

SECAS HIDROLÓGICAS NO SEMI-ÁRIDO BRASILEIRO: O PAPEL DA VARIABILIDADE DOS DEFLÚVIOS ANUAIS

Francisco Almino Menezes Júnior¹; Ticiania Marinho de Carvalho Studart² ; José Nilson Beserra Campos² ; Ricardo Marinho de Carvalho ³ e Juliana Pontes Machado de Andrade⁴

Resumo. O presente trabalho analisa os valores esperados de secas hidrológicas máximas $E[T_{max}]$ e as durações médias das secas hidrológicas (T_{med}), em nove cenários de diferentes variabilidades de deflúvios anuais. Foi aplicado o Método de Monte Carlo para o cálculo dos valores esperados de secas hidrológicas máximas ($E[T_{max}]$). Já para se encontrar os valores das durações médias das secas hidrológicas, além do Método de Monte Carlo, foi utilizada a Teoria dos Runs. Verificou-se que quanto maior o valor das variabilidades dos deflúvios anuais (CV_{def}) dos cenários analisados, maiores são os valores de $E[T_{max}]$. Também foi possível verificar que quanto maior o valor do CV_{def} , menor a quantidade de secas e maior o tempo médio de meses que elas ocorrem.

Abstract. The present paper analyses the expected values of maximum hydrological droughts $E[T_{max}]$ and the average length of hydrological droughts $E[T_{med}]$, in nine scenarios of different variability of annual discharges. It was applied Monte Carlo method to calculate the expected values of hydrological droughts, and Theory of Runs, to calculate the average length of hydrological droughts. It was observed that $E[T_{max}]$ is proportional to CV_{def} . It was also possible to observe that the bigger is the value of CV_{def} , the smaller is the number of droughts episodes and the bigger is their average duration (in months).

Palavras – chave: Secas hidrológicas; Teoria dos Runs; Reservatório.

¹ Engenheiro Civil. Mestre em Recursos Hídricos pela Universidade Federal do Ceará.

E-mail: alminojunior@bol.com.br

² Professores do Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental – Universidade Federal do Ceará. Campus do Pici, Centro de Tecnologia, Bl. 713, Fortaleza, Ceará, Brasil, CEP 60.451-970, Fone: (85) 288.9623, Fax: (85)288.9627 e-mails: ticiana@ufc.br e nilson@ufc.br

³ Professor do Departamento de Engenharia de Edificações – Universidade Federal do Ceará. Campus do Pici, Centro de Tecnologia, Bl. 710, Fortaleza, Ceará, Brasil. E-mail: ricardomarinho@fortalnet.com.br

⁴ Estudante do Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Ceará. Bolsista de Iniciação Científica do CNPq. E-mail: juliana.pontes@secrel.com.br

INTRODUÇÃO

A problemática das secas no Semi-Árido nordestino, consiste em um dos piores obstáculos ao desenvolvimento sócio-econômico da Região. Ao contrário de outras catástrofes naturais como terremotos, enchentes, vendavais e furacões que, apesar dos grandes transtornos sócio-econômicos que podem causar, ocorrem de uma forma repentina e rápida, as secas ocorrem lentamente, cobrindo áreas de uma maneira perversa.

Yevjevich (1967) relata que as secas podem ser analisadas de acordo com quatro pontos de vista: do ponto de vista meteorológico ou climatológico, as secas ocorrem quando as precipitações estão abaixo de um valor crítico. Com relação ao caráter hidrológico, ocorrem quando há uma deficiência hídrica, devido à baixa capacidade de armazenamento em rios, lagos e reservatórios. No aspecto ambiental, as secas relacionam-se às mudanças nos processos naturais induzidos pelo longo período de déficit hídrico. E, por último, no ponto de vista sócio-econômico, as secas além de ser um problema de suprimento hídrico, é também uma questão de atendimento à demanda.

No presente trabalho são estudadas as durabilidades das secas hidrológicas pontuais, no caso as secas que ocorrem em cada um dos nove cenários escolhidos, causando a falta ou total deficiência hídrica nesses reservatórios. Será utilizado o Método de Monte Carlo e *a posteriori* a Teoria dos Runs.

A TEORIA DOS RUNS

De um modo geral um run é definido como uma série de observações de um mesmo tipo, precedida e sucedida por uma ou mais observações de um tipo diferente. A Figura 1 representa a série da variável contínua X_t . Um valor X_0 , denominado nível de truncamento, é arbitrado. A partir desse ponto, a série da variável X_t é interceptada em diversos pontos e a relação da constante X_0 para todos os valores de X_t servem de base para as várias definições dos runs.

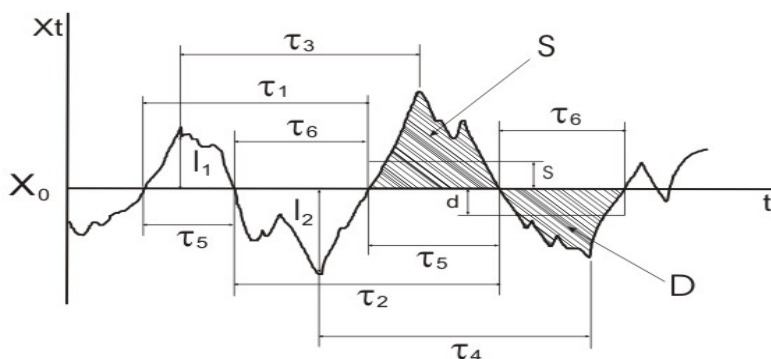


Figura 1. Representação de uma série contínua da variável X_t servindo como base para várias definições dos runs (Yevjevich, 1967).

A Teoria dos Runs está diretamente ligada à presente pesquisa, pois ela visa exatamente o objetivo principal do estudo, ou seja, analisar as durações de secas em uma dada região ou reservatório.

METODOLOGIA

Neste trabalho são estudados nove cenários com diferentes características hidrológicas. A escolha destes cenários foi feita tendo como parâmetro a variabilidade dos deflúvios naturais, traduzida pelo coeficiente de variabilidade dos deflúvios anuais (CVdef). Assim, foi possível se relacionar as variabilidades, aos valores esperados de secas hidrológicas máximas ($E[T_{max}]$) e durações médias das secas hidrológicas (T_{med}) para situações distintas.

Dados Utilizados

No sentido de se analisar os valores esperados de secas hidrológicas máximas ($E[T_{max}]$) e o número médio de meses consecutivos em que houve um evento de seca (T_{med}) para um dado cenário, foi selecionado um rio típico do Semi-Árido do Ceará: o Rio Caxitoré, localizado no Norte do Estado.

Para se analisar cenários de diferentes variabilidades, foi utilizado a mesma média dos deflúvios anuais do Rio Caxitoré ($126,3 \text{ hm}^3$) em todas as simulações, mas os valores dos coeficientes de variação dos deflúvios anuais (CVdef) utilizados para a entrada de dados no programa SimRes, foram àqueles relativos à série histórica natural de cada um destes cenários.

A Tabela 1 mostra a relação dos nove cenários, juntamente com seus coeficientes de variação e suas médias dos deflúvios anuais reais (CVdef e μ respectivamente).

Tabela 1. Características dos cenários envolvidos na pesquisa.

Rios	Série Histórica (anos)	CVdef	μ real (hm^3/ano)	Cenários	Simulação (CVdef)	Simulação μ (hm^3/ano)
Goitá	34	0,6	75,68	Cenário 1	0,6	126,3
Lima Campos	82	1,0	90,41	Cenário 2	1,0	
Russas	86	1,1	25,05	Cenário 3	1,1	
Caxitoré	79	1,2	126,3	Cenário 4	1,2	
Orós	86	1,3	880,22	Cenário 5	1,3	
Boa Viagem	82	1,4	28,65	Cenário 6	1,4	
Banabuiú	85	1,5	346,23	Cenário 7	1,5	
Arneiroz	85	1,6	100,89	Cenário 8	1,6	
Apertado	82	1,8	6,58	Cenário 9	1,8	

O Açude Caxitoré

O reservatório utilizado nas simulações dos cenários foi o Caxitoré, terceiro maior açude da Bacia do Curu, tendo capacidade de acumular cerca de 202 milhões de metros cúbicos.

O seu regime hidrológico é definido pelo seguintes parâmetros:

- Volume Afluente Médio Anual (μ) : 126,3 hm³/ano
- Desvio Padrão dos Deflúvios Anuais (σ) : 151,4 hm³/ano
- Coeficiente de Variação dos Deflúvios Anuais (CVdef) : 1,2

Valores Esperados de Secas Hidrológicas Máximas (E[Tmax])

Considera-se como E[Tmax], o valor esperado, em meses, de secas hidrológicas máximas. A variável aleatória, nesse caso, foi considerada como a duração das secas e para a avaliação destas, foi utilizado o Método de Monte Carlo, por meio do software SimRes, desenvolvido pela Universidade Federal do Ceará (UFC) no Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental.

As etapas para a estimativa dos E[Tmax] de cada cenário são descritas a seguir:

Geração das séries sintéticas de deflúvios anuais

Nesta etapa do trabalho foram geradas 9 séries de 20.000 valores de vazões anuais afluentes, para cada um dos nove cenários em estudo, seguindo uma Distribuição Gamma II, cuja equação é:

$$P(x) = (\beta^\alpha x^{\alpha-1} e^{-\beta x}) / \Gamma(\alpha) \quad (1)$$

onde: $\Gamma(\alpha)$ é a Função Gamma e α e β , os parâmetros da distribuição, calculados pelo método dos momentos a partir das equações 2 e 3.

$$\mu = \alpha/\beta \quad (2)$$

$$\sigma^2 = \alpha/\beta^2 \quad (3)$$

Como citado anteriormente, a média histórica do reservatório Caxitoré foi conservada ($\mu = 126,3$ hm³/ano) e apenas variou-se o coeficiente de variação dos deflúvios anuais (CVdef) entre 1,0 e 1,6, com valores extremos de 0,6 e 1,8, representando os nove cenários já mencionados (Tabela 2).

Tabela 2. Valores de μ e σ (em hm^3/ano) utilizados para a geração das séries sintéticas de vazões afluentes anuais para coeficiente de variação variando entre 0,6 e 1,8

Coeficientes de Variação dos Deflúvios (C_{vdef})									
	0,6	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,8
μ	126,3	126,3	126,3	126,3	126,3	126,3	126,3	126,3	126,3
σ	75,78	126,3	138,93	151,56	164,19	176,82	189,45	202,08	227,34

Fragmentação dos deflúvios anuais em mensais

Após a geração das nove séries anuais de 20000 anos para cada um dos nove cenários, foi verificado a importância de se trabalhar a nível mensal. Devido a isso, foi necessário realizar a desagregação das vazões anuais em mensais. O Método dos Fragmentos, metodologia proposta por Svarnidze (1964) foi utilizado. Após a desagregação feita para todos os nove cenários, as respectivas séries de 20000 anos foram fracionadas em 200 séries de até 100 anos de duração para posteriormente efetuar-se a simulação estocástica dos cenários em estudo.

Simulação estocástica do reservatório

Nesta etapa fez-se as simulações para todos os casos em estudo, onde o arquivo Tape2caxitoré.dat, é relativo aos dados hidrológicos gerais de entrada do Açude Caxitoré, juntamente com o arquivo relacionado às séries históricas naturais de cada cenário utilizado em todas as simulações.

Essas simulações foram feitas para todos os cenários, e obtido para cada uma delas, vários arquivos de saída. Porém nesta etapa da pesquisa o arquivo utilizado foi o Tape4.dat, que relaciona todos os valores de $E[T_{max}]$ para todos os cenários.

Tempo Médio das Secas Hidrológicas (T_{med})

A segunda etapa deste trabalho refere-se ao estudo para a obtenção, em cada cenário, dos valores médios do número de meses em que se encontram em estado de seca hidrológica. Para se obter esses dados, foi utilizado além do Método de Monte Carlo (Sobol, 1994; Vose, 1996), a Teoria dos Runs (Yevjevich, 1967; Solon, Campos e Studart, 2001).

O procedimento de cálculo é similar ao da etapa anterior, exceto que, para cada um dos nove cenários foram geradas 5 séries sintéticas com extensão 1.000 anos, 5.000 anos, 10.000, 15.000 e

20.000 anos. Todas essas séries anuais geradas, foram fragmentadas em séries mensais e, por fim, feitas as cinco simulações para cada cenário.

Para cada uma das cinco simulações (1.000, 5.000, 10.000, 15.000 e 20.000 anos), obteve-se um arquivo de falhas (Tape9.dat). Este arquivo apresenta uma relação de falhas, onde para cada simulação foram calculadas suas falhas médias.

Pela Teoria dos Runs, calculou-se as falhas existentes em cada cenário simulado e verificou-se a existência da seca hidrológica e, no caso dela existir, a sua duração.

RESULTADOS

Esta etapa do trabalho foi subdividida em duas partes para uma melhor compreensão dos resultados encontrados. A primeira, refere-se aos valores esperados de secas hidrológicas máximas ($E[T_{max}]$) encontrados após as simulações realizadas para cada um dos cenários utilizando 200 séries sintéticas de 10 anos, 20, 30, até 200 séries de 100 anos.

Na segunda etapa, são apresentados os resultados referentes às simulações para séries de 1000, 5000, 10000, 15000 e 20000 anos de duração, para todos os CVdef's em estudo, citando, para cada uma delas, todos os dados relacionados às durações médias das secas hidrológicas (T_{med}), o número de ocorrências de falhas e o número máximo de meses consecutivos em que cada uma dessas falhas ocorreu.

Duração e Variabilidade dos Valores Esperados de Secas Hidrológicas Máximas

Para a análise de como o processo de armazenamento é influenciado por esta variabilidade, efetuou-se a operação simulada do Reservatório Caxitoré em nove cenários hidrológicos diferentes, ou seja, vazões afluentes anuais com CVdef entre 0,6 e 1,8.

As tabelas 3 e 4 mostram os resultados obtidos para os valores esperados de secas hidrológicas máximas $E[T_{max}]$ e CV's nas simulações de 200 séries de 10 anos até as 200 séries de 100 anos para os nove casos.

Tabela 3. Valores esperados de secas hidrológicas máximas, $E[T_{max}]$, em meses, para todos os cenários analisados.

CVdef									
H	0,6	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,8
10	0,91	1,2	0,9	1,2	1,3	1,2	1,5	1,1	0,84
20	3	4,5	3,9	4,6	6,0	5,2	6,2	6,4	6,1
30	5,5	6,3	6,0	7,7	8,7	8,2	9,8	10,5	9,8
40	6,7	8,3	7,8	9,3	10,5	10,8	11,6	12,2	13,9
50	7,4	9,3	9,4	10	12,1	12,4	13,3	14,4	16,9
60	8,1	9,9	10,6	11,2	12,9	14,2	15,2	16,2	18,8
70	8,7	10,5	11,3	12,4	13,9	15,4	16,9	18,2	19,5
80	9,2	11,4	12,2	12,9	14,8	16,2	17,3	18,6	20,9
90	10	11,4	12,9	13,4	15,7	17,5	19,1	20,0	21,6
100	10,3	12,4	13,2	14,0	16,2	18,0	20,2	20,9	24,1

Tabela 4. Coeficientes de Variação (CV) calculados para todos os cenários analisados.

CVdef									
H	0,6	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,8
10	0,51	0,99	0,61	0,78	1,11	0,56	1,14	0,65	0,63
20	0,39	0,71	0,81	0,76	0,70	0,73	0,71	0,69	0,71
30	0,53	0,66	0,62	0,66	0,66	0,69	0,64	0,63	0,72
40	0,54	0,60	0,60	0,62	0,62	0,63	0,60	0,53	0,61
50	0,51	0,52	0,52	0,55	0,56	0,63	0,59	0,52	0,57
60	0,48	0,45	0,48	0,52	0,53	0,58	0,53	0,51	0,57
70	0,45	0,46	0,50	0,52	0,51	0,57	0,56	0,47	0,55
80	0,41	0,44	0,49	0,46	0,50	0,56	0,52	0,43	0,49
90	0,45	0,40	0,44	0,50	0,49	0,51	0,48	0,43	0,48
100	0,47	0,39	0,43	0,45	0,46	0,49	0,50	0,40	0,52

Através da Tabela 3 e da Figura 2 pode-se notar que para todos os cenários, à medida que o horizonte de simulação (H) das séries cresce, o valor de $E[T_{max}]$, em meses, também cresce, sem excessão. Isto pode até ser considerado um fato lógico, pois quanto maior o horizonte de tempo H, maior a probabilidade de ocorrência de falhas.

Mas, no caso de se analisar os valores de $E[T_{max}]$ relacionados ao grau de variabilidade dos cenários em estudo, pode-se notar na Tabela 4 que, com valores de H mais baixos, principalmente em H variando de 10 a 30 anos, há uma completa irregularidade em relação ao $E[T_{max}]$. É possível

verificar que a partir de $H = 50$ anos, todos os cenários apresentam crescimento proporcional de seus valores de $E[T_{\max}]$ em relação aos seus valores de CV_{def} .

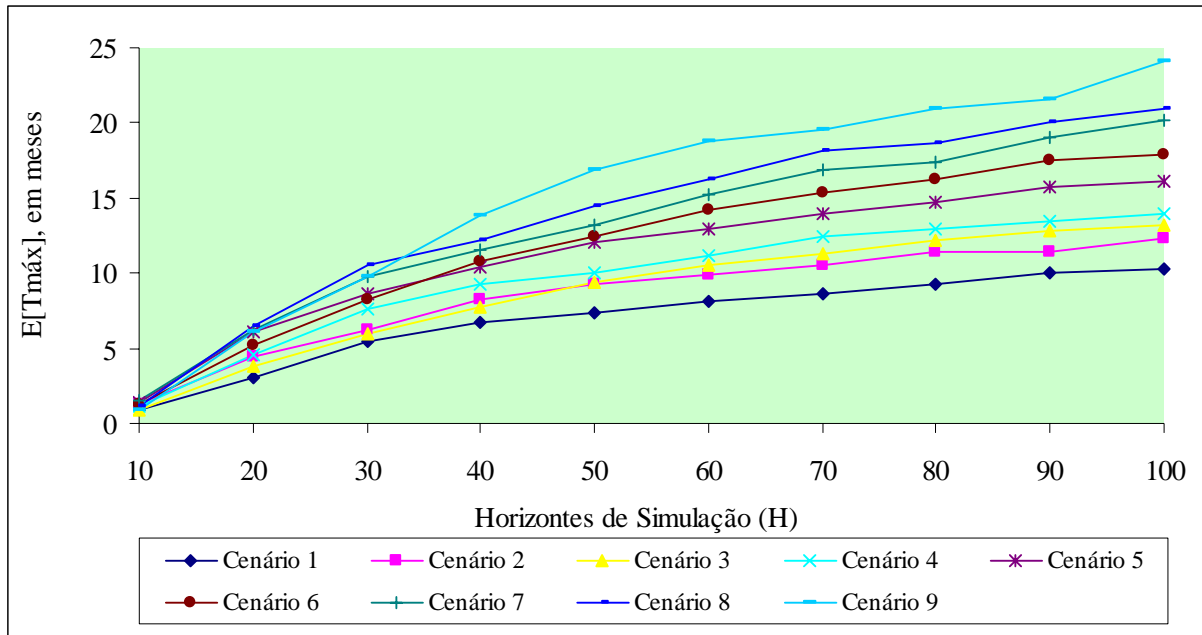


Figura 2. Valores esperados de secas hidrológicas máximas, $E[T_{\max}]$, em meses, em relação à H para todos os cenários em estudo sob uma garantia de 90 % da vazão regularizada.

A Tabela 5 apresenta as equações que melhor se aproximam aos valores esperados de secas hidrológicas máximas para cada cenário.

Tabela 5. Equações que melhor representam os valores esperados de secas hidrológicas máximas para os nove cenários do estudo.

CV = 0,6	CV = 1,0	CV = 1,1
$y = 4,1623 \ln(x) - 8,9048$ fator $R^2 = 0,9936$	$y = 4,8159 \ln(x) - 9,8506$ fator $R^2 = 0,9953$	$y = -0,0014 x^2 + 0,2878x - 1,5552$ fator $R^2 = 0,9976$
CV = 1,2	CV = 1,3	CV = 1,4
$y = 5,669 \ln(x) - 11,958$ fator $R^2 = 0,9962$	$y = 6,4111 \ln(x) - 13,239$ fator $R^2 = 0,9991$	$y = -0,0019 x^2 + 0,3822x - 1,9269$ fator $R^2 = 0,996$
CV = 1,5	CV = 1,6	CV = 1,8
$y = 8,072 \ln(x) - 17,681$ fator $R^2 = 0,9939$	$y = 8,6847 \ln(x) - 19,246$ fator $R^2 = 0,997$	$y = 10,188 \ln(x) - 23,61$ fator $R^2 = 0,9895$

Estudo das Durações Médias das Secas Hidrológicas (T_{med})

A segunda etapa deste capítulo dá uma maior ênfase às simulações realizadas com apenas uma série de 1.000, uma de 5.000, uma de 10.000, 15.000 e por fim, uma série de 20.000 anos. Os nove cenários analisados foram submetidos a cinco simulações cada, obtendo assim, a relação dos T_{med} (médias das durações de secas para cada simulação).

Para cada simulação, inicialmente é encontrado o valor do número de falhas ocorridas ou a quantidade de vezes que um dado reservatório se encontrou sob alguma falha, após isso, é analisado para cada um dos nove cenários, a falha que teve a maior duração, isto é, o valor máximo de meses consecutivos de seca ocorridos em uma determinada falha e finalmente, os valores de Tmed são encontrados (Tabela 6).

Tabela 6. Número de episódios de falhas para H =1.000, 5.000, 10.000, 15.000 e 20.000 anos nos nove cenários em estudo sob uma garantia de 90 % da vazão regularizada.

		CVdef							
H	0,6	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,8
1000	80	72	66	70	70	64	59	52	54
5000	366	358	328	356	327	301	308	288	254
10000	734	737	658	691	656	595	593	576	508
15000	1130	1091	985	1036	975	907	887	859	782
20000	1497	1454	1325	1385	1324	1206	1174	1147	1044

Pode-se verificar que a medida em que os valores de CVdef dos cenários cresce, para cada simulação, o número de falhas decresce (Tabela 6).

À medida em que o horizonte de tempo H aumenta, o número de falhas logicamente também aumenta, podendo ser identificado um crescimento proporcional aos valores de H.

Existe uma relação direta entre o número de episódios de falhas ocorridas em cada cenário simulado e as durações de cada uma dessas falhas. É possível observar através da Tabela 7, para cada uma das simulações, as falhas que tiveram maior duração. Pode-se fazer uma comparação com relação à Tabela 6 onde o *Cenário 1* apresenta um maior número de ocorrência de falhas, mas, de acordo com a Tabela 7, essas falhas têm intervalos de durações máximas pequenos, se recuperando assim mais rapidamente de um evento de seca.

Tabela 7 . Falhas máximas, em meses, para os nove cenários analisados.

CVdef									
H	0,6	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,8
1000	12	30	26	22	34	41	55	36	39
5000	23	30	29	35	43	47	54	57	76
10000	23	30	29	46	46	54	55	58	78
15000	23	32	43	46	56	54	55	58	79
20000	28	33	43	46	56	68	57	70	93

Enquanto o *Cenário 1* possui uma falha máxima de 28 meses em uma simulação de 20000 anos, o cenário com CVdef igual a 1,8, apresenta uma falha máxima de até 93 meses consecutivos, equivalentes a quase 8 anos. Então apesar do *Cenário 9* ter um número de falhas pequeno em relação aos outros (Tabela 6), essas falhas possuem uma duração bem maior (Tabela 7). As falhas máximas aumentam tanto de acordo com o horizonte de simulação H, como também com relação aos coeficientes de variação dos deflúvios anuais (CVdef).

Finalmente é apresentada a relação entre os Tmed de cada um dos cenários para H igual a 1.000, 5.000, 10.000, 15.000 e 20000 anos, para cada um dos CVdef's analisados. Esses dados se encontram na Tabela 8.

Tais valores correspondem ao fato de que, no momento em que houver a ocorrência de uma falha, o número médio de meses em que essa falha ocorreu. Este valor médio, significa também dizer que é o tempo médio pelo qual o reservatório leva para se recuperar dessa falha e voltar a atender a demanda e regularizar suas vazões da maneira programada.

Tabela 8. Número médio de meses em que ocorreram falhas (Tmed), nos nove cenários com uma garantia anual de 90% da vazão regularizada.

CVdef									
H	0,6	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,8
1000	4,3	6,1	6,1	6,6	6,0	6,6	8,8	10,7	10,0
5000	5,1	5,7	5,6	6,6	7,1	7,0	8,3	9,6	11,3
10000	4,9	5,6	6,2	6,5	7,1	7,5	8,8	9,4	11,2
15000	4,8	5,6	6,2	6,4	7,1	7,5	8,9	9,5	10,6
20000	4,8	5,6	6,1	6,4	7,0	7,6	9,0	9,5	10,6

Através da Tabela 8 é possível analisar que a medida em que o grau de variabilidade do cenário estudado aumenta, os valores de Tmed também aumentam proporcionalmente, mas pode-se

afirmar que, ao aumentar o horizonte de simulação (H), os valores de Tmed para cada cenário não aumenta, ficando quase que constantes.

CONCLUSÕES

Com relação aos *valores esperados de secas hidrológicas máximas* pode-se concluir que para qualquer cenário analisado E[Tmax] aumentou de acordo com o aumento de H. Dentre os cenários estudados, o *Cenário 1* foi o que apresentou menores valores de CV's, enquanto o *Cenário 7* foi o que apresentou maiores oscilações dos valores encontrados de CV's. Com exceção aos *Cenários 3 e 6*, os demais tiveram suas curvas ajustadas à equações logarítmicas.

Já com relação às *durações médias das secas hidrológicas* (Tmed), verifica-se que quanto maior o CVdef, menor é o número de episódios de secas, porém, menores são suas durações máximas: *Cenário 1* - muitos episódios de secas, porém de pequenas durações; *Cenário 9* - poucos episódios de secas, porém de grandes durações. E, finalmente, quanto maior o valor do CVdef, maiores serão as durações médias das secas hidrológicas, isto é, maior será o tempo que o reservatório levará para se recuperar de um evento de seca hidrológica.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- SOBOL, I.M. (1994). **A Primer for the Monte Carlo Method**. CRC Press, Flórida, 1994
- SOLON, A. O; CAMPOS, J. N. e STUART, T.M.C . (2001). **Estimativa dos Valores Esperados para Durações Máximas de Secas Hidrológicas no Açude Castanhão - Ce**. In: XIV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos/ V Simpósio de Hidráulica e Recursos Hídricos dos Países de Língua Oficial Portuguesa, Aracaju, Se.
- SVANIDZE, G.G., (1980). **Mathematical Modeling of Hydrologic Series**. Water resources Publications, Fort Collins, Colorado, USA.
- VOSE, D. (1996). **Quantitative Risk Analysis: A Guide to Monte Carlo Simulation Modelling**. John Wiley & Sons, England.
- YEVJEVICH, V. (1967). **Stochastic Process in Hydrology**. Water Resources Publications. Fort Collins, Colorado.