

ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS PARÂMETROS DE SECAS E DE CHEIAS HIDROLÓGICAS EM RIOS INTERMITENTES DO SEMI-ÁRIDO BRASILEIRO

RESUMO

Na gestão de recursos hídricos em regiões semi-áridas um problema de vital relevância é o projeto e otimização de sistemas de reservatórios multiusos. Para isso, faz-se necessário o uso de modelos de geração de vazão sintética, bem como o gerenciamento da vazão escoada nos rios, notadamente no que concerne aos períodos de secas e de cheias. Pretendeu-se neste artigo, a partir da abordagem da própria definição de seca hidrológica, assim como de seus parâmetros característicos (duração, severidade e magnitude), proceder a uma análise estatística em três séries de rios no Estado do Ceará, a qual pudesse servir de base na formulação de um novo modelo de geração de vazão sintética para rios intermitentes.

ABSTRACT

By the water resources management in semiarid regions a main problem, which for a long time has been recognized, is the design and optimization of multipurpose reservoirs systems, particularly by generating streamflows for intermittent rivers in those regions. In this study it is presented diverse statistical tests that are applied to three annual flows series of semiarid basins in the State of Ceará in order to analyze the relationships of the droughts and floods characteristics (duration, severity and magnitude) of the pseudo-historical series. This makes possible the development of a model that is able to preserve not only the statistical parameters of the historical time series, but also to reproduce the persistence (i.e. long periods of low flows) encountered in the historical series, which is fundamental to the reservoir design and operation.

**Marcos Airton de
Sousa Freitas**

Prof. e Coord. do Grupo
de Pesquisas em Recursos
Hídricos, Meio
Ambiente e Computação
Aplicada da Universidade
de Fortaleza - UNIFOR

1 - INTRODUÇÃO

Na formulação de diversos modelos autoregressivos apresentados na literatura para a geração de vazões sintéticas, utilizadas no projeto e na otimização da operação de reservatórios superficiais, os parâmetros característicos dos períodos de secas e cheias, isto é, a duração, a severidade e a magnitude, não são, via de regra, considerados. Talvez devido a isso, esses modelos não conseguem reproduzir, de maneira satisfatória, as características típicas de intermitência dos rios de regiões semi-áridas. FREITAS (1995), por exemplo, modificou e aplicou nove modelos autoregressivos, em nível mensal, às quatro bacias de regiões semi-áridas. A maioria dos modelos analisados apresentaram, contudo, problema de superestimação da vazão média mensal, devido provavelmente ao caráter markoviano dos mesmos, conforme atestado também por ASKEW et al. (1971) e STEDINGER & TAYLOR (1982).

FREITAS (1995) demonstrou ainda que, para a análise do desempenho de modelos de geração de vazão no semi-árido três critérios são fundamentais, quais sejam: (1) comparação dos parâmetros estatísticos (média, desvio padrão, coeficiente de variação, assimetria, coeficiente de correlação e de autocorrelação) das séries geradas com os da série histórica; (2) análise do resultado da simulação da operação do reservatório para cada série gerada, isto é, deve ser feita uma análise de Monte Carlo e (3) análise das características (duração, severidade e magnitude) dos períodos de cheias e de secas gerados.

Procurou-se, destarte, neste estudo verificar a partir de três séries de vazões de rios intermitentes pertencentes ao Estado do Ceará, a inter-relação entre os parâmetros característicos dos períodos de cheias e secas observados nas séries históricas, de modo a fornecer subsídios na elaboração de um modelo de geração de vazão ao nível anual para rios intermitentes, considerando-se tais inter-relações entre os parâmetros.

2 - Parâmetros Característicos dos Períodos de Seca e de Cheia

Para a realização das análises estatísticas foram empregadas séries de vazão pseudo-

históricas, isto é, séries geradas a partir de um modelo chuva-vazão MODHAC (LANNA & SCHWARZBACH, 1989) ajustado às bacias hidrográficas estudadas, devido à inexistência de diversas séries de vazão, sem falhas, com comprimento maiores do que trinta anos. Essas séries representam séries típicas de rios intermitentes do semi-árido brasileiro.

Devido ao aspecto anual dos eventos de seca no Nordeste do Brasil, adotou-se neste estudo, um intervalo de tempo de 1 (um) ano. O uso de um intervalo de tempo menor, como, por exemplo, de um mês, implicaria num número maior de valores na amostra e num elevado valor para o coeficiente de correlação. Ao contrário, o uso de um intervalo de tempo mais dilatado (um ano, por exemplo) gera um reduzido número de valores na amostra e um coeficiente de correlação pequeno.

Os parâmetros característicos dos períodos de cheias e secas são ainda influenciados pela escolha da vazão-patamar na série de tempo, para distinção entre um evento de cheia e de um de seca. O uso do valor mediano, por exemplo, resultaria no mesmo valor para a duração média dos períodos de seca e de cheia. Já a utilização da vazão média como patamar, resulta em uma mesma severidade média para os períodos de cheia e de seca, quando de um ciclo completo do processo de alternância (LEE et al., 1986).

A curva de frequência da duração de uma seca para séries anuais apresenta, devido ao reduzido número da amostra, uma forma não suave. Quando da aplicação de uma regionalização, parte-se do pressuposto que um evento de seca hidrológica em uma região homogênea ocorre para cada rio, ao mesmo tempo. Um procedimento de normalização, juntamente com um procedimento denominado decimação, pode, neste caso, ser perfeitamente empregado (BLOOMFIELD, 1976; FREITAS, 1997).

Uma seca hidrológica pode ser caracterizada como um ou uma seqüência de mais anos, onde a vazão média anual permanece abaixo da vazão anual média a longo prazo, considerando-se toda a série existente (YEVJEVICH, 1967; DRACUP et al., 1980a). Um evento de seca (ou cheia) pode, destarte, ser caracterizada por meio de três parâmetros: a

duração D , em anos; a severidade ou déficit acumulado S e a magnitude M , a qual representa o déficit médio acumulado abaixo de um determinado valor X_0 (por exemplo, a média anual, um percentual da média anual ou ainda um quantil com uma dada probabilidade).

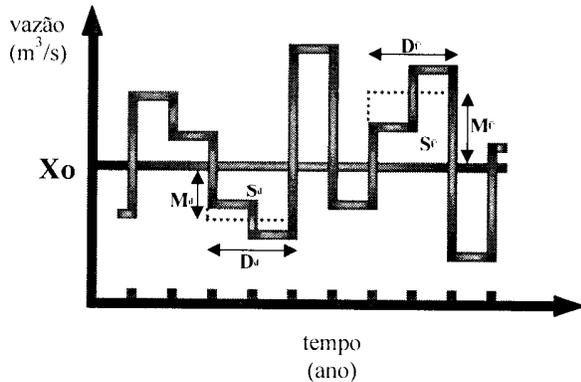


Figura 1: Parâmetros Característicos dos Eventos de Secas e Cheias (LEE et al., 1986)

De um modo geral, a severidade S de uma seca (ou cheia) pode ser expressa da seguinte forma:

$$S = \int_0^D Y(t) dt \quad (1)$$

sendo

$Y(t)$ = déficit (excesso) no ano t de uma seca (cheia) de D -anos de duração.

Em se tratando de seca hidrológica, isto é, vazão, tem-se, para um período seco:

$$S = \int_0^D [\bar{Q} - Q(t)] dt \quad (2)$$

$Q(t)$ = vazão não regularizável no ano t de uma seca de D -anos de duração;

\bar{Q} = vazão média anual ou percentual desta.

A magnitude M pode ser estimada como a seguir:

$$M = \frac{1}{D} \int_0^D Y(t) dt \quad (3)$$

ou

$$M = S / D \quad (4)$$

A magnitude é, portanto, um parâmetro secundário, já que pode ser expresso como função da duração e da severidade. Esses últimos são denominados parâmetros primários. De

acordo com KENDALL & DRACUP (1992), a severidade de uma seca de D -anos de duração pode ser descrita através de:

$$S_d = Y_1^D + Y_2^D + \dots + Y_D^D \quad (5)$$

D = duração da seca (anos);

Y_n^D = déficit no ano n de uma seca de duração D .

Na tabela 1 encontram-se os valores desses parâmetros para a série do Posto Faz. Cajazeiras no rio Acaraú, no Estado do Ceará.

Número da seca	duração (a)	ano inicial	severidade (m³/s*a)	magnitude (m³/s)
1	3	1914	244.465	81.489
2	2	1918	144.350	72.175
3	1	1922	10.132	10.132
4	1	1925	24.561	24.561
5	4	1930	273.634	68.408
6	4	1936	190.788	47.697
7	9	1941	648.996	72.111
8	6	1951	478.588	79.765
9	3	1958	224.272	74.757
10	1	1962	59.084	59.084
11	1	1966	90.210	90.210
12	4	1969	240.825	60.206
13	4	1976	215.043	53.761
14	3	1981	190.646	63.549
15	1	1987	35.815	35.815

Tabela 1: Secas hidrológicas da série pseudo-histórica do Posto Faz. Cajazeiras (1911-1988) no Rio Acaraú.

3 - TESTES ESTATÍSTICOS

Foram, então, realizadas as seguintes análises estatísticas dos eventos de cheias e secas:

- I) Teste de estacionariedade (tendência);
- II) Teste de estocasticidade (coeficiente de correlação lag-1);

III) Teste de correlação entre os parâmetros;

IV) Correlação cruzada entre os parâmetros de sucessivos eventos de cheias e secas ou inversamente.

3.1 Estacionariedade (tendência)

Os graus de estacionariedade para os eventos de cheias e de secas foram determinados através da comparação da declividade da reta de regressão ajustada para cada série com o estatístico t. Foram estimados os menores valores para o nível de significância α associados à rejeição da hipótese nula (isto é, a declividade da reta de regressão é igual a zero). Nessa tabela, NE significa que a série em questão é muito instacionária ($\alpha < 0.01$) e E significa que a série analisada é muito estacionária ($\alpha > 0.20$). Os sinais correspondem aos sinais da declividade das retas de regressão.

Posto	Cheia			Seca		
	Duração	Severidade	Magnitude	Duração	Severidade	Magnitude
Faz. Cajazeiras	+E	+E	-E	-E	-E	-E
Pacajus	+E	+E	-E	-E	-E	+E
P. Sarasate	-E	+E	+E	-E	-E	-E

Tabela 2: Teste t; Valores de α para a não-estacionariedade dos eventos de cheias e de secas.

- 1) Os sinais correspondem às declividades das retas de regressão.
- 2) NE (não-estacionário) para $\alpha < 0.01$; E (estacionário) para $\alpha > 0.20$.

Com base nos resultados da tabela 2, as seguintes constatações qualitativas podem ser feitas:

I) A um aumento da duração de um período de cheia correspondem normalmente um incremento na severidade e uma diminuição na magnitude dos períodos de cheias (figura 2);

II) Uma redução da duração da seca leva a uma diminuição da severidade da seca e a um aumento da magnitude da seca;

III) Nem os parâmetros característicos dos períodos de cheias, nem tampouco os de secas apresentam instacionariedades significativas. Isso, entretanto, pode ser decorrência do fato de o teste utilizado não ter poder suficiente

para detectar isso, a partir de uma amostra pequena (HAAN, 1977).

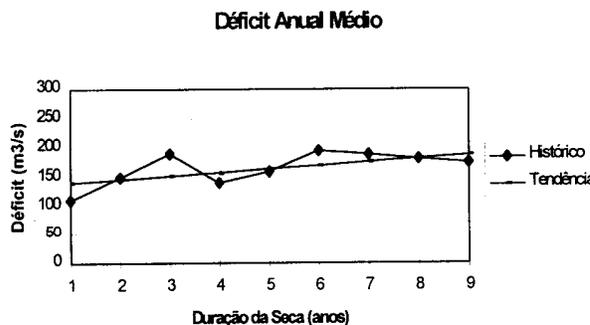


Figura 2: Valor esperado para o déficit médio em função da duração (Posto Faz. Cajazeiras)

3.2 Estocasticidade

O grau de estocasticidade das séries foi avaliado através do teste de ANDERSON (1942) usando o coeficiente de correlação lag-1, supondo-se as séries cíclicas. O menor nível de significância α , associado à hipótese nula, ou seja, $\rho_1=0$, utilizando-se o estatístico z, encontra-se na tabela 3. Dessa tabela advém as seguintes conclusões qualitativas:

I) Coeficientes de correlações negativos das durações de cheias estão ligados a coeficientes de correlações negativos das severidades e magnitudes de cheias;

II) Coeficientes de correlações negativos das durações de secas estão associados a coeficientes de correlações negativos de severidades de secas;

III) A duração é o parâmetro mais aleatório e a severidade o mais não-aleatório;

IV) Todos os parâmetros característicos dos períodos de cheias das séries testadas apresentaram coeficientes de correlações negativos;

Posto	Cheia			Seca		
	Duração	Severidade	Magnitude	Duração	Severidade	Magnitude
Faz. Cajazeiras	-R	-R	-R	+0.05	+0.05	+R
Pacajus	-R	-0.10	-0.20	-R	-R	-R
P. Sarasate	-R	-0.10	-0.05	+0.05	+0.05	-R

Tabela 3: Teste z; Valores de α para o comportamento não-aleatório dos eventos de cheias e de secas hidrológicas.

1) Os sinais correspondem às declividades das retas de regressão.

2) NR (não-estocástico) para $\alpha < 0.01$; R (estocástico) para $\alpha > 0.20$.

A duração e a severidade dos eventos de secas foram, então, por meio de envoltórias estudadas. As estimativas das máximas de vazão foram determinadas através da desigualdade de Tschebycheff independentemente da distribuição de probabilidade, como a seguir:

$$\max X \approx u_x + (n)^{1/2} \sigma_x \quad (6)$$

u_x = média;

σ_x = desvio padrão;

n = tamanho da amostra.

Para parâmetros aleatórios, como a duração, DRACUP et al. (1980b) propuseram trocar $n^{1/2}$ por $(n/2)^{1/2}$ na equação acima, a qual passa a ser denominada de máximo de Tschebycheff modificado. A figura 3 mostra o diagrama de espalhamento e a envoltória para a duração dos períodos de secas para o Posto Faz. Cajazeiras (Rio Acaraú) no Estado do Ceará.

Para parâmetros não-aleatórios, como aparenta ser o caso da severidade, os valores de severidade ficam restritos normalmente ao triângulo inferior esquerdo. Isso significa que períodos de secas extremas somente muito raramente são seguidos por outros períodos de secas extremas. A envoltória expressa assim a máxima resposta da bacia hidrográfica aos eventos observados (figura 4). O triângulo superior direito apresenta, portanto, um período de retorno superior ao comprimento da série histórica (DRACUP et al., 1980b).

3.3 Correlação simples e correlação cruzada

A relação entre os três parâmetros característicos de secas e cheias hidrológicas podem da mesma forma ser estudados. Analisou-se aqui não só a relação entre cada par de parâmetros (correlação simples), bem como a relação entre eventos de cheias e secas ou entre eventos de secas e cheias (correlação cruzada). Esta análise permite uma quantificação das estruturas interna e externa dos períodos de secas e cheias hidrológicas.

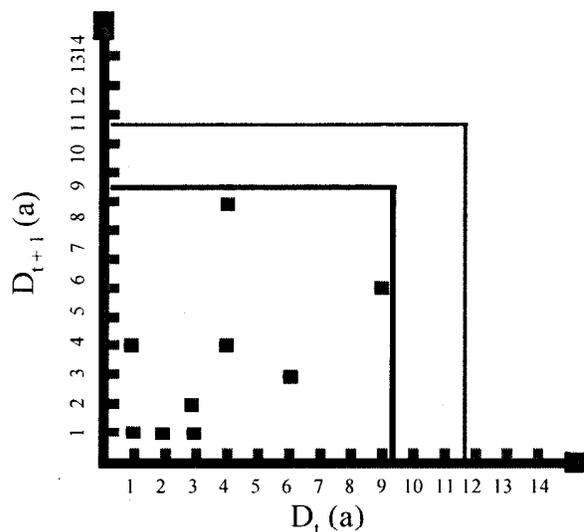


Figura 3: Diagrama de espalhamento e envoltória para a duração dos períodos de secas para o Posto Faz. Cajazeiras (Rio Acaraú)

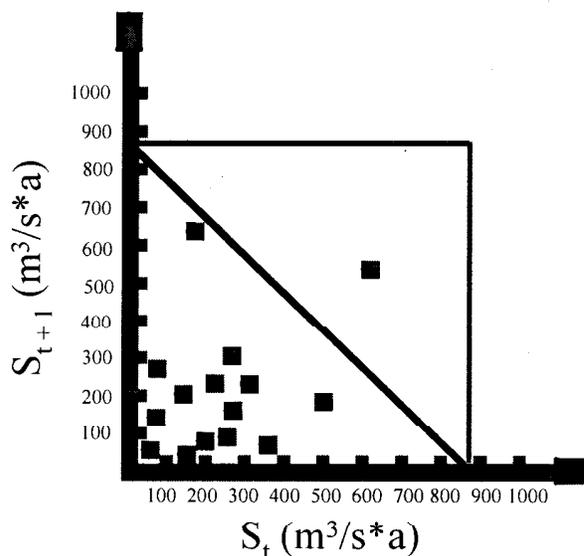


Figura 4: Diagrama de espalhamento e envoltória para a severidade dos períodos de secas para o Posto Faz. Cajazeiras (Rio Acaraú)

Nas tabelas 4 e 5 encontram-se listados os valores do nível de significância α associados à hipótese de rejeição ($r=0$). Ainda, ID significa que a correlação não é significativa ($\alpha > 0.20$) e D significa que a correlação é muito significativa ($\alpha < 0.01$). Os sinais correspondem aos sinais dos coeficientes das correlações simples e cruzada.

Das tabelas 4 e 5 pode-se concluir que:

I) A duração e a magnitude são os

parâmetros menos correlacionados, enquanto que a duração e a severidade são os mais correlacionados.

Essa dependência interna pode ser expressa através da seguinte inequação:

$$C_v(M_I) < C_v(D_I) < C_v(S_I)$$

C_v = coeficiente de variação.

Posto	Cheia			Seca		
	D vs. M	D vs. S	M vs. S	D vs. M	D vs. S	M vs. S
Faz. Cajazeiras	+0.10	+D	+D	+0.20	+D	+0.05
Pacajus	+ID	+D	+0.01	-ID	+D	+ID
P. Sarasate	+0.05	+D	+D	+ID	+D	+0.10

Tabela 4: Teste t; Valores de α para a correlação simples dos eventos de cheias e secas.

- 1) Os sinais correspondem às declividades das retas de regressão.
- 2) ID (não correlacionados) para $\alpha > 0.20$; D (correlacionados) para $\alpha < 0.01$.

Posto	Cheia e Seca			Seca e Cheia		
	Duração	Severidade	Magnitude	Duração	Severidade	Magnitude
Faz. Cajazeiras	-ID	-0.10	-0.20	-0.10	-0.20	-ID
Pacajus	+ID	+ID	+ID	+0.20	+0.05	-ID
P. Sarasate	-0.20	-0.20	-0.10	-0.10	-ID	+ID

Tabela 5: Teste t; Valores de α para a correlação cruzada dos eventos de cheias e secas.

- 1) Os sinais correspondem às declividades das retas de regressão cruzada.
- 2) ID (não correlacionados) para $\alpha > 0.20$; D (correlacionados) para $\alpha < 0.01$.

A partir dos resultados dos testes acima aplicados às séries de vazão pode-se adotar dois procedimentos para a modelagem das séries de vazão, quais sejam:

- I) O tratamento da duração e da magnitude sob a suposição de independência;
- II) O tratamento da duração e da severidade sob a suposição de dependência.

Uma forma de aplicação deste primeiro tratamento foi apresentado por JACKSON (1975) através da junção de uma cadeia de Markov para a duração, com um modelo autoregressivo para a magnitude. DRACUP et al. (1980a & b) demonstraram, entretanto, que a probabilidade de ocorrência de secas extremas é subdimensionado por meio de um processo de Markov, de modo que secas com du-

ração e severidade maiores do que as encontradas na série histórica raramente são geradas por este processo. Um exemplo de modelo que segue o segundo tratamento, isto é, que usa a suposição de dependência entre a duração e a severidade é o Alternating Renewal-Reward Model (ARRM), apresentado por KENDALL & DRACUP (1992). A aplicação deste modelo ao semi-árido brasileiro, associado ao Método dos Fragmentos (SVANIDZE, 1980) para desagregação em vazões mensais, pode ser visto em FREITAS (1996 e 1997).

4 – CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Analisou-se neste artigo os parâmetros característicos dos períodos de cheias e de secas hidrológicas, quais sejam: duração, severi-

dade e magnitude de três rios intermitentes da região semi-árida do Ceará. Da aplicação desses diversos testes estatísticos às séries observou-se vários aspectos qualitativos relacionados à interdependência existentes entre esses parâmetros. Tais observações são de capital importância na elaboração de modelos de geração de vazão para regiões semi-áridas.

5 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS:

- ANDERSON, R. L., — Distributions of the Serial Correlation Coefficient, **Annals of Mathematical Statistics**, 13, 1-13, 1942.
- ASKEW, A. J.; YEH, W. W-G.; HALL, W. A. — **A Comparative Study of Critical Drought Simulation**, **Water Resources Research**, 7(1), 52-62, 1971.
- BLOOMFIELD, P. — **Fourier Analysis of Time Series: An Introduction 1976** — Wiley-Interscience, 258p.
- DRACUP, J. A.; LEE, K. S.; PAULSON, E.G. — **On the Definition of Droughts**, **Water Resources Research**, 16(2), 297-302, 1980a.
- DRACUP, J. A.; LEE, K. S.; PAULSON, E.G. — **On the Statistical Characteristics of Drought Events**, **Water Resources Research**, 16(2), 289-296, 1980b.
- FREITAS, M. A. S. — **Stochastische Abflussgenerierung in intermittierenden semiariden Gebieten (NO-Brasilien)**, Abschlussarbeit, Weiterbildendes Studium Bauingenieurwesen, Univ. Hannover, Deutschland, 1995.
- FREITAS, M.A.S. — A Aplicação do Modelo Alternating Renewal Reward / Fragmentos (ARRF) na Geração de Vazão no Semi-Árido, In: **Anais do III Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste**, Salvador, pág. 543-551, 1996.
- FREITAS, M. A. S. — **Regionale Dürreanalyse anhand statistischer Methoden und Neuro-Fuzzy-Systemen mit Anwendung für Nordost-Brasilien**, Promotionsarbeit, Inst. für Wasserwirtschaft, Hydrologie und landwirtschaftl. Wasserbau, Univ. Hannover, 1997.
- HAAN, C. T. — **Statistical Methods in Hydrology**, The Iowa State University Press, Ames, Iowa, 1977.
- JACKSON, B. B. — **Markov Mixture Models for Drought Lengths**, **Water Resources Research**, 11(1), 64-74, 1975.
- KENDALL, D.R.; DRACUP, J. A. — **On the Generation of Drought Events Using an Alternating Renewal-Reward Model**, **Stochastic Hydrol. Hydraul.**, 6, 55-68, 1992.
- LANNA, A. E.; SCHWARZBACH, M. — **MODHAC - Modelo Hidrológico Auto-Calibrável**, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, UFRGS, 1989.
- LEE, K.S.; SADEGHIPOUR, J.; DRACUP, J.A. — **An Approach for Frequency Analysis of Multiyear Drought Durations**, **Water Resources Research**, 22(5), 655-662, 1986.
- STEDINGER, J. R.; TAYLOR, M. R. — **Synthetic Streamflow Generation, 1: Model Verification and Validation**, **Water Resources Research**, 18(4), 909-918, 1982.
- SVANIDZE, G.G. — **Mathematical Modeling of Hydrologic Series for Hydroelectric and Water Resources Computations**, **Water Resources Publications**, Fort Collins, Colorado, USA, 1980.
- YEVJEVICH, V.M. — **Objective Approach to Definitions and Investigations of Continental Droughts 1967**, Hydraulic Paper, Colorado State University, Fort Collins, Colorado.