CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO À HIDROLOGIA ESTATÍSTICA

CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO À HIDROLOGIA ESTATÍSTICA

Esse capítulo apresenta o contexto no qual se insere a hidrologia estatística e introduz brevemente as idéias de processos, variáveis, séries e dados hidrológicos.

1.1 – Caracterização dos Fenômenos e Processos Hidrológicos

A 'Hidrologia' é a geociência que investiga os fenômenos que determinam a distribuição espaço-temporal da água, em nosso planeta, sob os atributos de quantidade, de qualidade e de interação com as sociedades humanas. Os fenômenos hidrológicos são aqueles que definem os mecanismos de armazenamento e transporte entre as diversas fases do ciclo da água em nosso planeta, com atenção especial para as áreas continentais. As intensidades com que esses fenômenos se manifestam apresentam uma marcante variabilidade ao longo do tempo e do espaço, em decorrência das variações, algumas regulares e muitas irregulares, dos climas global e regional, bem como das particularidades regionais e locais, sob os aspectos meteorológicos, geomorfológicos, de propriedades e uso do solo, entre tantos outros. A 'Hidrologia Aplicada' utiliza os princípios da hidrologia para planejar, projetar e operar sistemas de aproveitamento e controle de recursos hídricos; a consecução desses objetivos requer a quantificação confiável das variabilidades espaciais e/ou temporais presentes em fenômenos hidrológicos tais como: precipitação, escoamento e armazenamento superficiais, evapotranspiração, infiltração, escoamento e armazenamento sub-superficiais, propriedades físico-químicas e biológicas da água, conformações geomorfológicas, transporte de sedimentos, etc.

As intensidades com que os fenômenos hidrológicos ocorrem, podem ser postas como funções do tempo, ou do espaço, ou de ambos, em escalas geográficas diversas que vão desde a global até a local, passando pela escala usual da bacia hidrográfica. A tais funções associa-se o conceito de processos hidrológicos. A função do tempo que descreve a evolução contínua das vazões que atravessam uma certa seção fluvial é um exemplo de um processo hidrológico. Os processos associados ao ciclo hidrológico podem ser classificados, grosso modo, em determinísticos ou estocásticos embora, em geral, sejam, de fato, uma combinação de ambos.

Os processos hidrológicos determinísticos são aqueles que resultam da aplicação direta de leis da Física, Química ou Biologia. Em hidrologia, são raríssimas as ocorrências das regularidades inerentes aos processos puramente determinísticos, nos quais as variações espaço-temporais podem ser completamente explicadas

por um número limitado de variáveis, a partir de relações funcionais ou experimentais unívocas. A resposta hidrológica de uma superfície completamente impermeável, de geometria simples e totalmente definida, a um pulso conhecido, uniforme e homogêneo de precipitação, pode ser considerado um raro exemplo de um processo hidrológico puramente determinístico. Uma curva-chave estável, válida para uma seção encaixada em um leito rochoso de um trecho fluvial, com controle hidráulico invariável e inequivocamente definido, para a qual tenha sido precisamente determinada a histerese devida ao escoamento não permanente, é outro raro exemplo de uma relação puramente determinística. Evidentemente, em rios naturais, com leitos móveis ou controle hidráulico variável, a situação anteriormente descrita é de ocorrência muito improvável, estando a relação cota-descarga sujeita à complexa interferência de uma infinidade de fatores aleatórios.

Quase todos os processos hidrológicos são considerados estocásticos, ou governados por leis de probabilidades, por conterem componentes aleatórias as quais se superpõem a regularidades eventualmente explicitáveis, tais como as estações do ano ou às variações da radiação solar no topo da atmosfera ao longo da órbita da Terra em torno do Sol. Nesse sentido, em um dado ponto do espaço geográfico, são considerados processos hidrológicos estocásticos a precipitação, a evapo-transpiração, os escoamentos superficial e sub-superficial, os afluxos de sedimento em suspensão, as concentrações de oxigênio dissolvido, as conformações do leito fluvial, as temperaturas da água, as capacidades de infiltração, dentre tantos outros. Rigorosamente, pela forçosa existência de componentes aleatórios, inexistem relações funcionais e unívocas entre as variáveis características de processos hidrológicos. Tomando-se como exemplo as características relevantes das enchentes em uma certa bacia hidrográfica, é notável a presença de forte aleatoriedade por tratar-se de um fenômeno no qual nem todos os fatores causais e/ou influentes, bem como suas interdependências nas escalas espacial e temporal, podem ser precisamente explicitados e determinados. De fato, as distribuições espacial e temporal da precipitação, a velocidade e a direção de deslocamento da tormenta sobre a bacia, as variações temporais e espaciais das perdas por interceptação, evapo-transpiração e infiltração, bem como dos teores de umidade do solo, são exemplos do grande número de fatores interdependentes que podem causar cheias ou influir em sua formação e intensificação.

Nesse ponto, poder-se-ia inferir, então, que, se todos os fatores causais pudessem ser definidos e medidos com precisão e se todas as possíveis dependências entre eles puderem ser explicitadas e determinadas, as características relevantes das enchentes de uma dada bacia hidrográfica poderiam ser tratadas como relações puramente determinísticas do tipo causa-efeito. Entretanto, tal possibilidade esbarra

em restrições práticas associadas ao monitoramento preciso e abrangente dos fatores causais, bem como nos limites do conhecimento humano sobre os processos hidrológicos, muito embora sejam inegáveis os avanços continuados da pesquisa científica e do desenvolvimento tecnológico em tais direções. Ao longo do futuro, esses avanços certamente irão reduzir o grau de aleatoriedade presente nos processos hidrológicos, mas não o farão a ponto de torná-los puramente determinísticos.

Estas constatações conduzem ao emprego simultâneo das abordagens determinística e estocástica para a melhor explicitação e para o correto entendimento das regularidades e também das variabilidades inerentes aos processos hidrológicos, de modo a agregá-las em sólido arcabouço científico e tecnológico capaz de proporcionar elementos para a formulação de propostas racionais para questões relativas ao desenvolvimento dos recursos hídricos. Nesse contexto, posto que aos fenômenos hidrológicos associam-se distribuições da variabilidade espaço-temporal de variáveis aleatórias, relativas à quantidade e à qualidade da água, é forçosa a necessidade do emprego da teoria de probabilidades, aqui resumidamente definida como a área da matemática que investiga os fenômenos aleatórios. A teoria de probabilidades apresenta duas ramificações de grande importância para a hidrologia aplicada: a estatística matemática e o estudo de processos estocásticos. A estatística matemática é o ramo da teoria de probabilidades que permite analisar um conjunto limitado de observações de um fenômeno aleatório e extrair inferências quanto à ocorrência de todas as prováveis realizações do fenômeno em questão. O estudo de processos estocásticos refere-se à identificação e interpretação da aleatoriedade presente em tais processos, em geral por meio de modelos matemáticos que buscam estabelecer as possíveis conexões seqüenciais, no tempo e/ou no espaço, entre suas realizações.

O conjunto {teoria de probabilidades - estatística matemática - processos estocásticos} constitui um amplo corpo teórico que partilha dos mesmos fundamentos e encontra uma diversificada gama de aplicações em hidrologia. Não obstante a fundamentação teórica em comum, é freqüente agruparem-se as aplicações hidrológicas da teoria de probabilidades e da estatística matemática na disciplina 'Hidrologia Estatística', cabendo à 'Hidrologia Estocástica' o estudo dos processos hidrológicos estocásticos. Esta publicação, sob o título 'Hidrologia Estatística', tem por objetivo apresentar os fundamentos da teoria de probabilidades e da estatística matemática, tal como aplicados na identificação e interpretação da aleatoriedade presente nos processos hidrológicos, bem como na formulação e estimação de modelos probabilísticos de suas respectivas variáveis características.

1.2 – Variáveis Hidrológicas

As variações temporais e/ou espaciais dos fenômenos do ciclo da água podem ser descritas pelas variáveis hidrológicas. São exemplos de variáveis hidrológicas o número anual de dias consecutivos sem precipitação, em um dado local, e a intensidade máxima anual da chuva de duração igual a 30 minutos. Outros exemplos são a vazão média anual de uma bacia hidrográfica, o total diário de evaporação de um reservatório ou a categoria dos 'estados do tempo' empregada em alguns boletins meteorológicos.

As flutuações das variáveis hidrológicas, ao longo do tempo ou do espaço, podem ser quantificadas, ou categorizadas, por meio de observações ou medições, as quais, em geral, são executadas de modo sistemático e de acordo com padrões nacionais ou internacionais. Por exemplo, as variações temporais dos níveis d'água médios diários da seção fluvial de uma grande bacia hidrográfica podem ser monitoradas pelas médias aritméticas das leituras das réguas linimétricas, tomadas às 7 e às 17 horas de cada dia. Da mesma forma, as variações dos totais diários de evaporação de um lago podem ser estimadas pelas leituras dos níveis de um tanque evaporimétrico local, tomadas regularmente às 9 horas da manhã. Essas são exemplos de variáveis hidrológicas, as quais, por estarem associadas a processos estocásticos, são descritas por distribuições de probabilidade e consideradas variáveis aleatórias. Ao conjunto das observações de uma certa variável hidrológica, tomadas em tempos e/ou locais diferentes, dá-se o nome de amostra, a qual contem um número limitado de realizações daquela variável. É certo que a amostra não contem todas as possíveis observações daquela variável, as quais estarão contidas na população que reúne a infinidade de todas as possíveis realizações do processo hidrológico em questão. O objeto principal da hidrologia estatística é o de extrair da amostra, os elementos suficientes para concluir, por exemplo, com que probabilidade a variável hidrológica, em questão, irá igualar ou superar um certo valor de referência, o qual ainda não foi observado, encontrando-se, portanto, fora da amplitude estabelecida pelos limites amostrais.

Segundo as características de seus resultados possíveis, as variáveis aleatórias podem ser classificadas em qualitativas ou quantitativas. As primeiras são aquelas cujos resultados possíveis não podem ser expressos por um número e, sim, por um atributo ou qualidade. As variáveis qualitativas ainda podem ser subdivididas em nominais e ordinais, em consonância com as respectivas possibilidades de seus atributos, ou qualidades, não serem ou serem classificados em modo único. O estado do tempo, entre as possibilidades {'bom', 'chuvoso' e 'nublado'}, é exemplo de uma variável hidrológica qualitativa nominal porque seus resultados não são números e, também, por não serem passíveis de ordenação ou classificação.

De outra forma, o nível de armazenamento de um reservatório, tomado entre as possibilidades {A: excessivamente alto; B: alto; C: médio; D: baixo e E: excessivamente baixo}, representa um exemplo de uma variável hidrológica qualitativa ordinal.

As variáveis hidrológicas quantitativas são aquelas cujos resultados possíveis são expressos por números inteiros ou reais, recebendo a denominação de discretas, no primeiro caso, e contínuas no segundo. O número anual de dias consecutivos sem chuva, em um dado local, é um exemplo de uma variável hidrológica discreta cujos valores possíveis estarão compreendidos integralmente no subconjunto dos números inteiros dado por {0, 1, 2, 3, ..., 366}. Por outro lado, a altura diária máxima anual de precipitação, nesse mesmo local, é uma variável hidrológica contínua porque o conjunto de seus resultados possíveis estará totalmente contido no subconjunto dos números reais não negativos. As variáveis hidrológicas quantitativas ainda podem ser classificadas em limitadas e ilimitadas. As primeiras são aquelas em que os resultados possíveis são limitados superior e inferiormente, seja por condicionantes físicas, seja pelo modo como são medidas. A variável concentração de oxigênio dissolvido em um lago, por exemplo, é limitada inferiormente por zero e superiormente pela capacidade de dissolução de oxigênio do corpo d'água, a qual, por sua vez, é dependente de sua temperatura. Do mesmo modo, a direção do vento local, registrada em um anemômetro, será um ângulo compreendido entre 0 e 360º. Por sua vez, as variáveis ilimitadas não possuem limites inferior e superior definidos. Embora a variável vazão média diária de um curso d'água não pode, evidentemente, ter valores negativos, ela não estará limitada, pelo menos do ponto de vista da hidrologia estatística, a um limiar superior conhecido ou definível, sendo, portanto, uma variável hidrológica, quantitativa, contínua e ilimitada.

As variáveis hidrológicas ainda podem ser classificadas em univariadas, quando a elas associam-se os resultados de apenas um único atributo de quantidade ou qualidade da água, ou multivariadas em caso contrário. As alturas horárias de precipitação em um certo local são um exemplo de variável hidrológica univariada, enquanto a variação conjunta das alturas horárias de chuva, observadas simultaneamente em diversos pontos de uma bacia hidrográfica, pode ser descrita por uma variável hidrológica multivariada. Por representarem o objeto de grande parte das aplicações da hidrologia estatística, a presente publicação ocupar-se-á exclusivamente das variáveis hidrológicas aleatórias quantitativas.

1.3 – Séries Hidrológicas

As variáveis hidrológicas e hidrometeorológicas têm sua variabilidade registrada por meio das chamadas séries temporais, as quais reúnem as observações ou medições daquela variável, organizadas no modo seqüencial de sua ocorrência no tempo (ou espaço). Por limitações impostas pelos processos de medição ou observação, as variáveis hidrológicas, embora apresentem variações instantâneas ou contínuas ao longo do tempo, ou do espaço, têm seus registros separados por determinados intervalos de tempo, ou de distância. Em geral, os intervalos de tempo (ou de distância) entre os registros sucessivos de uma série temporal são eqüidistantes, embora possam existir séries temporais com registros tomados em intervalos irregulares. Em uma bacia hidrográfica de alguns milhares de quilômetros quadrados, por exemplo, as vazões médias diárias, tomadas como médias aritméticas das leituras linimétricas instantâneas das 7 e das 17 horas de cada dia, irão constituir a série temporal representativa da variável hidrológica em questão. Em outra bacia hipotética, de apenas algumas dezenas de quilômetros quadrados e com tempos de concentração de poucas horas, as vazões médias diárias serão insuficientes para demonstrar a variabilidade ao longo do dia; nesse caso, a série temporal mais conveniente deveria ser, por exemplo, aquela formada pelos registros consecutivos de vazões médias horárias.

As séries hidrológicas podem incluir todas as observações disponíveis, coletadas em intervalos de tempo regulares ao longo de vários anos de registros, ou apenas alguns de seus valores característicos como, por exemplo, os máximos anuais ou as médias mensais. No primeiro caso, quando nenhum registro é desprezado, trata-se da chamada série hidrológica completa e, no segundo, quando apenas algumas observações do registro são consideradas, ou quando elas são resumidas por meio de valores médios anuais ou mensais, trata-se da série hidrológica reduzida. A série composta por todas as vazões médias diárias observadas em uma estação fluviométrica é um exemplo de uma série completa, enquanto que aquela composta pelas vazões médias anuais, organizadas de acordo com a ordem cronológica das ocorrências, é um exemplo de série reduzida.

No caso específico de eventos hidrológicos extremos, tais como máximos e mínimos, as séries reduzidas podem ser anuais, quando os registros consecutivos são eqüidistantes no tempo, ou de duração parcial, em caso contrário. A Figura 1.1 ilustra a série de máximos anuais do Rio Paraopeba, na estação fluviométrica de Ponte Nova do Paraopeba (código 40800001), localizada na região centro sul do estado de Minas Gerais, a qual é composta por valores extraídos da série hidrológica completa; para um certo ano, extraiu-se somente um único valor, correspondente à máxima vazão média diária entre as 365 ou 366 observações

daquele ano. Embora a série anual, assim construída, contenha menos informação hidrológica que a série completa, ela reúne as observações geralmente consideradas como essenciais em estudos de vazões de enchentes. Observando a série anual da Figura1.1, vê-se que o ano de 1971 foi excepcionalmente seco e que seu valor máximo é muito baixo quando comparado às máximas de outros anos, ou mesmo talvez às suas correspondentes segundas ou terceiras maiores enchentes. Essa constatação remete à construção das chamadas séries de duração parcial, na qual todas as enchentes, que sejam independentes entre si e superiores a um determinado valor limiar, são ali incluídas, de modo não eqüidistante no tempo. Dessa maneira, de volta à Figura 1.1, se o valor limiar fosse fixado em 290m^3/s, as máximas descargas médias diárias dos anos de 1971, 1976 e 1989, respectivamente 246, 276 e 288 m^3/s, não estariam incluídas na série de duração parcial. Por outro lado, poderiam estar incluídas as segundas, as terceiras ou até as quartas maiores enchentes de outros anos, fazendo com que a série de duração parcial, assim formada, pudesse ser constituída, por exemplo, das 73 ou 82 maiores descargas médias diárias distribuídas de forma não eqüidistante ao longo dos 57 anos de registros. Para a seleção dos valores constituintes de uma série de duração parcial, há que se observar que entre dois de seus pontos consecutivos haja um período suficientemente longo de recessão de seus respectivos hidrogramas, de modo que as descargas da série sejam independentes entre si.

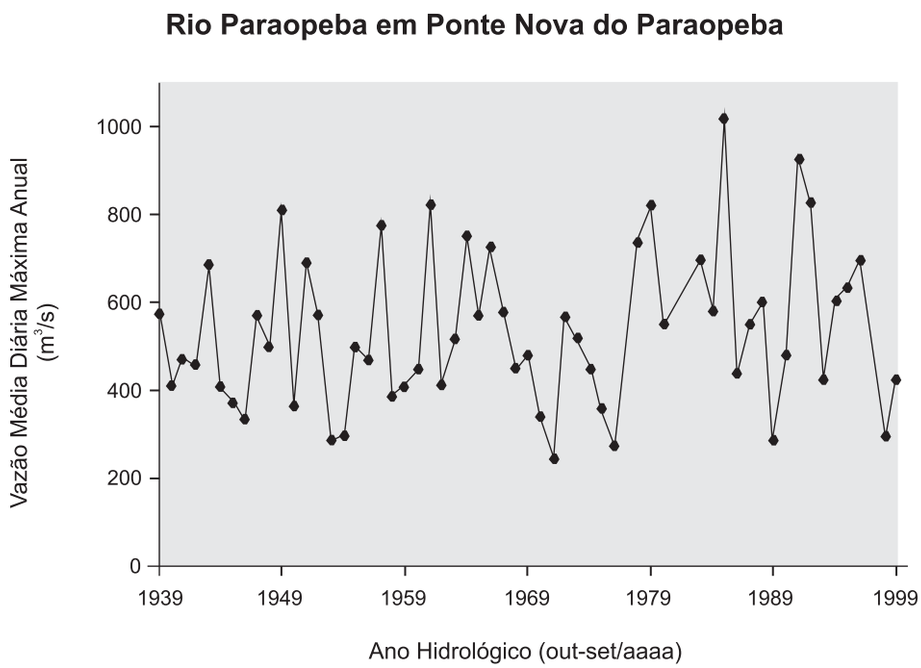

Figura 1.1 – A Série de Máximos Anuais do Rio Paraopeba em Ponte Nova do Paraopeba

As séries hidrológicas podem apresentar uma tendência, ou um 'salto', ou uma periodicidade ao longo do tempo, como resultado de variações naturais do clima ou alterações induzidas pela ação do homem. Nesse caso, as séries hidrológicas seriam ditas não estacionárias ao longo do tempo. Por exemplo, um reservatório de acumulação, de dimensões importantes, construído logo a montante de uma estação fluviométrica, faria com que a série hidrológica correspondente se apresentasse não estacionária e heterogênea no tempo, respectivamente, com descargas não regularizadas e regularizadas, antes e depois da implantação daquele reservatório a montante. Por outro lado, quando certas propriedades estatísticas de uma série hidrológica não se alteram ao longo do tempo, a série é dita estacionária. A série é considerada homogênea se o padrão de variabilidade, em torno de seu valor médio, é único e idêntico, ao longo do tempo. No exemplo do reservatório de acumulação, a série completa é certamente não estacionária e heterogênea, sendo composta por duas sub-séries, possivelmente estacionárias e homogêneas. Na maioria das aplicações da hidrologia estatística, as séries hidrológicas reduzidas devem ter como pré-requisito os atributos de estacionariedade e homogeneidade.

Finalmente, as séries hidrológicas devem ser representativas ou, em outras palavras, que seus valores constituintes sejam representativos da variabilidade presente no fenômeno hidrológico em questão. De volta ao exemplo da série de máximos anuais, ilustrada na Figura 1.1, a sub-série constituída somente pelos anos excepcionalmente secos de 1967 a 1976 não seria representativa porque contem uma seqüência de valores consistentemente mais baixos. Por outro lado, a sub-série constituída apenas pelos máximos anuais, ocorridos entre os anos considerados excepcionalmente molhados de 1978 e 1985, também não seria representativa da variabilidade das enchentes anuais do anuais do Rio Paraopeba em Ponte Nova do Paraopeba. Assim como para os atributos de estacionariedade e homogeneidade, na maioria das aplicações da hidrologia estatística, as séries hidrológicas reduzidas devem ser também representativas. Esses tópicos serão discutidos com maior rigor no capítulo 7, desta publicação.

1.4 – População e Amostra

O conjunto finito ou infinito de todos os possíveis resultados, ou possíveis realizações, de uma variável hidrológica recebe o nome de população. Na maioria das situações, o que se conhece é um sub-conjunto extraído da população, com um número limitado de observações, sub-conjunto ao qual dá-se o nome de amostra. Supondo tratar-se de uma amostra estacionária, homogênea, e representativa da população, nos mesmos sentidos enunciados para as séries

hidrológicas, pode-se dizer que o principal objetivo da hidrologia estatística é o de extrair conclusões válidas sobre o comportamento populacional da variável hidrológica em análise, somente a partir da informação contida na amostra. Como exemplo desse raciocínio, tome-se, por exemplo, a série de máximos anuais do Rio Paraopeba em Ponte Nova do Paraopeba cujos valores mínimo e máximo são 246 e 1017 m^3/s, respectivamente. Com base única e exclusivamente na amostra, poder-se-ia dizer que a probabilidade de se observar valores inferiores ou superiores aos limites amostrais é nula. De modo análogo, poder-se-ia dizer apenas que a enchente que deverá ocorrer no próximo ano, neste local, estaria provavelmente compreendida entre 246 e 1017 m^3/s.

O raciocínio subjacente à hidrologia estatística inicia-se com a proposta de um modelo matemático plausível para a distribuição de freqüências das realizações populacionais; nesse caso, trata-se de um raciocínio dedutivo, no qual faz-se uma tentativa de propor uma idéia geral válida para quaisquer casos particulares. Tal modelo matemático possui parâmetros, cujos verdadeiros valores populacionais devem ser estimados a partir dos valores amostrais. Uma vez estimados os seus parâmetros e, portanto, particularizado para um local ou situação, o modelo matemático pode ser agora usado para inferir sobre probabilidades de cenários não observados, tais como a probabilidade de ocorrer um valor superior a 1350 m^3/s em Ponte Nova do Paraopeba ou mesmo sobre a descarga média diária máxima local, cuja probabilidade de ser igualada ou superada é de apenas 0,01%; nesse caso, trata-se de um raciocínio indutivo, no qual particulariza-se a idéia geral. A Figura 1.2 ilustra as etapas do raciocínio inerente à hidrologia estatística.

Em geral, a amostra é constituída por elementos que são extraídos da população, um a um, de maneira aleatória e independente. Isso significa que em uma amostra, composta pelos elementos $\{x_1, x_2, ... , x_N\}$, cada um deles foi extraído da população ao acaso dentre um grande número de escolhas possíveis e equiprováveis. O elemento x_1, por exemplo, teve a mesma chance de ser sorteado da de qualquer outro constituinte da amostra e, inclusive, até mesmo de se repetir como elemento sorteado. Essa última possibilidade, ou seja a amostragem com reposição, implica em se ter independência entre os N elementos constituintes da amostra. Os atributos de eqüiprobabilidade e de independência definem uma amostra aleatória simples (AAS), a qual representa o plano de amostragem mais simples e mais eficaz para se fazer inferências sobre a população. Uma AAS homogênea e representativa é, em geral, o requisito inicial de qualquer aplicação da hidrologia estatística.

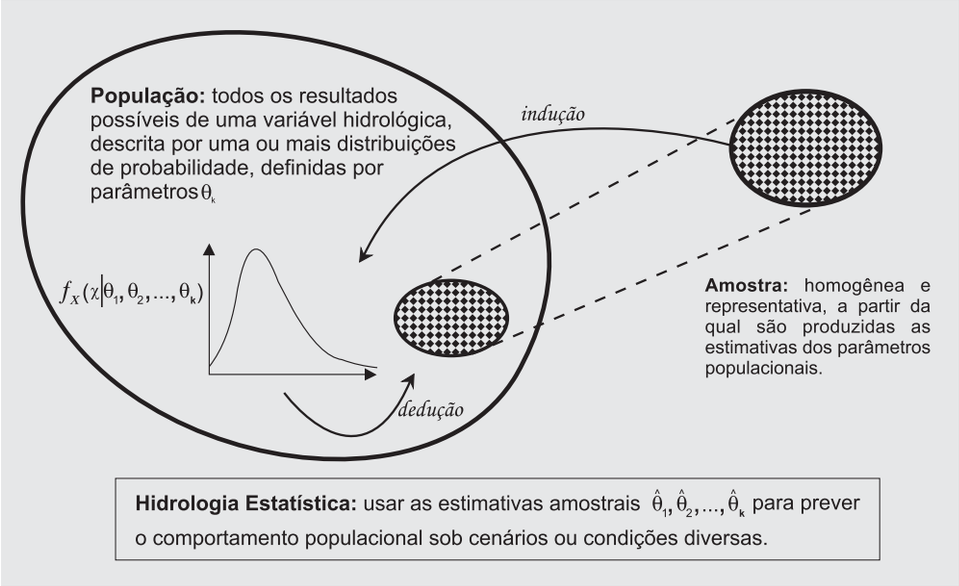

Figura 1.2 – Ilustração do Raciocínio Típico da Hidrologia Estatística

1.5 – Dados Hidrológicos

A quantificação das diversas fases do ciclo hidrológico, das suas respectivas variabilidades e de suas inter-relações, requer a coleta sistemática de dados básicos que se desenvolvem ao longo do tempo ou do espaço. As respostas aos diversos problemas de hidrologia aplicada serão tão mais corretas, quanto mais longos e precisos forem os registros de dados hidrológicos. Esses podem compreender dados climatológicos, pluviométricos, fluviométricos, evaporimétricos, sedimentométricos e de indicadores de qualidade da água, obtidos em instalações próprias, localizadas em pontos específicos de uma região, em intervalos de tempo pré-estabelecidos e com sistemática de coleta definida por padrões conhecidos. O conjunto dessas instalações, denominadas postos ou estações, constituem as redes hidrométricas e/ou hidrometeorológicas, cujas manutenção e densidade são essenciais para a qualidade dos estudos hidrológicos.

No Brasil, as principais entidades produtoras de dados hidrológicos e hidrometeorológicos são a Agência Nacional de Águas (ANA), cuja parte da rede é operada pela CPRM - Serviço Geológico do Brasil, e o Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Outras redes acessórias, de menor extensão, são mantidas por companhias energéticas ou por companhias de serviços de saneamento básico, entre outras. Grande parte dos dados hidrológicos brasileiros encontra-se disponível por meio do Sistema de Informações Hidrológicas da

Agência Nacional de Águas – Hidroweb, mediante acesso à URL http:// hidroweb.ana.gov.br. Alguns fenômenos hidrológicos e algumas de suas variáveis características mais comumente medidas encontram-se listadas na Tabela 1.1, juntamente com suas respectivas unidades.

Tabela 1.1 – Características e Variáveis Hidrológicas - Unidades

Fenômeno	Variável Característica	Unidade
Precipitação	Altura Intensidade Duração	mm, cm mm/h h, min
Evaporação/ Evapotranspiração	Intensidade Total	mm/dia, mm/mês mm, cm
Infiltração	Intensidade Altura	mm/h mm, cm
Escoamento total	Fluxo Volume Altura equivalente (Deflúvio)	l/s, m^3/s m^3, 10^6 m^3 , (m^3/s).mês mm ou cm sobre uma área
Escoamento subterrâneo	Fluxo Volume	l/min, l/h, m^3/dia m^3, 10^6 m^3

Os dados hidrológicos contêm erros aleatórios, sistemáticos e/ou grosseiros. Os primeiros são inerentes aos atos de medir e observar, trazendo consigo as imprecisões das leituras e medições ou, em outras palavras, as flutuações em torno de seus verdadeiros valores. Por exemplo, se em um único dia, forem realizadas 10 medições de descarga líquida em uma seção fluvial, em meio a uma estiagem prolongada com descarga quase constante, empregando o mesmo molinete e o mesmo hidrometrista, teríamos 10 resultados próximos e diferentes, os quais estariam flutuando em torno do verdadeiro valor da descarga líquida naquele local. Os erros sistemáticos, por sua vez, são aqueles que produzem um viés, para cima ou para baixo, nos resultados das observações e podem ter origem em mudanças na técnica de medição empregada, em calibrações incorretas de aparelhos de medição ou nos processos de coleta, transmissão e processamento dos dados. A mudança da posição de um pluviômetro, por exemplo, pode, em decorrência da ação do vento, provocar a ocorrência de erros sistemáticos nas observações das alturas de precipitação em um dado local. Do mesmo modo, a extrapolação errônea de uma curva-chave pode resultar em descargas exageradamente altas ou exageradamente baixas. Os erros grosseiros provêm de falhas humanas e resultam da falta de cuidado na execução de uma medição ou observação de uma variável hidrológica. Leituras linimétricas incorretas ou ilegíveis são exemplos de erros grosseiros.

Rigorosamente, os pressupostos da hidrologia estatística não admitem a existência dos erros mencionados. A hidrologia estatística lida com os 'erros' de amostragem ou com as flutuações amostrais de um fenômeno natural que possui uma variabilidade temporal e/ou espacial. Cinco diferentes amostras de uma certa

variável hidrológica, cada uma com o mesmo número de elementos, irão produzir 5 estimativas diferentes de determinadas propriedades estatísticas populacionais. As diferenças entre tais estimativas são os erros de amostragem em torno de seus respectivos e verdadeiros valores populacionais. Esses valores populacionais serão conhecidos somente se toda a população for amostrada. A essência da hidrologia estatística é extrair conclusões válidas a respeito do comportamento populacional, tendo-se em conta a incerteza devida à presença e à magnitude dos erros de amostragem. Nesse sentido, é evidente que quanto maior for a quantidade dos dados hidrológicos disponíveis e quanto mais isentos estiverem de erros de observação e medição, tanto melhores serão as inferências relativas ao comportamento populacional.

Exercícios

1. Enumere as principais razões que tornam estocásticos os fenômenos das precipitações e vazões de uma bacia hidrográfica.

2. Enumere exemplos de processos hidrológicos aproximadamente determinísticos.

3. Dê 3 exemplos de possíveis variáveis discretas e 3 de possíveis variáveis contínuas, associadas ao fenômeno da precipitação.

4. Os anexos 1, 2 e 3 desse boletim técnico referem-se respectivamente às vazões médias mensais, às vazões médias diárias máximas anuais e às alturas diárias de precipitação máximas anuais das estações fluviométrica 40800001 e pluviométrica 01944004, ambas com a mesma denominação de Ponte Nova do Paraopeba, em Minas Gerais. Faça um gráfico de dispersão entre as vazões médias diárias e as alturas de precipitação máximas anuais. Enumere as principais causas da impossibilidade de se estabelecer uma relação funcional do tipo causa e efeito entre tais variáveis. Explique como tais causas prováveis se manifestam no gráfico de dispersão.

5. Com relação às amostras de vazões médias mensais do anexo 1, discuta os atributos de aleatoriedade e independência, necessários ao conceito de amostra aleatória simples.

6. Enumere 3 exemplos de erros grosseiros eventualmente presentes em dados fluviométricos.

7. Enumere 3 exemplos de erros sistemáticos eventualmente presentes em dados pluviométricos.

8. Enumere 3 causas possíveis de presença de heterogeneidade em dados pluviométricos e fluviométricos. O que fazer diante de séries heterogêneas?

9. Visite o site do Sistema de Informações Hidrológicas – Hidroweb, clique em Dados Hidrológicos' e, em seguida, em 'Séries Históricas'. Faça o download da série hidrológica completa da estação fluviométrica de código 40800001, do Rio Paraopeba em Ponte Nova do Paraopeba, disponível desde 1938. Verifique o número N de anos completos, sem falhas no período chuvoso da região centro-sul de Minas Gerais que vai de Outubro a Março. Construa a série de duração parcial das N maiores vazões médias diárias máximas e compare-a com a série de máximos anuais, também de tamanho N. Em sua opinião, qual delas pode ser considerada mais representativa das cheias do Rio Paraopeba em Ponte Nova do Paraopeba?

10. Tome a série de máximos anuais, obtida no exercício 7, e subdivida-a em 5 sub-series não sobrejacentes de igual tamanho. Calcule e compare as médias aritméticas para cada uma das sub-séries e para a série total. Por que todas são estimativas da cheia média anual? Qual das estimativas é mais confiável? Por que?

11. Com os resultados do exercício 9, discuta a questão da representatividade da amostra.

12. Os rios Tocantins e Araguaia têm sua confluência a montante do reservatório de Tucuruí. Com base nas observações das estações pluvio-fluviométricas de ambas sub-bacias, é possível considerar as afluências a Tucuruí como uma variável hidrológica multivariada? Discuta as dificuldades de se conceber e empregar tal variável na previsão das afluências a Tucuruí.

13. Haan (1977) afirma que um problema hidrológico raramente preenche todos os requisitos necessários à aplicação de um certo método ou técnica estatística. Na seqüência, esse autor aponta duas alternativas. A primeira é a de redefinir a questão de forma que ela preencha os requisitos da teoria estatística e produza uma resposta "exata" para o problema artificial. A segunda é a de alterar a técnica estatística, quando possível, e aplicá-la ao problema real, tendo-se em conta que os resultados serão respostas aproximadas para a questão em foco e que o grau de aproximação irá depender fortemente da severidade com que as premissas da teoria estatística foram violadas. Qual das duas alternativas lhe parece mais adequada? Por que?