

5 Hidrologia

*Jader Lugon Jr.**
*Pedro Paulo Gomes Watts Rodrigues***

5.1 Hidrologia e ciclo hidrológico

Hidrologia é a ciência que estuda a dinâmica da água na Terra, sua circulação e distribuição, as suas propriedades físicas e químicas, e sua reação com o meio ambiente, incluindo sua relação com as formas vivas. Sua importância pode ser sintetizada simplesmente no papel da água na existência de todos os seres vivos. Não há dúvida que a forte pressão que nossa civilização exerce sobre os recursos hídricos confere à disciplina uma relevância ainda maior. O objeto central da Hidrologia é o estudo do Ciclo Hidrológico (CH) e dos diversos subciclos que o compõem.

A determinação, estimativa ou previsão de todos os mecanismos que controlam o ciclo hidrológico são essenciais para a definição da disponibilidade hídrica e da própria qualidade dessa água. Essa avaliação normalmente é conduzida no âmbito de bacias hidrográficas, que são regiões geográficas delimitadas pelo relevo, de maneira que a água que escoar sobre essa região será drenada para seu exterior por um curso principal.

O transporte de água dentro de uma bacia hidrográfica é bastante complexo, sendo controlado por diversas variáveis. Apesar disso, quatro mecanismos principais podem ser identificados: precipitação, evapotranspiração, infiltração e escoamento (superficial e subterrâneo), detalhados no item 5.2.

* Professor do PPEA do IFF. Engenheiro Mecânico, Doutor em Modelagem Computacional pela Universidade do estado do Rio de Janeiro. Instituto Federal Fluminense / *Campus* Macaé.

** Professor adjunto da Universidade do estado do Rio de Janeiro (UERJ). Doutorado em Oceanografia pela University of Newcastle Upon Tyne. UERJ.

5.2 Precipitação

A precipitação é um fenômeno através do qual o vapor de água presente na atmosfera se condensa em microgotículas, que se aglutinando podem assumir peso suficiente para que a gravidade vença o transporte ascensional. Essa aglutinação pode ser induzida por partículas de poeira, gelo ou gotas maiores (PINTO *et al.*, 1990).

5.2.1 Tipos de precipitação

Há três tipos principais de precipitações:

- a) Frontais: como sugere o nome, ocorrem na interface que separa duas massas de ar distintas;
- b) Convectivas: associadas com fortes movimentos ascensionais locais. O aquecimento intenso e rápido de porções da superfície terrestre pode gerar uma estratificação instável, com o ar menos denso sob o mais denso, estratificação essa que pode ser quebrada pela brusca ascensão dessa camada de ar, eventualmente gerando precipitação;
- c) Orográficas: chuvas que decorrem da ascensão de camadas de ar, forçada por barreiras físicas, como montanhas. São características de áreas situadas ao “pé” de serras.

5.2.2 Mensuração da precipitação

A precipitação é medida pela altura (em mm) da coluna de água acumulada sobre uma superfície plana e impermeável. Essa medição pode ser expressa por um total acumulado em um intervalo ou ao longo de um tempo determinado. Para fins de comparação entre precipitações, pode ser necessário definir sua intensidade (altura/tempo) ou duração. Chuvas frontais normalmente são duradouras e não muito intensas ao contrário das chuvas convectivas.

Medidas de precipitação média sobre uma bacia são essenciais para estimativa de disponibilidade hídrica ou previsão de eventos catastróficos. Essas medidas são conduzidas em estações pluviométricas ou meteorológicas, cujo adensamento no nosso território é bastante variado. Há regiões, portanto, que não possuem registros históricos suficientes ou mesmo qualquer tipo de registro. Por esse motivo, métodos são implementados para a cobertura dessas falhas, que podem ser de natureza espacial ou temporal. Dentre esses métodos, destacam-se o Aritmético, de Thiessen e das Isoietas (PINTO *et al.*, 1990; TUCCI, 1993):

- **Método Aritmético:** simplesmente estabelece uma média aritmética entre as alturas pluviométricas registradas nas estações da bacia. Seus resultados são tão mais confiáveis quanto melhor for a distribuição das estações na bacia;
- **Método Thiessen:** nesse método determina-se uma média ponderada das alturas registradas, que é diretamente proporcional à área de influência da bacia. Essa área de influência é determinada através dos seguintes passos:
 - i) Sobre o mapa da bacia as estações são ligadas por linhas, determinando-se polígonos;
 - ii) Mediatrizes são traçadas para cada lado, de maneira que o encontro dessas com o contorno da própria bacia delimitam as áreas de influência para cada estação.
- **Método das Isoietas:** curvas de mesma precipitação, construídas a partir de dados pluviométricos, determinam sobre uma bacia o que se denominam isoietas. As isoietas, juntamente com os contornos da bacia, delimitam áreas que servem como peso no cálculo da precipitação média ponderada sobre a bacia.

5.2.3 Verificação de homogeneidade de dados

Os dados seguintes representam precipitação (mm) anual acumulada em 4 estações, situadas em região que apresenta o mesmo padrão de precipitações. Dessa maneira, em que pesem os acumulados para cada estação variarem, todas obedecem ao mesmo padrão de variação. Sendo assim, gráficos que correlacionassem os valores de cada estação com as médias delas, todas teriam que ser retas. Na sequência, são apresentados esses gráficos que se constituem

em retas geradas pelo aplicativo Excel. De fato, ainda que cada reta tenha uma inclinação distinta, não há mudança de inflexão em nenhuma delas. Caso houvesse, isso poderia ser decorrente de inúmeros fatores, mas, para efeito prático, essa anomalia poderia ser corrigida. Da mesma forma, a ausência de dados poderia ser suprida.

Um exemplo pode elucidar o procedimento usual para solucionar esse tipo de problema, supondo que o dado assinalado em negrito na Tabela 1 não estivesse disponível, ou que fosse inconsistente. Nesse caso, a precipitação poderia ser estimada (dado faltante) ou corrigida (dado inconsistente), obtendo-se a média ponderada dos valores obtidos no mesmo ano para as estações 2, 3 e 4, e a ponderação seria estabelecida através da razão entre a média da estação 1 e, respectivamente, as médias das estações 2, 3 e 4.

Tabela 1
Dados de precipitação (mm) anual acumulada em 4 estações

Ano	1	2	3	4	média
1	461	1003	745	961	792,5
2	982	1142	1250	1444	1204,5
3	1203	1118	1535	1220	1269
4	812	1070	998	1515	1098,75
5	425	661	743	408	559,25
6	1022	1564	1393	732	1177,75
7	533	852	893	718	749
8	388	629	635	477	532,25
9	596	940	626	620	695,5
10	906	2029	1154	1206	1323,75
11	1016	1701	1044	1201	1240,5
12	793	1342	1295	1154	1146
13	908	1068	649	710	833,75
Média anual	772	1163	996	951	

Fonte: Elaboração própria.

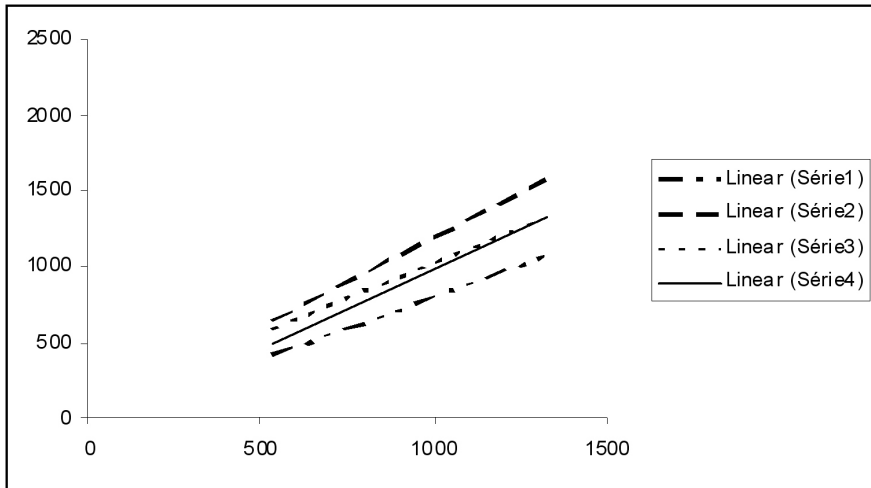


Figura 5.1: Gráficos para análise dos dados de precipitação

Fonte: Elaboração própria.

5.3 Evapotranspiração

Define-se por evaporação o processo físico, através do qual a água presente sobre a superfície terrestre ou nos poros do solo é transformada em vapor de água. Já a transpiração é um processo biológico, ativamente conduzido pelos vegetais no curso de suas atividades fisiológicas, resultando em liberação de água para a atmosfera, sob forma de vapor. Na maior parte das vezes, os dois fenômenos são tratados em conjunto, daí o termo evapotranspiração (PINTO *et al.*, 1990; TUCCI, 1993).

Há diversos fatores que controlam a evapotranspiração. Por exemplo, a evaporação será tanto menos intensa quanto maior for a *umidade relativa do ar*, obedecendo à lei de Dalton, que estabelece que a intensidade do processo é proporcional ao gradiente da pressão de vapor entre a superfície evaporada e o ar, dada pela expressão:

$$EV = c(p_0 - p_a) \quad (1)$$

Onde EV é a intensidade da evaporação, C é uma constante que depende de diversos fatores e p_0 e p_a são, respectivamente, a pressão de saturação do vapor de água à temperatura da água e a pressão de vapor presente no ar atmosférico.

Por outro lado, a intensidade do processo é diretamente proporcional à *temperatura*, uma vez que a capacidade de absorção do ar aumenta com o aumento desse parâmetro. O *vento* também tem efeito sobre a evapotranspiração, na medida em que renova o ar adjacente às superfícies livres de corpos de água ou no entorno de vegetais, adveitando massas de ar eventualmente saturadas. Outro fator relevante é a intensidade da *radiação solar*, que controla tanto a atividade metabólica dos vegetais (transpiração) como determina a mudança de estado da água para vapor (evaporação).

5.3.1 Mensuração da evapotranspiração

Antes de apresentar os métodos de estimativa dessa variável, é conveniente distinguir entre evapotranspiração potencial e real. A primeira refere-se a uma situação ideal, a superfície evapotranspirada sendo considerada toda coberta por vegetação de pequeno porte, e que não esteja limitada quanto ao suprimento de água. Como tal cenário nem sempre é o que ocorre na natureza, há necessidade de se considerar a evapotranspiração real, que será o volume total de água retirado de uma dada região, em decorrência dos processos de evaporação e transpiração. Pelas definições, conclui-se que a evapotranspiração real nunca será superior à potencial. Como qualquer variável hidrológica, evaporação e transpiração podem ser medidas ou calculadas.

5.3.1.1 Medidas diretas

A *evaporação* pode ser medida diretamente em águas não agitadas, através de evaporímetros. Esses se constituem em recipientes, cuja área da superfície voltada para a atmosfera é conhecida, e que são colocados próximos aos corpos de água dos quais se pretende determinar a taxa de evaporação.

Determina-se a evolução do volume presente no recipiente ao longo de um intervalo de tempo, monitorando-se, simultaneamente, as variáveis mais relevantes para o processo: temperatura, umidade do ar e velocidade do vento. Os cálculos devem, evidentemente, considerar o aporte de água decorrente da precipitação.

Por outro lado, a *evapotranspiração* decorrente do solo pode ser determinada através de lisímetros, que são tanques enterrados no solo, com geometria determinada, sendo recobertos pelo solo local, obedecendo à ordem original dos horizontes. Ao fundo do tanque são instalados drenos, que possibilitam recolher e medir a água drenada. Conhecendo-se a precipitação e determinando-se a quantidade de água percolada pelo solo, tem-se, por diferença, o total evapotranspirado.

5.3.1.2 Fórmulas empíricas

A evaporação pode ser estimada também através de fórmulas empíricas, que normalmente se baseiam na lei de Dalton. Nesse caso, o processo é formulado pelo gradiente de pressão de vapor existente entre a superfície evaporada e o ar sobrejacente. Da mesma maneira, a evapotranspiração pode ser avaliada empiricamente, em formulações que adotam como variável de controle a temperatura (Fórmula de Thornthwaite), a radiação incidente ou ambos.

5.3.1.3 Balanço hídrico

Por último, a evapotranspiração pode ser estimada indiretamente, através do balanço hídrico para uma dada bacia hidrográfica. A diferença entre o total precipitado e o volume escoado por uma seção que drene toda a bacia, feitas as devidas conversões, será devido à evapotranspiração, se for considerado que o armazenamento subterrâneo seja pequeno. Essa hipótese é particularmente válida para longos períodos de tempo.

5.4 Infiltração

Define-se por infiltração o processo de penetração da água no interior do solo. Há diversos fatores que controlam tanto a capacidade de infiltração quanto a velocidade com que o processo ocorre no interior do solo. O tipo, grau de umidade e de compactação do solo, bem como a cobertura vegetal e até mesmo a temperatura podem atenuar ou acelerar o processo de infiltração.

5.4.1 Mensuração da infiltração

5.4.1.1 Medidas diretas

A infiltração pode ser medida diretamente no campo através de infiltômetros. Estes são tubos cilíndricos que, cravados verticalmente no solo, permitem um contato com a atmosfera, através dos quais um volume conhecido de água é adicionado, de maneira a manter-se constante uma lâmina de água sobrejacente a esse contato. Conhecendo-se a taxa de adição de água sobre essa superfície livre, é possível determinar-se a taxa de infiltração. Alternativamente, a exemplo da determinação da evapotranspiração, lisímetros podem ser utilizados para determinação da taxa de infiltração.

5.4.1.2 Balanço hídrico

Aplicável apenas para pequenas bacias hidrográficas, nas quais é aceitável a hipótese de homogeneidade espacial das variáveis que controlam a infiltração. Baseia-se na diferença entre precipitação e deflúvio, para o intervalo de tempo em que transcorre a precipitação, ou seja, o período em que se dá o escoamento superficial.

5.5 Águas subterrâneas

A água que se infiltra no solo está submetida a três forças: atração molecular, tensão superficial e gravidade. A Figura 2 é uma representação esquemática dos horizontes ocupados por essa água.

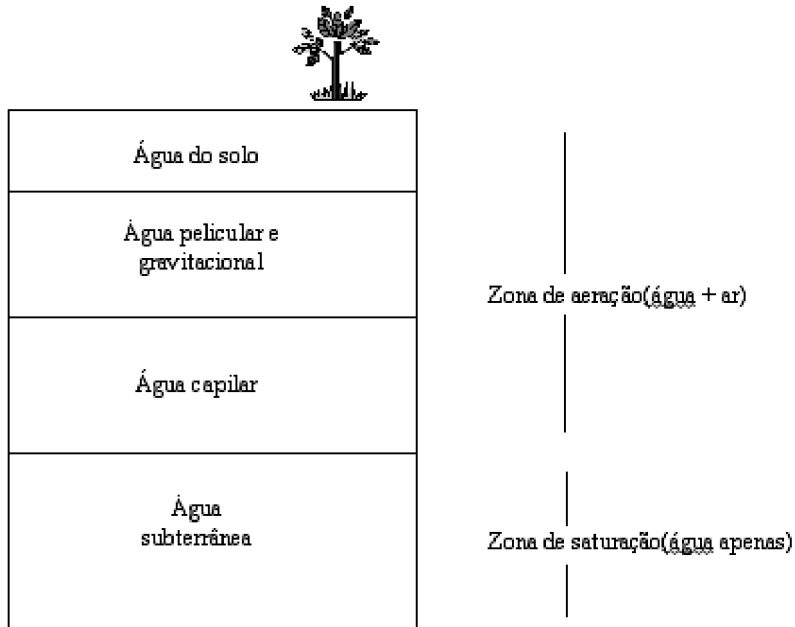


Figura 2: Representação esquemática dos horizontes ocupados pela água no solo

Fonte: adaptado de PINTO *et al.*, 1990.

Na zona de aeração, próxima à superfície, a água absorvida do ar é mantida em torno de partículas sólidas por forças moleculares. Já a água que divide com o ar os interstícios entre os poros deixados pelos sedimentos, está sujeita a forças capilares. É dita subterrânea a água que vence essas duas forças e, impulsionada pela gravidade, vem se acumular em lençóis subterrâneos. Há dois tipos fundamentais de lençóis subterrâneos. Os denominados freáticos que se apresentam com superfície livre; e artesianos que se não a possuem, estando limitados, nesse caso, por duas camadas impermeáveis.

5.6 Escoamento superficial

Define-se por escoamento superficial todo deslocamento de água que ocorra sobre a superfície terrestre. Para uma mesma precipitação, diversos fatores condicionam a intensidade e duração do escoamento superficial: área drenada, topografia, tipo de cobertura vegetal, tipo de solo e geologia da área drenada. Há ainda fatores decorrentes da atividade humana, tais como irrigação, canalização, captação e construção de barragens.

5.6.1 Hidrograma

Hidrograma é a denominação dada ao gráfico que relaciona a vazão no tempo. A distribuição da vazão no tempo é resultado da interação de todos os componentes do ciclo hidrológico, que se dá entre a ocorrência da precipitação e a vazão na bacia hidrográfica. A Figura 5.3 apresenta um hidrograma típico.

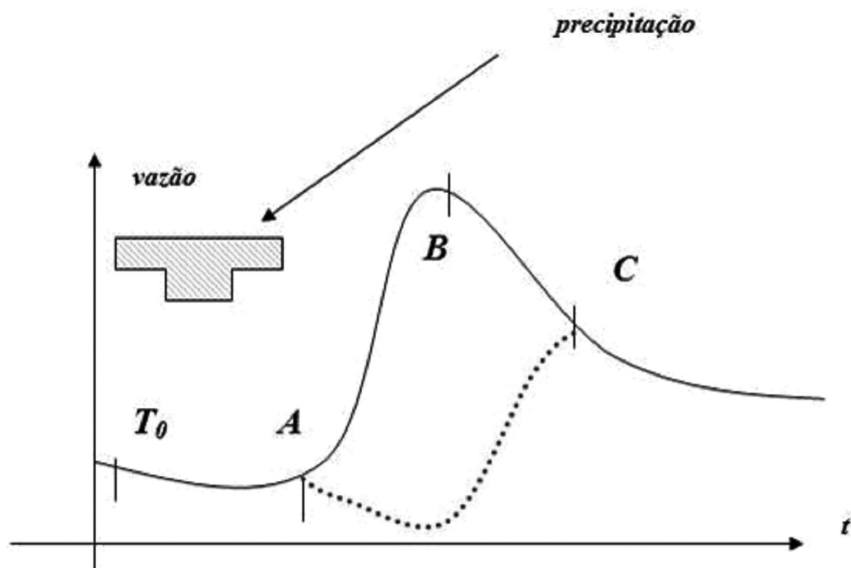


Figura 3: Representação esquemática de um hidrograma típico.

Fonte: Elaboração própria.

A linha tracejada da Figura 3 representa o escoamento subterrâneo. O intervalo transcorrido entre T_0 e A representa um retardo da resposta do escoamento superficial à precipitação, fruto de mecanismos como interceptação e o preenchimento de eventuais depressões presentes sobre a área drenada. De A até B, constata-se um acentuado aumento da vazão, após o qual dá-se um declínio de forma mais branda. O escoamento superficial se encerra em C, quando a vazão volta a ser controlada pelo escoamento subterrâneo.

Segundo Pinto *et al.* (1990), considerando-se chuvas de distribuição uniforme e intensidade constante sobre uma bacia, três proposições básicas podem ser enunciadas com respeito a um hidrograma:

- a) em uma dada bacia hidrográfica, o tempo de duração do escoamento superficial é constante para chuvas de igual duração;
- b) duas chuvas de igual duração, produzindo volumes diferentes de escoamento superficial, dão lugar a fluviogramas em que as ordenadas, em tempos correspondentes, são proporcionais aos volumes escoados;
- c) a distribuição, no tempo, do escoamento superficial de determinada precipitação independe de precipitações anteriores.

Por último, deve ser destacado que a forma do hidrograma dá indicativos de algumas características da bacia hidrográfica à qual se relaciona. Assim, hidrogramas de bacias essencialmente rurais apresentam boa distribuição da vazão ao longo do tempo, enquanto que de bacias urbanas apresentam picos pronunciados. Por outro lado, bacias em forma radial apresentam hidrogramas com picos mais acentuados e prematuros, se comparadas com bacias em forma alongada.

5.6.2 Vazões líquidas

Vazão líquida, ou simplesmente vazão, é o volume de água por unidade de tempo que é transportado por uma seção transversal de um curso de água. Os principais métodos de medição de vazão são (SANTOS *et al.*, 2008):

- por flutuadores;
- vertedores;
- volumétrico;
- químico;
- integração das velocidades;
- acústico.

A vazão medida por *flutuadores* consiste em determinar-se a velocidade de deslocamento de objetos que fluem na lâmina de água. Conhecendo-se a área média das seções onde se conduz a medição, determina-se a vazão. Já *vertedores* são dispositivos de geometria regular, nos quais a relação entre velocidade de escoamento e altura de lâmina de água é conhecida. Determinando-se, portanto, a altura dessa lâmina, tem-se a velocidade e, por conseguinte, a vazão do curso. O método *volumétrico* baseia-se no tempo necessário para o enchimento de um volume conhecido. Embora seja o mais preciso de todos os métodos, é de difícil aplicação para a maioria das situações práticas.

Uma alternativa bastante precisa, principalmente para cursos situados em montanhas, é o método *químico*, que consiste no lançamento contínuo e não transiente de substância conservativa no curso em que se deseja determinar a vazão. Se no período de tempo da medição for assumido que o escoamento do curso é invariante, determinando-se a concentração resultante em um ponto a jusante, obtém-se a vazão.

O método da *integração das velocidades* é, seguramente, o de mais ampla aplicação. Consiste em determinarem-se velocidades, usualmente por meio de molinetes fluviométricos, em distintos pontos na transversal do curso e a diferentes profundidades. A velocidade média da seção é, então, obtida através de uma média ponderada, na qual o fator de ponderação é a subárea, que seja representativa do(s) ponto(s) de determinação.

Por último, tem-se o método *acústico*, oriundo de metodologia muito empregada em oceanografia. Em síntese, esse consiste em determinar-se o tempo de retorno de um pulso sonoro aplicado sobre uma coluna de água. Conhecendo-se fatores como frequência de emissão e velocidade de propagação, obtém-se não só o campo de velocidades, como a própria batimetria do curso.

5.7 Ciclo hidrológico e qualidade de água: uma perspectiva de modelagem

Como visto até aqui, o ciclo hidrológico é composto por uma complexa trama de processos que se passam nos diversos compartimentos em que a água pode existir. Embora, conceitualmente, a sua dinâmica seja relativamente bem compreendida, a quantificação do ciclo esbarra em diversos problemas operacionais. Da mesma maneira, a qualidade da água, dentro do ciclo, sofre alterações, antropogênicas ou não, muitas vezes de difícil mensuração, dentro de uma representatividade amostral que se considere aceitável. Tais fatos impõem severas limitações à gestão de recursos hídricos.

É sabido que o gerenciamento de uma bacia hidrográfica pressupõe o conhecimento do seu ambiente, envolvendo o reconhecimento do tipo de ocupação, atividades e recursos hídricos existentes. Por outro lado, as características físicas e químicas dos cursos que drenam a bacia são severamente influenciadas pelo uso que se faz do solo. Por exemplo, o escoamento superficial é uma importante fonte não pontual de poluição. Além disso, através dos processos de evapotranspiração, interceptação, infiltração, percolação e absorção, os diferentes tipos de cobertura de solo influenciam o balanço de água e o ciclo hidrológico e, como consequência, também condicionam a quantidade e qualidade das águas nos diferentes compartimentos em que se armazenam na bacia. Dessa forma, o manejo dos recursos de uma bacia passa pela avaliação integrada do uso do solo e da caracterização quantitativa e qualitativa dos reservatórios superficiais e subterrâneos de água.

O diagnóstico da qualidade de um corpo hídrico, convencionalmente, baseia-se na análise de alguns parâmetros. No Brasil, as Resoluções CONAMA 01/1986 e 357/2005 estabeleceram níveis de concentração de acordo com os usos aos quais se destina a água. A gestão de recursos hídricos não envolve, entretanto, somente diagnóstico, mas também monitoramento e previsão de cenários futuros. Historicamente, a avaliação do comportamento de constituintes em corpos de água iniciou-se pelo desenvolvimento de modelos chamados do tipo “caixa-preta”, em que a remoção ou produção do constituinte era avaliada pelo balanço de massa existente entre sua entrada e sua saída no corpo hídrico considerado. Tal abordagem baseia-se em monitoramento intensivo, com óbvias limitações logísticas e econômicas. Alternativamente, o comportamento de substâncias nesses corpos de água pode ser estimado

através de modelos matemáticos e computacionais. Sob esse aspecto, os ditos modelos de qualidade de água constituem-se em ferramentas extremamente úteis. Embora sejam sempre abstrações da realidade, se consistentes, tais modelos reduzem tempo, custo e risco de análises de impactos que estejam sendo avaliados sobre os corpos hídricos. A construção, implementação e validação desses modelos exigem um conjunto de entradas, como condições de contorno, entradas externas, reações internas e a forma do corpo hídrico a ser representado no modelo.

Tais modelos possibilitam descrever a dinâmica e o transporte de solutos ou suspensões dentro do sistema. Idealmente, apresentam-se como os instrumentos mais adequados de diagnóstico e prognóstico de ambientes aquáticos, pois, uma vez calibrados, diversos cenários podem ser gerados, bastando-se que para isso sejam modificados os dados e entradas do modelo.

Por último, deve-se destacar que a capacidade desses modelos de lidar com uma ampla e variada gama de variáveis, torna-os particularmente atraentes na gestão de recursos hídricos. Nesse sentido, o desenvolvimento e aprimoramento dos Sistemas de Informação Geográfica (SIG) vêm permitindo o acoplamento dessas plataformas aos modelos de qualidade de água, de maneira que o georreferenciamento de características relevantes para a modelagem, tais como cobertura/uso do solo e relevo, bem como a fácil manipulação e exportação desses dados a partir dos SIGs, vem permitindo uma mais ágil definição de cenários de quantidade e qualidade de água.