dependem do tipo de indústria e dos processos de industrialização, gerando necessidades diferentes de qualidade da água para cada uso. Em termos de uso da água, os fatores mais preocupantes são os processos de corrosão e incrustação, que dependem da presença de íons H (gerados no processo de dissociação iônica da água) e da estabilidade do carbonato de cálcio. A corrosão ocorre devido a reação dos íons H com algum metal.

A natureza precipitante ou corrosiva da água, em termos do carbonato de cálcio, pode ser determinada pelo índice de saturação do carbonato de cálcio na solução (IS), de acordo com Langelier (1936): $IS = pH_a - pH_c$, onde pH_c é o pH teórico da água que esta alcançaria em equilíbrio com o $CaCO_3$ e o pH_a é o pH atual da água (Tabela 5.20.). Se o IS for negativo, há subsaturação de $CaCO_3$ e tendência da água ser corrosiva ou dissolver depósitos cálcicos; e se positivo, tendência para formação de precipitados e obstruções.

De modo complementar, a severidade da corrosão ou precipitação de $CaCO_3$ pode ser classificada pelo índice de estabilidade (IE), segundo Ryznar (1944): $IE = 2 \times pH_c - pH_a$ (Tabela 5.21.). Se o IE for menor que 5 poderão ocorrer incrustações acentuadas; de 5 a 6 ocasionarão incrustações em parte aquecidas; de 6 a 6,5 há neutralidade, não ocorrendo problemas; de 6, 5 a 7 poderá haver corrosão leve; de 7 a 8 poderá ocasionar corrosão em partes aquecidas; e acima de 8 poderá ocorrer corrosão acentuada.

Tabela 5.20. Índice de Langelier (1936)	
<i>I</i>	Classificação
<i>> 0</i>	Incrustante
<i>= 0</i>	Neutra
<i>< 0</i>	Agressiva

Tabela 5.21. Índice de Estabilidade de Ryznar (1944)	
<i>IE</i>	Classificação
<i>4 - 5</i>	Muito incrustante
<i>5 - 6</i>	Moderadamente incrustante
<i>6 - 7</i>	Pouco incrustante ou agressiva
<i>7 - 7,5</i>	Agressiva
<i>7,5 - 9</i>	Francamente agressiva
<i>> 9</i>	Muito agressiva

5.3. Categorias de Poluição da Água

A utilização da água constitui sempre uma degradação ou redução do seu potencial quantitativo e/ou qualitativo, ou seja, a utilização sempre impacta o estado da água. Os parâmetros que definem a qualidade da água dependem de seu uso, ou seja, dos fins e objetivos de uso a que ela se destina.

5.3.1. Eutrofização

O processo de eutrofização pode ser considerado como sendo resultante do excesso de fertilização das águas por nutrientes, principalmente compostos orgânicos, fósforo e nitrogênio. A decomposição dos compostos orgânicos leva, comumente, à liberação de sais minerais como os de N e P. A eutrofização pode ter causas naturais e antrópicas (Figura 5.3.).

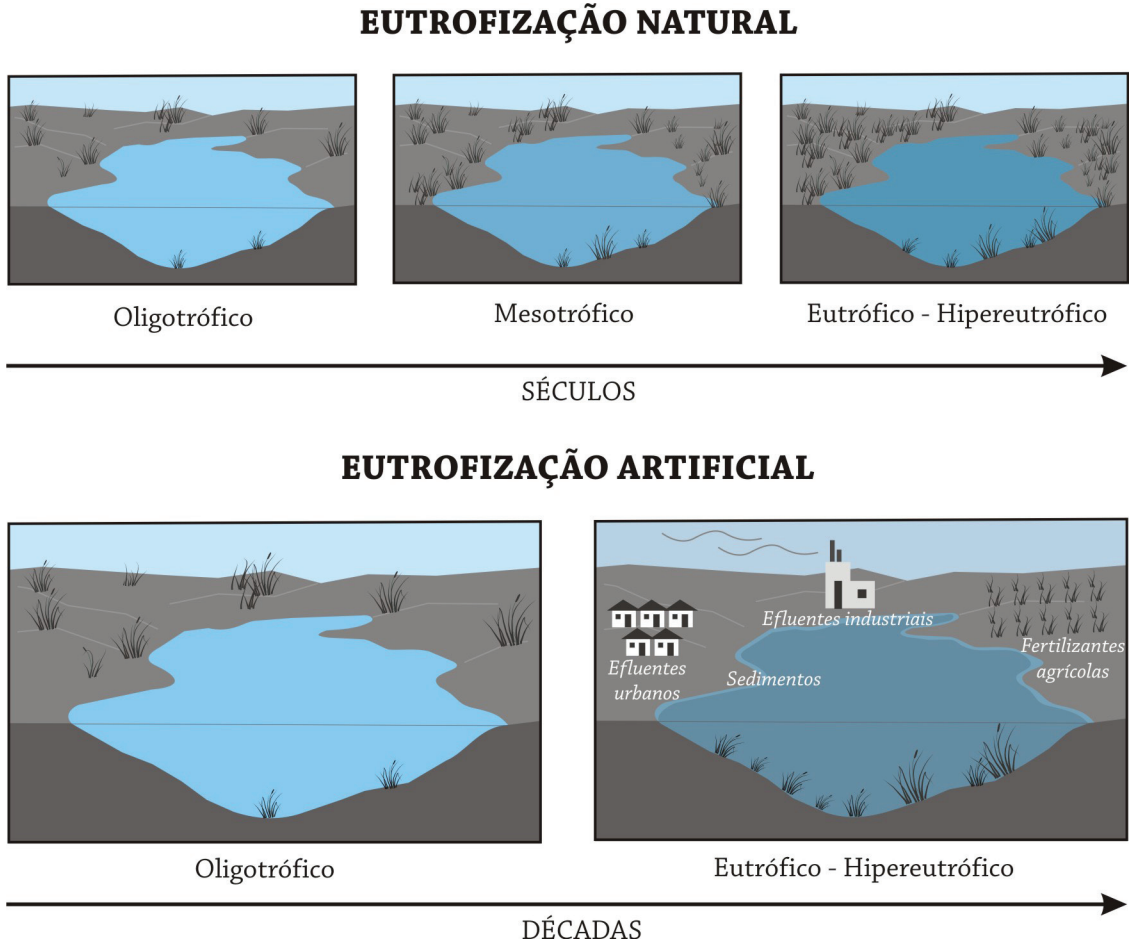
Os nutrientes servem de fonte de alimento para algas e plantas aquáticas que proliferam. Como as algas são organismos fotossintetizantes, elas produzem muito oxigênio durante o dia. Porém, durante a noite as mesmas algas consomem o oxigênio que produziram em seus processos vitais. Se a quantidade de algas formar uma barreira à penetração da luz solar (aumento da turbidez), a fotossíntese será realizada somente nas camadas mais superficiais do corpo d’água. Como consequência, o oxigênio produzido pela fotossíntese tende a ser perdido para a atmosfera, não se fixando na água.

Cria-se, então, uma situação em que grande parte do oxigênio produzido durante o dia é perdido, enquanto durante a noite há o consumo de oxigênio pelas algas. A queda do oxigênio pode, em certo momento, levar à morte das próprias algas que passam a se acumular no fundo do manancial, servindo de alimento para microorganismos anaeróbios.

Deste modo, dentre os principais indicadores de eutrofização estão o aumento excessivo na concentração de oxigênio dissolvido durante o dia e sua queda brusca durante a noite – pH elevado, entre 9 e 11 – e mudança na população plantônica de algas diatomáceas para algas verdes ou azuis (cianobactérias). A morte de grandes quantidades destes microorganismos pode estimular o crescimento de bactérias que levam à redução do OD na água.

Além de P e N, o carbono, como CO₂ ou bicarbonatos, também podem contribuir para o processo de eutrofização. Em resumo, o processo de eutrofização envolve um excesso inicial de nutrientes (superfertilização) que favorece a proliferação de microorganismos e de certas plantas aquáticas, levando ao envelhecimento acelerado de um corpo d’água pela redução do OD. O fenômeno poluidor propriamente dito não é a eutrofização em si, mas seu efeito na redução do oxigênio dissolvido devido à decomposição da matéria orgânica por bactérias aeróbias.

FIGURA 5.3.
Processo de Eutrofização



Fonte: Adaptação de figura disponibilizada pelo Laboratório de Limnologia e Planejamento Ambiental (UFES)¹⁰.
Elaboração: Joyce Bonna

Os principais elementos orgânicos presentes na água são: proteínas, carboidratos, gorduras, óleos, uréia¹¹, fenóis¹², pesticidas, dentre outros. A oxidação da matéria orgânica ocorre principalmente pela respiração de microorganismos decompositores que convertem a matéria orgânica a compostos inertes, como água e CO₂, e a nutrientes inorgânicos dissolvidos, como ortofosfatos e nitratos.

A oxidação dos constituintes orgânicos leva à perda de OD e ao aumento da DBO. A poluição orgânica é geralmente medida por métodos indiretos que envolvem o consumo de oxigênio (DBO ou DQO) ou a medição do carbono orgânico (Carbono Orgânico Total – COT).

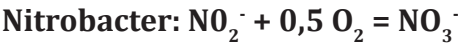
¹⁰ Disponível em: <<http://www.dern.ufes.br/limnol/aging.jpg>>.

¹¹ Substância cristalina, incolor, existente na urina (CON₂H₄).

¹² Derivados hidroxilados do benzeno, cristalino incolor, mas avermelhado quando exposto à luz, com cheiro característico (C₆H₆O). O benzeno é um líquido incolor e volátil, utilizado como solvente (C₆H₆).

A nitrificação (oxidação da amônia em nitritos e estes em nitratos) também consome O na água. nitrificação é a transformação biológica de compostos nitrogenados de um estado reduzido para outro mais oxidado. A amônia é nitrificada por nitrosomonas, bactérias que utilizam a energia resultante da oxidação. Os nitritos transformam-se em nitratos por meio da oxidação realizada por bactérias *Nitrobacters*. A maior parte da energia liberada é utilizada na fixação de CO₂.

Os processos de nitrificação que envolvem a transformação de amônia em nitritos, realizada pelas bactérias nitrosomonas, e de transformação de nitritos em nitratos, pelas bactérias *Nitrobacters*, podem ser expressos pelas seguintes equações:



Por processos de redução, o N₂ pode ser liberado dos nitratos, facilitando a acumulação de amônia. Os compostos nitrogenados possuem grande mobilidade e não são facilmente absorvidos pelos minerais do solo, como as argilas e os hidróxidos de Fe, ao contrário do P.

O excesso de nutrientes nas águas tem origem principalmente nos esgotos domésticos (Figura 5.4.), mas também deve-se a águas residuárias industriais, fertilizantes, drenagem pluvial urbana, detergentes e alguns agrotóxicos.

FIGURA 5.4.
Lançamento de Egotos na Água¹³.



13 Fotografia disponível em: <http://www.mp.go.gov.br/porta1web/hp/9/img/esgotos_a_ceu_aberto_2.jpg>.

O caso dos esgotos pluviais é ilustrativo, já que não chamam tanto a atenção como os esgotos domésticos e industriais. Como lembra Tucci et al. (2002), a poluição dos esgotos pluviais ainda não é uma prioridade em grande parte das cidades brasileiras, já que o esgoto cloacal é ainda o problema principal a ser combatido. O autor lembra, no entanto, que durante uma cheia urbana, a carga do pluvial pode chegar até 80 % da carga do esgoto doméstico. O tratamento de águas pluviais pode ser uma boa solução para sua utilização em usos menos exigentes e não potáveis. O armazenamento em bacias de decantação pode ser a primeira etapa de eliminação dos poluentes dos esgotos pluviais.

Em águas residuárias urbanas, a relação N/P é normalmente 3:1, enquanto em fontes difusas a relação é bem superior (o N é o fator limitante). Porém, o P é mais facilmente removido de esgotos do que o N, por meio de precipitação química, sendo a técnica geralmente empregada para o controle da eutrofização. O controle da eutrofização envolve métodos físico-químicos (caracterização da degradação no que tange às suas causas) e métodos biológicos (efeitos da degradação sobre as comunidades biológicas). O combate da eutrofização envolve geralmente a retirada ou redução de fosfatos das águas residuárias através de tratamento químico, por exemplo.

A decomposição do lixo é uma das fontes de poluentes orgânicos nas águas, gerando o denominado chorume, cuja concentração de material orgânico pode equivaler de 30 a 100 vezes a do esgoto sanitário, além de microorganismos patogênicos e metais pesados (BNETTI e BIDONE, 1987).

Em relação aos micropoluentes orgânicos, alguns não são biodegradáveis e não integram os ciclos biogeoquímicos, acumulando-se em alguma parte do ciclo. A maior parte é tóxica, como é o caso de certos detergentes e agrotóxicos.

A tabela 5.22. mostra a relação entre os dois principais nutrientes presentes nas águas residuárias lançadas em lagos: o N total e o P total.

Tabela 5.22. Razão N total/P total em Águas Residuárias lançadas em Lagos		
N/P	Nutriente limitante do crescimento	Nível de clorofila a (mg/m3)
> 12	P	< 20
7 - 12	N e/ou P	20 - 70
< 7	N	> 70

Fonte: Tundisi (2000).

5.3.2. Micropoluentes Inorgânicos e Poluição Tóxica

Muitos micropoluentes inorgânicos também são tóxicos. A poluição tóxica é gerada principalmente por atividades mineradoras e despejos industriais e domésticos.

- **Metais pesados**

O grupo dos metais pesados engloba metais e metalóides não degradáveis, com densidade maior que 6 g/cm³ e número atômico superior a 22. Também são conhecidos por serem precipitados por sulfetos e por causarem efeitos adversos à saúde humana quando presentes em certas concentrações. São micropoluentes inorgânicos de origem principalmente industrial. Do total de 72 metais, 59 podem ser classificados como metais pesados, dos quais 17 são considerados muito tóxicos.

Os metais pesados são originados por fontes naturais e artificiais. As fontes naturais referem-se ao intemperismo físico-químico das rochas, precipitação de material particulado da atmosfera, atividade vulcânica, entre outros. No caso das fontes antrópicas destacam-se: atividades industriais, atividades agrícolas (agrotóxicos), mineração, desmatamento e queima de combustíveis fósseis.

A ordem decrescente de toxidade dos metais pesados é aceita que seja: mercúrio, prata, cobre, cádmio, zinco, chumbo, cromo, níquel, cobalto, e outros. As interações dos metais pesados com o solo, as águas e os sedimentos envolvem reações de adsorção, precipitação, complexação e oxidação. Os metais pesados tendem a aderir aos sólidos em suspensão, que podem se acumular nos leitos dos corpos d'água. As partículas mais finas e ionicamente carregadas têm maior capacidade de acumular metais pesados por processos de complexação. Materiais mais ricos em grãos de quartzo tendem a acumular menos.

Alguns metais pesados possuem maior mobilidade no solo, como o alumínio, o cádmio e o manganês. Outros, como o chumbo e o cobalto, têm baixa mobilidade. Solos acidificados tendem a aumentar a mobilidade de certos metais no solo, fato que facilita sua absorção pelas plantas. As argilas e os constituintes orgânicos têm forte poder absorvente de alguns metais pesados no solo.

Dependendo de sua concentração, os metais pesados podem comprometer a presença de microorganismos que decompõem a matéria orgânica nas águas. Nesse caso, elevadas concentrações de OD não significariam, necessariamente, uma água de qualidade adequada, já que o OD estaria em concentrações elevadas justamente em função da redução dos organismos decompositores. Além do seu potencial tóxico direto, os metais pesados também podem ter efeitos biológicos nocivos a médio ou longo prazo, devido aos processos de bioacumulação ou biomagnificação, nos quais há um aumento progressivo da concentração do elemento ao longo da cadeia alimentar ecológica.

Os sedimentos do leito dos cursos d'água podem conter uma concentração de metais pesados entre 1000 e 10.000 vezes maior do que nas águas, já que os metais

podem ser absorvidos ou combinados com outros minerais e compostos orgânicos, precipitando-se. A absorção de metais pesados por minerais ou matéria orgânica pode ser relativamente benéfica em certas ocasiões (despoluição), mas implicam em riscos quando as condições aquáticas facilitarem a liberação dos metais tóxicos nas águas.

- **Estrogênio mimético**

Os compostos de PVC e outros materiais plásticos decompõem-se lentamente, gerando um componente que mimetiza o estrogênio, provocando o hermafroditismo em peixes como o bacalhau.

- **Compostos organosintéticos**

São principalmente os agrotóxicos que, sintetizados artificialmente, sua biodegradabilidade é muito baixa. Sabe-se que os organismos decompositores atuam eficientemente apenas na degradação da matéria orgânica natural.

- **Hidrocarbonetos**

Estão presentes nos produtos petrolíferos e possuem caráter hidrófobo, não se misturando com a água. Ao formarem uma película sobre a água, evitam a troca de gases entre a água e o ar.

5.3.3. Assoreamento

O assoreamento é a poluição causada por excesso de sedimentos ou materiais sólidos nos leitos d'água, como o lixo. É derivado do aumento de carga sedimentar nos leitos dos cursos d'água, devido à erosão acelerada nas áreas das respectivas bacias hidrográficas. A erosão permite que uma maior quantidade de sedimentos atinja o corpo d'água, que não tem sua capacidade e/ou competência aumentada na mesma proporção. Portanto, sem conseguir transportar toda a carga que chega, o corpo d'água tem seu leito gradualmente preenchido por sedimentos, reduzindo seu espaço útil para o escoamento das águas. Como resultado, as inundações podem tornar-se mais frequentes e intensas. A erosão acelerada também tende a aumentar a carga em suspensão, levando ao aumento da turbidez.

O assoreamento tende a aumentar, também, a poluição orgânica e tóxica, pois as argilas têm elevado poder absorvente de alguns poluentes. Os sedimentos do leito dos cursos d'água podem conter uma concentração de metais pesados entre 1000 e 10.000 vezes maior do que nas águas, já que os metais podem ser absorvidos por minerais ou combinar com outros minerais, precipitando-se.

5.3.4. Resíduos Sólidos

Os resíduos sólidos ocorrem em estado sólido e semissólido, e resultam de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Também estão incluídos os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água, gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição, bem como

determinados líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpos d'água, ou exijam para isso soluções técnicas e economicamente inviáveis em face à melhor tecnologia disponível¹⁴.

Os tipos de destinação final dos resíduos sólidos mais comuns no Brasil são:

- **Lixão ou vazadouro:** disposição sobre o solo, sem medidas de proteção ao meio ambiente ou à saúde pública.
- **Aterro controlado:** envolve o confinamento dos resíduos sólidos, o recobrimento com uma camada de material inerte ao final de cada jornada de trabalho. Não é exigida a impermeabilização da base, nem sistemas de tratamento de chorume ou de dispersão de gases.
- **Aterro sanitário:** segue normas de engenharia e normas operacionais específicas, visando a proteção e a saúde pública. Envolve o confinamento (redução máxima de volume por meio da compactação), cobertura com uma camada de terra ou material inerte, sistemas de impermeabilização da base e laterais, sistema de drenagem, tratamento do chorume, e queima dos gases produzidos.

O lixo urbano conta com grande quantidade de matéria orgânica, que entra rapidamente em decomposição ao ar livre. A falta de revolvimento desta massa faz com que o oxigênio em seu interior seja rapidamente consumido pela ação bacteriana, dando lugar à decomposição anaeróbia, com desprendimento de gases mefíticos, como metano, gás sulfídrico, etc.

A maior parte do lixo municipal no Brasil é constituída de matéria orgânica, papel e papelão. Os parâmetros indicadores mais utilizados para verificação de contaminação de águas subterrâneas por resíduos sólidos (chorume) são os compostos nitrogenados (amônia, nitritos, nitratos), metais, cloretos de enxofre, substâncias orgânicas e o íon cloreto.

5.3.5. Outras Categorias de Poluição

A contaminação patogênica envolve microorganismos capazes de transmitir doenças aos seres humanos, como vírus, fungos e bactérias. A contaminação tem efeitos diretos na inutilização da água para diversos fins como a potabilidade.

Outra categoria de poluição envolve a acidificação dos corpos d'água por efluentes industriais ou pela chuva ácida, que pode resultar em pH de 3 a 4, quando normalmente a água da chuva apresenta pH de 5 a 6. A acidificação pode reduzir drasticamente a biota aquática e impedir alguns usos.

Cabe também destacar a poluição térmica, que leva ao aumento ou redução das temperaturas das águas. Esta ocorrência é comumente originada em processos industriais de resfriamento de equipamentos (centrais elétricas, refinarias, indústrias petroquímicas, indústrias metalúrgicas, etc.). O retorno das águas termicamente modificadas provoca a elevação da temperatura do corpo receptor e o aumento da

evaporação no caso das águas aquecidas. A velocidade da reação química duplica para cada 10 °C de aumento da temperatura, acelerando as reações que se relacionam com a atividade microbiana. Para cada 1°C de aumento da temperatura da água, esta perde 2% de oxigênio dissolvido, aumentando, por consequência, a DBO. A produção primária do fitoplâncton diminui significativamente com a elevação exagerada da temperatura.

As categorias de poluição das águas apresentadas estão associadas a várias fontes de poluição derivadas de atividades humanas. Podemos destacar as principais fontes de poluição das águas no Brasil:

- **Esgotos domésticos:** os esgotos são os principais elementos poluentes das águas no Brasil. Além dos lançamentos de esgotos não tratados diretamente nos corpos d'água, podem também ocorrer vazamentos nos sistemas de coletores domésticos.
- **Lagoas de oxidação e bacias de decantação:** a base e as laterais das lagoas e bacias devem ser impermeabilizadas para evitar-se a infiltração de poluentes no solo, através da construção de poços de monitoramento à jusante para identificação de possíveis infiltrações e contaminações da água subterrânea.
- **Fossas sépticas:** as fossas contaminam as águas subterrâneas por infiltração dos esgotos. As fossas devem situar-se à jusante de poços de captação de água para evitar-se a contaminação. Nos locais onde se constroem as fossas, o lençol freático deve situar-se a pelo menos 10 metros de profundidade e não devem ser próximas a cursos d'água superficiais. As fossas negras são totalmente prejudiciais à qualidade da água, já que, diferentemente das fossas sépticas, não possuem nenhum tipo de controle e normas de proteção contra os vazamentos e a infiltração.
- **Efluentes industriais:** assim como os esgotos domésticos, os efluentes industriais estão entre os principais poluidores das águas no Brasil, devendo ser tratados antes de seu lançamento nos corpos d'água.
- **Aterros sanitários e lixões:** os aterros sanitários são menos prejudiciais do que os lixões, no que se refere à poluição da água. Normalmente são revestidos por material impermeável para evitar a infiltração dos poluentes. Neste caso, emprega-se muitas vezes argila compactada ou outros *liners* (barreiras protetoras) para deter ao máximo a percolação do fluxo de infiltração (Figura 5.27.). Estes liners são aplicados no fundo e nas laterais do aterro.

Segundo a Norma NBR 8419, da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT, 1992), aterro sanitário de resíduos sólidos urbanos consiste na técnica de disposição de resíduos sólidos no solo, sem causar danos ou riscos à saúde pública e à segurança, minimizando os impactos ambientais. Este método utiliza princípios de engenharia para confinar os resíduos sólidos à menor área possível e reduzi-los ao menor volume permissível, cobrindo-os com uma camada de terra na conclusão de cada fornada de trabalho ou em intervalos menores, se necessário.

¹⁴ ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas, NBR 10004/87.

Os aterros sanitários são mais difundidos internacionalmente por se apresentarem mais econômicos do que a compostagem e a incineração, que exigem maiores investimentos para sua construção e para a manutenção da estrutura técnico-administrativa de operação.

Tabela 5.23. Tipos de Liners usados em Aterros sanitários	
Origem natural	Sintéticos
Solo compactado	Polietileno clorosulfurado (Hypalon)
Concreto	Cloreto polivinílico (PVC)
Emulsões asfálticas (aplicadas por jateamento)	Polietileno (PE)
Solo-cimento	Polietileno clorado
Membrana de bentonita	Borracha butílica
Misturas de areia e bentonita	-

- Postos de gasolina: os tanques de combustíveis são geralmente no subsolo, e possíveis vazamentos permitem que os combustíveis infiltrem no solo e entrem em contato direto com as águas subterrâneas.
- Cemitérios: o necrochorume também é considerado uma fonte de poluentes importante. Para evitá-lo, devem ser seguidas as normas específicas para a construção dos cemitérios e sua fiscalização.
- Agrotóxicos/fertilizantes e águas de irrigação contaminadas: os agroquímicos são as principais fontes de poluição difusa, sendo de difícil controle após serem liberados no ambiente.
- Esgotos pluviais urbanos: os esgotos pluviais poluem tanto quanto os esgotos domésticos e industriais, principalmente em áreas com precipitações elevadas e sistemas de limpeza urbana ineficientes. O escoamento pluvial pode carrear poluentes tóxicos importantes, como metais pesados, hidrocarbonetos e sedimentos.
- Rejeitos de mineração: os rejeitos minerais devem ser acondicionados seguindo as normas exigidas pela legislação. Quando submetidos a chuvas, os rejeitos podem gerar poluentes que infiltram no solo e contaminam as águas. As atividades minerais também devem ser fiscalizadas para atender as normas legais exigidas, já que processos de extração inadequados podem provocar impactos importantes no nível d’água subterrânea e nos cursos d’água superficiais.

5.4. Água, Saneamento e Saúde

5.4.1. Bases conceituais

O saneamento envolve o controle de todos os fatores do meio físico do homem, que exercem ou podem exercer efeitos nocivos sobre seu bem estar físico, mental e social. Envolve um conjunto de medidas, visando a preservar ou modificar as condições do ambiente com a finalidade de prevenir doenças e promover a saúde humana. Neste caso, o saneamento visa controlar e prevenir doenças e melhorar a qualidade de vida da população.

A noção de saneamento básico vem, ao longo dos anos, se desvinculando da conotação de executor de obras públicas de águas e esgotos e se direcionando a um conjunto de serviços voltados à qualidade ambiental e à qualidade de vida. O saneamento passa a buscar, portanto, a salubridade ambiental, ou seja, “o estado de qualidade ambiental capaz de prevenir a ocorrência de doenças relacionadas ao meio ambiente e de promover condições favoráveis ao pleno gozo da saúde e do bem-estar da população”¹⁵.

O saneamento básico é entendido como o conjunto de serviços, infraestruturas e instalações operacionais que envolvem¹⁶

- a) Abastecimento de água potável: constituído pelas atividades, infraestruturas e instalações necessárias ao abastecimento público de água potável, desde a captação até as ligações prediais e respectivos instrumentos de medição.
- b) Esgotamento sanitário: constituído pelas atividades, infraestruturas e instalações operacionais de coleta, transporte, tratamento e disposição final adequados dos esgotos sanitários, desde as ligações prediais até o seu lançamento final no meio ambiente.
- c) Limpeza urbana e manejo de resíduos sólidos: conjunto de atividades, infraestruturas e instalações operacionais de coleta, transporte, transbordo, tratamento e destino final do lixo doméstico e do lixo originário da varrição e limpeza de logradouros e vias públicas.
- d) Drenagem e o manejo das águas pluviais urbanas: conjunto de atividades, infraestruturas e instalações operacionais de drenagem urbana de águas pluviais, de transporte, detenção ou retenção para o amortecimento de vazões de cheias, tratamento e disposição final das águas pluviais drenadas nas áreas urbanas.

Na Lei Municipal n. 8260/2001, da Prefeitura Municipal de Belo Horizonte – MG, o saneamento engloba os seguintes serviços:

- Abastecimento de água em quantidade suficiente para assegurar higiene adequada e conforto, e com qualidade compatível com os padrões de potabilidade.
- Coleta, tratamento e a disposição adequada de esgotos e de resíduos sólidos.

15 BELO HORIZONTE, 2001.

16 PRESIDÊNCIA DA REPÚBLICA, 2007.

- Drenagem urbana das águas pluviais.
- Controle de vetores transmissores e de reservatórios de doenças.

O saneamento vem sendo cada vez mais entendido como saneamento ambiental, em lugar de saneamento básico. A lei nacional do saneamento (PRESIDÊNCIA DA REPÚBLICA, 2007) refere-se a saneamento básico na definição, mas estabelece diretrizes relacionadas ao saneamento ambiental em seu texto. O saneamento ambiental envolve a provisão adequada de abastecimento de água potável, disposição de resíduos e esgotos, coleta de lixo, controle de vetores transmissores de doenças, drenagem urbana, habitação salubre, suprimento de alimentos, segurança no ambiente de trabalho, proteção contra a radiação e produtos químicos sintéticos, e proteção contra a degradação social (HESPANHOL, 2002).

Até o século XX, as questões de saneamento não eram prioritárias no gerenciamento das cidades, principalmente no que se referia à coleta e tratamento de esgotos. O paradigma do *tout à l'égout*, ou seja, todos os esgotos e resíduos são lançados sem tratamento nos cursos d'água, mudou inteiramente as relações entre a humanidade e as águas a partir do século XIX. Seu início se deu na Inglaterra, com a reforma sanitária de 1847, quando foi introduzido, de forma generalizada, o uso de descargas hidráulicas em vasos sanitários, ligando-os diretamente aos sistemas de esgotos. Anteriormente, eles eram usados quase exclusivamente para o escoamento de águas pluviais. Por isto, nas décadas seguintes, tornaram-se comuns as epidemias de doenças de veiculação hídrica no mundo, como a febre tifóide e o cólera.

Ao longo do século XX, as questões de saneamento foram sendo cada vez mais valorizadas nos processos de gestão das cidades no mundo. Este aspecto esteve muito mais ligado à necessidade de busca de soluções para os problemas de saúde pública, já que grande parte das doenças comuns nas grandes cidades era transmitida por meio da água poluída. No século XXI, o saneamento ambiental é considerado como um pilar dos processos de gestão dos recursos hídricos no mundo.

O fornecimento de água de qualidade é um dos principais processos do saneamento. Após a captação da água nos mananciais e antes de sua distribuição, a água deve ser tratada para atender aos padrões de qualidade exigidos pela Portaria n. 815/2004 do Ministério da Saúde (BRASIL, 2004), no caso da água potável. O tratamento ocorre nas Estações de Tratamento de Água – ETAs –, onde a água pode ser submetida aos seguintes processos:

- **Desinfecção:** adição de cloro para eliminação de microorganismos patogênicos, cheiros, gosto e coloração anormal.
- **Coagulação:** adição de agentes coagulantes que levam à aglomeração de partículas em suspensão. Os coagulantes são, principalmente, o sulfato de alumínio – $\text{Al}_2 (\text{SO}_4)_3$ – e o sulfato de ferro – $\text{Fe}_2 (\text{SO}_4)_3$. Os colóides são neutralizados quanto entram em contato com os coagulantes. Como a água fica ácida, é preciso neutralizá-la com cal.

- **Floculação:** a água é agitada para intensificar a aglomeração das partículas.
- **Decantação:** decantação dos flocos formando camada de lodo que é transferido para o canal de águas residuais da estação.
- **Filtração:** os filtros mais comuns são de carvão e areia sobre uma camada de cascalho.
- **Correção do pH.**
- **Fluoretação:** o flúor é adicionado às águas de distribuição para atender às exigências legais do Ministério da Saúde. O flúor é um elemento importante para a dentição humana.

Os sistemas de distribuição levam a água às residências e o uso da água gera os esgotos domésticos, que deverão ser coletados e tratados pelo poder público ou por empresas terceirizadas. Atualmente, o preço da água potável corresponde essencialmente aos custos de captação (incluindo a energia elétrica para bombeamento) e aos custos de distribuição, não devendo ser confundido com o valor da cobrança pelo uso da água nos moldes do que apregoa a Política Nacional de Recursos Hídricos.

No Brasil, o setor de saneamento é de competência dos municípios, mas estes podem delegar os serviços, parcial ou totalmente, ao setor privado ou a companhias de capital misto. Por isto, no Brasil, a gestão dos serviços de saneamento divide-se em dois modos principais: a gestão pelos serviços autônomos municipais e a gestão pelas companhias de saneamento estaduais (capital misto).

5.4.2. Esgotamento Sanitário

Assim como no caso do abastecimento de água, o acesso ao esgotamento sanitário é um dos temas mais consensuais na busca da melhoria da qualidade de vida. Qualitativamente, os esgotos domésticos são formados por 99,9% de água e 0,1% de impurezas físicas, químicas (substâncias orgânicas e inorgânicas) e biológicas (vírus, vermes, leveduras, protozoários). É esta parte que exige o tratamento da água para os diferentes usos.

O Relatório do Desenvolvimento Humano, publicado anualmente pelas Nações Unidas, considera o acesso aos serviços de coleta de esgotos como um dos indicadores do índice de pobreza humana nos países em desenvolvimento. O acesso ao serviço de coleta de esgotos e a existência de instalações sanitárias adequadas são fatores decisivos no controle de doenças de transmissão hídrica, já que evitam o contato direto da população com os despejos domésticos e industriais.

Um dos avanços da Conferência Rio+10, realizada em Johannesburg no ano de 2002, foi o compromisso dos países participantes de reduzir à metade a população sem acesso à água potável e ao saneamento básico até 2015. O acesso aos serviços de água potável, coleta de esgotos e coleta de lixo têm sido atualmente valorizados como indicadores de qualidade de vida. Estes indicadores têm sua importância diretamente ligada ao setor de saúde pública, já que a falta de saneamento básico é, no Brasil, um dos fatores mais decisivos na origem de doenças, com destaque para a esquistossomose.

No Brasil, o acesso à água potável e à coleta de esgotos ocorre basicamente por meio das redes administradas pelos operadores dos serviços de águas e esgotos. A mais importante fonte de dados sobre saneamento básico no país é o Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgotos, publicado anualmente pelo Ministério das Cidades. O Diagnóstico, elaborado com base no Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento – SNIS –, apresenta uma extensa lista de indicadores de performance da qualidade de quase todos os operadores do país, distribuídos em quatro dimensões básicas:

- a) Paralisações nos sistemas de água.
- b) Intermitências nos sistemas de água.
- c) Extravasamentos de esgotos.
- d) Qualidade da água distribuída.

No Brasil, 83,9 % dos domicílios eram atendidos por abastecimento de água via rede geral em 2008 (IBGE, 2009). A região com melhores indicadores é a Sudeste, onde 91,8 % dos domicílios são atendidos, enquanto a região Norte apresenta os números mais baixos: apenas 58,3 % dos domicílios são atendidos. Em termos de esgotamento sanitário, 52,5 % dos domicílios são atendidos por rede coletora de esgotos, enquanto 20,7 % são atendidos por fossa séptica e 26,8 % são atendidos por outro meio ou não são atendidos. A região Sudeste também é a mais favorecida: 80,7 dos domicílios são atendidos por rede coletora, percentual bem acima das demais regiões: Centro-Oeste – 37,6 %; Sul – 33,4 %; Nordeste – 32,1 %; e Norte – 9,5 %.

O Brasil adota dois sistemas de coleta de esgotos – separador e unitário ou combinado (combinação com águas pluviais), este último cada vez menos aceito devido às suas deficiências em comportar as vazões, principalmente em períodos de chuva.

O Diagnóstico dos Serviços de Águas e Esgotos (MINISTÉRIO DAS CIDADES, 2010 e MAGALHÃES JR., 2007) propõem um número significativo de indicadores para o monitoramento das condições de esgotamento sanitário, entre os quais:

- Índice de população atendida por coleta de esgotos (%).
- Índice de população sem banheiro ou sanitário (%).
- Índice de população com instalações adequadas de esgotos (%);.
- Índice de população cujos esgotos são lançados diretamente em rios ou lagos (%).
- Índice de lançamento de esgotos em cursos d’água (m³/dia; l/hab/dia).
- Índice de lançamento de carga orgânica nos cursos d’água (kg DBO₅/dia)¹⁷.
- Índice de lançamento de esgotos industriais nos cursos d’água (m³/dia).

¹⁷ Para o índice de lançamento de carga orgânica nos cursos d’água adota-se o parâmetro tradicional de 54 gramas de DBO₅ por habitante/dia.

- Índice de coleta de esgotos produzidos (%).
- Índice de tratamento de esgotos coletados (%).

Porém, a obtenção das informações necessárias à construção desses indicadores esbarra em alguns problemas, no caso brasileiro:

- Muitos operadores dos serviços de água, principalmente os serviços autônomos municipais, não possuem sistemáticas de monitoramento dos dados.
- Quando monitorados, os dados não são, geralmente, divulgados à população. Muitas vezes, há significativa dificuldade de acesso aos dados, principalmente no caso das companhias estaduais de saneamento (falta de transparência). Não há instrumentos que facilitem o controle externo da qualidade dos dados monitorados (confiabilidade).
- Os cálculos da *população com instalações sanitárias adequadas* são baseados nos dados dos Censos Demográficos do IBGE, sendo considerada a população com instalações sanitárias não compartilhadas com outro domicílio e com escoamento através de fossa séptica ou rede geral de esgoto. Deve-se levar em conta, portanto, os possíveis riscos de erros no levantamento dos dados, já que a diferenciação entre fossas sépticas e fossas negras não é clara no contexto da população.
- Os indicadores não levam em conta o estado de conservação e de funcionamento das instalações sanitárias. A existência de rede geral ou de fossas sépticas não significa, portanto, ausência de contaminação da água por defeitos ou mau estado de conservação das instalações.
- Os dados do IBGE apresentam significativas diferenças para com os dados fornecidos diretamente pelos operadores dos serviços de água e esgotos.
- Dados de coleta de esgotos devem ser acompanhados de dados de *tratamento de esgotos*, pois um aumento na taxa de coleta pode resultar justamente no aumento da poluição devido ao aumento da carga poluente concentrada nos pontos de lançamento. O mesmo pode ser dito da coleta de lixo, cujo aumento da população atendida e do lixo coletado, pode implicar em danos ambientais se o lixo não for adequadamente disposto.

Alguns parâmetros são importantes na gestão dos serviços de esgotamento sanitário, como por exemplo:

- **Coeficiente de Retorno:** é a parcela da água consumida que retorna à rede coletora ou aos cursos d’água na forma de esgotos. É calculado por meio da relação vazão de esgotos/vazão de água. Adota-se, geralmente, um coeficiente de 80 % (0,8). Não deve ser considerada, neste caso, a vazão distribuída na qual não estão deduzidos os volumes de perdas durante a distribuição (vazamentos na rede, etc.). Para evitar tais problemas, é considerado o *volume de água*

micromedido (l/hab/dia). O coeficiente de 80 % deste volume é multiplicado pelos respectivos percentuais de população de cada município atendida por água via rede geral, permitindo a obtenção do volume diário de esgotos gerados.

- **Vazão Doméstica de Esgotos:** esta vazão pode ser calculada pela equação:

Qdméd = Pop. QPC . R / 1000 (m³/dia) ou Qdméd = Pop. QPC . R / 86.400 (l/s)

sendo **Qdméd**: vazão média de esgotos (m³/d ou l/s); **QPC**: consumo *per capita* de água (l/hab/dia); **R**: coeficiente de retorno

Além da coleta, o tratamento dos esgotos é essencial nos processos de gestão dos serviços de saneamento. Coletar os esgotos de uma cidade e despejá-los sem tratameno nos cursos d’água pode ter um efeito devastador nas condições ecológicas e sanitárias das águas. Os esgotos são geralmente tratados nas Estações de Tratamento de Esgotos – o ETE. Para sua construção e dimensionamento são necessárias informações sobre as vazões de esgotos a serem coletadas, as quais dependem do consumo médio de água das residências.

Algumas indústrias têm efluentes particularmente tóxicos e nocivos ao ambiente, como as de produção de fumo, couros e peles (curtumes), construção civil, alimentação, perfumaria, papel e química.

O setor de produção de açúcar e álcool apresenta elevado potencial poluidor devido aos elementos tóxicos presentes na vinhaça aplicada na lavoura, que podem atingir o nível d’água subterrâneo. O setor de papel e celulose apresenta maior potencial poluidor no que se refere aos restos de madeira e de alvejamento de fibras. No setor metalúrgico/ siderúrgico a maior parte da água é utilizada na lavagem e refrigeração de fornos de fundições de metais. Embora emitam pequena quantidade de efluentes líquidos, estes contêm, geralmente, elevadas quantidades de metais pesados.

No setor têxtil, os efluentes apresentam razoável carga de contaminantes, com média de 30 mg/l de DBO e 26 mg/l de DQO, causando odores, elevação da alcalinidade e formação de organometálicos na água. O setor de curtumes gera efluentes com elevadas concentrações de DBO e DQO (matérias orgânicas, sabões, cal, sulfetos, cromo, etc.) e aumentam a alcalinidade da água. Já o setor frigorífico gera efluentes com elevadas concentrações de DBO (800 a 3200 mg/l); resíduos sólidos (15 g/l) e materiais graxos (Pontes, 2.000). Todos os tipos de efluentes que aumentam a DBO e reduzem o oxigênio dissolvido da água são formados por importante percentual de carga orgânica.

A Tabela 5.24. ilustra os tipos de processos ou sistemas de tratamento de esgotos mais comuns no Brasil. As etapas mais comuns incluem o tratamento físico preliminar, onde são empregados filtros e grades, bem como tanques de sedimentação para retirada de areia. No tratamento primário, ocorre a separação de óleos e gorduras, dentre outras substâncias, por decantação, bem como a geração de lodo ativado. O efluente passa por um tanque de aeração onde é agitado e recebe uma injeção de ar. O oxigênio vai alimentar os microorganismos que aceleram a degradação natural dos resíduos orgânicos, compondo o lodo ativado.

Já no tratamento secundário, o efluente é levado a outro decantador, onde o lodo ativado é retirado. No tratamento do lodo, parte volta ao tanque de aeração para aumentar o número de microorganismos ativos. O resto é desidratado e passa por uma série de tratamentos extras.

Tabela 5.24. Processos ou Sistemas de Tratamentos de Esgotos por tipo de Parâmetro de Qualidade	
Poluente	Processo ou Sistema
Sólidos em suspensão	Gradeamento; desarenação; floculação/coagulação/sedimentação; disposição no solo.
Matéria orgânica biodegradável	Lagoas de estabilização; lodos ativados e variações; filtro biológico e variações; tratamento anaeróbio; disposição no solo.
Patogênicos	Lagoas de maturação; disposição no solo; desinfecção com produtos químicos ou com radiação ultravioleta.
Nitrogênio	Nitrificação e desnitrificação biológica; disposição no solo; processos físico-químicos.
Fósforo	Remoção biológica; processos físico-químicos.

Fonte: Von Sperling (1998).

As lagoas aeróbias permitem a decantação de partículas e a oxigenação por meio do contato dos efluentes com o ar (são lagoas rasas). As bacias de aeração também promovem o contato dos efluentes com microorganismos agregados em um lodo ativado. A mistura e a aeração podem ser realizadas por agitadores mecânicos ou injeção de ar ou oxigênio. Outro meio de aeração é por meio de algas fotossintéticas que liberam oxigênio na água. Os microorganismos aeróbios consomem oxigênio e requerem, geralmente, algum dispositivo de aeração.

As lagoas nas quais ocorrem processos de metabolismo aeróbios e anaeróbios (o lodo ativado depositado no leito sofre um processo anaeróbio de digestão devido às condições inadequadas de luz e oxigênio) são chamadas de lagoas mistas ou facultativas. Elas requerem áreas maiores devido ao processo ser mais lento.

Há ainda as lagoas anaeróbias para os casos de poluição crítica e abundância de lodo. Neste caso, os microorganismos anaeróbios, na ausência de oxigênio, degradam por fermentação e hidrólise as substâncias dissolvidas, suspensas ou agregadas, transformando-as em ácidos inorgânicos simples. Outras espécies degradam estes ácidos, liberando gases como metano, sulfídrico e amônia.

Seja nas lagoas de aeração ou nas mistas, o lodo ativado pode ser separado em um tanque de decantação e enviado a filtros para reduzir sua umidade e peso, seguindo, então, para tanques de degradação anaeróbia ou aterros sanitários. Parte do lodo retorna do decantador para a bacia de aeração, visando retroalimentar o processo.

Nos casos de poluição reduzida, os filtros biológicos podem ser mais econômicos São dispositivos semelhantes a filtros de pedras, nos quais são cultivados microorganismos. Os efluentes são despejados no topo e passam lentamente pelo leito filtrante. Na presença dos microorganismos e do ar presente nos poros, ocorre a degradação dos poluentes. O líquido resultante é escoado pela parte inferior do tanque.

O processo de osmose reversa tem ganhado atenção em nível internacional. Baseia-se na utilização de membranas semipermeáveis (poliamida) para a separação dos sólidos dissolvidos das moléculas de água. A água resultante é denominada de água recuperada.

5.4.3. Reuso de Águas Residuárias

A escassez de recursos hídricos e os problemas de poluição hídrica têm levado à crescente aplicação da técnica do reuso das águas residuárias, reduzindo as pressões sobre os mananciais hídricos em termos de quantidade (redução da água captada) e de qualidade (redução dos efluentes poluídos que são lançados).

Em muitos países os esgotos tratados são vendidos na forma de água passível de ser aplicada em usos menos exigentes. Os esgotos tratados também são usados para recarga artificial de aquíferos em países como EUA e Israel., onde cerca de 70% dos efluentes são utilizados na irrigação de 20.000 ha de terras agrícolas. Um dos países pioneiros no reuso da água é a Austrália, onde desde 1897 opera-se um sistema de tratamento por escoamento superficial no solo. Este sistema trata cerca de 250.000 m3/dia de efluentes em 5.000 ha, permitindo a posterior utilização dos campos irrigados como pastagens (CAMPOS *et al.*, 1999). Também em Edimburgo (Escócia) fazendas de esgotos já funcionavam por volta de 1650 e logo se disseminaram pela Inglaterra.

Em Phoenix, Arizona (EUA), tem ocorrido um interessante acordo entre irrigantes e o governo, envolvendo a troca de esgotos fornecidos pela cidade por água potável fornecida pelos agricultores. A cidade ganha cerca de 2.000 m3 de água potável para cada 3.000 m3 de esgotos, que são tratados nas bacias de decantação dos distritos de irrigação. Em El Paso, Texas (EUA), são injetados esgotos altamente tratados em poços subterrâneos, que atingem os aquíferos e atravessam 3 km em dois a quatro anos antes de serem extraídos em poços de abastecimento na cidade (POSTEL, 1992).

Atualmente, países com extrema escassez de água, como no Oriente Médio e norte da África, os governos vêm estabelecendo metas de reutilização da totalidade de seus efluentes domésticos (CAMPOS *et al.*, 1999). No Brasil, o reuso ainda é timidamente aplicado, mas vem crescendo a aplicação de efluentes tratados na agricultura. A maior barreira para reutilizar esgotos tratados é psicológica e, não, técnica. Grandes ganhos podem vir da reutilização em grande escala de esgotos municipais na agricultura.

Há dois tipos básicos de reuso. O reuso direto envolve o uso de águas residuárias recuperadas quando o transporte for realizado diretamente da planta de tratamento até o destino dos efluentes tratados. E o reuso indireto envolve a passagem dos efluentes tratados por um curso d’água natural, superficial ou subterrâneo (METCALF & EDDY, 1991).

O reuso tem diversas vantagens, mas deve ser aplicado com cautela, pois os efluentes tratados podem levar à poluição do solo e das águas superficiais e subterrâneas (por nitratos, por exemplo), se o seu nível de tratamento não for adequado.

Os elfuentes tratados são potencialmente úteis nos seguintes casos (Hespanhol, 2002):

a) Usos Urbanos

- Irrigação de parques e jardins, centros esportivos, etc.
- Reserva de proteção contra incêndios.
- Sistemas decorativos aquáticos (fontes, chafarizes, etc.).
- Descargas sanitárias em banheiros públicos e/ou edifícios comerciais/ industriais.
- Lavagem de veículos de transporte público.

b) Usos Industriais

- Torres de resfriamento e caldeiras.
- Construção civil.
- Irrigação de áreas externas, lavagem de pisos, etc.
- Processos industriais.

c) Usos Agrícolas

Os esgotos tratados podem ser aplicados na agricultura por meio de diferentes técnicas de irrigação: inundação do solo, sulcos, aspersão, irrigação subsuperficial, gotejamento. A irrigação deve ser aplicada em cultivos que não exigem água de qualidade superior, e que sejam atendidos pela qualidade dos efluentes tratados. A Organização Mundial da Saúde – OMS – estabelece critérios de qualidade para a aplicação de efluentes tratados na irrigação, com base no número de microorganismos presentes, dentre os quais nemátodas, helmintos, coliformes fecais, bactérias, vírus e protozoários.

Em Israel e outros países, há experiências de armazenamento de águas residuárias e de esgotos, que são tratados biologicamente em lagoas de decantação e utilizados para irrigação por gotejamento em cultivos que não são comidos crus.

Pesquisadores têm mostrado que, com um suficiente tempo de armazenagem, o tratamento aeróbio e anaeróbio recebido nas lagoas de decantação pode eliminar os constituintes mais nocivos dos esgotos, como bactérias, vírus e vermes parasitas, e reduzir muito a matéria orgânica presente. Estes projetos fazem algo em que os modernos esquemas de engenharia hidráulica são falhos: tratar os esgotos como recurso que pode ser usado produtivamente e, não, como um rejeito que deve ser jogado fora. As águas tratadas e de boa qualidade são geralmente utilizadas para usos

menos exigentes no mundo e a irrigação com águas residuárias e esgotos parcialmente tratados pode minimizar este uso irracional.

Um problema dessa técnica é que os esgotos são gerados o ano inteiro, enquanto a irrigação pode ser sazonal. Meios adequados de estocar os esgotos são necessários para permitir os máximos benefícios para a irrigação e evitar que os esgotos sejam liberados para o ambiente. Também deve-se evitar que níveis inadequados de metais pesados sejam liberados junto com os esgotos usados na irrigação. Deve-se, neste caso, evitar que efluentes industriais não tratados, que frequentemente contêm metais pesados, sejam misturados aos esgotos domésticos.

Uma das técnicas de reuso é a disposição no solo dos esgotos. A técnica pode ser usada de três maneiras: infiltração rápida (solos com elevada capacidade de infiltração), infiltração-percolação (usada principalmente para irrigação) e escoamento superficial. A disposição no solo contribui para a produção agrícola, o tratamento dos esgotos (pela percolação) e a recarga dos aquíferos.

O esgoto é lançado em parcelas do solo, com declividade reduzida e vegetadas, sendo o excedente recolhido na parte inferior, por meio de canaletas ou calhas. No percurso, o esgoto é tratado na interação com o solo e a vegetação. No caso da técnica do escoamento superficial, a vegetação deve ser perene, tolerante a elevadas taxas de nutrientes e adaptada a longos períodos de imersão. O método apresenta eficiência elevada na remoção de matéria orgânica e nutriente, mas a remoção de organismos patogênicos ainda é limitada.

5.5. Impactos Ambientais em Ambientes Hídricos

Os impactos humanos nas águas podem ser de caráter quantitativo ou qualitativo. A seguir são listadas as principais categorias de intervenções humanas e seus respectivos impactos nas águas e ambientes hídricos.

5.5.1. Impactos no Nível d'água Subterrâneo

A extração excessiva de água subterrânea provoca o rebaixamento do nível d'água subterrâneo (fenômeno na histerese). Este rebaixamento também pode advir dos processos de urbanização, que provocam a redução das taxas de infiltração no solo e, consequentemente, de recarga dos aquíferos.

Seja qual for a causa, o rebaixamento pode levar à extinção de nascentes, à redução de vazões superficiais, à formação de vales secos, à compactação e subsidência do solo (devido à falta da sustentação que a água fornece ao solo), e a intrusões salinas nas áreas litorâneas (já que a água salgada é mais densa do que a água doce, penetrando nos aquíferos à medida que a água doce vai sendo extraída).

Um bom exemplo dos impactos devidos à superexploração de água subterrânea pode ser encontrado na cidade do México (México), onde o nível freático sofreu

fortes impactos ao longo dos séculos. Como consequência, o centro da cidade sofre uma subsidência de cerca de 20 cm por ano, tendo sofrido um rebaixamento de 7,5 m desde 1950 (CLARKE & KING, 2005). Estes autores também citam outros casos importantes de impactos no nível freático:

- Na Arábia Saudita, 75 % da água utilizada são subterrâneas, mas prevê-se que os níveis freáticos estarão esgotados em 50 anos, principalmente devido à irrigação dos desertos. Causa espanto o fato de a Arábia Saudita ser exportadora de trigo desde 1984.
- Os níveis freáticos da costa da Líbia, no Mediterrâneo, foram tão explorados que baixaram a um ponto de facilitar a invasão de águas salgadas tornando a água subterrânea salobra.
- Os níveis freáticos da capital chinesa, Pequim, estão baixando em torno de dois metros por ano e 1/3 dos poços da cidade já secaram.

5.5.2. Saturação do Solo e Elevação do Nível Freático

O homem também pode impactar as águas subterrâneas pelo efeito contrário ao do tópico anterior, ou seja, aumentando as reservas hídricas dos aquíferos. Este fato pode ocorrer por irrigação excessiva ou recargas artificiais, que visam propositalmente elevar a recarga dos aquíferos. Apesar de este processo gerar impactos positivos, como o aumento da disponibilidade hídrica, também pode gerar efeitos adversos, como a poluição dos aquíferos por água sem os padrões de qualidade exigidos, e também a salinização do solo devido à evaporação elevada das águas próximas à superfície.

5.5.3. Urbanização

A urbanização tem efeitos diretos e indiretos na disponibilidade e qualidade das águas. Dentre os impactos podem ser citados aqueles derivados da impermeabilização das superfícies. A impermeabilização provoca a redução das taxas de infiltração, o que pode levar à redução da recarga dos aquíferos, ao rebaixamento do nível d'água subterrâneo e à redução das vazões dos cursos d'água perenes (escoamento de base).

Com as superfícies impermeabilizadas também ocorre a tendência do aumento da quantidade e velocidade do escoamento superficial, já que não há obstáculos que reduzam a velocidade e favoreçam a infiltração. O aumento do fluxo que chega aos canais pode levar à redução do tempo de concentração dos fluxos, ao aumento dos picos de cheia e sua antecipação no tempo. Como consequências, podem ocorrer inundações (Figura 5.5.) e o aumento das taxas de erosão fluvial. A própria redução da rugosidade natural do solo leva ao aumento da velocidade do escoamento e de seu poder erosivo.

FIGURA 5.5.
Inundação em Área Urbana¹⁸



Em termos de qualidade da água, o aumento do fluxo superficial em áreas urbanas pode levar ao maior escoamento de poluentes urbanos e à poluição das águas por metais pesados, óleos e graxas, sólidos em suspensão, dentre outros parâmetros. Os efluentes pluviais podem ser tão ou mais poluentes e tóxicos do que os esgotos domésticos em áreas urbanas. Porém, não são tão focados nas políticas de saneamento como os esgotos cloacais.

O modelo de urbanização vigente em grande parte dos países também provoca impactos diretos nos cursos d'água que cortam as cidades, processo este que tem raízes históricas. No século XIX, o urbanismo europeu se caracterizava como uma corrente disciplinadora do espaço construído, buscando organizar, requalificar e sanear as cidades. Desde então, uma concepção higienista, ordenadora e estética passa a nortear a dinâmica das cidades (MACEDO, 2009). Nesse contexto, o sanitarianismo clássico higienista elegeu como solução saneadora, em relação aos problemas de inundações e de saúde pública, a implantação de obras estruturais nos cursos d'água, principalmente a canalização e a retificação de cursos d'água. O objetivo era viabilizar o sistema viário com as avenidas sanitárias e a expansão imobiliária nas cidades (Figura 5.6.). Porém, estes benefícios viários e imobiliários não foram acompanhados por benefícios ecológicos e hidrológicos.

¹⁸ Fotografia disponível em: <http://4.bp.blogspot.com/_glyLfBk9Cic/R84AYe6Ck0I/AAAAAAAAAOI/X8RAAdla1mI/s400/enchente-centro2.jpg>.

FIGURA 5.6.
Rio Tietê Canalizado (São Paulo)¹⁹



A canalização realmente acelera os fluxos fluviais, pois reduz ou acaba com as rugosidades naturais que freiam os fluxos nos períodos de cheia. Este processo tem o lado positivo de beneficiar a população e a cidade como um todo, ao reduzir os riscos de inundações, já que a água flui com rapidez e deixa a cidade em menos tempo. Porém, a canalização elimina os meandros dos rios, que possuem funções bem determinadas na dissipação da energia dos fluxos fluviais. Os meandros equilibram o balanço energético das águas ao servirem como mecanismos de criação de células de circulação secundárias e aumento do percurso da água nos canais. Com a retificação e a canalização, a água flui mais rápida e com mais energia erosiva, podendo trazer problemas de erosão acelerada à jusante dos trechos canalizados.

A canalização também homogeneíza os fluxos e os padrões hidrogeomorfológicos, acabando com a diferenciação de linhas de fluxo que marcam os canais naturais. A impermeabilização das margens e leito dos rios urbanos acaba cortando as trocas hídricas entre os canais e os meios saturado e insaturado dos solos marginais. Como consequência, os canais não são alimentados por água que flui do nível freático ao longo do seu percurso. Os impactos se estendem à biota aquática e à eliminação ou degradação de *habitats* físicos, já que os organismos não se adaptam facilmente a condições tão artificiais de cimento e concreto.

¹⁹ Fotografia disponível em: <[http://1.bp.blogspot.com/_I_bABiHcaBg/Sw14ZYIYYOI/AAAAAAAAAQLU/2dd0dqmGakc/s1600/S%C3%A3o+Paulo-SP+24-11-09+\(Petria+Chaves\).jpg](http://1.bp.blogspot.com/_I_bABiHcaBg/Sw14ZYIYYOI/AAAAAAAAAQLU/2dd0dqmGakc/s1600/S%C3%A3o+Paulo-SP+24-11-09+(Petria+Chaves).jpg)>.

Como agravante do processo histórico de canalização dos cursos d'água urbanos nas grandes cidades do mundo, a partir do século XIX, os rios passaram a receber os efluentes domésticos e industriais *in natura*, transformando-se em esgotos a céu aberto. Com a poluição, os rios tornaram-se focos de doenças. Alguns exemplos são ilustrativos de situações críticas. O Rio Tâmisa, em Londres (Inglaterra), exalava tal odor devido à poluição que obrigou por muitas vezes a interrupção das sessões do Parlamento Britânico (HOBBSAWM, 2003).

A lógica das intervenções estruturais nos cursos d'água urbanos passou a ser mais intensamente questionada pelos urbanistas e ambientalistas em alguns países a partir do final do século XX. Desde os anos 1980 vem ganhando força a lógica da restauração dos cursos d'água urbanos, como será abordado no tópico seguinte.

Outro foco de impactos urbanos advém da remoção da vegetação quando da expansão urbana. Há, por consequência, a redução das taxas de infiltração, o aumento da quantidade e velocidade do escoamento superficial e das taxas de erosão. O adensamento de construções urbanas também pode gerar o efeito ilha de calor, devido ao aumento das temperaturas e à elevação das taxas de evaporação. Como resultado, aumentam as taxas de evapotranspiração.

Se, por um lado, a urbanização tende a reduzir a densidade de drenagem natural em função da ocupação e recobrimento de canais por obras estruturais, por outro lado tende a aumentar a densidade de drenagem urbana gerada pelas chuvas (drenagem pluvial). As bacias de drenagem pluvial são, portanto, temporárias, mas devem ser igualmente tratadas com importância. Se não geridas com responsabilidade à luz dos processos de ocupação, podem trazer sérios problemas de inundações, erosão e poluição.

Várias medidas de minimização dos impactos ambientais da urbanização são apontadas na literatura, destacando-se:

- Fiscalização e monitoramento de obras e intervenções, como loteamentos, ocupações, parques, etc.
- Aplicação da legislação ambiental urbana, incluindo leis orgânicas, planos diretores, entre outros. A ocupação de Áreas de Preservação Permanente deve ser fiscalizada de acordo com as exigências legais.
- Revegetação de áreas ainda não ocupadas por construções.
- Criação de reservatórios de acumulação temporária das águas das chuvas, como bacias de retenção pluvial.
- Utilização racional das águas pluviais, com coleta, armazenamento, tratamento e utilização em usos menos exigentes. Estes usos podem incluir a irrigação de jardins e pátios, bem como em descargas sanitária.

A recarga artificial de aquíferos com águas pluviais é uma solução já aplicada em diversos países. Grande parte da civilização urbana moderna percebe as águas pluviais

como um inimigo, devido aos processos de inundações e de poluição. Portanto, há uma cultura de rejeição em relação às águas de chuva, principalmente nas cidades que vêm perdendo a guerra contra as enchentes. A coleta da água de chuva, que foi praticada intensamente por romanos, astecas e incas, hoje em dia está limitada a situações de carência de água extrema.

Os sistemas de coleta da água de chuva podem utilizar telhados e até áreas asfaltadas. Combinando água subterrânea, pluvial e fluvial, pode-se reduzir a forte demanda sobre as áreas rurais de captação, ao mesmo tempo em que contribui para o controle das inundações urbanas. O uso de água tratada em descargas sanitárias desperdiça água de qualidade, sabendo-se que em muitas realidades o período chuvoso facilitaria o uso de águas pluviais em vários meses do ano. O uso das águas pluviais nas cidades exige instrumentos legais que obriguem os cidadãos a captar as águas de chuva. Sistemas de telhados específicos podem ser exigidos em certas situações.

5.5.4. Agropecuária

A irrigação é o uso que mais utiliza água no mundo (em torno de 70 % de toda a água utilizada). É também o uso que responde pelas maiores perdas de água, fato explicado pela evaporação e pela infiltração. Pode-se deduzir, portanto, que a irrigação, quando não gerida e planejada, interfere seriamente nas vazões fluviais, podendo baixar os níveis d'água, comprometer a dinâmica hidrossedimentar e provocar o assoreamento dos canais pela redução da capacidade de transporte.

Certas técnicas de irrigação como a aspersão (Figura 5.7.) são ainda piores ao provocarem maiores perdas de água por evaporação, fato agravado em áreas áridas, semiáridas ou tropicais secas. Um bom exemplo da superexploração de água para irrigação é o caso do Mar de Aral, no Cazaquistão. Desde 1957 houve uma redução de 50 % da sua superfície e de 66 % do volume de água. A irrigação de 7,5 milhões de ha de algodão levou ao desvio de dois dos principais rios formadores do Mar de Aral (rios Amu e Syr), provocando efeitos devastadores (CLARKE & KING, 2005). As águas do Rio Nilo também são tão exploradas para irrigação que ele raramente consegue chegar ao Mar Mediterrâneo (op. Cit.).

FIGURA 5.7.
Irrigação por Aspersão²⁰



Ao provocar a elevação dos volumes de água infiltrados no solo, a irrigação aumenta e, conseqüentemente, as taxas de umidade e de armazenamento hídrico do solo. Porém, em áreas com elevada evapotranspiração (ETP), grandes volumes de água presentes nos poros (meio insaturado) ou no nível freático, que pode elevar-se próximo à superfície (meio saturado), evaporam continuamente, provocando o efeito da salinização do solo. Grandes quantidades de sais presentes na água vão se acumulando na superfície do solo enquanto a água evapora. Não elevar o nível freático sem controle é, portanto, um procedimento adequado. Quanto maior for a eficiência da irrigação, menor será a lâmina de água aplicada e, como conseqüência, menor será a quantidade de sal conduzido para a área irrigada. O controle básico da salinização é a existência de lixiviação e drenagem natural ou artificial.

Em termos de qualidade da água, a agropecuária explica o fato de o nitrato ser o principal poluente das águas subterrâneas das zonas rurais no Brasil, o qual é proveniente principalmente da lixiviação de fertilizantes orgânicos ou inorgânicos. O uso indiscriminado de agroquímicos (fertilizantes, inseticidas, etc.) é o principal causador de impactos na qualidade das águas no meio rural. Esgotos e dejetos orgânicos de fazendas, pocilgas, abatedouros, curtumes e usinas de açúcar/álcool também apresentam elevado potencial de poluição.

²⁰ Fotografia disponível no seguinte endereço eletrônico: <<http://www.aceav.pt/blogs/rogerfernandes/Lists/Fotografias/AGRICULTURA/Irriga%C3%A7%C3%A3o.gif>>.

Finalmente cabe destacar que a agropecuária é o principal foco de pressões humanas responsáveis por desmatamentos. A remoção da cobertura vegetal é o primeiro passo para o surgimento de erosão acelerada e, conseqüentemente, o assoreamento de canais fluviais.

5.5.5. Usos Industriais

Os principais impactos dos usos industriais da água são os relativos à poluição de águas superficiais e subterrâneas, e de ambientes hídricos. Destacam-se como poluentes os dejetos químicos e orgânicos. Os metais pesados são parâmetros associados a certos usos industriais e podem ser muito tóxicos ao homem e aos animais. Deve-se também destacar a poluição térmica gerada por efluentes oriundos do resfriamento de máquinas e equipamentos.

Dos rejeitos líquidos ou sólidos da mineração, os mais perigosos são produzidos pelas minas de carvão e de metais. Nas minas de metais, o principal problema decorre da dissolução de metais pesados nos processos de lavra e/ou beneficiamento de minérios, além dos floculantes orgânicos utilizados.

5.5.6. Construção de Reservatórios Hídricos Artificiais

Os reservatórios artificiais são construídos para diferentes objetivos e, no caso brasileiro, são comuns os reservatórios para geração de energia hidrelétrica (Figura 5.8).

FIGURAS 5.8.
Represa para Geração de Energia²¹



²¹ Fotografia disponível no seguinte endereço eletrônico: <http://mapx.map.vgd.gov.lv/geo3/Ukr/_Izmantotie%20Atteli/Arzemes/Itaipu.jpg>.

Podemos destacar alguns dos impactos mais comuns gerados pelos represamentos:

- Assoreamento do reservatório e à montante do mesmo, devido à perda de energia do fluxo.
- Erosão à jusante do reservatório, devido ao aumento da energia do fluxo a partir da retenção de sedimentos. A redução da carga sedimentar à jusante aumenta a energia do fluxo. A jusante de barragens é comum que o leito fluvial seja constituído de material grosseiro (cascalho, seixos). Isto se deve ao fato do fluxo remover o material mais fino, como a areia. A partir do momento em que se forma este tipo de armadura ou encouraçamento no leito, aumentando a resistência à erosão, estabelece-se uma nova condição de equilíbrio (SILVA & WILSON JR., 2005).
- Alteração no regime de cheias e vazantes dos cursos d'água, podendo impactar a dinâmica hidrossedimentar e a formação das planícies de inundação.
- Estratificação térmica: quanto maior o reservatório maior a possibilidade de formação de camadas com temperaturas homogêneas. Pode haver o resfriamento e a redução do O dissolvido em águas mais profundas (para cada 1°C há redução de 2 %). A estratificação pode gerar mudanças na dinâmica dos fluxos internos diários e sazonais em função das temperaturas.
- Eutrofização no reservatório devido à superfertilização por esgotos, efluentes industriais ou agrícolas. Os reservatórios funcionam como bacias de retenção destes nutrientes que servem de alimento a microorganismos e algas.
- Modificações nos ciclos biogeoquímicos: retenção de P (precipitação de fosfato férrico em sedimentos devido à anulação da reoxigenação) e exportação de N à jusante (pode levar à eutrofização). Também pode ocorrer aumento na concentração de matéria orgânica em reservatórios eutróficos.
- Alterações ecológicas: reprodução da fauna e flora.

5.6. Proteção e Recuperação de Ambientes Hídricos

No intuito de buscar modos de gestão mais eficientes e alternativas técnicas para a economia da água, diversas experiências internacionais vêm aplicando medidas neste sentido:

- Instalação de dispositivos econômicos de água na irrigação, com técnicas mais eficientes, como a irrigação por gotejamento.
- Instalação de dispositivos de economia de água nos vasos sanitários; em vários países já ocorrem experiências de substituição de instalações sanitárias por modelos mais econômicos.
- Captação e utilização de águas pluviais.

As águas pluviais devem ser coletadas, armazenadas e utilizadas em usos menos exigentes e não potáveis. Estruturas adequadas instaladas em telhados, por exemplo,

podem permitir o uso em descargas domésticas e o armazenamento em bacias de captação em zonas rurais e urbanas pode permitir a coleta de água e o controle de inundações e erosão acelerada. As águas pluviais podem ser utilizadas também para recarga artificial de aquíferos, como ocorre na Espanha:

- Instalação de dispositivos de economia de água, detecção e consertos de vazamentos na rede de distribuição.
- Pagamento, redução de preços, políticas de preços diferenciadas e outros benefícios financeiros a quem economiza água.
- Programas educativos visando a utilização racional da água e sua economia.
- Fiscalização e aplicação de instrumentos de comando e controle (legislação).

A proteção e a recuperação de ambientes hídricos passam, no caso brasileiro e da maioria dos países subdesenvolvidos e em desenvolvimento, pela universalização dos serviços de saneamento. A coleta e o tratamento de esgotos são processos essenciais na busca de redução da poluição das águas e combate às doenças de transmissão por meio da água.

Especificamente no caso dos ambientes fluviais, as técnicas de proteção e recuperação de seus ambientes envolvem, em grande parte, medidas válidas para outros ambientes. Entretanto, algumas medidas e técnicas possuem aplicabilidade específica para margens e leitos fluviais. Estas são baseadas na proteção destes ambientes via equilíbrio entre a força aplicada pelo fluxo e a resistência oferecida pelos materiais. O aumento da resistência e/ou a redução da energia do fluxo tornam-se, muitas vezes, necessários ao controle da erosão fluvial em áreas de desequilíbrio. A vegetação tem um papel fundamental neste processo, mas outras técnicas podem ser importantes como estruturas dissipadoras de energia ou modificadoras da direção de fluxo.

a) Restauração de cursos d'água

Desde os anos 1980 procedimentos de restauração de cursos d'água baseados no consórcio de obras estruturais e não estruturais vem sendo defendidos e aplicados por agências públicas nos EUA e Inglaterra. A lógica da restauração questiona a tradicional abordagem de intervenções de cursos d'água com base em obras exclusivamente estruturais, como a canalização. Além de focar nos problemas de ordem hidráulica, os programas de restauração buscam, geralmente, integrar as questões ecológicas e sociais dentro de uma perspectiva ambiental que não separa os cursos d'água da população. As questões viárias e

Citando várias fontes, Macedo (2009) chama a atenção para o conceito de restauração:

A United Kingdom Ecological Restoration Society (Sociedade para Restauração Ecológica do Reino Unido) define restauração como “o processo de alteração intencional de um local para sua forma natural. A meta é simular a estrutura, a função, a diversidade e a dinâmica de um ecossistema específico, de acordo com as suas características históricas”

(Riley, 1998). Este conceito corrobora as idéias de Kauffman, et al. (1997), Wade, Large & de Wall (1998) e Benhardt & Palmer (2007). Outro interessante viés adiciona o componente humano e social ao conceito: está intrínseco na restauração o processo de compensação intencional pelos danos antrópicos à biodiversidade e dinâmica do ecossistema original através de processos e intervenções que levem a reestabilizar a relação de sustentabilidade e saúde entre o natural e o cultural (Riley, 1998).

Citando Benhardt *et al.* (2005), Macedo (op. cit.) também chama a atenção para os objetivos mais comuns dos programas de restauração de cursos d'água:

- melhorar a qualidade hídrica;
- gerenciar as zonas ripárias;
- aumentar os *habitats* dentro do rio;
- propiciar a passagem de peixes; e
- estabilizar as margens.

Outras passagens do trabalho de Macedo (2009) auxiliam a compreender os estudos de restauração de cursos d'água:

Deve-se ressaltar que retornar um curso d'água à sua forma natural ou semi-natural é um grande desafio, que geralmente não é alcançado. Em primeiro lugar, conhecer a situação pré-distúrbio de um sistema fluvial urbano é muito difícil, considerando que o processo de urbanização intensiva em muitas cidades possui mais de 200 anos. Em segundo lugar, quando esta condição é conhecida, a atual dinâmica hidrológica não permite tal adequação, sobretudo por causa de barramentos à montante e do uso do solo atual (Wade, Large & de Wall, 1998).

Deve-se também levar em consideração que alguns cursos d'água estão tão modificados, que é economicamente inviável a sua restauração (Gregory, 2006). Este é caso do rio Chicago, nos Estados Unidos (Riley, 1998) ou do próprio ribeirão Arrudas, em Belo Horizonte. Entretanto, deve-se ressaltar a importância da restauração de pequenos cursos d'água, pois ao longo do tempo isto poderá viabilizar economicamente intervenções em grandes rios altamente impactados.

Apesar da grande importância da execução de programas de restauração de cursos d'água em áreas urbanas, a maior parte destes é implantada em áreas menos populosas, como demonstrado por Benhardt & Palmer (2007) em seus estudos em Maryland e na Carolina do Norte/EUA.

Mesmo com estas dificuldades, nos últimos 20 anos, incontáveis programas de restauração de cursos d'água foram implementados, principalmente nos Estados Unidos, na Europa e na Austrália. Em um

recente levantamento realizado pelo *U.S. National River Restoration Science Synthesis* (NRRSS), com todos os programas de restauração de cursos d'água executados nos Estados Unidos que se tem registro, nota-se um crescimento exponencial destes na última década. Foram relatados 37.099 programas (até julho/2004), alguns com intervenções em poucos metros, e outros chegando a quilômetros (Benhardt *et al.*, 2005).

Finalmente, cabe destacar que, no Brasil, o Programa Drenurbs²² é um dos melhores exemplos de programas de restauração de cursos d'água. Os seus objetivos ilustram as principais metas da restauração de rios urbanos para o contexto brasileiro:

- Melhoria da qualidade da água, através da cobertura total dos serviços sanitários (coleta de esgoto e lixo).
- Controle das inundações, através da manutenção de áreas permeáveis adjacentes ao rio (criação de parques lineares) e da construção de barragens de contenção/retenção
- Estabilização das margens para cessar a produção de sedimentos.
- Integração do rio à paisagem urbana.
- Retirada da população da área de risco.
- Educação (conscientização) ambiental (PBH, 2003).

b) Erosão acelerada

O controle da erosão é um dos pilares do controle das perdas de água. Quando o solo é perdido por erosão, também se perde água que infiltraria no solo, passando a escoar superficialmente ou evaporar. Pode-se compreender o fenômeno da erosão, conceituando-a como um conjunto de processos responsáveis pela desagregação, remoção e deposição, lenta ou acelerada, dos materiais rochosos, solos ou depósitos superficiais inconsolidados. Como o próprio conceito demonstra, não é apenas um processo que na maioria das vezes atua no mecanismo da erosão, mas uma associação dos mesmos.

A erosão ocorre como função da relação entre a força trativa do fluido e a resistência do material. Uma força trativa crítica exercida pelo fluido na direção do movimento é requerida para deslocar partículas e manter tal movimento. Tal força é denominada força trativa crítica de **Du Boys**, e é expressa pela equação:

$$F_c = p \cdot H \cdot S$$

sendo **p**: densidade do líquido, **H**: distância crítica e **S**: declividade.

²² Drenurbs – Programa de Recuperação Ambiental e Saneamento dos Fundos de Vale e dos Córregos em Leito Natural de Belo Horizonte foi concebido pela Prefeitura de Belo Horizonte (2003). O Programa propõe o tratamento integrado dos problemas sanitários, ambientais e sociais nas bacias hidrográficas cujos cursos d'água, embora degradados pela poluição e pela invasão de suas margens, ainda se conservem em seus leitos naturais, ou não canalizados (PBH, 2003).

Partículas menores exigem maiores velocidades críticas de erosão devido às forças de coesão entre elas. Apesar disto, a textura siltosa e arenosa fina favorece a erosão, já que não apresenta a coesão das argilas nem a permeabilidade e diâmetro das areias média/grossa. A remoção das partículas envolve um predomínio das forças cisalhantes aplicadas sobre o material pela água, sobre as forças de resistência deste material, e este desequilíbrio pode ser impulsionado por causas naturais ou antrópicas.

Fatores que favorecem o aumento desequilibrado do volume e velocidade do escoamento superficial (devido à redução da infiltração, redução da rugosidade da superfície, redução de obstáculos interceptadores do fluxo, elevação das declividades, etc.) ou do escoamento subsuperficial (elevação anormal da infiltração, fortes oscilações do lençol freático, elevações das declividades, etc.) estão no cerne do problema da erosão.

Estudos demonstram que os principais fatores do solo ou rocha condicionantes da erosão são:

- Estrutura do solo: boa estruturação favorece a estabilidade dos agregados.
- Coesão das partículas: função do teor de argilas, matéria orgânica e óxidos de Fe e Al, presença de raízes, nível de tensão capilar e nível de compactação do solo.

É consensual que a vegetação impede ou reduz a erosão subsuperficial acelerada através da estruturação do solo e da redução da velocidade do fluxo pelas raízes. Outro aspecto claro é a proteção da superfície do solo pela vegetação contra os efeitos do impacto direto das gotas de chuva (salpicamento).

O erro mais comum no monitoramento da erosão é a desconsideração da escala. Pequenas parcelas e tanques coletores fornecem maiores valores de perdas por unidade de área, já que cada partícula erodida é coletada e medida. Em bacias experimentais, por exemplo, somente os sedimentos que passam pela seção de referência (ou outro ponto de monitoramento) são computados, deixando de lado logicamente, todos os sedimentos erodidos que não saíram da bacia, mas ficaram armazenados, temporariamente ou não, nas encostas, planícies e outros subsistemas da bacia. Em condições reais de campo, é comum que 90 a 95 % dos sedimentos sejam redepositados na bacia. Consequentemente, as perdas sedimentares monitoradas em bacias são apenas uma pequena parcela das perdas monitoradas em parcelas experimentais (STOCKING, 1994).

c) Desertificação

O tema desertificação vem sendo discutido pela comunidade internacional, desde 1997, quando da realização, em Nairobi (Quênia), da Conferência Internacional das Nações Unidas para o Combate à Desertificação. A partir desta conferência foi criado o Plano de Ação de Combate à Desertificação – PACD –, que visava desenvolver ações em âmbito mundial, com a adesão voluntária dos países que participaram da conferência.

Desertificação é a degradação dos solos nas zonas áridas, semiáridas e subúmidas secas resultantes de fatores naturais (tais como as variações climáticas) e as atividades humanas, acompanhada da degradação das águas, da fauna, da flora e das condições

de vida humana (CNUMAD, 1992). São consideradas zonas áridas, semiáridas e subúmidas secas todas as áreas (com exceção das polares e subpolares), que a razão de precipitação anual e evapotranspiração potencial está compreendida entre 0,05 e 0,65. Portanto, a desertificação é a degradação das terras secas, implicando na perda da produtividade biológica e econômica das terras agrícolas e das áreas de matas nativas devido às variabilidades climáticas e atividades humanas.

No Brasil, segundo definição contida na Convenção de Combate à Desertificação das Nações Unidas, a área susceptível ao processo de desertificação encontra-se situada na região semiárida, que representa 18% do território nacional e abriga 29% da população do País, numa extensão de 858.000 km². Os principais núcleos de desertificação são: Gilbués-PI, Irauçuba-CE, Seridó-RN e Cabrobó-PE. Ali vivem 18,5 milhões de habitantes, sendo que 8,6 milhões pertencem à zona rural, caracterizada por alta vulnerabilidade. Estas pessoas estão entre as mais pobres da região, com índices de qualidade de vida muito abaixo da média nacional. Fora do semiárido, estão localizadas, também, algumas regiões inseridas no âmbito da aplicação da Convenção. São aquelas que se encontram no Polígono das Secas, com extensão estimada de 1.083.000 km², incluindo municípios do norte de Minas Gerais e Espírito Santo. A pobreza é reconhecida como um dos principais fatores associados à desertificação.

A Convenção também conceitua seca como um fenômeno que ocorre naturalmente quando a precipitação registrada é significativamente inferior aos valores normais, provocando um sério desequilíbrio hídrico que afeta negativamente os sistemas de produção dependentes dos recursos da terra (Convenção das Nações Unidas de Combate à Desertificação, 1994).

d) O fenômeno da erosão hídrica superficial

Erosão é o processo de retirada de partículas do solo por agentes como a água e o vento. Entre os fatores que condicionam a erosão estão os níveis de precipitação e a topografia, já que quanto mais íngreme a topografia maiores os riscos de erosão acelerada. Outros fatores importantes são os de caráter pedológico, ou seja, aqueles que determinam as características dos solos. A estrutura depende da presença de elementos agregantes como argilas, matéria orgânica, óxidos de Fe e Al, sendo a estrutura granular a mais propensa à erosão, já que os grânulos são a estrutura que mais se aproximam da esfera. Devido à estrutura granular em pequenos agregados, os latossolos, ricos em óxidos de Fe e Al (solos mais velhos), apresentam maior erodibilidade, fato minimizado pela ocorrência predominante destes solos em topografias suavizadas.

Em termos de textura, os solos arenosos são menos coesos e geralmente menos resistentes à erosão. Apresentam menor fertilidade e mais baixa capacidade de retenção de umidade. Devem receber frequentemente suplementação de água e fertilizantes. A adição de matéria orgânica melhora sua capacidade de retenção de água e nutrientes.

A permeabilidade é a habilidade do solo ou rocha de transmitir água; sendo a propriedade do material de se deixar atravessar pela água. Materiais muito porosos, como a argila,

não são muito permeáveis devido à elevada superfície específica dos grãos e às cargas iônicas dos minerais. A porosidade e a permeabilidade são inversamente proporcionais.

O teor de umidade do solo pode ser expresso pela equação:

$$Tu=Va/Vt$$

sendo **Va**: volume de água do solo; medição: **Vt** :pesagem (peso úmido - peso seco\peso seco), sonda de nêutrons; a **Tu** varia, geralmente, de 25 a 60 % do volume do solo em saturação

O conteúdo de matéria orgânica no solo influencia na estrutura (estabilidade), na porosidade (reduz porosidade capilar), na permeabilidade e na retenção de umidade. A matéria orgânica retém de duas a três vezes o seu peso em água (BERTONU & NETO, 1985). Além do seu papel retentor de umidade a matéria orgânica é importante nos seguintes processos:

- Agregação de partículas, formando ou melhorando a estrutura do solo, facilitando o fluxo de ar e retenção de água.
- Geração de cargas nas superfícies dos colóides. O aumento do pH resultante da calagem gera cargas negativas que aumentam a capacidade de troca catiônica (CTC) do solo²³. O abaixamento do pH gera cargas positivas.
- Fonte de suprimento de nutrientes às plantas.

A matéria orgânica está presente no solo em três reservatórios denominados:

- **Fração Lável ou Prontamente Disponível (LAB):** é a fração sujeita ao ataque imediato de microorganismos, constituída de folhas, caules e raízes, a biomassa microbiana e também o material resistente à degradação.
- **Fração Fisicamente Protegida (FFP):** fração da MO associada com os agregados do solo, estando protegida em seu interior e sendo inacessível ao ataque imediato de microorganismos, em condições de solo não perturbados. Sua estabilidade é ilimitada e o seu tempo de residência no solo é de 25 a 100 anos.
- **Fração Quimicamente Protegida (FQP):** compreende a fração da MO em alto estágio de humificação, apresentando interações coloidais ou moleculares com os minerais do solo, o que lhe confere alta estabilidade. O tamanho dessa fração ou reservatório é controlado pela textura e mineralogia do solo e seu tempo de residência é acima de 1000 anos.

A perda (mineralização) da matéria orgânica do solo está associada à destruição da proteção física (quebra da estrutura dos agregados) causada pela ação dos implementos usados nas operações de preparo (derrubada, aração, gradagem, nivelamento, etc.).

23 Capacidade de Troca Catiônica (CTC): refere-se à soma das cargas negativas na superfície das argilas e da matéria orgânica. As cargas negativas têm a capacidade de adsorver íons com cargas opostas (cátions): Ca2+, Mg2+, K+, H+, etc.

Podem ser destacados os seguintes processos erosivos:

• **Salpicamento**

O saplicamento resulta do impacto das gotas no solo (efeito *splash*). Representa o primeiro impacto erosivo das águas pluviais no contato com a superfície. É o efeito do choque das gotas de chuva contra o solo ou rocha exposta e é função direta da energia cinética da chuva ($mv^2/2$). Como não há transporte, não é um processo erosivo, mas, sim, um processo de denudação, meteorização ou desgaste.

A erosividade das chuvas é determinada por sua energia cinética²⁴ que, por sua vez, é função da sua intensidade. A intensidade é função da duração da chuva e da velocidade, tamanho e massa das gotas, como mostra a fórmula a seguir:

$$\textit{Energia cinética da chuva: } mv^2\backslash 2 \text{ (joule\mm\m}^2\text{)}$$

sendo **m**: massa da gota e **v**: velocidade da gota

Portanto, suas consequências varia com a massa da gota que, por sua vez, varia com a intensidade da chuva e com o diâmetro da gota.

• **Escoamento difuso ou laminar**

O escoamento difuso é considerado o escoamento de transição para o fluxo concentrado. Acontesse na forma de uma rede de microcanais interconectados que ocorre logo após o início do escoamento superficial. Ao contrário do que se pensa o escoamento laminar também apresenta poder erosivo, carreando significativas quantidades de sedimentos, fato que costuma passar despercebido, principalmente por agricultores preocupados em conter grandes focos de erosão acelerada.

• **Escoamento concentrado**

Após o início do escoamento superficial, obstáculos nas encostas desviam os filetes d'água e provocam sua concentração em linhas de fluxo preferenciais. Estas linhas podem gerar pequenas formas (geralmente milimétricas) denominadas microrravinas e microrravinas com cabeceiras (headcuts), neste caso quando a erosão remontante passa a ocorrer recuando as cabeceiras e transportando um volume maior de sedimentos. Com o recuo das cabeceiras, o aprofundamento e alargamento dos canais e o maior volume de sedimentos transportados formam as ravinas propriamente ditas que aumentam a turbulência do fluxo e a erosão. As ravinas evoluem principalmente a partir de bifurcações em pontos de ruptura topográfica e recuo de cabeceiras.

A erosão fluvial acelerada ocorre quando há desequilíbrio no balanço energético dos canais devido a impactos naturais ou humanos, levando a interferências na relação entre processos de erosão, transporte e deposição fluvial. A erosão acelerada das margens e do leito ocorre quando há aumento da energia do fluxo e/ou redução da resistência dos materiais nos canais. A erosão acelerada somente pode ser assim caracterizada quando implica na remoção de materiais em taxas superiores a médias históricas.

24 Energia cinética: energia resultante do movimento translacional de um corpo (Goudie, 1985).

Dentre as causas de erosão fluvial acelerada pode-se destacar:

- Remoção da cobertura vegetal marginal que constitui na proteção natural do sistema fluvial. As raízes têm fundamental importância na resistência das margens.
- Remoção de materiais que conferem rugosidade e atrito ao leito e margens, tendendo a aumentar a velocidade do fluxo e sua energia. A canalização fluvial gera, normalmente, este impacto.
- Redução da carga sedimentar dos canais, aumentando a energia do fluxo. Grande parte da energia hidráulica dos canais é dispendida no transporte sedimentar. A retenção de sedimentos em reservatórios, por exemplo, pode causar este impacto.

e) A erosão hídrica subsuperficial

A erosão subsuperficial é muitas vezes negligenciada em estudos e projetos ambientais, devido, em parte, à sua difícil detecção. Porém, sua atuação pode gerar danos superiores à erosão superficial. Sua origem passa pela elevação da energia do fluxo subsuperficial como função da elevação do seu volume e velocidade, principalmente pelo aumento da infiltração ou redução das perdas internas de água por evapotranspiração.

A erosão de vazamento é a erosão gerada por uma descarga crítica de um fluxo difuso, sendo também chamada *sapping*. Ocorre pelo fluxo interno intersticial entre as partículas do solo, sendo responsável pelo recuo remontante de cabeceiras e evolução de voçorocas.

A erosão em túnel (*piping*) é gerada pela força cisalhante do fluxo nas margens de macroporos, que remove as partículas e permite a formação de vazios internos e tuneis. A continuidade do processo resulta em abatimentos do solo.

f) Os voçorocamentos

As voçorocas são formas erosivas geradas por erosão acelerada e cuja origem decorre da atuação dos fluxos superficiais (pluviais e/ou fluviais), fluxos subsuperficiais e movimentos de massa (quedas e/ou deslizamentos). Voçoroca é um nome derivado do tupi-guarani: *ibiçoroc* ou *mbaê-çorogca*, significando, respectivamente, terra rasgada (PICHLER, 1953 in FACINCANI, 1995) ou coisa rasgada (FURLANI, 1980 in FACINCANI, 1995).

As voçorocas não devem ser confundidas com as ravinas, pois estas últimas são formas erosivas equilibradas, que não denotam erosão acelerada e não tem participação dos fluxos subterrâneos. Na literatura, as confusões entre ambas são constantes, muitas vezes devido ao fato das definições variarem de acordo com cada ciência ou foco de estudo. A FAO (1967), por exemplo, dá um enfoque agrônômico e considera que voçorocas são sulcos de tamanho que impede cultivos mecânicos e não podem ser eliminadas por práticas normais de manejo, enquanto ravinas são microcanais que podem ser removidos por operações de aragem do solo.

Outros trabalhos, como os de Cavaguti (1994) e Canil *et al.* (1995) (*apud* GUERRA, 1999), consideram que ravina é gerada por fluxo superficial, e voçoroca é necessariamente gerada por contribuições do fluxo subsuperficial (nível freático). Essa concepção genética das voçorocas é mais adequada, já que a dimensão não é um aspecto determinante da diferenciação entre ravinas e voçorocas.

Entre os fatores favoráveis ao voçorocamento, os desmatamentos se destacam por fragilizar a cobertura do solo e provocar:

- Redução da interceptação do escoamento superficial (redução da infiltração e rebaixamento do nível d'água subterrâneo, aumento do volume e da velocidade do fluxo superficial).
- Redução da interceptação da chuva (aumento do efeito *splash* e da compactação do solo, redução da infiltração e aumento do volume do escoamento superficial).
- Redução do percentual de raízes no solo: redução da coesão das partículas, redução da permeabilidade, aumento da velocidade do fluxo subsuperficial (redução de obstáculos) favorecendo erosão interna.
- Redução do percentual de matéria orgânica no solo: redução da coesão e estruturação do solo (estabilidade dos agregados).

Outras causas importantes dos voçorocamentos são as intervenções humanas que deixam o solo desprotegido, como a construção de vias de circulação descepeadas, principalmente aquelas construídas no sentido do declive das encostas. As cercas favorecem concentração do fluxo e a compactação do solo pelo pisoteio do gado. Porém, fatores naturais também podem facilitar a ação da erosão acelerada, como rochas com horizonte C rico em silte ou areia fina, levando a uma baixa estabilidade e coesão do solo. A erosão acelerada é comum em encostas onde materiais areno-siltosos ou silto-arenosos (areia fina) do regolito estão expostos.

As formas denominadas **cabeceiras de vale** ou **vales não canalizados** têm sua gênese relacionada a incisões erosivas do fluxo superficial e à convergência entre fluxos superficiais e fluxos subterrâneos. Em geral, as áreas de cabeceira são os pontos da rede hidrográfica que demonstram maior sensibilidade às oscilações hidrodinâmicas, sendo áreas de risco potencial ao surgimento de voçorocas (OLIVEIRA, 1999).

Os anfiteatros, depressões preenchidas ou não por colúvios, concentram o escoamento superficial e os eventos deposicionais, sendo locais preferenciais do escoamento superficial saturado, formação de sulcos erosivos e início de fluxos de massa.

g) O controle da erosão acelerada

Na busca de medidas para o controle da erosão acelerada, deve-se considerar estratégias de redução do impacto direto das gotas de chuva no solo a redução da desagregação do solo, o aumento da infiltração e a redução dos volumes de escoamento superficial pluvial e de sua velocidade. As técnicas estruturais da engenharia tradicional são

indicadas para situações de emergência ou quando não há mais condições de utilização de técnicas não estruturais, já que estas últimas tendem a serem mais práticas e mais baratas e são voltadas para prevenção e controle. Suas vantagens em relação às técnicas estruturais englobam:

- Custos mais baixos do que as técnicas estruturais.
- Materiais e equipamentos baratos e de fácil obtenção.
- Não há a exigência de mão de obra especializada e de conhecimentos técnicos muito dispendiosos, de difícil compreensão pelos usuários ou inacessíveis.
- Indução de sucessão ecológica e de processos ecológicos mais sustentáveis ao longo do tempo.
- Manutenção barata e fácil.

No controle da erosão acelerada é importante o disciplinamento do uso e ocupação do solo, a elaboração e aplicação de planos diretores e da legislação ambiental em geral, bem como a fiscalização e o monitoramento.

As práticas de controle de erosão podem ser: edáficas, visando o controle da erosão e a manutenção ou melhoria da fertilidade do solo; vegetativas, quando há a utilização da vegetação no controle da erosão; e mecânicas, quando há a aplicação de estruturas artificiais.

As técnicas vegetativas incluem a densificação da cobertura vegetal e a aplicação de horizontes orgânicos (mulch, cobertura morta) como restos de cultura, palha, etc. Além de proteger o solo, estas coberturas armazenam umidade e evitam bruscas mudanças de temperatura do solo. Outras técnicas vegetativas incluem:

- Semeadura direta de sementes nativas, aplicadas manualmente a lanço.
- Espalhamento manual na superfície de tufo de serrapilheira coletada em mata nativa.
- Distribuição manual na superfície de material vegetal de herbáceas nativas (caules e sementes).
- Estacas vivas que dão mais coesão e resistência ao solo.
- Rolos ou tapetes vegetais (como fibra de côco envolvida em redes). Estes tapetes permitem o crescimento de vegetação após a inserção de soluções solo-sementes.
- Bloqueadores vivos de sedimentos: trincheiras preenchidas com mudas, matéria orgânica e sementes para que a vegetação retenha sedimentos em margens de rios, bases de encostas, etc.

No controle da erosão e na recuperação de áreas degradadas, há diferentes modelos de reflorestamento (MARTINS, 2001):

- Modelo de reflorestamento homogêneo: indicado para situações de acentuada degradação do solo e da mata ciliar. Baseia-se no plantio de uma espécie de rápido crescimento, como as leguminosas, que proporcione a cobertura do solo e o controle da erosão.
- Modelo de ilhas vegetativas: indicado para áreas muito extensas e condições de poucos recursos financeiros. Baseia-se no princípio de que ilhas vegetativas, fragmentos vegetacionais ou até mesmo indivíduos isolados podem atuar como focos de expansão da vegetação, por atrair animais dispersores de sementes. A vegetação secundária se expande e a sucessão ecológica é acelerada.
- Modelo de plantio ao acaso: o plantio de mudas ocorre sem espaçamento definido, considerando que em meio natural a regeneração das matas não obedece a um espaçamento predeterminado. Deve-se evitar deixar extensas áreas desnudas e outras com forte adensamento de mudas. Recomenda-se manter uma distância de três a cinco metros entre as covas de plantio. O modelo apresenta o problema da conciliação entre espécies sombreadoras (pioneiras) e as sombreadas (não pioneiras).
- Modelos sucessionais é combinação de diferentes grupos sucessionais e podem ser aplicados os seguintes modelos: modelo de plantio em linha com duas espécies (uma linha com espécies pioneiras e outra com espécies não pioneiras); modelo do plantio em linha com várias espécies (linhas alternadas de pioneiras e não pioneiras, linhas mistas com pioneiras e não pioneiras, etc.); modelo do plantio em quincôncio (uma muda de espécie não pioneira fica no centro de um quadrado de quatro mudas de espécies pioneiras), entre outros.

A proteção e a recuperação da cobertura vegetal podem ser obtidas por meio das seguintes técnicas:

- Isolamento da área a ser protegida: o isolamento visa evitar a aproximação do gado, os incêndios e a depredação humana.
- Implantação de zona tampão (zona de transição) entre a mata ciliar e as áreas ocupadas. As zonas agroflorestais têm sido utilizadas como zonas tampão, nas quais há o consorciamento entre espécies arbóreas e cultivos agrícolas.
- Controle de cipós: os cipós são favorecidos por ambientes degradados onde há maior incidência de luz solar; podem inibir a regeneração de espécies arbóreas e até mesmo matar indivíduos adultos.
- Restauração de clareiras: a restauração de áreas desmatadas pode ser realizada por meio de semeadura ou o plantio de mudas.

Segundo Griffith *et al.* (2000), até 1994 os processos de recuperação de áreas degradadas envolviam dois conjuntos de atividades baseadas na revegetação a saber:

- Estabelecimento de um tapete verde de espécies agressivas e de rápido crescimento, como capim-gordura e braquiária, ou espécies arbóreas como o

eucalipto. A estratégia apresenta vantagem de rápida cobertura e proteção do solo (devido ao crescimento rápido das espécies escolhidas), mas apresenta um estágio máximo de equilíbrio em um patamar relativamente baixo. Problemas associados podem surgir como a necessidade de freqüentes fertilizações, a suscetibilidade à destruição por pragas e fogo, a erosão devido a falhas na cobertura vegetal e o empobrecimento visual em médio prazo. É a estratégia mais popular no Brasil.

- Sucessão ecológica: neste caso, ocorre uma mudança com o tempo da composição em espécies e da estrutura de comunidades. Ocorre a substituição de espécies mediante as adaptações ao substrato, à irradiação solar e à competitividade, gerando sistemas mais complexos e estruturados que os iniciais. Apesar de atingir um equilíbrio em um patamar de recuperação superior à estratégia anterior, esta estratégia se mostra muito lenta, podendo deixar a superfície exposta à erosão acelerada durante os períodos mais chuvosos.

Após 1994 ganharam força as idéias de compatibilização entre as duas estratégias anteriores, visando um sistema em desenvolvimento sucessional autossustentável e que seja paisagisticamente atrativo. Neste caso, seriam propostas duas etapas:

1. Prover os locais degradados com condições físicas, químicas e biológicas favoráveis ao rápido crescimento de plantas que sejam receptivas ao processo sucessional.
2. Criar condições para que a sucessão ecológica possa, de forma eficiente e em harmonia com a paisagem regional, atingir o equilíbrio entre seus componentes, de forma a garantir a autosustentabilidade.

Com essa compatibilização, a recuperação é agilizada em relação à segunda estratégia e atinge o equilíbrio em um nível de recuperação superior à primeira estratégia.

Os estudos mostram que é necessário abrir janelas na vegetação inicial, visando facilitar a entrada de espécies pioneiras e permitindo o posterior estabelecimento das espécies tardias. A densa cobertura graminosa nas etapas iniciais pode dificultar a germinação das pioneiras.

É possível implantar ilhas de vegetação em áreas degradadas sobre o tapete verde, visando o estabelecimento de plantas provenientes da dispersão natural ou plantas da região introduzidas por semeio ou como mudas. A interligação entre ilhas de vegetação arbórea enriquece a superfície.

Quanto às espécies introduzidas, as leguminosas são, geralmente, eficientes, já que apresentam organismos associados ao sistema radicular capazes de fixar o N_2 atmosférico, transformando-o em uma forma assimilável pelas plantas. As leguminosas apresentam, ainda, boa produção de biomassa, com relação C/N favorável à mineralização, o que proporciona rápido incremento de carbono ao substrato. Devido a tais vantagens, as leguminosas levam à menor intensidade de intervenção futura no sistema, facilitando e agilizando a sucessão ecológica.

h) Manejo do solo e práticas agrícolas adequadas

A busca de eficiência na agropecuária deve ser compatibilizada com a busca da proteção ambiental. A maior produtividade física (t/ha/ano) deve ser associada aos menores custos financeiros (\$/ha/ano), sociais e ecológicos. Neste último caso, deve-se buscar utilizar a menor quantidade de água possível (kg produzido/m³/ha/ano). O agronegócio mundial considera como aceitável o consumo máximo de 10.000 m³/ha/ano, sendo ótima a taxa de 5.000 a 7.000 m³/ha/ano (REBOUÇAS, 2004).

A busca da otimização do uso da água na agropecuária pode ser viabilizada por meio de técnicas de proteção do solo, já que a perda de solos implica na perda de água. Dentre estas técnicas, podemos destacar:

- Plantio em curva de nível²⁵: o plantio em curva de nível deve buscar segmentar as vertentes, reduzindo o seu comprimento de rampa e a sua declividade. Também pode estar associado ao plantio em faixas de vegetação e alternância de cultivos de boa cobertura com cultivos de cobertura ineficiente.
- Eliminação das queimadas: evitando-se as queimadas, evitam-se solos descobertos e a eliminação da fauna estruturadora do solo.
- Preparo do solo: deve-se buscar, quando possível, a mínima mecanização e a conservação de restos culturais em superfície.
- Rotação de culturas: a rotação de culturas permite o descanso do solo.

Na região do cerrado brasileiro tem sido implementada a rotação, utilizando-se a combinação gramínea-leguminosa (ou leguminosa-gramínea), com alternância variada. Os restos culturais das gramíneas, normalmente mais volumosos, lignificados e com relação C/N mais ampla, são de decomposição mais lenta e incorporam mais carbono ao solo do que as leguminosas (relação C/N mais estreita). A sucessão de culturas (também conhecida como safrinha), que consiste no cultivo de uma segunda cultura logo após a colheita, requer a utilização de variedades precoces e de ciclo curto e a combinação de uma série de eventos. Envolve a precipitação, como a ocorrência de chuvas na época do plantio e estiagem na época da colheita da primeira cultura e retorno das chuvas para o plantio da segunda cultura, que nem sempre é possível devido a irregularidade e erraticidade das precipitações na região dos cerrados (SILVA & RESCK, 1998).

- Plantio direto no solo: o plantio direto não sobrecarrega o solo com maquinário e revolvimento.
- Integração lavoura-pecuária e vice-versa: tem sido bastante discutida a viabilização da pecuária integrada com a lavoura em sistemas rotativos, através dos quais as pastagens são recuperadas com o resíduo das adubações de culturas anuais.

²⁵ Uma curva de nível é aquela que possui todos os pontos em uma mesma altura do terreno.

- *Mulching*: esta técnica envolve a abertura de sulcos verticais no terreno, com dimensões médias de 8 cm de largura por 40 cm de profundidade, em nível e perpendicularmente ao declive; são preenchidos por matéria vegetal viva ou morta que favoreça a proteção do solo contra a erosão acelerada.
- Escolha adequada dos cultivos apropriados para cada tipo de clima, evitando-se a necessidade de irrigações freqüentes e de perdas excessivas de água por evaporação. As leguminosas têm, por exemplo, uma boa densidade de recobrimento, fácil propagação, resposta favorável a fertilizantes e corretivos, estabelecimento inicial mais rápido e denso que as gramíneas.

Pesquisas estão sendo desenvolvidas para a obtenção de gramíneas e leguminosas que, plantadas após a colheita da cultura comercial, se prestam como produtoras de palha, atendendo aos seguintes requisitos:

- a. baixa exigência de água;
- b. enraizamento profundo;
- c. tolerância à acidez;
- d. possibilidade de uso como forrageira; e
- e. produção de grãos (SILVA & RESCK, 1998).

Uma das alternativas promissoras tem sido o milheto que pode ser plantado por ocasião das primeiras chuvas em outubro e, após 45 dias de crescimento, é dessecado e roçado, realizando-se o plantio direto sobre a palha daquela gramínea. Outra tem sido o estilosantes, uma leguminosa que pode ser plantada concomitantemente com a cultura comercial. Por apresentar uma excelente sobrevivência durante a seca, a leguminosa cobre o solo produzindo um grande volume de massa, que pode ser utilizada como forrageira e/ou depositada ou incorporada ao solo antes do plantio (SILVA & RESCK, 1998).

Além destas técnicas específicas para áreas agrícolas, outras podem ser válidas para qualquer área onde há a necessidade de se evitar as perdas de solo e água:

- Distribuição adequada de vias de acesso: a distribuição deve seguir, o mais próximo possível, as curvas de nível. Os carregadores que ligam as vias principais em nível devem ser ligeiramente inclinados e desencontrados (para impedir a concentração elevada da água de chuva).
- Proteção da vegetação nas Áreas de Preservação Permanente, incluindo áreas de declives acentuados e matas ciliares. Na recuperação de matas ciliares, a seleção de espécies deve priorizar as espécies nativas das matas ciliares locais, o plantio do maior número possível de espécies (diversidade), a combinação de espécies pioneiras de rápido crescimento com espécies não pioneiras (secundárias tardias), o plantio de espécies atrativas para a fauna, e o respeito à tolerância das espécies à umidade do solo.

- Aplicação de cordões de vegetação permanente: os cordões auxiliam como obstáculos ao fluxo superficial, interceptando-o e favorecendo a sua infiltração e a retenção de sedimentos que chegariam aos cursos d’água, assoreando-os.
- Aplicação de quebra-ventos: os quebra-ventos protegem o solo contra a erosão eólica. Devem ser postos em posição perpendicular aos ventos principais. Algumas espécies adequadas aos quebra-ventos são eucaliptos, bambu, ciprestes, etc.
- Terraceamento: um terraço é um combinado de um canal (valeta) e um camalhão (monte de terra ou dique) construído em intervalos dimensionados no sentido transversal ao declive (PIRES & SOUZA, 2003). Os terraços reduzem o comprimento de rampa e a velocidade do fluxo, aumentando a infiltração e reduzindo o escoamento superficial.
- Muros de pedra: os muros de pedra postos em curva de nível servem como obstáculos ao escoamento superficial, facilitando a infiltração e a retenção de sedimentos.
- Barragens escalonadas (*rip-raps*) ou sulcamento transversal nos talvegues: as rupturas de declive transversais ao eixo dos focos de erosão acelerada são importantes para quebrar a velocidade do fluxo e o seu poder erosivo. Com o tempo, as barragens e sulcamentos permitem a retenção de sedimentos, o que contribui para o nivelamento dos talvegues e a criação de novos níveis de base dos focos de erosão.
- Bacias de retenção de águas pluviais: as águas pluviais podem ser coletadas e armazenadas em bacias construídas ao longo das encostas. A água retida acaba sendo induzida a infiltrar e não escoar para os canais. Deste modo, reduz-se a erosão dos solos e o assoreamento dos cursos d’água. As bacias de retenção já são comumente utilizadas nas áreas rurais do Brasil, sendo também conhecidas como barraginhas. Pires e Souza (2003) fornecem algumas recomendações para a construção das bacias (Tabela 5.26.).

Tabela 5.26. Distâncias Recomendadas para o Distanciamento de Bacias de Retenção de Águas Pluviais	
% Declividade da encosta	Distância (C)
< ou = 5	12 L (largura da estrada)
5 - 10	6 L
10 - 15	4 L
15 - 20	3 L

Fonte: Pires e Souza (2003).

- Mantas têxteis, geotêxteis, biotêxteis: as mantas vegetais não são aplicáveis somente em áreas agrícolas, mas sim em qualquer área passível de ocorrência de erosão acelerada. São eficientes na cobertura do solo e no crescimento vegetal rápido e denso, mas possuem custos relativamente elevados. Na aplicação das mantas pode se abrir covas para plantio de um coquetel de solo e sementes de gramíneas e leguminosas, já que são indicadas para situações em que há a necessidade de crescimento rápido. Sobre o coquetel pode se colocar uma cobertura morta (*mulch*) e a manta biotextil protetora.
- Defletores de fluxo com vegetação (para ambientes fluviais): visam desviar o fluxo em pontos de erosão acelerada das margens. Podem incluir pedras, galhos, troncos e outros materiais.

No caso específico de voçorocamentos, o controle da erosão passa por técnicas como as seguintes:

- Revegetação na base e nas encostas da voçoroca.
- Dispersão do fluxo pluvial que cai na voçoroca.
- Gradeamento para retenção dos sedimentos (*rip-raps*).
- Instalação devertedores para redução da energia da água dentro da voçoroca.
- Instalação de dissipadores de energia nos pontos de lançamentos de efluentes.
- Terraplanagem (quando possível e indicado) para regularização do nível de base da voçoroca.
- Controle da erosão subsuperficial (*piping*) através de drenos enterrados.
- Estruturas em degraus para dissipação de energia da água.

As obras estruturais são indicadas quando os voçorocamentos atingem dimensões nas quais as técnicas não estruturais não conseguem deter o processo. Porém, deve-se atentar para a construção adequada de cada obra, já que grande parte das obras de contenção de voçorocas é destruída devido ao subdimensionamento do fluxo.

i) Controle de erosão em áreas urbanas

As áreas urbanas também devem receber atenção no que se refere ao controle das perdas de água, à poluição e à erosão acelerada. Nesse sentido, algumas técnicas indicadas são:

- Reforço das medidas legais motivadoras do controle da erosão acelerada e da poluição das águas, bem como da retenção das águas pluviais em bacias de armazenamento e coberturas do solo permeáveis.

- Limitação ou proibição de exposição de áreas em construção ou loteamentos, evitando-se a erosão acelerada nas áreas não pavimentadas.
- Construção adequada de vias, acompanhando curvas de nível e evitando sua construção e exposição em substratos instáveis e declividades elevadas.
- Obras de microdrenagem: instalação adequada de coletores pluviais, pavimentação de ruas, bocas de lobo.
- Obras de macrodrenagem: canais abertos ou fechados (emissários), dissipadores de energia (inclusive à jusante de emissários), estabilizadores de talvegues (barragens de gabião, terra e concreto).
- Proteção de taludes e aterros adjacentes a vias de acesso: esta proteção pode ser viabilizada por meio de: dissipadores de energia; canais tipo rápido ou escada quando a capacidade dos dissipadores de energia for ultrapassada; valetas de proteção de crista de corte e saias de aterro com dissipadores de energia no final; bacias de acumulação ao longo de valetas para reduzir velocidade do escoamento; dissipadores de energia à jusante das bocas de saída dos bueiros; e proteção vegetal nos taludes e aterros.
- Drenos profundos nos taludes quando for necessário drenar níveis d'água.
- Utilização de terra armada nos aterros, com base em solos granulares armados com tiras de ferro, malhas de arame ou plástico, esteiras de borracha, etc.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 8419. Apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos. Rio de Janeiro, 1992, 7 p.

ALVES, J. M. P.; CASTRO; P. T. A. Influência das feições geológicas na morfologia da bacia do rio do Tanque (MG) baseada no estudo de parâmetros morfométricos e análise de padrões de lineamentos. **Revista Brasileira de Geociências**, São Paulo, v. 33, n. 2, p. 117-124, 2003.

ANA – Agência Nacional de Águas. Disponibilidades e Demandas de Recursos Hídricos no Brasil. Brasília: Cadernos de Recursos Hídricos, 2005. 123 p.

Disponível em <[http://www.ana.gov.br/pnrh_novo/documentos/01Disponibilidade e Demandas/VF DisponibilidadeDemanda.pdf](http://www.ana.gov.br/pnrh_novo/documentos/01Disponibilidade_e_Demandas/VF_DisponibilidadeDemanda.pdf)>

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. 2009.

Disponível em <<http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.asp>>.

BARRAQUÉ, B. (Org.). **Les politiques de l'eau en Europe.** Paris: La Découverte, 1995. 234 p.

BARROS, L. F. P. **Fatores condicionantes da produção de sedimentos em suspensão na bacia do Rio Maracujá, Quadrilátero Ferrífero, MG.** 2009. 85 f. Monografia (Graduação em Geografia) – Instituto de Geociência, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

BARTH, F.T. **Fundamentos para Gestão de Recursos Hídricos.** São Paulo: Nobel/ABRH, 1987.526 p.(Coleção ABRH de Recursos Hídricos, v.1).

BELO HORIZONTE. Lei n. 8.260, de 3 de dezembro de 2001. **Política Municipal de Saneamento.** Diário Oficial, Poder Executivo Municipal, Belo Horizonte, MG, 04 dez 2001, Ano VII, n.1.510.

BENETTI, A.; BIDONE, F. O meio ambiente e os recursos hídricos. In. TUCCI, C. E. M. (Org.) **Hidrologia: ciência e aplicação.** 2. ed. Porto Alegre: UFRGS/ABRH, 2000. p. 651-658.

BENEVIDES, V. F. de S.; BEEKMAN, G. B. Aspectos de Sustentabilidade e Vulnerabilidade dos Recursos Hídricos. In: SIMPÓDIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 1995, Recife.

BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. **Conservação do solo.** Piracicaba, SP: Livroceres, 1985. 392 p.

BRASIL. Ministério da Saúde. Portaria nº 518 de 25 de março de 2004. Estabelece os procedimentos e responsabilidades relativas ao controle e vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de

potabilidade, e dá outras providências. Diário Oficial (da) República Federativa do Brasil. Brasília DF, 25 mar. 2004.

BRICE, J. E. **Channel patterns and terraces of the Loup Rivers in Nebraska.** United States Geological Survey Professional Papers, 4 22'D, 1964.

CAMPOS, J. R. et al. **Tratamento de Esgotos Sanitários por Processo Anaeróbio e Disposição Controlada no Solo.** Rio de Janeiro: ABES Projeto Prosab, 1999. 248p.

CETESB – Companhia Tecnológica de Saneamento Ambiental. Relatório de qualidade de águas interiores do estado de São Paulo. São Paulo, SP, Cetesb, 2005, 307 p.

CHEREM, L. F. S. **Análise Morfométrica da Bacia do Alto Rio das Velhas - MG: Comparação de Metodologias e Dados.** 2008.101 f. Dissertação (Mestrado em Modelagem de Sistemas Ambientais) – Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

CHEVALIER, P. Aquisição e processamento de dados In. TUCCI C.E.M. **Hidrologia ciência e aplicação**, 3°. ed. revisada. Porto Alegre: ABRH-Edusp, 2004. p. 485-525.

CHITALE, S.V.. River channel patterns. Proceedings of American Society of Civil Engineers. **Journal of the Hydraulics Division, Pap.** 7038, 96 (HY1): 201—221, 1970.

CHOW, V.; MAIDMENT, D.; MAYS, L. **Applied Hydrology.** 1. ed. Columbus: McGraw-Hill Science, 1988. 572 p.

CHRISTOFOLETTI, A. **Geomorfologia.** São Paulo: Edgard Blücher, 1980. 186 p.

CLARKE, R.; KING, J. O. **Atlas da Água.** [tradução Anna Maria Quirino]. São Paulo: Publifolha, 2005. 128 p.

CNRH – Conselho Nacional de Recursos Hídricos. Resolução CNRH n. 12, de 19 de julho de 2000. Brasília DF, 19 jul. 2000.

CNUMAD – CONFERÊNCIA DAS NAÇÕES UNIDAS SOBRE MEIO AMBIENTE E DESENVOLVIMENTO, **Agenda 21.** Rio de Janeiro, 1992.

BRASIL. **Código das Águas.** Decreto Federal n. 24.643, de 10 de julho de 1934.

CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução n. 303, de 20 de março de 2002. Dispõe sobre parâmetros, definições e limites de Áreas de Preservação Permanente. Brasília, DF, 13 mai. 2002.

CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução n. 357, de 17 de março de 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. Brasília, DF, 17 mar. 2005. 23 p.

CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução n. 396 de 3 de abril de 2008. Dispõe sobre a classificação e diretrizes ambientais para o enquadramento das águas subterrâneas e dá outras providências. Brasília, DF, 3 abr 2008. 13 p.

COSGROVE, W. J.; RIJSBERMAN, F. R. **World Water Vision - Making Water Everybody's Business**. London: Earthscan Publications Ltd., World Water Council, 2000. 70 p.

CPRM – Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais. **Hidrogeologia: conceitos e aplicações**. Coordenadores: FEITOSA, F. A. C.; FORTALEZA Filho; J. M.: CPRM, LABHID - UFPE, 1997.

CRICKMAY, C. H. **The work of the river**. American Elsevier Publ. Co., Inc. New York: 1974.

CUSTODIO, E. ; LLAMAS, M.R.. **Hidrologia Subterrânea**. 2. ed. Barcelona: Omega, 1983.

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Atlas do Meio Ambiente do Brasil**. Brasília: Terra Viva, 1994. 138 p.

ENGELMAN, E.; LEROY, P. **Sustaining water. Population and the future of renewable water supplies**. Washington: Population Action International, 1993.

ETCHEBEHERE, M. L. de; SAAD, A. R.; FULFARO, V. J.; PERINOTTO, J. A. de J. Aplicação do Índice Relação Declividade-Extensão – RDE – na Bacia do Rio do Peixe (SP) para detecção de deformações neotectônicas. **Revista do Instituto de Geociências - USP**, São Paulo, v. 4, n. 2, p. 43-56, out. 2004.

ETCHEBEHERE, M. L. de C.; SAAD, A. R.; SANTONI, G.; CASADO, F. da C.; FULFARO, V. J. Detecção de prováveis deformações neotectônicas no vale do rio do Peixe, região ocidental paulista, mediante aplicação de índices RDE (relação declividade-extensão) em segmentos de drenagem. **Revista do Instituto de Geociências - USP**, São Paulo, v.25, p. 271-287, 2006.

FACINCANI, E. M. **Influência da estrutura e tectônica no desenvolvimento das boçorocas da região de São Pedro, SP: proposta de reabilitação e aspectos jurídico-institucionais correlatos**. 1995. 124 f. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, SP, 1995.

FAO – Organizacion de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentacion. **La erosion del suelo por el água: algunas medidas para combatirla em las tierras de cultivo**. Roma: FAO, 1967.

FREITAS, A. J. Direito e outorga de uso de água In: Silva, D. D.; Pruski, F. F. (Org). **Recursos Hídricos e Desenvolvimento Sustentável da Agricultura**. Brasília: MMA, 1997. p. 15-36.

FREITAS, M. A. V. de; SANTOS, A. H. M. Importância da água e da informação hidrológica. In: FREITAS, M. A. V. de. (Ed.). **O estado das águas no Brasil: perspectivas de gestão e informações de recursos hídricos**. Brasília, DF: ANEEL/MME/ MMA-SRH/OMM, 1999. p. 13-16. il.

GLEICK, P.H. **Water in Crisis: A Guide to the World's Fresh Water Resources**. New York: Oxford University Press, 1993.

GRIFFITH, J. J.; DIAS, L. D.; MARCO JR, P. de. A recuperação ambiental. **Ação Ambiental**, Viçosa, MG, n.10, p. 8-10, fev/mar, 2000.

GUERRA, A. J. T. O início do processo erosivo. In: GUERRA, A. J. T.; SILVA, A. S.; BOTELHO, R. G. M. **Erosão e conservação dos solos**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1999.

HACK, J. T. Stream-profile analysis and stream-gradient index. **Journal Research of the U. S. Geolo**, Survey, v.1, p.421-429, 1973.

HESPANHOL, I. Potencial de reuso de água no Brasil: agricultura, indústria, municípios, recarga de aquíferos. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Brasília, vol. 7, n.4, p. 75-95, out/dez, 2002.

HOBSBAWM, E. **Era dos Extremos: o breve século XX, 1914-1991**. 2. ed. São Paulo: Companhia das Letras, 2003.

HORTON, R.E. **Drainage Basin Characteristics**, Transaction American Geophysical Union, 13:350-361, 1932.

HORTON, R. E. An index number system for rating water quality. **Journal WPCF**, v. 37, n. 03, 317 p. 300-306, 1965.

IBAMA – Instituto Brasileiro do Meio Ambiente. **GeoBrasil 2002 – Perspectivas do meio ambiente no Brasil**. Brasília: Edições IBAMA, 2002. 447 p.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios. Síntese de Indicadores 2008**. Rio de Janeiro, 2009.

IGAM – Instituto Mineiro de Gestão das Águas. Águas de Minas. Disponível em: <http://www.igam.mg.gov.br>

ISA – Instituto Socioambiental. **Abastecimento de água e esgotamento sanitário nas capitais brasileiras em 2004**. São Paulo: ISA, 2007. 23 p.

KRUMBEIN, W. C. Measurement and geological significance of shape and roundness of sedimentary particles. **Journal of Sedimentary Research**; v. 11; n. 2; p. 64-72, 1941.

LAMBERT, R. **Géographie du Cycle de L'Eau**. Toulouse: Presses Universitaires du Mirail, Université de Toulouse-Le Mirail, 1996. 439 p.

LANGELIER, W. F. The analitical control of anticorrosion water treatment. **Journal of American Water Works Association**, Denver, v. 28, n. 10, p. 1500-1521, 1937.

LANNA, A. E. Modelos de Gerenciamento das Águas. **A Água em Revista**, Belo Horizonte, CPRM, p. 15 a 26, 1997.

LAWRENCE, P.; MEIGH, J.; SULLIVAN, C. **The Water Poverty Index: an International Comparison**. Keele: Keele University, 2002. 17p.

LEOPOLD, L. B.; MILLER, J. P. **Fluvial Processes in Geomorphology**. San Francisco: Freeman and Company, 1964.

LEOPOLD, L. B.; WOLMAN, M. G. River Channel Patterns: Braided, Meandering and Straight. **United States Geological Survey Professional Papers**, 2 82B , 39-84, 1957.

LIBÂNIO, M. **Fundamentos de Qualidade e Tratamento de Água**. Campinas: Ed. Átomo, 2005.444 p.

MACEDO, D. R. **Avaliação de Projeto de Restauração de Curso d'água em Área Urbanizada: estudo de caso no Programa Drenurbs em Belo Horizonte**. 2009, 122 f. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

MAGALHÃES Jr., A. P. **Indicadores Ambientais e Recursos Hídricos – Realidade e Perspectivas para o Brasil a partir da Experiência Francesa**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2007. 686 p.

MARTINS, S. V. **Recuperação de Matas Ciliares**. Belo Horizonte: Editora Aprenda Fácil, 2001. 143 p.

MAYS, L. W. **Water Resources Sustainability**. New York: McGraw-Hill, 2007. 330 p.

METCALF & EDYY. **Wastewater Engineering Treatment, Disposal and Reuse**. 3 ed, Revised by TCHOBANOGLIOUS, G.; BURTON, F. New York: McGraw-Hill, 1991.

MILLER, V.C. A quantitative geomorphic study or drainage basins characteristics in the Clinc Mountain area. **Technical Report (3)**. Dept.' Geology Columbia University, 1953.

MINISTÉRIO DAS CIDADES. **Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgotos 2008**. Brasília: Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento, 2010.

NETO, J. C. C. **Política de Recursos Hídricos**. São Paulo: Editora da USP, 1988. 93 p.

NEUTZLING, I. (Org.). **Água: bem público universal**. São Leopoldo: Ed. Unisinos. 2004. 143 p.

OLIVEIRA, M. A. T. Processos erosivos e preservação de áreas de risco de erosão por voçorocas. In: GUERRA, A. J. T.; SILVA, A. S.; BOTELHO, R. G. M. (Orgs.). **Erosão e conservação dos solos: conceitos, temas e aplicações**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, p. 57-99, 1999.

OMS – Organização Mundial da Saúde. Portaria. 518/2004 do Ministério da Saúde: estabelece os limites de concentração dos parâmetros para a água potável no Brasil. Disponível em: <<http://www.who.int/publications/en/>>..

ONU – Organização das Nações Unidas. **Relatório do Desenvolvimento Humano 2006. A água para lá da escassez: poder, pobreza e a crise mundial da água**. New York: Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento, 2006. 422 p.

OPS – Organização Panamericana da Saúde; OMS – Organização Mundial da Saúde. **Relatório Água e Saúde**. 30 de maio de. 2005. Disponível em: <<http://www.opas.org.br/sistema/fotos/agua>>.

PBH – Prefeitura Municipal de Belo Horizonte. **Relatório de viabilidade sócio-ambiental do programa Drenurbs**. Belo Horizonte, MG: Prefeitura Municipal de Belo Horizonte, Secretaria Municipal de Política Urbana. 2003. 77p.

PETRELLA, R. **O Manifesto da Água**. Petrópolis: Ed. Vozes, 2004. 159 p.

PIRES, F. R.; SOUZA, C. M. de. **Praticas mecânicas de conservação do solo e da água**. Viçosa: Suprema Gráfica, 2003. 176 p.

PIVELI, R. P.; KATO, M. T. **Qualidade das águas e poluição: aspectos físico-químicos**. São Paulo: ABES, 2005. 285 p.

PNUD – Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento. **Relatório do Desenvolvimento Humano 2006 - A água para lá da escassez: poder, pobreza e a crise mundial da água**. New York: ONU, 2006. 1101 p.

POSTEL, S. **Last oasis-facing water scarcity**. New York: W.W. Norton and Co., 1992, p. 239.

BRASIL. Lei nº 11.445, de 5 de janeiro de 2007. Estabelece diretrizes nacionais para o saneamento básico. Diário Oficial (da) República Federativa do Brasil. Brasília, DF, 5 de janeiro de 2007.

REBOUÇAS, A.C. **Panorama da Água Doce no Brasil**. São Paulo: Rio+5, 1997. p.5-25.

REBOUÇAS, A. C. **Uso inteligente da água**. São Paulo: Escrituras, 2004.143 p.

REBOUÇAS, A. C. **Water crisis: facts and myths**. An. Acad. bras. Ci. 66, Sup. 1. p 135-147, 1994.

ROSA, D. J. M. **Plano Nacional de Recursos Hídricos – Navegação Interior**. Disponível em: <http://www.ana.gov.br/pnrh_novo/Apresentacoes/APNavegacao.pdf>.

RUST, B. R. A Classification of alluvial channel systems. **Canadian Society of Petroleum Geologists, Memoir**, 5, 187-198, 1978.

RYZNAR, T. A new index for determining the amount of calcium carbonate scale formed by a water. **Journal of American Water Works Association**, Denver, v.36, n.3, p.472-494, 1944.

SANTOS, I.; FILL, H. D.; SUGAI, M. R. V. B.; BUBA, H.; KISHI, R. T.; MARONE, E.; LAUTERT, L. F. **Hidrometria Aplicada**. Curitiba: Ed. Lactec, 2001. 372 p.

SANTOS, J. G. R. dos. **Desenvolvimento e produção da bananeira nanica sob diferentes níveis de salinidade e lâminas de água**. 1997. 173 f. Tese (Doutorado) – Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande, 1997.

SCHUMM, S. A. Evolution of drainage systems and slopes in badlands at Perth Amboy. **Geological Society of America Bulletin**, N. Jersey, v.67, p.597-646, 1956.

SCHUMM, S. A. The Disparity Between Present Rates of Denudation and Orogeny. **United States Geol. Survey Profess. Paper**, 454-H, 13. p., 1963.

SCHUMM, S. A.; KAHN, H. **Experimental Study of Channel Patterns. Bulletin of the Geological Society of America** (83), p.1755-1770, 1972.

SEEBER, L.; GORNITZ, V. Rivers profiles along the Himalayan arc as indicators of active tectonics. **Tectonophysics**, v.92, p. 335-367, 1983.

SELBORNE, L. **A Ética do Uso da Água Doce: um levantamento**. Brasília: UNESCO, 2002. 80 p. (Série Meio Ambiente e Desenvolvimento, vol. 3, cadernos UNESCO Brasil).

SENADO FEDERAL. **Agenda 21** – Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento, Brasília, 2ª ed., 1997, 598 p.

SENADO FEDERAL. **Diário Oficial da União**. Brasília: 1999. 34 p.

SHULITS, S. Graphical analysis of trend profile of a shortened section of river. **Trans. AGU**, vol. 36, p. 649-654, 1955.

SILVA, J. E.; RESCK, D. V. S. Matéria orgânica do solo. In: VARGAS, M. A. T.; HUNGRIA, M. (Ed.). **Biologia dos solos dos cerrados**. Planaltina: Embrapa-CPAC, 1997. p. 467-524.

SILVA, R.C.V.; WILSON Jr, G. **Hidráulica Fluvial**. Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ, 2005, 255 p.

SMITH, D.G. & PUTNAM, P.E. Anastomosed river deposits: modern and ancient example. In: **Canadian Journal of Earth Sciences**. Alberta, Toronto, Canada, vol. 17, p. 1396-1406, 1980.

STOCKING, M. A. Assessing vegetative cover and management effects. In: LAL, R. **Soil erosion research methods**. Delray Beach: Soil and Water Conservation Society, 1994. 340 p.

STRAHLER, A. N. Dimensional analysis applied to fluvial eroded landforms. **Geological Society of America Bulletin**, v.69, p.279-300, 1958.

THORNTHWAIT, C.W.; MATHER, J.R. **The water balance. Publications in Climatology**. New Jersey: Drexel Institute of Technology, 104p. 1955.

TUNDISI, J.G. Bases ecológicas para o desenvolvimento sustentado. In: CASTELLANO, E. C.; CHAUDHRY, F. H. (Eds.) **Desenvolvimento sustentado: problemas e estratégias**. São Carlos: EESC-USP, 2000. p. 3-6

UNESCO – The United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization. **PHI – Programa Hidrológico Internacional. Recursos d'Água do Mundo**. Paris: 1998. 45 p.

UNESCO – The United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization. **Water for People, Water for Life**. Paris: World water Assessment Program, The United Nations World Water Development Program, 2003. 36 p.

UNESCO – United Nations Educational Scientific and Cultural Organization. **Water in a Changing World. 3rd UN World Water Development Report**, 2009.

Disponível em: <<http://www.unesco.org/water/wwap/wwdr/wwdr3>>.

UNESCO – The United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization. **World water balance and water resources of the earth**. Genève: 1978. 243 p.

VESTENA, L. R.; CHECCHIA, T.; KOBIYAMA, M. Análise morfométrica da bacia hidrográfica do Caeté, Alfredo Wagner/SC. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE GEOMORFOLOGIA, 6, 2006, Goiânia. **Anais ... Goiânia: UFGO**, 2006. 8p.

VILLIERS, M. de. **Água**. Rio de Janeiro: Ed. Ediouro, 557. p. 2002.

VON SPERLING, M. Associação entre a legislação brasileira de qualidade da água (Resolução CONAMA 20/86) e a seleção de processos de tratamento de esgotos. **Engenharia Sanitária e Ambiental (ABES)**, ano 3, v 3, n. 1-2, p. 67-73, 1998.

VON SPERLING, M. **Princípios do tratamento biológico de águas residuárias - vol. I: Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. 2. ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, DESA-UFMG, 1996. 243 p.

WHO – World Health Organization; UNICEF – United Nations Children’s Fund. **The Global Water Supply and Sanitation Assessment 2000**. New York: Programme for Water Supply and Sanitation (JMP), 2000. 87 p.

WORLD BANK - **Environmental Indicators**, 2002.

Disponível em: <http://www.worldbank.org>



ISBN 978-85-64724-15-0



9 788564 724150