

HIDROLOGIA APLICADA

TEXTO BÁSICO

Disciplina Ministrada na Universidade Estadual do Rio Grande do Sul, para o curso de graduação em Engenharia de Bioprocessos e Biotecnologia na unidade de Caxias do Sul.

Adriano Rolim da Paz

adrianorpaz@yahoo.com.br

Setembro/2004

Aspectos gerais

A Hidrologia pode ser entendida como a ciência que estuda a água, como a própria origem da palavra indica (do grego): hidrologia = *hydor* (“água”) + *logos* (“ciência” ou “estudo”). Entretanto, uma boa definição adotada por vários autores é a seguinte:

“Hidrologia é a ciência que trata da água na Terra, sua ocorrência, circulação e distribuição, suas propriedades físicas e químicas e sua reação com o meio ambiente, incluindo sua relação com as formas vivas” (Definição do U.S. Federal Council of Service and Technology, citada por Chow, 1959, apud Tucci, 2000).

Como se pode perceber pela definição acima, a hidrologia é uma ciência consideravelmente ampla, cujo escopo de trabalho abrange diversas sub-áreas mais específicas, como por exemplo:

- Hidrometeorologia: trata da água na atmosfera;
- Limnologia: estuda os lagos e reservatórios;
- Potamologia: estuda os rios;
- Oceanografia: estuda os oceanos;
- Hidrogeologia: estuda as águas subterrâneas;
- Glaciologia: trata da ocorrência de neve/gelo na natureza.

Entretanto, cabe salientar que a maioria dos estudos envolve mais de uma das sub-áreas, já que os fenômenos e processos envolvendo a água na natureza (ocorrência, distribuição, propriedades físico-químicas, etc.) estão interrelacionados de tal forma que a explicação e o entendimento dos mesmos só são alcançados mediante a reunião dos conhecimentos das diversas sub-áreas. Por exemplo, como estudar os processos de deposição de nutrientes e sedimentos em um reservatório (limnologia) sem a caracterização do aporte dessas substâncias oriundo do curso d'água (rio) barrado para formar o reservatório (potamologia)?

Tornando a análise um pouco mais geral, face ao caráter de escassez atribuído à água atualmente, sendo reconhecida a importância em preservar e usar racionalmente esse recurso, uma vasta gama de profissionais tem se dedicado a estudar a hidrologia, entre eles os engenheiros, economistas, estatísticos, químicos, biólogos, químicos, matemáticos, geólogos, agrônomos, geógrafos, etc.

Os problemas relacionados à água geralmente requerem um enfoque multidisciplinar, segundo o qual diversos especialistas contribuem em suas áreas para entender a situação e alcançar a melhor alternativa, sob determinados critérios. Um exemplo disso é um projeto que vise o barramento de um rio para formação de um reservatório, com o objetivo de captar água para abastecimento humano e irrigação. Simplificadamente, poder-se-ia dizer que o hidrólogo seria responsável pela caracterização da área contribuinte ao reservatório, estimando a vazão afluente e dimensionando a barragem; ao especialista em hidráulica caberia projetar o sistema de captação, bombeamento e distribuição da água; o biólogo analisaria o impacto do barramento do rio sobre o ecossistema, em particular sobre a biota aquática, bem como no levantamento das espécies que habitam a região a ser alagada; o sociólogo (e psicólogo) estaria envolvido com a remoção da população residente na área alagada pela barragem, a qual seria realocada; a vegetação que ficaria submersa com o enchimento do lago iria se degradar, merecendo o devido monitoramento da qualidade da água, que poderia ser realizado por um especialista na área de saneamento/química; o agrônomo iria definir as condições de irrigação das culturas agrícolas atendidas, e assim por diante.

Por outro lado, também cabe salientar que, a despeito dos vários profissionais envolvidos na problemática da água, os estudos hidrológicos, propriamente ditos, geralmente envolvem técnicas originárias ou desenvolvidas a partir de conceitos de outras áreas, mas que o profissional que lida com a hidrologia deve estar familiarizado e ser capaz de aplicá-las e entender seus resultados. Entre tais técnicas pode-se citar: teoria estocástica, séries temporais, análise multicritério, teoria das decisões, análise econômica, programação dinâmica, inteligência artificial, otimização, interpretação de imagens de satélite, etc.

Breve histórico da hidrologia

A importância da água na história da humanidade é identificada quando se observa que os povos e civilizações se desenvolveram às margens de corpos d'água, como rios e lagos. A seguir serão listados alguns fatos marcantes da história da hidrologia, de maneira superficial, sendo maiores detalhes encontrados na bibliografia pesquisada, citada ao final deste documento.

- Diversos autores citam registros de que no Egito Antigo, na época dos faraós, existiram obras de irrigação e drenagem. Também na Mesopotâmia, na região conhecida como Crescente Fértil, entre os rios Tigre e Eufrates, a água já era usada para irrigação.
- Os filósofos gregos são considerados os primeiros a estudar a hidrologia como ciência. Por exemplo, Anaxágoras, que viveu entre 500 e 428 a. C., tinha conhecimento de que as chuvas eram importantes na manutenção do equilíbrio hídrico na Terra.
- Mas apenas na época de Leonardo da Vinci é que o ciclo hidrológico veio a ser melhor compreendido. Um fato relevante foi o realizado por Perrault, no século 17, que analisou a relação precipitação-vazão, comparando a precipitação com dados de vazão.
- No século 19 dá-se o início de medições sistemáticas de vazão e precipitação;
- Até a década de 30, prevalece o empirismo, procurando descrever os fenômenos naturais, enquanto até a década de 50 é predominante o uso de indicadores estatísticos dos processos envolvidos;

- Com o advento do computador em conjunto com o aprimoramento de técnicas estatísticas e numéricas, deu-se um grande avanço na hidrologia. Foram desenvolvidos modelos precipitação-vazão e avanços na hidrologia estocástica. O escoamento subterrâneo, a limnologia e a modelação matemática de processos constituem outros desenvolvimentos importantes.

A modelagem ajuda a entender e explicar padrões de ocorrência e possibilita simular cenários futuros, fornecendo subsídios importantes para responder a perguntas do tipo “o que aconteceria se...?”. Um exemplo de modelagem de processos é a simulação da circulação da água e do transporte de poluentes em um lago ou rio. Com um modelo computacional, é possível inferir sobre o que aconteceria se ocorresse um vazamento de óleo próximo a um lago, em termos de áreas atingidas, tempo de deslocamento da mancha de óleo, etc. Isso tudo sem o processo estar ocorrendo, apenas hipoteticamente, o que permite prever impactos e traçar alternativas de combate previamente.

Ocorrência de água na Terra

Considera-se, atualmente, que a quantidade total de água na Terra, estimada em cerca de 1.386 milhões de km³, tem permanecido de modo aproximadamente constante durante os últimos 500 milhões de anos. Entretanto, as quantidades de água estocadas na Terra sob as diferentes formas (ou nos diferentes “reservatórios”) variaram substancialmente nesse período.

Na Figura 1.1 é apresentada a distribuição da água na Terra, conforme Shiklomanov (1997) apud Setti et al. (2001).

Verifica-se que cerca de 97,5% do volume total de água na Terra estão nos oceanos (água salgada), sendo apenas 2,5% do total constituído por água doce. Por sua vez, a água doce é encontrada principalmente sob a forma de geleiras, que representam 68,7% do total de água doce. Considerando que as águas doces contidas em rios e lagos constituem as formas mais acessíveis ao uso humano e de ecossistemas, tem-se um percentual muito pequeno de água disponível – em torno de 0,27% da água doce o que corresponde a 0,007% do volume total de água.

Assim, embora a Terra apresente 1.386 milhões de km³ de água, considera-se que o que está disponível ao uso humano é apenas 0,007% dessa quantidade.

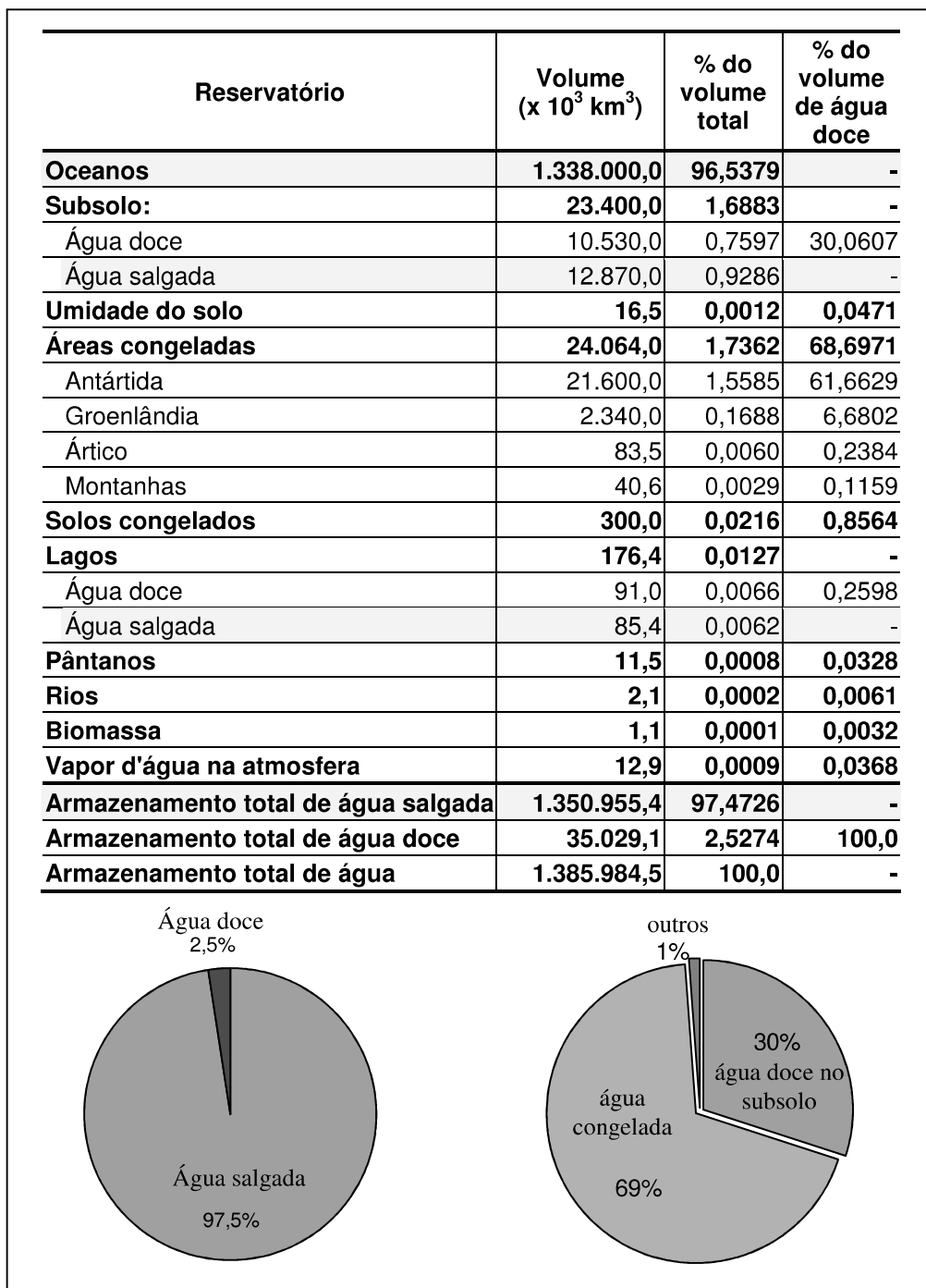


Figura 1.1 – Distribuição da água na Terra (adaptado de Shiklomanov, 1997, apud Setti et al. 2001).

Capítulo 2

ciclo hidrológico

Descrição geral

Embora tenham sido estimados os volumes em cada um dos “reservatórios” na Terra (ver Figura 1.1), é importante lembrar que a água está em constante movimento, constituindo o que se denomina de ciclo hidrológico. Esse ciclo tem o Sol como principal fonte de energia, através de sua radiação, e o campo gravitacional terrestre como a principal força atuante.

A Figura 2.1 apresenta um esquema do ciclo hidrológico, identificando as diversas etapas que o compõem.

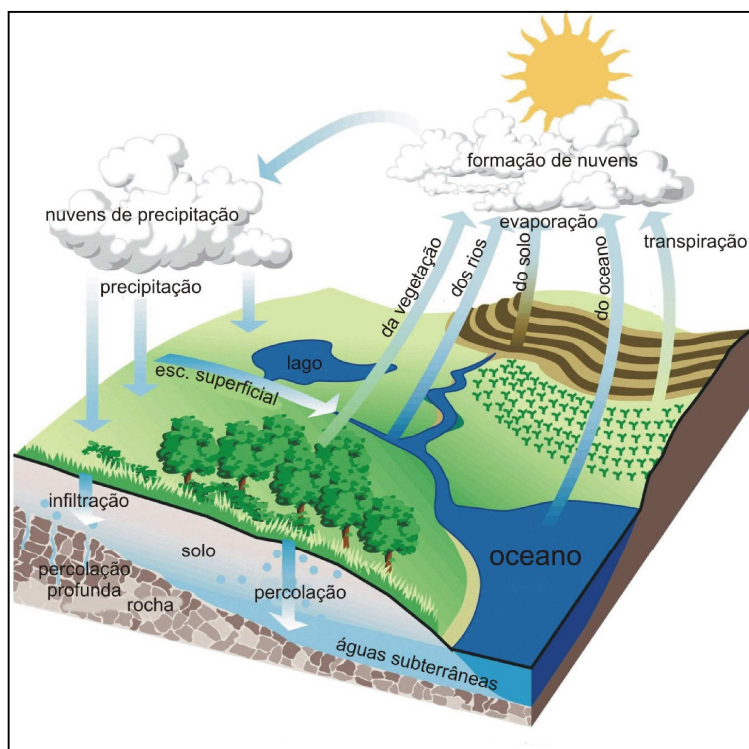


Figura 2.1 – Ciclo hidrológico (fonte: adaptado de EPA, 1998).

De maneira simplificada, o ciclo hidrológico pode ser descrito da seguinte forma:

- ocorre evaporação da água dos oceanos e formação do vapor de água;
- sob determinadas condições, o vapor precipita na forma de chuva, neve, granizo, etc (precipitação);
- parte da precipitação não chega nem a atingir a superfície terrestre, sendo evaporada;
- boa parte da precipitação atinge diretamente a superfície de lagos e oceanos, daí evaporando parcela;
- da precipitação que atinge a superfície terrestre, uma parte é interceptada pela cobertura vegetal (interceptação), de onde parte evapora e parte acaba escorrendo até o solo;
- da precipitação que chega ao solo, parcela infiltra sub-superficialmente (infiltração), e desta uma parte escoam até corpos d'água próximos, como rios e lagos (escoamento sub-superficial);
- uma parte infiltrada percola atingindo os aquíferos (percolação), que escoam lentamente até rios e lagos (escoamento subterrâneo);
- ainda quanto à parte da precipitação que atinge o solo, esta vai escoar superficialmente (escoamento superficial), sendo retida em depressões do solo, sofrendo infiltração, evaporação ou sendo absorvida pela vegetação. O “restante” do escoamento superficial segue para rios, lagos e oceanos, governada pela gravidade;
- a vegetação, que retém água das depressões do solo e infiltrações, elimina vapor d'água para a atmosfera (transpiração), através do processo de fotossíntese;
- a água que alcança os rios, seja por escoamento superficial, sub-superficial ou subterrâneo, ou mesmo precipitação direta, segue para lagos e oceanos, governada pela gravidade.

Cabe ressaltar que o ciclo hidrológico não apresenta um “começo” nem um “fim”, já que a água está em movimento contínuo, sendo o início da descrição do ciclo realizado a partir da evaporação dos oceanos apenas por questões didáticas.

Outro fato a ser ressaltado é que a evaporação está presente em quase todas as etapas do ciclo.

Um termo normalmente usado para denotar a evaporação associada à transpiração da vegetação é a evapotranspiração.

Apesar de haver algumas divergências quanto aos valores estimados de autor para autor, convém comentar que cerca de 383.000 km³ de água evaporam por ano dos oceanos (Wundt, 1953, apud Esteves, 1988). Isso equivaleria à retirada de uma camada de 106 cm de espessura dos oceanos por ano. Desse total evaporado, estima-se que 75% retornem diretamente aos oceanos sob a forma de precipitação, enquanto os 25% restantes precipitam sobre os continentes.

Uma curiosidade evidenciada por Esteves (1988) é que a composição química da precipitação oceânica difere nitidamente da continental, particularmente no que diz respeito à concentração de íons como Na⁺, Mg²⁺ e Cl⁻, maior na precipitação oceânica.

O ciclo hidrológico, como já colocado anteriormente, promove a movimentação de enormes quantidades de água ao redor do planeta. Entretanto, algumas das fases do ciclo são consideradas rápidas e outras muito lentas, se comparadas entre si. A Tabela 2.1 ilustra esse comentário, ao apresentar alguns períodos médios de renovação da água nos diferentes “reservatórios”. Tais valores dizem respeito ao tempo necessário para que toda a água contida em cada um dos reservatórios seja renovada – dentro de uma visão bastante simplificada, é claro, da “entrada”, “circulação” e “saída” de água neles.

Tabela 2.1 – Período de renovação da água em diferentes reservatórios na Terra.
Fonte: Shiklomanov (1997) apud Setti et al. (2001).

Reservatórios	Período médio de renovação
Oceanos	2.500 anos
Águas subterrâneas	1.400 anos
Umidade do solo	1 ano
Áreas permanentemente congeladas	9.700 anos
Geleiras em montanhas	1.600 anos
Solos congelados	10.000 anos
Lagos	17 anos
Pântanos	5 anos
Rios	16 dias
Biomassa	algumas horas
Vapor d'água na atmosfera	8 dias

A princípio, as etapas de precipitação e evaporação são consideradas as mais importantes dentro do ciclo hidrológico, pensando em termos de volume de água movimentado. Entretanto, à medida que se diminui a escala de análise, as demais fases do ciclo se tornam muito importantes. Por exemplo, analisando uma determinada área de dezenas de hectares, a interceptação, infiltração, percolação e escoamento superficial são bastante relevantes para entendimento dos processos hidrológicos.

Impactos sobre o ciclo hidrológico

Observando a descrição do ciclo hidrológico, é fácil perceber o quanto ele é condicionado pelas características locais, como clima, relevo, tipo de solo, uso e ocupação do solo, geologia, tipo de cobertura vegetal, rede hidrográfica (rios), etc. Por exemplo, a interceptação que ocorre em uma área com mata nativa é muito superior à de áreas agrícolas, como o cultivo de fumo e arroz. Em áreas com solo tipo argiloso, pouco permeável, a infiltração se dá em menor quantidade do que em áreas com solo arenoso, mais permeável, enquanto que em áreas pavimentadas essa fase já não ocorre praticamente. Como o escoamento se processa movido pela ação da gravidade, em terrenos mais íngremes a tendência é ocorrer menor retenção da água em depressões do solo, com escoamentos mais rápidos do que em terrenos mais planos, onde há maior propensão ao acúmulo de água, facilitando a infiltração.

O homem vem modificando o meio em que vive, de modo à “adequá-lo” às suas necessidades, o que repercute em sensíveis alterações do ciclo hidrológico. Por exemplo, pode-se citar o barramento de rios, que modifica o regime de escoamento, aumenta a evaporação e eleva o nível das águas subterrâneas (lençol freático), além de outras conseqüências sobre a biota aquática. Outro exemplo é a impermeabilização do solo devido à urbanização, o que diminui a parcela infiltrada e aumenta o escoamento superficial, causando alagamentos. O desmatamento é outro exemplo, na medida em que diminui a interceptação, deixando os solos expostos à ação das gotas de chuva e do escoamento superficial, que erodem o solo e carregam nutrientes e sedimentos para rios e lagos.

Para ilustrar o efeito da substituição da cobertura natural do solo pela urbanização sobre o ciclo hidrológico, tem-se a Figura 2.2. Observa-se que, após uma impermeabilização entre 30% e 50% da superfície, o escoamento superficial passa a

corresponder a 55% do total precipitado, enquanto esse percentual era equivalente a apenas 10% da precipitação para a situação de cobertura natural do solo.

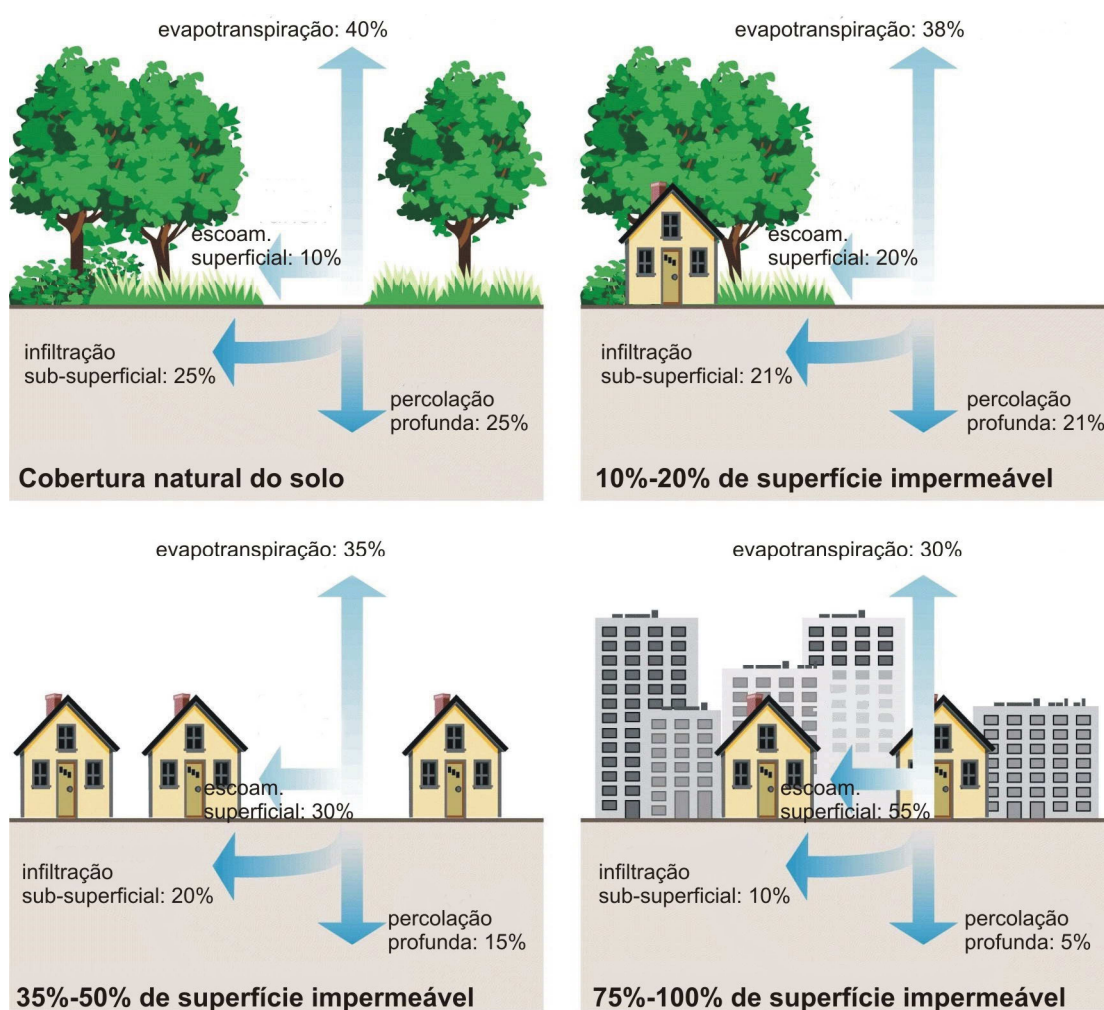


Figura 2.2 – Ilustração do efeito da urbanização sobre o ciclo hidrológico (os percentuais se referem à parcela da precipitação que “segue” cada uma das fases do ciclo). Fonte: adaptado de EPA (1998).

Além de alterar as fases do ciclo hidrológico, as atividades antrópicas¹ têm uma série de repercussões sobre o meio ambiente, tais como: contaminação de corpos d’água, devido ao lançamento de efluentes de origem industrial, agrícola ou doméstico (esgoto das cidades); introdução de espécies exóticas (espécies que não eram encontradas na região na região e foram introduzidas pelo homem); ocupação de planícies de inundação; mudanças globais no clima; desmatamento; contaminação do ar, ocasionando chuvas ácidas, etc (Tabela 2.2).

¹ atividade antrópica = aquela relativa à ação humana.

Tabela 2.2 – Atividade humana e seus impactos sobre a disponibilidade hídrica. (Fonte: adaptado de Tundisi, 2000).

Atividade humana	Impacto nos ecossistemas aquáticos	Valores/serviços em risco
Construção de represas	Alteração do fluxo dos rios, transporte de nutrientes e sedimentos, interferência na migração e reprodução de peixes	Habitats, pesca comercial e esportiva, deltas e suas economias
Construção de diques e canais	Destruição da conexão do rio com as áreas inundáveis	Fertilidade natural das várzeas e controles das enchentes
Alteração do canal natural dos rios	Danos ecológicos dos rios. Modificação dos fluxos dos rios	Habitats, pesca comercial e esportiva. Produção de hidroeletricidade e transporte.
Drenagem de áreas alagadas	Eliminação de um componente fundamental dos ecossistemas aquáticos	Biodiversidade. Funções naturais de filtragem e reciclagem de nutrientes. Habitats para peixes e aves aquáticas.
Desmatamento/uso do solo	Mudança de padrões de drenagem, inibição da recarga natural dos aquíferos, aumento da sedimentação	Qualidade e quantidade da água, pesca comercial, biodiversidade e controle de enchentes.
Poluição não controlada	Prejuízo da qualidade da água	Suprimento de água. Custos de tratamento. Pesca comercial. Biodiversidade. Saúde humana.
Remoção excessiva de biomassa	Diminuição dos recursos vivos e da biodiversidade	Pesca comercial e esportiva. Ciclos naturais dos organismos.
Introdução de espécies exóticas	Supressão das espécies nativas. Alteração dos ciclos de nutrientes e ciclos biológicos	Habitats, pesca comercial. Biodiversidade natural e estoques genéticos.
Poluentes do ar (chuva ácida)	Perturbação da composição química de rios e lagos	Pesca comercial. Biota aquática. Recreação. Saúde humana. Agricultura
Mudanças globais no clima	Alteração drástica do volume dos recursos hídricos, dos padrões de distribuição da precipitação e evaporação, riscos de enchente	Suprimento de água, transporte, produção de energia elétrica, produção agrícola, pesca.
Crescimento da população e padrões gerais do consumo humano	Aumento na pressão para construção de hidroelétricas, da poluição da água, da acidificação de lagos e rios. Modificação do ciclo hidrológico.	Praticamente todas as atividades econômicas que dependem dos serviços dos ecossistemas aquáticos.

Usos da água

Os setores usuários das águas são diversos, utilizando-as para diferentes fins. Dependendo do uso, há a necessidade de derivação da água e ocorre um consumo (uso consuntivo), retornando determinada parcela da água aos corpos d'águas. Outros usos,

como a navegação, por exemplo, são considerados não consuntivos, pois não alteram a quantidade deste recurso na natureza.

Na Tabela 2.3 são listados os principais usos da água, explicitando algumas características: existência ou não de derivação de águas do seu curso natural; a finalidade e os tipos de uso; as perdas por uso consuntivo da água; os requisitos de qualidade exigidos para cada uso e; os efeitos da utilização, especialmente de qualidade.

Tabela 2.3 – Usos da água (Fonte: adaptado de Barth, 1987, apud Setti et al., 2001).

Forma	Finalidade	Tipo de uso	Uso consuntivo	Requisitos de qualidade	Efeitos nas águas
Com derivação de águas	abastecimento urbano	abastecimento doméstico, industrial, comercial e público	baixo, de 10%, sem contar as perdas nas redes	altos ou médios, influenciando no custo do tratamento	Poluição orgânica e bacteriológica
	abastecimento industrial	sanitário, de processo, incorporação ao produto, refrigeração e geração de vapor	médio, de 20%, variando com o tipo de uso e de indústria	médios, variando com o tipo de uso	Poluição orgânica, substâncias tóxicas, elevação de temperatura
	irrigação	irrigação artificial de culturas agrícolas segundo diversos métodos	alto, de 90%	Médios, dependendo do tipo de cultura	Carreamento de agrotóxicos e fertilizantes
	abastecimento	doméstico ou para dessedentação de animais	baixo, de 10%	Médios	Alterações na qualidade com efeitos difusos
	aqüicultura	estações de piscicultura e outras	baixo, de 10%	Altos	Carreamento de matéria orgânica
sem derivação das águas	geração hidrelétrica	acionamento de turbinas hidráulicas	perdas por evaporação do reservatório	baixos	alterações no regime e na qualidade da água
	navegação fluvial	manutenção de calados mínimos e eclusas	não há	baixos	lançamento de óleo e combustíveis
	recreação, lazer e harmonia paisagística	natação e outros esportes com contato direto, como iatismo e motonáutica	lazer contemplativo	altos, especialmente recreação de contato primário	não há
	pesca	com comerciais de espécies naturais ou introduzidas através de estações de piscicultura	não há	altos, nos corpos d'água, correntes, lagos, ou reservatórios artificiais	alterações na qualidade após mortandade de peixes
	assimilação de esgotos	diluição, autodepuração e transporte de esgotos urbanos e industriais	não há	não há	poluição orgânica, física, química e bacteriológica
	usos de preservação	vazões para assegurar o equilíbrio ecológico	não há	médios	melhoria da qualidade da água

Escassez da água

Há algum tempo atrás, predominava a idéia da abundância da água na natureza, o que não gerava preocupação quanto à quantidade de água consumida ou desperdiçada por determinado uso. Entretanto, atualmente tem-se tentado tornar cada vez mais consensual a noção de escassez de água, pelo menos em termos relativos, em virtude da crescente demanda por esse valioso recurso.

São diferenciados dois tipos de escassez: (a) escassez quantitativa e (b) escassez qualitativa.

A escassez quantitativa decorre da falta de água em quantidade suficiente para atender àqueles usos pretendidos, sendo comum a ocorrência no Nordeste brasileiro (região semi-árida, principalmente). Cabe salientar aqui a irregular distribuição temporal (precipitações concentradas em poucos meses do ano) e espacial (abundância de água na Amazônia e escassez no semi-árido nordestino).

A escassez qualitativa é resultante da falta de qualidade suficiente da água para atender os usos pretendidos, ocasionada principalmente pelo lançamento de esgotos das várias origens.

Assim, por ser um recurso escasso, a água é considerada dotada de valor econômico, como dispõe a Lei 9.433 de 1997², a chamada Lei das Águas. Por isso, além da gestão da oferta de água (busca de novos mananciais de abastecimento ou aumento da exploração dos existentes), praticada há mais tempo, tem-se ressaltado a necessidade da gestão da demanda pela água. Isso visa proporcionar um uso racional desse recurso e, para tanto, diversos instrumentos estão previstos na referida lei, entre eles alguns instrumentos econômicos, como a outorga e a cobrança pela água. A outorga se refere basicamente à concessão do direito de utilização da água, seja para captá-la, para usá-la como diluição de esgotos (efluentes) ou para geração de energia elétrica, a ser emitida pelo órgão responsável. A cobrança diz respeito ao pagamento de um valor pela retirada da água do corpo d'água ou pelo lançamento de efluentes no mesmo.

² Lei Federal n. 9.433, de 8 de janeiro de 1997, que institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Recursos Hídricos e dá outras providências.