

Hidrologia Estatística

MAURO NAGHETTINI
ÉBER JOSÉ DE ANDRADE PINTO



MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA

NELSON HUBNER

Ministro Interino

SECRETARIA DE GEOLOGIA, MINERAÇÃO E TRANSFORMAÇÃO MINERAL

CLÁUDIO SCLAR

Secretário

SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL – CPRM

AGAMENON SÉRGIO LUCAS DANTAS

Diretor-Presidente

MANOEL BARRETTO DA ROCHA NETO

Diretor de Geologia e Recursos Minerais

JOSÉ RIBEIRO MENDES

Diretor de Hidrologia e Gestão Territorial

FERNANDO PEREIRA DE CARVALHO

Diretor de Relações Institucionais e Desenvolvimento

ÁLVARO ROGÉRIO ALENCAR SILVA

Diretor de Administração e Finanças

FREDERICO CLÁUDIO PEIXINHO

Chefe do Departamento de Hidrologia

ERNESTO VON SPERLING

Chefe da Divisão de Marketing e Divulgação

COORDENAÇÃO E AUTORIA

MAURO NAGHETTINI

ÉBER JOSÉ DE ANDRADE PINTO

COLABORAÇÃO

ALICE SILVA DE CASTILHO

ELIZABETH GUELMAN DAVIS

ERNESTO VON SPERLING

FERNANDO ALVES LIMA

FREDERICO CLÁUDIO PEIXINHO

JOSÉ MÁRCIO HENRIQUES SOARES

MARCELO JORGE MEDEIROS

MÁRCIO DE OLIVEIRA CÂNDIDO

Hidrologia Estatística

Mauro Naghettini
Éber José de Andrade Pinto

Belo Horizonte
Agosto de 2007

Coordenação Editorial a cargo da
Divisão de Marketing e Divulgação
Diretoria de Relações Institucionais e Desenvolvimento
Serviço Geológico do Brasil - CPRM

Publishers

Ernesto von Sperling
José Márcio Henriques Soares

Naghattini, Mauro

N147 Hidrologia estatística. / Mauro Naghattini; Éber José de
Andrade Pinto. — Belo Horizonte: CPRM, 2007.

552 p.

Executado pela CPRM – Serviço Geológico do Brasil,
Superintendência Regional de Belo Horizonte. Hidrologia. 2.
Recursos Hídricos. 3. Engenharia Hidráulica. 4. Estatística.

I. Pinto, Éber José de Andrade.

II. CPRM- Serviço Geológico do Brasil.

III. Título.

ISBN 978-85-7499-023-1



APRESENTAÇÃO

A água, um bem natural de inestimável valor para humanidade, projeta-se, no cenário mundial, como tema central na agenda política das nações, face aos desafios relacionados com a sua escassez e a ocorrência de eventos extremos como secas e inundações, que inibem o desenvolvimento das nações e geram conflitos, degradando a qualidade de vida das populações em várias regiões do planeta.

Torna-se então cada vez mais imperioso o conhecimento sobre a ocorrência da água nos continentes, fundamental para a sua adequada gestão e o conseqüente aproveitamento racional deste valioso recurso.

A Hidrologia, como ciência da Terra que estuda a ocorrência, a distribuição, o movimento e as propriedades da água na atmosfera, na superfície e no subsolo, tem buscado, cada vez mais, uma abordagem sistêmica e interdisciplinar, integrando-se às outras geociências com o objetivo de expandir o conhecimento existente das diversas fases do ciclo da água no planeta. Ao tratar o ciclo hidrológico de forma integrada, visa também descrever o passado e prever o futuro.

Dada à natureza probabilística do fenômeno hidrológico, a Estatística é uma área de conhecimento importante da Hidrologia, utilizada na avaliação do comportamento dos processos hidrológicos.

O Serviço Geológico do Brasil, em consonância com a sua missão de gerar e difundir conhecimento hidrológico teve a iniciativa de produzir esta publicação, a qual representa uma relevante contribuição para a comunidade técnica e científica e a sociedade brasileira.

Agamenon Sérgio Lucas Dantas
Diretor-Presidente
Serviço Geológico do Brasil - CPRM



PREFÁCIO

É para mim um grande prazer escrever um prefácio para este excelente livro. Os dois autores conseguiram produzir um texto de qualidade que deveria ser usado como livro texto para estudantes de hidrologia e engenharia de recursos hídricos não apenas no Brasil, mas de maneira mais abrangente, em todos os países de língua portuguesa. Além de ser extremamente útil para o ensino, o livro também encontrará lugar na biblioteca de profissionais destas áreas, que encontrarão no mesmo um resumo muito útil das características das distribuições de probabilidade largamente encontradas na literatura de recursos hídricos. Começando com noções simples das essenciais análises gráficas dos dados hidrológicos, o livro fornece uma clara visão do papel importante que as considerações sobre probabilidade devem ter durante a modelação, o diagnóstico de ajuste de modelos, a previsão, e a avaliação das incertezas nas previsões fornecidas pelos modelos. Uma excelente apresentação é feita sobre como estabelecer relações entre duas ou mais variáveis e sobre a forma como estas relações são usadas para transferência de informação entre postos através da regionalização.

A grande variedade de exemplos discutidos no livro é especialmente admirável, bem como a inclusão de exercícios que ilustram e estendem o material de cada capítulo. O livro irá certamente se constituir numa base sólida para estudantes e outras pessoas interessadas em explorar não apenas os muitos métodos estatísticos nele descritos mas também outros assuntos associados como “bootstrap methods”, análise Bayesiana e Modelos Lineares Generalizados.

A nível pessoal, foi para mim um privilégio ter conhecido muitos dos autores mencionados na longa lista de referências deste livro, e ter trabalhado com vários deles na década de 1970 e início da década de 1980 quando o Institute of Hydrology (IH) do Reino Unido estava na liderança de muitas pesquisas em hidrologia. Entre os autores mencionados no livro incluem-se Cunnane que trabalhou no Flood Studies Report (FSR) do NERC (National Environment Research Council); Reed, que aprimorou a metodologia do FSR, e foi um dos autores da versão atualizada do relatório, intitulada Flood Estimation Handbook (FEH); Hosking, que desenvolveu várias de suas idéias com a colaboração de Wallis durante sua licença sabática passada no IH; Sutcliffe, um dos membros fundadores do IH, e Wiltshire, cujo trabalho é descrito no Capítulo 10. De um grupo de aproximadamente 20 pesquisadores trabalhando no IH em procedimentos estatísticos aplicados a estudos de cheias e estiagem, durante aquele tempo, nada menos que sete tornaram-se, subsequente, professores titulares em universidades britânicas.

Tenho certeza de que os capítulos que seguem este curto Prefácio constituir-se-ão numa sólida fundação para o conhecimento dos estudantes que por sua vez farão grandes contribuições ao gerenciamento dos recursos hídricos no Brasil, e em outros países, durante as décadas que estão por vir, que são de incertezas sobre as mudanças climáticas, o rápido desenvolvimento urbano, e o fornecimento de energia.

Porto Alegre, Agosto de 2007.

Robin Thomas Clarke

It gives me much pleasure to write a Preface to this excellent book. The two authors have succeeded in producing a first-class text which should be prescribed reading for students of hydrology and water resource engineering not only in Brazil but more widely throughout the Lusophone world. Besides being superbly useful for teaching, the book will also find a place on the bookshelves of mature practitioners who will find in it a useful summary of the characteristics of probability distributions widely encountered in the water resource literature. Starting with simple notions of the essential graphical examination of hydrological data, the book gives a very lucid account of the role that probability considerations must play during modeling, diagnosis of model fit, prediction, and evaluating the uncertainty in model predictions. An excellent account is given of how to establish relationships between two or more variables, and of the way in which such relationships are used for the transfer of information between sites by regionalization. The wide range of examples discussed in the book is especially admirable, and the inclusion of exercises which both illustrate and extend the material given in each chapter. The book will provide a very firm basis for students and others who need to explore not only the many statistical methods described within its covers but also the associated fields of bootstrap methods, Bayesian analysis and Generalized Linear Models.

At a personal level, it has been a privilege for me to have known a number of the authors mentioned in the book's extensive list of references, and to have worked with several of them during the decade of the 1970s and early 1980s when the UK Institute of Hydrology (IH) was at the forefront of much hydrological research. Those mentioned in the book include, but are not limited to, Cunnane who worked on the UK Flood Study Report (FSR); Reed, who developed the FSR methodology still further, and was joint author of its successor the Flood Estimation Handbook (FEH); Hosking, who developed many of his ideas during the sabbatical year that Wallis spent collaborating with him at Wallingford; Sutcliffe, one of the founder members of IH; and Wiltshire, whose work is described in Chapter 10. Of a group of about 20 researchers working at IH on statistical procedures and modeling applied to flood and drought studies during that time, no less than seven subsequently held senior chairs at British universities.

I have every confidence that the chapters that follow this short Preface will lay a similar foundation for students who will in their turn make major contributions to the management of water resources in Brazil, and elsewhere, during the coming decades of uncertainty about climate change, rapid urban development, and energy supplies.

Porto Alegre, August 2007.

Robin Thomas Clarke



INTRODUÇÃO

A humanidade, desde seus primórdios, sempre se interessou em observar o comportamento das variáveis hidrológicas, tais como, níveis em curso d'água e as precipitações. O desenvolvimento científico e tecnológico possibilitou o registro desse comportamento ao longo do tempo. O acúmulo dessas informações permite a formação de séries, as quais são analisadas utilizando a estatística como uma ferramenta básica e fundamental, de forma que o conhecimento dos conceitos estatísticos é indispensável ao desenvolvimento de estudos em hidrologia e em ciências naturais.

Este livro tem por objetivo fornecer aos profissionais que trabalham com recursos hídricos e as ciências ambientais, bem como aos estudantes de graduação e pós-graduação dessas áreas do conhecimento, um texto em português sobre os conceitos básicos de estatística, enfatizando a sua aplicação em hidrologia e nas ciências naturais.

A publicação foi organizada em dez capítulos, os quais apresentam a teoria, exemplos de emprego em hidrologia e nas ciências naturais de cada tópico analisado e, ao final, exercícios para treinamento e consolidação do aprendizado. O primeiro capítulo, Introdução à Hidrologia Estatística, apresenta brevemente as idéias de processos, variáveis, séries e dados hidrológicos. A análise preliminar de dados hidrológicos é descrita no segundo capítulo. Os fundamentos da teoria de probabilidades são expostos em detalhes no capítulo 3. A descrição dos modelos discretos de distribuição de probabilidades é o escopo do capítulo 4 e os principais modelos contínuos são apresentados no capítulo 5. A estimação pontual e por intervalos dos parâmetros dos modelos probabilísticos é delineada no capítulo 6. As linhas gerais para construção dos testes de hipóteses, a formulação dos testes paramétricos para populações normais, a lógica inerente aos testes não paramétricos, os testes de aderência e de detecção dos pontos amostrais atípicos formam o conteúdo do capítulo 7. No oitavo capítulo são descritos os procedimentos da análise de frequência local de variáveis hidrológicas. A apresentação dos conceitos básicos que possibilitam a realização de estudos de correlação e regressão linear entre duas ou mais variáveis é efetuada no capítulo 9. Finalmente, no décimo capítulo, são descritos os métodos de análise de frequência regional, com maior detalhe para o método *index-flood*, utilizando os momentos-L e as estatísticas-L.

A Diretoria de Hidrologia e Gestão Territorial através do Departamento de Hidrologia expressa o compromisso de disseminar o conhecimento geocientífico, ao promover e incentivar a publicação de um livro sobre hidrologia estatística, cujo tema apresenta grande importância no desenvolvimento dos trabalhos em recursos hídricos, uma das áreas fundamentais de atuação do Serviço Geológico do Brasil.

Frederico Cláudio Peixinho

Chefe do Departamento de Hidrologia
Serviço Geológico do Brasil - CPRM



DEDICATÓRIA

Para meus pais, Nilo (in memoriam) e Augusta, meus exemplos permanentes de perseverança e dignidade.

MN

Para meus pais, Dalva Urbano de Resende e José Maria de Andrade Pinto e, ao fraterno amigo do movimento escoteiro, Luiz Tadeu Coelho. Pessoas muito queridas que partiram no último ano hidrológico (2005-2006). E para os meus filhos, Lúcio e Maria Cecília, fontes de alegria e sentido nessa existência.

EJAP



SOBRE OS AUTORES

Mauro Naghettini

Graduou-se em Engenharia Civil pela Universidade Federal de Minas Gerais, em 1977. Mestre em Hidrologia pela École Polytechnique Fédérale de Lausanne, Suíça, em 1979 e PhD em Engenharia de Recursos Hídricos pela University of Colorado at Boulder, Estados Unidos, em 1994. De 1979 a 1989, foi engenheiro da Divisão de Hidrologia da Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG), tendo atuado no planejamento, projeto e operação de aproveitamentos hidrelétricos. Desde 1989 é professor do Departamento de Engenharia Hidráulica e Recursos Hídricos da UFMG, com atividades de pesquisa, ensino e extensão universitária. Atua no Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos da UFMG, lecionando diversas disciplinas, entre as quais “Hidrologia Estatística”, orientando alunos de mestrado e doutorado, com ativa participação nas linhas de pesquisa “Modelos Estocásticos em Hidrologia” e “Modelos de Simulação e Previsão Hidrológica”. Autor de vários artigos publicados em periódicos especializados e anais de simpósios e congressos técnicos. É pesquisador do CNPq desde 1996 e membro do conselho editorial da Revista Brasileira de Recursos Hídricos. Consultor de diversas empresas atuantes na área de engenharia de recursos hídricos.

E-mail: naghet@netuno.lcc.ufmg.br.

Eber José de Andrade Pinto

Engenheiro Civil graduado pela Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais em abril de 1992. Mestre e Doutor em Engenharia de Recursos Hídricos pelo Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos da Universidade Federal de Minas Gerais em 1996 e 2005, respectivamente. Trabalha, desde fevereiro de 1994, como engenheiro hidrólogo na CPRM – Serviço Geológico do Brasil, onde ingressou por concurso e atuou em projetos de obtenção de dados hidrométricos básicos, de consistência de dados hidrológicos, de avaliação da disponibilidade de recursos hídricos, de definição das relações intensidade-duração-freqüência, de regionalização de variáveis hidrológicas, de avaliação de estruturas de captação de águas de chuva, de implantação de bacias representativas, de operação do sistema de alerta de cheias da bacia do rio Doce, de definição de planícies de inundação, de zoneamento ecológico econômico, entre outras atividades. Autor de artigos publicados em periódicos especializados e anais de simpósios e congressos técnicos. Lecionou disciplinas de Hidrologia em cursos de especialização do CEFET-MG e do Instituto de Educação Continuada da PUC-MG.

E-mail: eber@bh.cprm.gov.br.





AGRADECIMENTOS

“Os autores agradecem o apoio institucional do Serviço Geológico do Brasil – CPRM, sem o qual, este livro não poderia ter sido publicado. Um agradecimento especial ao Marcelo Jorge Medeiros, da CPRM-Brasília, pelas iniciativas de propor a preparação deste livro e de não medir esforços para viabilizá-lo. Os autores agradecem as sugestões e idéias de diversos colegas, entre os quais, destacam Alice Silva de Castilho, Elizabeth Guelman Davis, Márcio de Oliveira Cândido e Fernando Alves Lima. Também agradecem a Frederico Cláudio Peixinho e Ernesto von Sperling pelo suporte e a colaboração durante a elaboração do livro. Finalmente, os autores agradecem aos seus familiares pela compreensão e estímulo.”



SUMÁRIO

APRESENTAÇÃO	v
PREFÁCIO	vii
INTRODUÇÃO	ix
DEDICATÓRIA	xi
SOBRE OS AUTORES	xiii
AGRADECIMENTOS	xv
SUMÁRIO	xvii
LISTA DE ANEXOS	xxv
LISTA DE FIGURAS	xxvii
LISTA DE TABELAS	xxxiii
CAPÍTULO 1	
INTRODUÇÃO À HIDROLOGIA ESTATÍSTICA	1
1.1 Caracterização dos Fenômenos e Processos Hidrológicos	3
1.2 Variáveis Hidrológicas	6
1.3 Séries Hidrológicas	8
1.4 População e Amostra	10
1.5 Dados Hidrológicos	12
Exercícios.....	14
CAPÍTULO 2	
ANÁLISE PRELIMINAR DE DADOS HIDROLÓGICOS	17
2.1 Apresentação Gráfica de Dados Hidrológicos	19
2.1.1 – Diagrama de Linha	19
2.1.2 – Diagrama Uniaxial de Pontos	20
2.1.3 – Histograma	22

2.1.4 – Polígono de Freqüências	25
2.1.5 – Diagrama de Freqüências Relativas Acumuladas	26
2.1.6 – Curva de Permanência	28
2.2 Sumário Numérico e Estatísticas Descritivas	30
2.2.1 – Medidas de Tendência Central	30
2.2.2 – Medidas de Dispersão	33
2.2.3 – Medidas de Assimetria e Curtose	35
2.3 Métodos Exploratórios	38
2.3.1 – O Diagrama <i>Box Plot</i>	39
2.3.2 – O Diagrama Ramo-e-Folha (<i>Stem-and-Leaf</i>)	40
2.4 Associação entre Variáveis	42
2.4.1 – Diagrama de Dispersão	42
2.4.2 – Diagrama Quantis-Quantis (Q-Q)	46
Exercícios	47

CAPÍTULO 3

TEORIA ELEMENTAR DE PROBABILIDADES 51

3.1 Eventos Aleatórios	53
3.2 Noção e Medida de Probabilidade	58
3.3 Probabilidade Condicional e Independência Estatística	61
3.4 Teoremas da Probabilidade Total e de Bayes	63
3.5 Variáveis Aleatórias	66
3.6 Medidas Descritivas Populacionais de Variáveis Aleatórias	71
3.6.1 – Valor Esperado	71
3.6.2 – Variância Populacional	74
3.6.3 – Coeficientes de Assimetria e Curtose Populacionais	76
3.6.4 – Função Geratriz de Momentos	78
3.7 Distribuições de Probabilidades Conjuntas de Variáveis Aleatórias	80
3.8 Distribuições de Probabilidades de Funções de Variáveis Aleatórias	88
3.9 Distribuições Mistas	91
Exercícios	92

CAPÍTULO 4 **VARIÁVEIS ALEATÓRIAS DISCRETAS:** **DISTRIBUIÇÕES E APLICAÇÕES 99**

4.1	Processos de Bernoulli	101
4.1.1	– Distribuição Binomial	103
4.1.2	– Distribuição Geométrica	106
4.1.3	– Binomial Negativa	112
4.2	Processos de Poisson	113
4.3	Outras Distribuições de Variáveis Aleatórias Discretas	116
4.3.1	– Distribuição Hipergeométrica	116
4.3.2	– Distribuição Multinomial	118
4.4	Sumário das Características Principais das Distribuições	119
4.4.1	– Distribuição Binomial	119
4.4.2	– Distribuição Geométrica	119
4.4.3	– Distribuição Binomial Negativa	120
4.4.4	– Distribuição de Poisson	120
4.4.5	– Distribuição Hipergeométrica	121
4.4.6	– Distribuição Multinomial	121
	Exercícios	122

CAPÍTULO 5 **VARIÁVEIS ALEATÓRIAS CONTÍNUAS:** **DISTRIBUIÇÕES E APLICAÇÕES 127**

5.1	Distribuição Uniforme	129
5.2	Distribuição Normal	131
5.3	Distribuição Log-Normal	141
5.4	Distribuição Exponencial	144
5.5	Distribuição Gama	147
5.6	Distribuição Beta	150
5.7	Distribuições de Valores Extremos	152
5.7.1	– Distribuições Exatas de Valores Extremos	153
5.7.2	– Distribuições Assintóticas de Valores Extremos	155
5.7.2.1	– Distribuição de Gumbel (Máximos)	158

5.7.2.2 – Distribuição de Fréchet (Máximos)	161
5.7.2.3 – Distribuição Generalizada de Valores Extremos (Máximos)	162
5.7.2.4 – Distribuição de Gumbel (Mínimos)	167
5.7.2.5 – Distribuição de Weibull (Mínimos)	168
5.8 Distribuições de Pearson	172
5.8.1 – Distribuição Pearson Tipo III	173
5.8.2 – Distribuição Log-Pearson Tipo III	174
5.9 Distribuições de Estatísticas Amostras	175
5.9.1 – Distribuição do Qui-Quadrado χ^2	176
5.9.2 – Distribuição do t de Student	178
5.9.3 – Distribuição F	180
5.10 Distribuição Normal Bivariada	181
5.11 Sumário das Características Principais das Distribuições	184
5.11.1 – Distribuição Uniforme	184
5.11.2 – Distribuição Normal	184
5.11.3 – Distribuição Log-Normal (2 parâmetros)	185
5.11.4 – Distribuição Exponencial	185
5.11.5 – Distribuição Gama	186
5.11.6 – Distribuição Beta	186
5.11.7 – Distribuição Gumbel (Máximos)	187
5.11.8 – Distribuição Generalizada de Valores Extremos (Máximos)	187
5.11.9 – Distribuição Gumbel (Mínimos)	188
5.11.10 – Distribuição Weibull (Mínimos) de 2 parâmetros	188
5.11.11 – Distribuição Pearson Tipo III	189
5.11.12 – Distribuição do χ^2	189
5.11.13 – Distribuição do t de Student	190
5.11.14 – Distribuição F de Snedecor	190
Exercícios	191

CAPÍTULO 6

ESTIMAÇÃO DE PARÂMETROS

6.1 Preliminares sobre a Estimação Pontual de Parâmetros	203
6.2 Método dos Momentos (MOM)	206

6.3	Método da Máxima Verossimilhança (MVS)	210
6.4	Método dos Momentos-L (MML)	213
6.5	Estimação por Intervalos	217
6.6	Intervalos de Confiança para Quantis	222
6.6.1	Intervalos de Confiança para Estimadores MOM de Quantis	224
6.6.2	Intervalos de Confiança para Estimadores MVS de Quantis	227
6.6.3	Intervalos de Confiança para Estimadores MML de Quantis	229
6.7	Sumário dos Estimadores Pontuais	230
6.7.1	Distribuição de Bernoulli	230
6.7.2	Distribuição Beta	230
6.7.3	Distribuição Binomial	231
6.7.4	Distribuição Exponencial	231
6.7.5	Distribuição Gama	231
6.7.6	Distribuição Geométrica	232
6.7.7	Distribuição Generalizada de Valores Extremos (GEV)	232
6.7.8	Distribuição Gumbel (máximos)	233
6.7.9	Distribuição Gumbel (mínimos)	234
6.7.10	Distribuição Log-Normal	235
6.7.11	Distribuição Log-Pearson Tipo III	235
6.7.12	Distribuição Normal	236
6.7.13	Distribuição Pearson Tipo III	237
6.7.14	Distribuição de Poisson	238
6.7.15	Distribuição Uniforme	238
6.7.16	Distribuição Weibull (mínimos)	238
	Exercícios	238

CAPÍTULO 7 TESTES DE HIPÓTESES 243

7.1	Os Elementos de um Teste de Hipótese	246
7.2	Alguns Testes Paramétricos Usuais para Populações Normais	253
7.2.1	Testes Paramétricos sobre a Média de uma Única População Normal	253
7.2.2	Testes Paramétricos sobre as Médias de Duas Populações Normais	256
7.2.3	Testes Paramétricos sobre a Variância de uma Única População Normal	258

7.2.4 – Testes Paramétricos sobre as Variâncias de Duas Populações Normais	260
7.3 Alguns Testes Não-Paramétricos Usuais em Hidrologia	261
7.3.1 – Teste da Hipótese de Aleatoriedade	263
7.3.2 – Teste da Hipótese de Independência	264
7.3.3 – Teste da Hipótese de Homogeneidade	265
7.3.4 – Teste da Hipótese de Estacionariedade	266
7.4 Alguns Testes de Aderência Usuais em Hidrologia	270
7.4.1 – O Teste de Aderência do Qui-Quadrado (χ^2)	271
7.4.2 – O Teste de Aderência de Kolmogorov-Smirnov (KS)	275
7.4.3 – O Teste de Aderência de Anderson-Darling (AD)	278
7.4.4 – O Teste de Aderência de Filliben	281
7.4.5 – Comentários a Respeito dos Testes de Aderência	286
7.5 Teste para Detecção e Identificação de Pontos Atípicos (<i>outliers</i>)	287
Exercícios	288

CAPÍTULO 8

ANÁLISE LOCAL DE FREQUÊNCIA DE VARIÁVEIS HIDROLÓGICAS..... 293

8.1 Análise de Frequência com Gráficos de Probabilidade	297
8.1.1 – Construção de Papéis de Probabilidade	298
8.1.2 – Posição de Plotagem	301
8.1.3 – Posição de Plotagem de Eventos Históricos	304
8.2 Análise de Frequência Analítica	306
8.3 Análise de Frequência Utilizando o Fator de Frequência	319
8.3.1 – Distribuição Normal	320
8.3.2 – Distribuição Log-Normal	321
8.3.3 – Distribuição Log-Pearson Tipo III	321
8.3.4 – Distribuição de Gumbel	322
8.3.5 – Distribuição Weibull (mínimos)	324
8.4 Intervalo de Confiança para os Quantis	326
8.5 Análise de Frequência de Séries de Duração Parcial	339
Exercícios	346

CAPÍTULO 9	
CORRELAÇÃO E REGRESSÃO	352
9.1 – Coeficiente de Correlação Linear de Pearson	357
9.1.1 – Testes de Hipóteses sobre o Coeficiente de Correlação	360
9.2 – Regressão Linear Simples	362
9.2.1 – Método dos Mínimos Quadrados	363
9.3 – Coeficiente de Determinação	365
9.4 – Hipóteses Básicas da Análise de Regressão Linear Simples (RLS)	367
9.4.1 – Erro Padrão da Estimativa	368
9.5 – Teste de Hipóteses e Intervalos de Confiança para os Coeficientes da RLS	368
9.5.1 – Intervalos de Confiança para a Linha de Regressão Linear Simples	370
9.5.2 – Intervalos de Confiança para um Valor Previsto pela RLS	371
9.6 – Avaliação da Regressão Linear Simples	372
9.7 – Regressão Não-Linear com Funções Linearizáveis	375
9.8 – Regressão Linear Múltipla	381
9.8.1 – Teste da Significância da Equação de Regressão Linear Múltipla	384
9.8.2 – Teste de Partes de um Modelo de Regressão Linear Múltipla	384
9.8.3 – Coeficiente de Determinação Parcial	385
9.8.4 – Inferências sobre os Coeficientes da Regressão Linear Múltipla	386
9.8.5 – Intervalos de Confiança da Regressão Linear Múltipla	387
9.8.6 – Transformações de um Modelo de Regressão Múltipla	388
9.8.7 – Comentários sobre a Regressão Múltipla	389
Exercícios	392
CAPÍTULO 10	
ANÁLISE REGIONAL DE FREQUÊNCIA	
DE VARIÁVEIS HIDROLÓGICAS	401
10.1 Regiões Homogêneas	404
10.1.1 – Noções sobre Análise de <i>Clusters</i>	406
10.2 Métodos de regionalização	410
10.2.1 – Método de Regionalização dos Quantis Associados a um Risco Especificado	410
10.2.2 – Métodos que Regionalizam os Parâmetros da Distribuição de Probabilidades	414
10.2.3 – Método <i>Index-Flood</i> ou da Cheia-Índice	418

10.3 Regionalização <i>Index-Flood</i> Utilizando Momentos-L	426
10.3.1 – Análise Regional de Consistência de Dados	428
10.3.1.1 – A Medida de Discordância	429
10.3.1.1.1 – Descrição	429
10.3.1.1.2 – Definição Formal	430
10.3.1.1.3 – Discussão	431
10.3.2 – Identificação e Delimitação de Regiões Homogêneas	432
10.3.2.1 – A Medida de Heterogeneidade Regional	432
10.3.2.1.1 – Descrição	432
10.3.2.1.2 – Definição Formal	433
10.3.2.1.3 – Discussão	436
10.3.3 – Seleção da Distribuição Regional de Frequência	438
10.3.3.1 – Seleção das Distribuições Candidatas – Propriedades Gerais	438
10.3.3.2 – A Medida de Aderência	439
10.3.3.2.1 – Descrição	439
10.3.3.2.2 – Definição Formal	440
10.3.3.2.3 – Discussão	441
10.3.4 – Estimação da Distribuição Regional de Frequência	443
10.3.4.1 – Justificativas	443
10.3.4.2 – O Algoritmo dos Momentos-L Regionais	445
10.3.4.2.1 – Descrição	445
10.3.4.2.2 – Definição Formal	445
10.3.4.2.3 – Momentos-L amostrais	446
10.3.4.2.4 – Discussão	448
Exercícios	468
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	471
ANEXOS	485



LISTA DE ANEXOS

ANEXO 1A	Vazões médias mensais e anuais (m^3/s) do Rio Paraopeba em Ponte Nova do Paraopeba (código 40800001) - redução por ano civil.	487
ANEXO 1B	Vazões médias mensais e anuais (m^3/s) do Rio Paraopeba em Ponte Nova do Paraopeba (código 40800001) – redução por ano hidrológico (Outubro a Setembro)	489
ANEXO 2	Vazões Médias Diárias Máximas Anuais (m^3/s) e Vazões Mínimas Anuais (m^3/s) para diferentes durações do Rio Paraopeba em Ponte Nova do Paraopeba (código 40800001)	491
ANEXO 3	Alturas de precipitação diária máximas anuais (mm) observadas na estação pluviométrica de Ponte Nova do Paraopeba (código 01944004) – redução por ano hidrológico (Outubro a Setembro)	493
ANEXO 4	Matemática: alguns tópicos importantes	495
ANEXO 5	Função Gama $\Gamma(t)$	501
ANEXO 6	Quantis $\chi^2_{1-\alpha, \nu}$ da distribuição do Qui-Quadrado, com ν graus de liberdade	503
ANEXO 7	Quantis $t_{1-\alpha, \nu}$ da distribuição de t de Student, com ν graus de liberdade	505
ANEXO 8	Função F de probabilidades acumuladas, com $\gamma_1 = m$ (g. l. do numerador) e $\gamma_2 = n$ (g.l. do denominador)	507
ANEXO 9	Modelos de séries de duração parcial	511
ANEXO 10	Transformações para linearização de diferentes tipos de funções	521
ANEXO 11	Vazões mínimas anuais (m^3/s) com 7 dias de duração de algumas estações da bacia do rio Paraopeba	523

ANEXO 12	Vazões médias diárias máximas anuais (m³/s) de algumas estações da bacia do rio Paraopeba	525
ANEXO 13	Vazões mínimas anuais (m³/s) com durações de 1, 3, 5 e 7 dias de duração de algumas estações da bacia do rio das Velhas	527
ANEXO 14	Séries de duração Parcial de intensidades de precipitação (mm/h) de 8 estações pluviográficas localizadas no Estado do Rio de Janeiro	531
ANEXO 15	Precipitações diárias máximas anuais (mm) de 92 estações pluviométricas da bacia do Alto São Francisco. Listagem e localização das 92 estações. Isoietas de precipitação média anual do Alto São Francisco (mm)	539
ANEXO 16	Precipitações anuais (mm) das 19 estações pluviométricas da APA SUL-RMBH. Listagem e localização das 19 estações	553

**CAPÍTULO 1
INTRODUÇÃO À HIDROLOGIA ESTATÍSTICA**

Figura 1.1	A Série de Máximos Anuais do Rio Paraopeba em Ponte Nova do Paraopeba	9
Figura 1.2	Ilustração do Raciocínio Típico da Hidrologia Estatística	12

**CAPÍTULO 2
ANÁLISE PRELIMINAR DE DADOS HIDROLÓGICOS**

Figura 2.1	Exemplo de Diagrama de Linha para o número de anos de cheias do Rio Magra em Calamazza, Itália, (adaptado de Kottogoda e Rosso, 1997)	20
Figura 2.2	Exemplo de Diagrama Uniaxial de Pontos para as vazões médias anuais do Rio Paraopeba em Ponte Nova do Paraopeba – Período 1938-1963	22
Figura 2.3	Histograma das vazões médias anuais do Rio Paraopeba em Ponte Nova do Paraopeba – Período 1938 a 1999	25
Figura 2.4	Polígono de Frequências Relativas das vazões médias anuais do Rio Paraopeba em Ponte Nova do Paraopeba – Período 1938 a 1999	26
Figura 2.5	Diagrama de Frequências Relativas Acumuladas das vazões médias anuais do Rio Paraopeba em Ponte Nova do Paraopeba – Período 1938 a 1999	27
Figura 2.6	Fluviograma do Rio Paraopeba em Ponte Nova do Paraopeba – 1962/63	29
Figura 2.7	Curva de Permanência das Vazões do Rio Paraopeba em Ponte Nova do Paraopeba	29
Figura 2.8	Categorização das distribuições de frequências com respeito à curtose	37
Figura 2.9	Diagrama <i>Box Plot</i> para as vazões médias anuais do Rio Paraopeba em Ponte Nova do Paraopeba – Período 1938-1999	40
Figura 2.10	Diagrama Ramo-e-Folha para as vazões médias anuais do Rio Paraopeba em Ponte Nova do Paraopeba – Período 1938-1999	41
Figura 2.11	Diagrama de Dispersão com Histogramas – Ponte Nova do Paraopeba	44

Figura 2.12	Diagrama de Dispersão com <i>Box Plots</i> – Ponte Nova do Paraopeba	44
Figura 2.13	Tipos de associação entre duas variáveis	46
Figura 2.14	Diagrama Quantis-Quantis entre Vazões Médias Anuais e Alturas Anuais de Precipitação de Ponte Nova do Paraopeba	47

CAPÍTULO 3

TEORIA ELEMENTAR DE PROBABILIDADES

Figura 3.1	Diagramas de Venn e operações com eventos em um espaço amostral (adap. de Kottegodá e Rosso, 1997)	56
Figura 3.2	Espaço amostral bi-dimensional para os eventos do exemplo 3.1	57
Figura 3.3	Ilustração da definição empírica ou <i>a posteriori</i> de probabilidade	59
Figura 3.4	Diagrama de Venn com ilustração do conceito de probabilidade condicional	62
Figura 3.5	Diagrama de Venn para o Teorema da Probabilidade Total	64
Figura 3.6	Distribuições de probabilidade da variável aleatória X	67
Figura 3.7	Funções densidade e acumulada de probabilidades de uma variável contínua	68
Figura 3.8	Formas variadas de uma função densidade de probabilidades	69
Figura 3.9	Função Densidade de X	70
Figura 3.10	FDP e FAP para a distribuição exponencial com parâmetro $\theta=2$	71
Figura 3.11	Funções densidade de probabilidades simétricas e assimétricas	77
Figura 3.12	Perspectiva de uma função densidade de probabilidade conjunta bivariada (adap. de Beckmann, 1968)	81
Figura 3.13	Exercício 2	92

CAPÍTULO 4

VARIÁVEIS ALEATÓRIAS DISCRETAS: DISTRIBUIÇÕES E APLICAÇÕES

Figura 4.1	Cheias máximas anuais como ilustração de um processo de Bernoulli	103
Figura 4.2	Exemplos de funções massa de probabilidades da distribuição binomial	104

Figura 4.3	Exemplos de funções massa de probabilidades da distribuição geométrica	107
Figura 4.4	Ilustração do conceito de tempo de retorno para eventos máximos anuais	108
Figura 4.5	Tempo de retorno da cheia de projeto em função do risco hidrológico e da vida útil estimada para uma estrutura hidráulica	110
Figura 4.6	Esquema de Desvio por Túnel	111
Figura 4.7	Ilustração do conceito de tempo de retorno para eventos mínimos anuais	112
Figura 4.8	Exemplos de funções massa de probabilidades da distribuição binomial negativa	113
Figura 4.9	Exemplos de funções massa de probabilidades de Poisson	115
Figura 4.10	Exercício 6	123
Figura 4.11	Exercício 8	124

CAPÍTULO 5

VARIÁVEIS ALEATÓRIAS CONTÍNUAS: DISTRIBUIÇÕES APLICAÇÕES

Figura 5.1	Funções densidade e de probabilidades acumuladas da distribuição uniforme	130
Figura 5.2	FDP e FAP da distribuição Normal, com $\theta_1 = 8$ e $\theta_2 = 1$	132
Figura 5.3	Efeitos da variação marginal dos parâmetros de posição e escala sobre $X \sim N(\mu, \sigma)$	133
Figura 5.4	Exemplos de Funções Densidades de Probabilidade Log-Normal	142
Figura 5.5	FDP e FAP da Distribuição Exponencial para $\theta = 2$ e $\theta = 4$	145
Figura 5.6	Exemplos de Funções Densidades de Probabilidade da Distribuição Gama	149
Figura 5.7	Exemplos de Funções Densidades de Probabilidade da Distribuição Beta	151
Figura 5.8	FDP e FAP do máximo amostral de uma variável original exponencial	154
Figura 5.9	Exemplos de caudas superiores de funções densidades de probabilidades	157
Figura 5.10	Exemplos de funções densidades da distribuição de Gumbel (máximos)	160

Figura 5.11	Exemplos de funções densidades da distribuição de Fréchet (máximos)	162
Figura 5.12	Exemplos de funções densidades da distribuição GEV	163
Figura 5.13	Relação entre o parâmetro de forma e o coeficiente de assimetria de uma variável GEV, para $\kappa > -1/3$	164
Figura 5.14	Exemplos de funções densidades da distribuição de Gumbel (mínimos)	168
Figura 5.15	Exemplos de funções densidade da distribuição de Weibull (mínimos)	170
Figura 5.16	Exemplos de funções densidades da distribuição Pearson Tipo III	173
Figura 5.17	Exemplos de funções densidades da distribuição do χ^2	177
Figura 5.18	Exemplos da função densidades t de Student	179
Figura 5.19	Exemplos da função densidade F	181
Figura 5.20	Exemplos de funções densidades conjuntas da distribuição Normal bivariada	183
Figura 5.21	Ilustração do problema da agulha de Buffon	197

CAPÍTULO 6 ESTIMAÇÃO DE PARÂMETROS

Figura 6.1	Amostragem e inferência estatística	202
Figura 6.2	Ilustração de um intervalo de confiança para μ , com σ conhecido e $(1-\alpha) = 0,95$ (adap. de Bussab e Morettin, 2002)	219

CAPÍTULO 7 TESTES DE HIPÓTESES

Figura 7.1	Ilustração dos erros dos tipos I e II em um teste de hipótese unilateral	249
Figura 7.2	Exemplos da curva característica operacional de um teste de hipóteses	251
Figura 7.3	Exemplos de função poder de um teste de hipóteses	252
Figura 7.4	Varição temporal das vazões médias anuais do Rio Paraopeba em Ponte Nova do Paraopeba	270
Figura 7.5	Freqüências empíricas e teóricas para o teste de aderência de Kolmogorov-Smirnov	278
Figura 7.6	Associação entre os quantis teóricos Normais e os observados no Rio Paraopeba em Ponte Nova do Paraopeba	285

CAPÍTULO 8

ANÁLISE LOCAL DE FREQUÊNCIA DE VARIÁVEIS HIDROLÓGICAS

Figura 8.1	Distribuição Normal em escala aritmética	298
Figura 8.2	Distribuição Normal no papel de probabilidade Normal	299
Figura 8.3	Papel de probabilidade Exponencial	300
Figura 8.4	Série com presença de pontos atípicos	304
Figura 8.5	Registros sistemáticos e informações históricas - Modificado de Bayliss e Reed (2001)	306
Figura 8.6	Distribuições empíricas sistemática e combinada	308
Figura 8.7	Ajuste das distribuições Log-Normal, Pearson-III e Log-Pearson III	334
Figura 8.8	Ajuste das distribuições de Gumbel, Exponencial e GEV	335
Figura 8.9	Distribuições ajustadas às vazões mínimas de Ponte Nova de Paraopeba com 3 dias de duração	338
Figura 8.10	Ajuste do modelo Poisson-Pareto à distribuição empírica	346

CAPÍTULO 9

CORRELAÇÃO E REGRESSÃO

Figura 9.1	Exemplos de relacionamentos (Adaptado de Helsel e Hirsh, 1992)	355
Figura 9.2	Exemplos de correlações (Adaptado de Helsel e Hirsh, 1992)	356
Figura 9.3	Correlações lineares positivas e negativas	357
Figura 9.4	Exemplos de coeficientes de correlação	359
Figura 9.5	Distribuição não equilibrada dos dados	359
Figura 9.6	Correlação entre quocientes de variáveis	360
Figura 9.7	Correlação entre produto de variáveis	360
Figura 9.8	Linha de Regressão	364
Figura 9.9	Componentes de Y	366
Figura 9.10	Hipótese de normalidade	367
Figura 9.11	Intervalos e Confiança	371
Figura 9.12	Verificação da independência	373
Figura 9.13	Verificação da variância dos resíduos	373
Figura 9.14	Extrapolação do modelo de regressão	374

Figura 9.15	Diagrama de dispersão	376
Figura 9.16	Linearidade entre as variáveis	377
Figura 9.17	Ajuste entre as observações e a reta de regressão	378
Figura 9.18	Resíduos	379
Figura 9.19	Ajuste dos resíduos à distribuição normal	379
Figura 9.20	Vazões calculadas versus observadas e desvio percentual	381
Figura 9.21	Diagramas de dispersão	391
Figura 9.22	Resíduos	392
Figura 9.23	Exercício 8	398

CAPÍTULO 10

ANÁLISE REGIONAL DE FREQUÊNCIA DE VARIÁVEIS HIDROLÓGICAS

Figura 10.1	Dendograma hipotético - 10 indivíduos (adap. de Kottegoda e Rosso, 1997)	408
Figura 10.2	Localização das estações da bacia do rio Paraopeba	411
Figura 10.3	Linha de regressão e os intervalos de confiança para o exemplo 10.1.	414
Figura 10.4	Distribuições empíricas adimensionais	416
Figura 10.5	Linhas de regressão e intervalos de confiança, exemplo 10.2.	418
Figura 10.6	Distribuição regional adimensional	425
Figura 10.7	Descrição esquemática da medida de discordância	429
Figura 10.8	Descrição esquemática do significado de heterogeneidade regional	433
Figura 10.9	Descrição esquemática da medida de aderência Z	439
Figura 10.10	Diagrama Assimetria-L x Curtose-L	443
Figura 10.11	Diagrama Assimetria-L x Curtose-L, exemplo 10.4	452
Figura 10.12	Localização das estações da bacia do rio das Velhas	456
Figura 10.13	Distribuições empíricas com 7 dias de duração, exemplo 10.5	457
Figura 10.14	Distribuições empíricas de Honório Bicalho, exemplo 10.5	458
Figura 10.15	Ajuste das distribuições empíricas e regionais, exemplo 10.5	460
Figura 10.16	Localização das estações do exemplo 10.6	462
Figura 10.17	Distribuições empíricas adimensionais com duração de 24 horas, exemplo 10.6	464
Figura 10.18	Diagrama Curtose-L x Assimetria-L, exemplo 10.6	466

**CAPÍTULO 1
INTRODUÇÃO À HIDROLOGIA ESTATÍSTICA**

Tabela 1.1	Características e Variáveis Hidrológicas - Unidades	13
-------------------	---	----

**CAPÍTULO 2
ANÁLISE PRELIMINAR DE DADOS HIDROLÓGICOS**

Tabela 2.1	Vazões Médias Anuais do Rio Paraopeba em Ponte Nova do Paraopeba	21
-------------------	--	----

Tabela 2.2	Vazões Médias Anuais do Rio Paraopeba em Ponte Nova do Paraopeba	23
-------------------	--	----

Tabela 2.3	Tabela de frequências da vazões médias anuais do Rio Paraopeba em Ponte Nova do Paraopeba – Período 1938 a 1999	24
-------------------	---	----

Tabela 2.4	Estatísticas descritivas das vazões médias anuais do Rio Paraopeba em Ponte Nova do Paraopeba – Período 1938-1999	38
-------------------	---	----

Tabela 2.5	Vazões médias anuais e alturas anuais de precipitação (ano hidrológico Outubro-Setembro) – Estação Ponte Nova do Paraopeba (Flu:40800001, Plu:01944004)	43
-------------------	---	----

Tabela 2.6	Exercício 15	50
-------------------	--------------	----

**CAPÍTULO 3
TEORIA ELEMENTAR DE PROBABILIDADES**

Tabela 3.1	Exercício 6	94
-------------------	-------------	----

**CAPÍTULO 4
VARIÁVEIS ALEATÓRIAS DISCRETAS: DISTRIBUIÇÕES E APLICAÇÕES**

Tabela 4.1	Exercício 7	124
-------------------	-------------	-----

CAPÍTULO 5 VARIÁVEIS ALEATÓRIAS CONTÍNUAS: DISTRIBUIÇÕES E APLICAÇÕES

Tabela 5.1	Função de Probabilidades Acumuladas da Distribuição Normal Padrão	135
Tabela 5.2	Relações auxiliares para a estimativa do parâmetro de escala de Weibull	171

CAPÍTULO 6 ESTIMAÇÃO DE PARÂMETROS

Tabela 6.1	Vazões Médias Anuais (m ³ /s) do Rio Paraopeba em Ponte Nova do Paraopeba	214
Tabela 6.2	Momentos-L e seus quocientes para algumas distribuições de probabilidades (adap. de Stedinger et al., 1993)	217
Tabela 6.3	Algumas funções-pivô para a construção de intervalos de confiança (IC), a partir de uma amostra de tamanho N	220

CAPÍTULO 7 TESTES DE HIPÓTESES

Tabela 7.1	Vazões médias anuais do Rio Paraopeba em Ponte Nova do Paraopeba (m ³ /s) e grandezas auxiliares para a realização dos testes de hipóteses de Wald-Wolfowitz, Mann-Whitney e Spearman	268
Tabela 7.2	Número anual de dias em que o nível d'água é inferior à cota da tomada d'água de projeto	273
Tabela 7.3	Frequências observadas e empíricas	273
Tabela 7.4	Frequências observadas e empíricas	275
Tabela 7.5	Valores críticos da estatística $D_{N,\alpha}$ do teste de aderência KS	277
Tabela 7.6	Valores críticos da estatística A^2_{α} do teste de aderência AD, se a distribuição hipotética é Normal ou Log-Normal (Fonte: D'Agostino e Stephens, 1986)	279

Tabela 7.7	Valores críticos da estatística A^2_{α} do teste de aderência AD, se a distribuição hipotética é Weibull (mínimos, 2p) ou Gumbel (máximos) (Fonte: D'Agostino e Stephens, 1986)	279
Tabela 7.8	Cálculo da estatística do teste de aderência AD – Vazões médias anuais em Ponte Nova do Paraopeba	280
Tabela 7.9	Fórmulas para o cálculo da posição de plotagem q_i	282
Tabela 7.10	Valores críticos $r_{crit,\alpha}$ para a distribuição Normal, com $a = 0,375$ na equação 7.32	283
Tabela 7.11	Valores críticos $r_{crit,\alpha}$ para a distribuição Gumbel, com $a = 0,44$ na equação 7.32	283
Tabela 7.12	Valores críticos $r_{crit,\alpha}$ para a distribuição GEV, com $a = 0,40$ na equação 7.32	284

CAPÍTULO 8

ANÁLISE LOCAL DE FREQUÊNCIA DE VARIÁVEIS HIDROLÓGICAS

Tabela 8.1	Valores de Z e $\Phi(Z)$ para construção do papel normal	299
Tabela 8.2	Fórmulas para estimativa das posições de plotagem	302
Tabela 8.3	Cálculo das posições de plotagem das séries sistemática e combinada	308
Tabela 8.4	Pesos das caudas superiores de algumas distribuições de probabilidade	315
Tabela 8.5	Cálculo dos $Y_m(n)$	325
Tabela 8.6	Parâmetro δ para estimativa do erro padrão da Log-Pearson Tipo III	328
Tabela 8.7	Parâmetro δ_w para estimativa do erro padrão da distribuição de Weibull (mínimos)	329
Tabela 8.8	Estatísticas de série de vazões diárias máximas de Ponte Nova do Paraopeba	330
Tabela 8.9	Parâmetros das distribuições candidatas	330
Tabela 8.10	Funções inversas da FAP de algumas distribuições	331
Tabela 8.11	Quantis calculados para o exemplo 8.1 (m^3/s)	332

Tabela 8.12	Resultados do teste de Filliben	334
Tabela 8.13	Probabilidades empíricas	335
Tabela 8.14	Quantis das distribuições de Weibull e Gumbel	337
Tabela 8.15	Distribuição empírica das vazões mínimas de Ponte Nova de Paraopeba com 3 dias de duração	338
Tabela 8.16	Contagem das excedências anuais	344
Tabela 8.17	Cálculo da distribuição empírica do exemplo 8.9	345
Tabela 8.18	Quantis anuais – Modelo Poisson-Pareto	346
Tabela 8.19	Dados do exercício 4	347
Tabela 8.20	Dados do exercício 8	348
Tabela 8.21	Dados do exercício 16	349
Tabela 8.22	Vazões do rio Greenbrier em Alderson (West Virginia, EUA) superiores a 17.000 cfs	351

CAPÍTULO 9

CORRELAÇÃO E REGRESSÃO

Tabela 9.1	Área de drenagem e médias das vazões máximas anuais	376
Tabela 9.2	Resíduos	378
Tabela 9.3	Somatórios dos Quadrados	378
Tabela 9.4	Desvios Percentuais	381
Tabela 9.5	Tabela ANOVA da regressão múltipla	383
Tabela 9.6	Vazões mínimas, área de drenagem, declividade e densidade de drenagem	390
Tabela 9.7	Matriz de correlações	391
Tabela 9.8	Logaritmos das variáveis	392
Tabela 9.9	ANOVA modelo QA	392
Tabela 9.10	ANOVA modelo QAI	393
Tabela 9.11	ANOVA modelo QADD	394
Tabela 9.12	Parâmetros dos modelos	395
Tabela 9.13	Áreas de drenagem e vazões médias de longo termo – Exercício 3	396

Tabela 9.14	Lista de medições de descargas do exercício 8	397
Tabela 9.15	Dados do exercício 9	398
Tabela 9.16	Dados do exercício 10	399

CAPÍTULO 10

ANÁLISE REGIONAL DE FREQUÊNCIA DE VARIÁVEIS HIDROLÓGICAS

Tabela 10.1	Características fisiográficas das estações do exemplo 10.1	411
Tabela 10.2	Parâmetros da distribuição de Weibull e a $Q_{7,10}$	413
Tabela 10.3	Matriz de correlações	413
Tabela 10.4	Estações para regionalização de vazões diárias máximas anuais	415
Tabela 10.5	Estatísticas locais das amostras do exemplo 10.2	416
Tabela 10.6	Parâmetros da distribuição de Gumbel	417
Tabela 10.7	Matriz de correlações, exemplo 10.2	417
Tabela 10.8	Parâmetros das distribuições de Gumbel adimensionais, exemplo 10.3	424
Tabela 10.9	Quantis regionais adimensionais	424
Tabela 10.10	Valores críticos da medida de discordância - D_j	431
Tabela 10.11	Medidas de discordância	450
Tabela 10.12	Resultados dos testes de aderência (Z)	451
Tabela 10.13	Valores das razões-L e dos momentos-L	451
Tabela 10.14	Parâmetros das distribuições regionais	454
Tabela 10.15	Quantis regionais adimensionais	455
Tabela 10.16	Estações para regionalização de vazões mínimas	456
Tabela 10.17	Momentos-L e Razões-L, exemplo 10.5	459
Tabela 10.18	Parâmetros da distribuição de Weibull	460
Tabela 10.19	Quantis regionais adimensionais	460
Tabela 10.20	Vazões médias das séries de mínimas (m^3/s)	461
Tabela 10.21	Estações pluviográficas	462

Tabela 10.22	Resultados da medida de heterogeneidade, exemplo 10.6	464
Tabela 10.23	Valores regionais das Razões-L e dos Momentos-L, exemplo 10.6	465
Tabela 10.24	Resultados dos testes de aderência (Z)	465
Tabela 10.25	Parâmetros da distribuição generalizada de valores extremos regional	466
Tabela 10.26	Quantis regionais adimensionalizados, $\mu_{D,T}$	467
Tabela 10.27	Fatores de adimensionalização e variáveis explicativas, exemplo 10.6	467