

MÉTODO PARA ESTIMATIVA REGIONAL DA DURAÇÃO DA ESTAÇÃO SECA DOS RIOS DO CEARÁ UTILIZADA NO FATOR ADIMENSIONAL DE EVAPORAÇÃO

Ernani C. Cavalcante Filho¹ & Ticiane M. de Carvalho Studart²; José Nilson B. Campos²

Resumo – Os reservatórios constituem-se nas principais fontes de águas seguras no Ceará. Campos (1987) desenvolveu um método de dimensionamento apropriado às condições hidrológicas do semiárido nordestino baseado em três parâmetros adimensionais da equação do balanço hídrico, tendo como suporte a teoria de matrizes de transição de Moran. No DTR (Diagrama Triangular de Regularização), Campos (1990), utilizou os mesmos adimensionais para transformar os volumes afluentes anuais em volumes regularizados, volumes vertidos e volumes evaporados. A duração das estações do ano, seca e úmida, é importante para a estimativa do fator adimensional de evaporação (f_E). Nesse artigo, busca-se refinar o processo de estimação da duração da estação seca para o Ceará. Adicional, apresenta-se uma regionalização das durações das estações secas para o Estado. A metodologia adotada neste trabalho foi a simulação estocástica dos reservatórios (Simulação Monte Carlo). Os resultados mostraram que a duração da estação seca de junho a janeiro foi observada na maioria dos casos. No entanto, a duração da estação seca regional para o Estado do Ceará permite determinar com maior precisão o fator adimensional de evaporação o que significa um ganho para aplicar o Diagrama Triangular de Regularização.

Abstract – The reservoirs are on the main sources of safe water in Ceará. Campos (1987) developed a method suitable for the hydrologic design of semi-arid northeastern based on three dimensionless parameters of the water balance equation, supported the theory of transition matrices Moran. In DTR (Triangular Diagram Settlement), Campos (1990) used the same dimensionless volumes to transform the regularized tributaries annual volumes, volumes and volumes poured evaporated. The duration of the seasons, wet and dry, it is important for estimating the dimensionless evaporation factor (EF). In this article, we seek to refine the process of estimating the duration of the dry season to Ceará. Further, it presents a regionalization of the durations of the dry season for the state. The methodology adopted in this work was the reservoirs of stochastic simulation (Monte Carlo simulation). The results showed that the duration of the dry season from June to January was observed in most cases. However, the duration of the dry season for the regional state of Ceará to determine more precisely the dimensionless factor of evaporation which means a gain to apply the triangular diagram of regularization.

Palavras-Chave – Diagrama Triangular de Regularização, Simulação Monte Carlo, Estação Seca.

¹ Engenheiro Civil. Msc. Recursos Hídricos. Instituto Estadual do Ambiente –INEA/RJ. Av. Venezuela, 110. Saúde, Rio de Janeiro- RJ. CEP. 20081-312. Tel.(21)2332.5737, email: ernani.inea@gmail.com

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: ticiane@ufc.br e nilson@ufc.br

INTRODUÇÃO

Os métodos de dimensionamento de reservatórios podem ser classificados em empíricos, analíticos e experimentais. Consideram-se empíricos os métodos relacionados a períodos críticos ou a uma única série histórica; os métodos analíticos são aqueles que utilizam a teoria do *range* ou a teoria de matrizes de transição de Moran; por fim, como experimentais estão os métodos que utilizam a simulação Monte Carlo (YEVJEVICH, 1978).

Campos (1987) adaptou a teoria de matrizes de transição de Moran (1954) para as condições dos rios intermitentes do Semi-árido brasileiro e desenvolveu com suporte conceitual na teoria de matrizes de transição de Moran um método de dimensionamento de reservatórios. O método admite o ano dividido em duas estações: a úmida e a seca e é apropriado para as condições hidrológicas do Semi-Árido brasileiro.

Os adimensionais utilizados no método são o fator adimensional de capacidade (f_K), fator adimensional de evaporação (f_E), fator adimensional de retirada (f_M). O regime hidrológico das vazões afluentes é caracterizado por uma função densidade de probabilidade gama e parametrizada a partir das médias 100 unidades/ano e do coeficiente de variação dos deflúvios anuais.

Posteriormente, utilizando os mesmos adimensionais, Campos (1990) desenvolveu o método do Diagrama Triangular de Regularização (DTR). Trata-se de um método gráfico, válido para a vazão regularizada com 90% de garantia anual, que permite estimar, em termos médios, a transformação dos volumes afluentes anuais em volumes regularizados, volumes vertidos e volumes evaporados. O método do DTR foi objeto de vários aperfeiçoamentos e foi apresentado recentemente em uma nova versão (CAMPOS, 2010).

A duração das duas estações do ano, seca e úmida, é importante para a estimativa do fator adimensional de evaporação. Na prática tem sido adotada para os reservatórios do Estado do Ceará uma duração de seis meses (seca e úmida). Nesse artigo, busca-se refinar o processo de estimação da duração da estação seca para o estado do Ceará. Adicional, apresenta-se uma regionalização das durações das estações secas para o Estado do Ceará. Essa duração é estimada fazendo com que o volume anual regularizado pelo modelo anual de duas estações (modelo bi-sazonal) seja igual ao volume anual regularizado estimado em escala de tempo mensal.

O zoneamento foi elaborado utilizando-se um levantamento de 50 reservatórios no Estado do Ceará. Foram utilizadas diversas capacidades hipotéticas para testar a sensibilidade do método à capacidade adimensional do reservatório. A principal contribuição é aperfeiçoar a estimativa do fator adimensional de evaporação para utilizar no método do DTR.

BASE CONCEITUAL

Uma característica marcante dos rios do Semi-Árido brasileiro é a forte sazonalidade retratada pela alternância entre uma estação úmida, com duração de três a seis meses, e uma estação seca, mais longa, quando os rios permanecem secos de seis a nove meses. A associação da longa estação seca com uma intensa evaporação regional faz com que as vazões anuais sejam serialmente independentes, isto é, apresentem um coeficiente de autocorrelação nulo.

Moran (1954) desenvolveu a Teoria do Armazenamento (*Theory of Storage*) a qual tem como premissas: os deflúvios afluentes seguem uma determinada lei de probabilidade (log-normal, gama ou outra) e são serialmente independentes. Com a utilização de cálculos analíticos o desempenho do reservatório é avaliado por um vetor de probabilidade dos níveis de água.

No desenvolvimento do Diagrama Triangular de Regularização – DTR o balanço hídrico foi representado pelas seguintes equações:

$$Z_{t+1} = Z_t + I_t - M - \left(\frac{A_{t+1} + A_t}{2}\right)E - S_t$$

(1)

sendo

$$S_t = \max \left[Z_t + I_t - M - \left(\frac{A_{t+1} + A_t}{2}\right)E - K; 0 \right]$$

(2)

Onde Z_t = volume da reserva no início do ano t ; I_t = volume afluente ao reservatório durante o período t ; A_t = área do lago do reservatório no início do período t ; E_v = lâmina evaporada do lago durante o período t ; K = capacidade do reservatório; S_t = volume perdido por sangria durante o período t .

Com a finalidade de se representar a morfologia da bacia hidráulica do reservatório utilizaram-se as seguintes equações:

$$Z(h) = \alpha.h^3$$

(3)

e

$$A(h) = 3\alpha.h^2 \tag{4}$$

Onde $Z(h)$ é o volume de acumulação quando o nível da água encontra-se a uma altura h , $A(h)$ a área da bacia e α o fator de forma da bacia hidráulica. Utilizando essas equações a equação (1) pode ser reescrita:

$$Z_{t+1} = Z_t + I_t - 3\alpha^{1/3} - \left(\frac{Z_{t+1}^{2/3} + Z_t^{2/3}}{2}\right)E - S_t \quad (5)$$

Se dividirmos os termos da equação (5) pelo deflúvio médio anual (μ) obtém-se:

$$Z_{t+1} = z_t + i_t - m - f_E \left(\frac{Z_{t+1}^{2/3} + Z_t^{2/3}}{2}\right) - m - s_t \quad (6)$$

com

$$f_E = \frac{3\alpha^{1/3}E}{\mu^{1/3}} \quad (7)$$

Onde f_E representa o fator adimensional de evaporação, z o volume acumulado adimensional (Z/μ), i o deflúvio adimensional (I/μ), m a retirada adimensional (M/μ) e s a sangria adimensional (S/μ).

Para representar os deflúvios anuais foi utilizada função de densidade de probabilidade gama de dois parâmetros:

$$f(x) = \frac{x^{\alpha-1} \cdot e^{(-x/\beta)}}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} \quad (8)$$

Onde α e β são os parâmetros de forma e de escala da distribuição e $\Gamma()$ representa a função gama. A média e a variância da distribuição podem ser calculadas pelas relações $\mu = \alpha \cdot \beta$ e $\sigma^2 = \alpha \cdot \beta^2$, respectivamente.

No modelo bi-sazonal a equação do balanço hídrico foi resolvido por integração numérica, onde se atribui um valor para a retirada M e simula-se a operação do reservatório para a respectiva série sintética de vazões. Para cada ano, calculam-se os valores dos volumes evaporados, sangrados e utilizados, de acordo com as estações úmida e seca.

Na estação úmida não existem, por hipótese, retiradas nem perdas por evaporação, a única maneira de saída no reservatório é a sangria. Na estação seca considera-se que a retirada se dá sempre que a reserva acima de $Z_{\min}$ e concomitantemente com as perdas por evaporação.

Para se operar um reservatório a nível mensal, foi utilizado o Método dos Fragmentos (SVANIDZE, 1980) o qual produz vazões mensais por fragmentação das vazões anuais utilizando séries históricas de vazões mensais observadas. Um estudo comparativo de seis técnicas de geração de vazões mensais aplicadas a rios intermitentes da Austrália foi realizado por Srikanthan & McMahon (1980) onde recomendaram o método dos fragmentos como o melhor para geração de vazões mensais em rios com tais características.

METODOLOGIA

No presente artigo utilizou-se a simulação Monte Carlo. O método de Monte Carlo é uma forma de resolver problemas usando números aleatórios e explorando suas propriedades estatísticas. A simulação estocástica oferece meios para a geração de inúmeras seqüências independentes do fenômeno. Cada sorteio gera uma nova série, diferente da histórica, mas com as mesmas propriedades estatísticas e, igualmente prováveis.

Studart (2000) cita Vose (1996) para enumerar as vantagens da simulação Monte Carlo em relação aos demais métodos:

- as distribuições de probabilidades das variáveis não precisam ser aproximadas;
- correlações e outras interdependências podem ser modeladas;
- o nível matemático envolvido na simulação não é muito alto;
- níveis mais elevados de precisão podem ser obtidos pelo aumento do número de interações;
- cálculos matemáticos complexos podem ser incluídos sem muita dificuldade, e
- mudanças no modelo podem ser feitas rapidamente.

Para a determinação das vazões regularizadas foram adotadas as seguintes premissas: as vazões anuais seguem uma lei de probabilidade gama; a forma dos reservatórios pode ser descrita pelas equações 3 e 4; a evaporação e precipitação sobre o lago podem ser representadas por seus valores médios; no modelo bisazonal o ano é dividido em duas estações, a úmida e a seca; no modelo mensal o ano é dividido em 12 estações correspondente aos 12 meses

No modelo bi-sazonal, o reservatório é simulado considerando uma estação úmida, onde não existem retiradas e perdas por evaporação, e outra seca, onde são efetuadas as retiradas concomitantemente com as evaporações. Para o mensal as trocas são realizadas simultaneamente no decorrer dos 12 meses.

A passagem da escala de tempo mensal para a anual equivale a mudanças no hidrograma médio anual conforme mostrado na Figura 2 com os dados do açude Forquilha no estado do Ceará.

O foco da pesquisa consiste em determinar a duração da estação seca do modelo bisazonal que iguala as vazões regularizadas nas duas escalas de tempo.

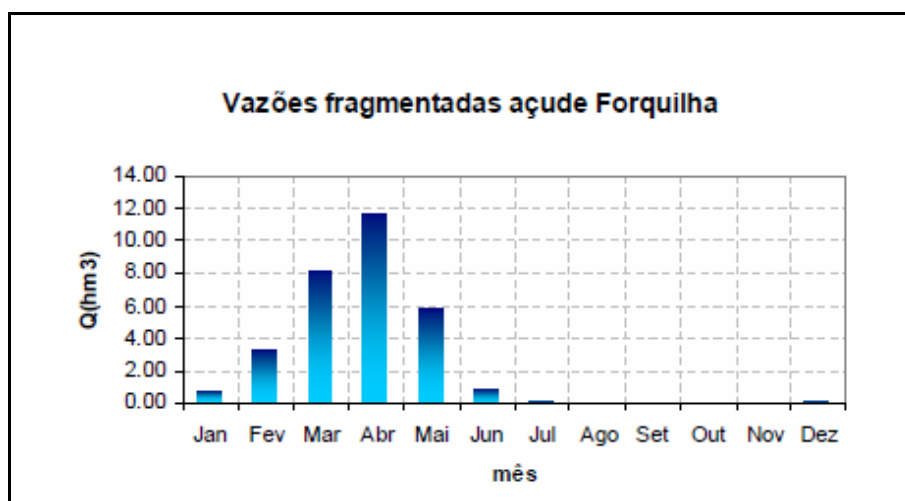


Figura 1: Hidrograma mensal açude Forquilha – Vazões fragmentadas.



Figura 2: Hidrograma bisazonal açude Forquilha.

A ferramenta computacional utilizada para desenvolver a metodologia da pesquisa foi o software SimRes® (CAMPOS ET. AL, 1999), desenvolvido no Laboratório de Estudos de Recursos Hídricos – LEHIDRO do Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental da UFC.

O programa consiste na geração de séries sintéticas, sua fragmentação pelas séries de vazões históricas e simulação do reservatório, segundo um dado horizonte de planejamento, em anos. Na geração das séries sintéticas dispõe-se das funções gama, normal e log-normal, a utilizada neste

trabalho foi a gama de 2 parâmetros já mostrada anteriormente. Para a fragmentação mensal das vazões anuais é necessário uma série histórica mensal de vazões. O módulo principal que é a simulação do reservatório onde se utiliza o método de Monte Carlo na obtenção de vazões para o estudo detalhado do reservatório, para os respectivos horizontes de simulação (1000, 2000, 3000, 4000 e 5000 anos), a fim de obter a vazão regularizada pelo reservatório.

Foram produzidos como arquivos de entrada para cada reservatório, arquivos chamados tape2.dat e tape3.dat. Os tapes2 contêm informações sobre o reservatório e, nos tapes3, encontram-se os dados de vazão histórica. Para todos os reservatórios foram simulados um horizonte de 5000 anos, para que o processo de armazenamento atingisse seu estado de equilíbrio. Para os dados dos reservatórios nos tapes2 as seguintes informações são essenciais para a simulação;

- número de estações,(2 ou 12);
- simulação com garantia fixa anual;
- volume inicial igual 50% da capacidade;
- reserva de segurança 5% da capacidade;
- número de retiradas a simular, referentes ao número de garantias, aqui apenas uma (90%)
- modulação sazonal das retiradas, para este trabalho foi considerado distribuído igualmente para todos os meses, no modelo anual, e 0 e 1 para o modelo Bisazonal;
- número de cotas, inserção da curva cota x volume (hm³);
- modulação sazonal das evaporações

Para determinar a duração média da estação seca foram selecionados 50 reservatórios no Estado do Ceará, distribuídos nas 11 regiões hidrológicas do Estado (a localização dos reservatórios estudados é mostrada na Figura 3 e Tabela 1)

Tabela 1: Dados de 50 reservatórios utilizados para estimar a duração média da estação seca dos rios cearenses.

Reservatórios	Tamanho Série (anos)	Capacidade (hm³)	Região Hidrológica	Latitude	Longitude
Pentecostes	85	395,6	Curu	-3,470	-39,600
Caxitoré	79	202,0	Curu	-3,450	-39,210
Edson Queiroz	85	254,0	Acaraú	-4,200	-40,100
Araras	84	891,0	Acaraú	-4,140	-40,280
Forquilha	84	50,1	Acaraú	-3,480	-40,150
Arneiroz	85	197,1	Alto Jaguaribe	-6,200	-40,080
Canoas	84	69,3	Alto Jaguaribe	-6,520	-39,520
Rivaldo Carvalho	84	19,52	Alto Jaguaribe	-6,200	-40,080
Favelas	84	30,1	Alto Jaguaribe	-6,020	-39,530
Muquem	86	47,6	Alto Jaguaribe	-6,130	-40,170
Oros	83	1940,0	Alto Jaguaribe	-6,600	-38,550

Poço da Pedra	83	52,0	Alto Jaquaribe	-6,580	-40,200
Trici	86	16,5	Alto Jaquaribe	-5,510	-40,210
Trussu	86	301,0	Alto Jaquaribe	-6,220	-39,180
Várzea do Boi	86	51,2	Alto Jaquaribe	-5,550	-40,210
Canafístula	84	13,12	Médio Jaguaribe	-6,140	-40,430
Ema	84	10,4	Médio Jaguaribe	-5,460	-38,210
Castanhão	37	6700,0	Médio Jaguaribe	-5,530	-38,270
Joaquim Távora	84	26,8	Médio Jaguaribe	-5,570	-38,550
Sto. Ant. Russas	80	24,0	Baixo Jaquaribe	-4,500	-37,480
Cipoadá	85	86,1	Banabuiú	-5,170	-38,360
Fogareiro	78	118,8	Banabuiú	-5,020	-39,200
Quixeramobim	85	54,0	Banabuiú	-4,480	-39,330
Monsenhor Tabosa	86	12,1	Banabuiú	-4,470	-40,040
Pedras Brancas	85	434,0	Banabuiú	-5,100	-38,520
Poço do Barro	86	52,0	Banabuiú	-5,280	-38,250
São José II	86	29,1	Banabuiú	-5,560	-39,260
Trapiá II	86	18,2	Banabuiú	-5,270	-39,430
Banabuiú	86	6001,0	Banabuiú	-5,600	-38,590
Patu	84	71,83	Banabuiú	-5,530	-39,250
Thomas Osterne	86	28,8	Salgado	-7,130	-39,230
Atalho II	86	108,25	Salgado	-7,410	-39,010
Cachoeira	86	34,33	Salgado	-6,560	-38,080
Olho d'água	85	21,0	Salgado	-6,470	-39,180
Lima Campos	84	66,4	Salgado	-6,250	-38,580
Rosário	87	47,2	Salgado	-6,450	-39,040
Manuel Balbino	83	37,18	Salgado	-7,020	-39,170
Prazeres	84	32,5	Salgado	-7,060	-38,440
Sto. Ant. Aracatiaçu	83	24,34	Litoral	-3,530	-40,020
Pacajus	86	240,0	Metropolitana	-4,190	-38,290
Pompeu Sobrinho	86	143,0	Metropolitana	-4,480	-39,070
Tucunduba	80	41,43	Coreaú	-3,100	-40,260
Carnaubal	34	87,7	Parnaíba	-4,560	-40,450
Jaburu II	34	116,0	Parnaíba	-4,560	-40,450
Jaburu I	34	220,0	Parnaíba	-3,510	-40,560
Colina	34	3,25	Parnaíba	-6,140	-40,430
Flor do Campo	34	111,3	Parnaíba	-5,270	-40,410
Cupim	34	4,55	Parnaíba	-4,560	-40,450
Realejo	34	31,55	Parnaíba	-4,560	-40,450
Barra Velha	34	99,5	Parnaíba	-5,230	-40,200

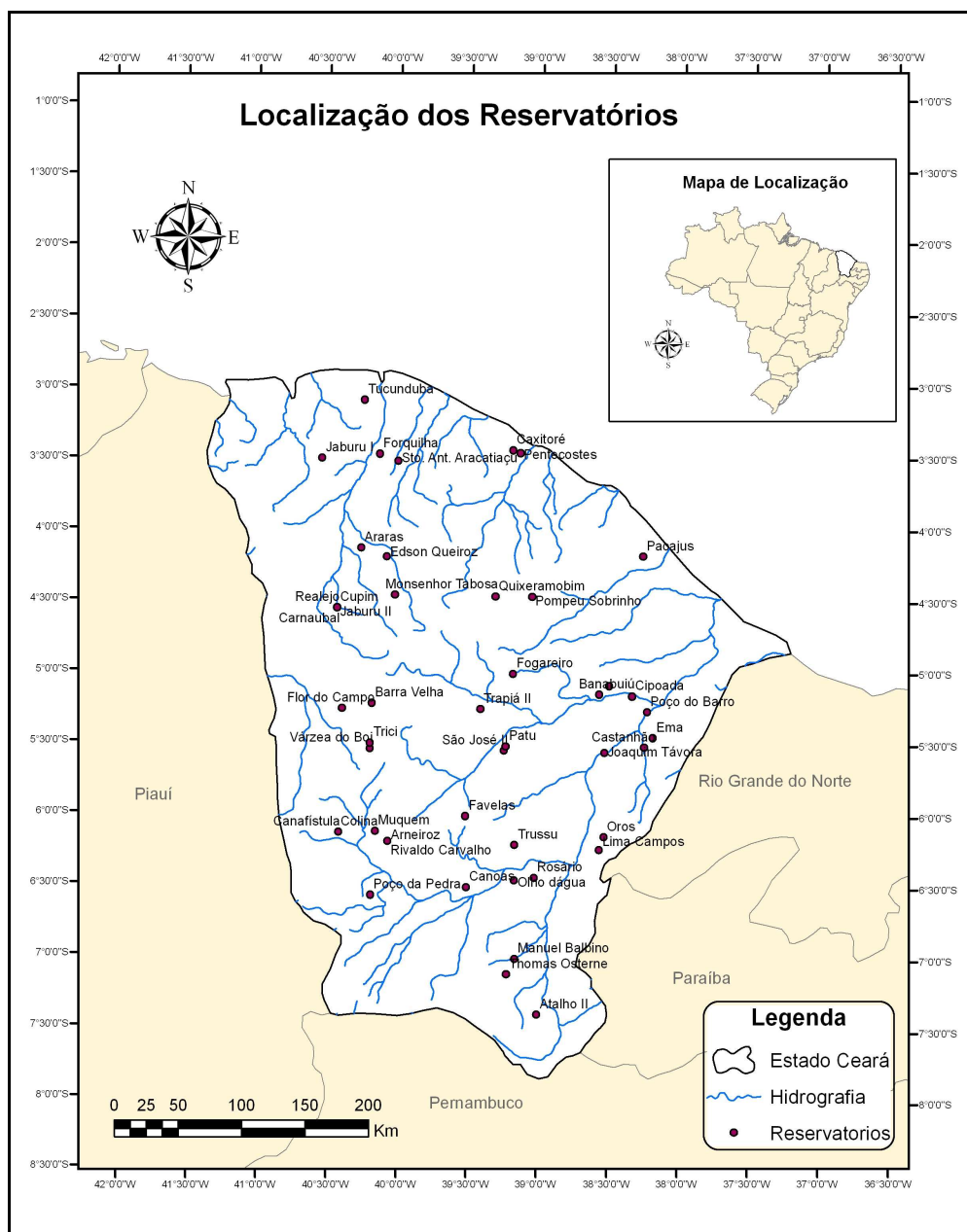


Figura 3: Localização dos Reservatórios.

As evaporações características de cada reservatório foram obtidas do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET, 1996). As estações evaporimétricas utilizadas foram as seguintes: Barbalha, Campos Sales, Quixeramobim, Crateús, Fortaleza, Iguatu, Jaguaruana, Morada Nova, Guaramiranga, Acaraú, Tauá e Sobral. A associação de cada reservatório analisado com seu respectivo posto de evaporação foi feita respeitando a contiguidade entre ambos. Para os dados pluviométricos utilizados foram os valores médios, das séries pluviométricas mensais, obtidas do banco de dados de SUDENE (Superintendência de Desenvolvimento do Nordeste).

Através da solução da equação do balanço hídrico, as vazões regularizadas, Q90, pelos reservatórios nos diferentes cenários de simulação podem ser analisadas. O mês como unidade de tempo, a retirada do reservatório constante ao longo dos anos e modulada ao longo dos meses e a contribuição líquida sobre o lago do açude (precipitação menos evaporação) sendo admitida

constante ao longo dos anos e variável ao longo dos meses são os princípios adotados a equação do balanço hídrico.

A garantia anual, adotada no presente trabalho foi equivalente a uma frequência de falha de 10% (ou seja, G igual a 90%) e todos os reservatórios foram simulados para três capacidades hipotéticas equivalentes a capacidades adimensionais (f_k) iguais a 1, 2 e 3. A capacidade adimensional é igual à razão entre a capacidade do reservatório (K) e o volume médio afluente anual ao reservatório (μ).

As retiradas foram moduladas sazonalmente através dos coeficientes de distribuição das retiradas - e_{ir} . Tais coeficientes seguem a modulação das evaporações (Tabela 2), porém, nos meses com índices de precipitação maior que a evaporação (e_i negativo), as retiradas do lago são consideradas nulas.

Tabela 2: Exemplo de modulação sazonal das retiradas.

	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Total
E_i	156,6	125,2	94,6	101,6	99,7	116,6	157,9	191,3	221,3	224,7	220	205,2	1914,7
P_i	66,8	141,3	224	213,3	118	24,4	10,7	1,5	1,0	2,1	4,8	19,5	826,4
$E_i - P_i$	89,8	0	0	0	0	92,2	147,2	189,8	220,3	222,6	215,2	185,7	1362,8
$e_{ir} = (E_i - P_i) / \sum(E_i - P_i)$	0,07	0	0	0	0	0,07	0,11	0,14	0,16	0,16	0,16	0,14	1,0

O modelo bi-sazonal foi comparado apenas ao modelo mensal com retiradas moduladas tendo como metodologia, para a análise da estação seca, o ajuste da evaporação líquida nesta estação para que os modelos apresentassem as mesmas vazões regularizadas. Esse ajuste foi feito por meio de consecutivas tentativas na simulação.

A evaporação líquida foi usada para determinar quando as vazões regularizadas pelos dois modelos são iguais. Simulam-se os reservatórios até se descobrir qual evaporação é usada pelo modelo bi-sazonal que iguala às vazões regularizadas pelo modelo mensal. Como consequência determina-se a duração da estação seca (modelo bi-sazonal) em meses que apresentam evaporação média semelhante à evaporação líquida equivalente (E_{eq}).

Como os reservatórios foram simulados para três capacidades hipotéticas diferentes, têm-se as lâminas de evaporação para os três casos, ou seja, E_1 , E_2 e E_3 , como sendo as evaporações para f_k igual a 1, 2 e 3 respectivamente. A média das lâminas E_1 , E_2 e E_3 foi a evaporação líquida equivalente para os dois modelos (E_{eq}).

RESULTADOS

Simulou-se cada reservatório utilizando-se retiradas mensais constantes e moduladas pela evaporação líquida do lago. Observou-se que os valores de Q₉₀, no modelo com retiradas constantes, em todos os 50 reservatórios, se mostraram maiores ou iguais aos do modelo mensal modulado. Na Tabela 3 são mostradas as vazões regularizadas obtidas pela simulação de cada reservatório no modelo mensal, para retiradas moduladas e constantes.

Tabela 3: Vazões regularizadas pelo modelo mensal (hm³).

Reservatórios	Q90 Modulado			Q90 Constante		
	fk 1,0	fk 2,0	fk 3,0	fk 1,0	fk 2,0	fk 3,0
Pentecostes	144,1	230,7	281,6	158,2	243	291,5
Caxitoré	35,1	55	66,6	39	58,3	69,4
Edson Queiroz	20,4	31,3	38,3	21,7	32,7	39,5
Araras	210,8	312,5	375,9	231,3	335,4	391,2
Forquilha	5,3	9,0	11,5	5,3	9,0	11,5
Arneiroz	11,6	20,1	25,7	12,7	21,2	26,6
Canoas	4,9	7,9	10	5,2	8,5	10,4
Rivaldo Carvalho	0,8	1,0	1,0	0,9	1,1	1,1
Favelas	2,4	2,5	2,6	2,6	2,7	2,8
Muquem	11,1	14	15,5	11,7	14,5	16,1
Oros	245,6	371,1	446,9	263,9	388,8	466
Poço da Pedra	6,1	9,7	11,8	6,4	10	12,2
Trici	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2
Trussu	16,1	25,2	30,9	17,5	26,6	32,1
Várzea do Boi	1,1	1,8	2,0	1,1	2	2,2
Canafístula	0	0,2	0,3	0	0,2	0,3
Ema	0,4	0,9	1,3	0,5	1,0	1,4
Castanhão	385,5	522,5	642,8	387	543,8	664,6
Joaquim Távora	0,7	1,6	2,3	0,8	1,7	2,4
Sto. Ant. Russas	27,1	44,1	53,8	29,8	46,3	55,6
Cipoada	3,6	7,4	10,2	3,9	7,8	10,6
Fogareiro	62,6	73,5	77,1	68,4	78,7	81,6
Quixeramobim	31,6	53,6	68,5	34,6	56,4	71,5
Monsenhor Tabosa	44,5	77	100,6	48,9	81,1	105
Pedras Brancas	22,8	35,8	42,6	24,5	38,4	45,5
Poço do Barro	3,0	4,7	4,7	3,3	5,1	5,1
São José II	2,0	3,3	3,9	2,2	3,5	4,1
Trapiá II	4,1	5,8	5,8	4,6	6,2	6,2
Banabuiú	55,3	74,8	90,4	61,7	80,9	96,1
Patu	11,8	18,4	23,2	12,7	19,4	24,1
Thomas Osterne	1,4	2,1	2,4	1,5	2,2	2,5
Atalho II	14	17,6	20,1	14,7	18,2	20,8
Cachoeira	0,9	1,5	1,8	1,0	1,6	1,9
Olho d'água	0,7	1,3	1,7	0,7	1,3	1,7
Lima Campos	4,4	6,8	8,0	4,9	7,3	8,5

Rosário	0,3	0,6	0,7	0,3	0,6	0,7
Manuel Balbino	0,1	0,2	0,2	0,1	0,2	0,2
Prazeres	1,6	2,3	2,8	1,7	2,4	2,9
Sto. Ant. Aracatiaçu	2,8	3,8	3,8	3,0	4,0	4,0
Pacajus	68,2	98,3	113,4	75,2	103,8	117,4
Pompeu Sobrinho	1,5	2,8	3,5	1,6	3,0	3,6
Tucunduba	15,8	26,2	32,7	16,8	27,2	33,4
Carnaubal	8,9	9,7	9,7	10,4	11,3	11,3
Jaburu II	2,1	4,3	7,6	2,4	4,8	8,3
Jaburu I	20,3	28,2	31,9	24	31,2	34,2
Colina	0,6	1,5	2,2	0,7	1,7	2,4
Flor do Campo	1,0	1,0	1,0	1,1	1,1	1,1
Cupim	1,0	2,8	4,0	1,1	3,0	4,2
Realejo	0,7	1,4	1,8	0,8	1,6	1,9
Barra Velha	1,6	4	5,2	1,6	4,0	5,2

Os valores dos coeficientes de correlação entre os dois modelos foram muito próximo a um (variaram de 0,9998 a 0,9999) o que mostra um ótimo ajuste entre as vazões regularizadas no estado de equilíbrio, para os dois modelos. Dessa forma, conclui-se que se pode obter matematicamente, com boa precisão, a vazão regularizada estimada para retirada modulada a partir da vazão regularizada com retirada constante ao longo dos meses.

Igualar o dimensionamento da vazão regularizada nos dois modelos (mensal e bi-sazonal) e posteriormente obter a evaporação líquida anual da estação seca no modelo bi-sazonal foi o procedimento realizado para a obtenção do tamanho das estações desse modelo.

Os períodos analisados para a duração das estações secas foram os seguintes: junho – dezembro; junho – janeiro; julho – dezembro; julho – janeiro; agosto – dezembro e agosto – janeiro. Assim a estação úmida assumiu duração de 4 a 7 meses e a estação seca de 5 a 8 meses.

As evaporações líquidas anuais, de cada reservatório, que produzem as mesmas vazões em ambos os modelos são mostradas na Tabela 4. Os resultados mostram que as evaporações encontradas apresentaram, para os três fk's, correlação muito boa e em muitos açudes a lâmina evaporada foi a mesma. As evaporações E1, E2 e E3 correspondem aos três fks e Eeq (evaporação equivalente) como sendo a média das três para a obtenção das estações.

Tabela 4: Evaporação líquida comum nos dois modelos, mensal e bi-sazonal, e evaporação equivalente.

Reservatórios	E1	E2	E3	Eeq
---------------	----	----	----	-----

Pentecostes	1,0	1,1	1,1	1,06
Caxitoré	1,3	1,3	1,3	1,29
Edson Queiroz	0,9	0,9	0,9	0,91
Araras	1,2	1,0	1,0	1,06
Forquilha	1,3	1,3	1,3	1,30
Arneiroz	2,0	1,9	1,9	1,94
Canoas	2,0	2,0	1,9	1,95
Rivaldo Carvalho	1,9	2,0	1,9	1,93
Favelas	1,6	1,5	1,5	1,51
Muquem	2,1	2,1	2,1	2,11
Oros	2,2	2,2	2,2	2,18
Poço da Pedra	1,5	1,4	1,5	1,46
Trici	2,2	2,2	2,2	2,20
Trussu	1,4	1,5	1,5	1,49
Várzea do Boi	1,5	1,6	1,6	1,58
Canafístula	1,8	1,8	1,8	1,79
Ema	1,3	1,4	1,3	1,35
Castanhão	1,4	1,4	1,5	1,41
Joaquim Távora	1,3	1,4	1,3	1,35
Sto. Ant. Russas	1,4	1,4	1,5	1,41
Cipoadá	1,7	1,7	1,7	1,71
Fogareiro	1,9	2,0	1,9	1,94
Quixeramobim	1,6	1,6	1,7	1,61
Monsenhor Tabosa	1,3	1,4	1,3	1,31
Pedras Brancas	1,6	1,5	1,5	1,54
Poço do Barro	1,8	1,8	1,8	1,79
São José II	1,5	1,5	1,5	1,48
Trapiá II	1,3	1,4	1,4	1,39
Banabuiú	1,5	1,5	1,5	1,51
Patu	1,0	1,0	0,9	0,99
Thomas Osterne	1,3	1,3	1,3	1,31
Atalho II	2,0	1,9	1,9	1,94
Cachoeira	1,6	1,6	1,5	1,57
Olho d'água	1,4	1,5	1,5	1,47
Lima Campos	1,3	1,4	1,3	1,33
Rosário	1,6	1,6	1,6	1,63
Manuel Balbino	1,5	1,3	1,5	1,39
Prazeres	1,8	1,8	1,8	1,78
Sto. Ant. Aracatiaçu	1,3	1,3	1,4	1,33
Pacajus	0,7	0,8	0,8	0,78
Pompeu Sobrinho	1,5	1,5	1,5	1,48
Tucunduba	0,7	0,8	0,7	0,73
Carnaubal	2,4	2,2	2,2	2,24
Jaburu II	2,2	2,2	2,2	2,17

Jaburu I	0,8	0,9	0,9	0,86
Colina	1,9	2,1	2,2	2,07
Flor do Campo	2,2	2,2	2,2	2,20
Cupim	2,4	2,5	2,5	2,43
Realejo	2,3	2,3	2,3	2,30
Barra Velha	2,4	2,5	2,4	2,42

A partir da evaporação equivalente foi observado qual período em meses que correspondia à mesma evaporação e assim as estações secas foram determinadas. Portanto cada reservatório apresentou uma estação seca característica para que os modelos produzissem vazões (Q90) iguais.

Tabela 5 – Estação Seca nos 50 reservatórios a partir da evaporação equivalente.

Reservatórios	Estação Seca (meses)	Reservatórios	Estação Seca (meses)
Pentecostes	Jul/Jan	Poço do Barro	Jun/Jan
Caxitoré	Ago/Jan	São José II	Jun/Dez
Edson Queiroz	Ago/Jan	Trapiá II	Jul/Dez
Araras	Ago/Dez	Banabuiú	Jun/Dez
Forquilha	Jun/Dez	Patu	Jun/Dez
Arneiroz	Jun/Jan	Thomas Osterne	Ago/Dez
Canoas	Jun/Jan	Atalho II	Jun/Jan
Rivaldo Carvalho	Jun/Jan	Cachoeira	Jun/Dez
Favelas	Jun/Jan	Olho d'água	Jul/Dez
Muquem	Jun/Jan	Lima Campos	Jul/Dez
Oros	Jul/Jan	Rosário	Jul/Jan
Poço da Pedra	Jun/Jan	Manuel Balbino	Ago/Jan
Trici	Jun/Jan	Prazeres	Jun/Jan
Trussu	Jul/Jan	Sto. Ant. Aracatiaçu	Jun/Dez
Várzea do Boi	Jun/Jan	Pacajus	Ago/Dez
Canafístula	Ago/Jan	Pompeu Sobrinho	Jun/Dez
Ema	Jun/Dez	Tucunduba	Ago/Dez
Castanhão	Jun/Jan	Carnaubal	Jun/Dez
Joaquim Távora	Jul/Dez	Jaburu II	Jun/Dez
Sto. Ant. Russas	Jul/Jan	Jaburu I	Ago/Dez
Cipoda	Jul/Jan	Colina	Jun/Dez
Fogareiro	Jun/Jan	Flor do Campo	Jun/Dez
Quixeramobim	Jun/Jan	Cupim	Jun/Jan
Monsenhor Tabosa	Jul/Dez	Realejo	Jul/Jan
Pedras Brancas	Jul/Jan	Barra Velha	Jun/Jan

A estação de junho a janeiro foi a estação com maior frequência entre as estações testadas e foi observada em sua maioria na região de clima Tropical Quente Semi-Árido. As figura 4 e 5 mostram os mapas de zoneamento da evaporação equivalente e da estação seca, respectivamente. Os

mapas foram desenvolvidos através do software ArcGis utilizando a ferramenta geoestatística kriging para a regionalização.

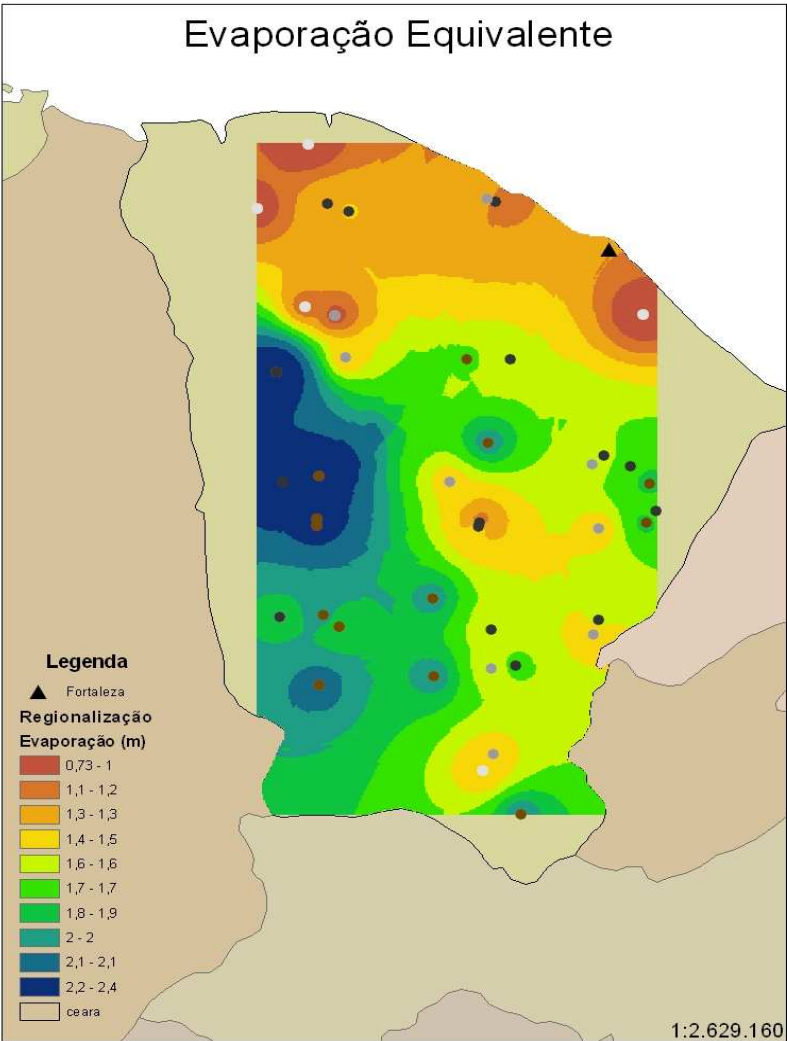


Figura 4: Mapa de zoneamento da evaporação equivalente.

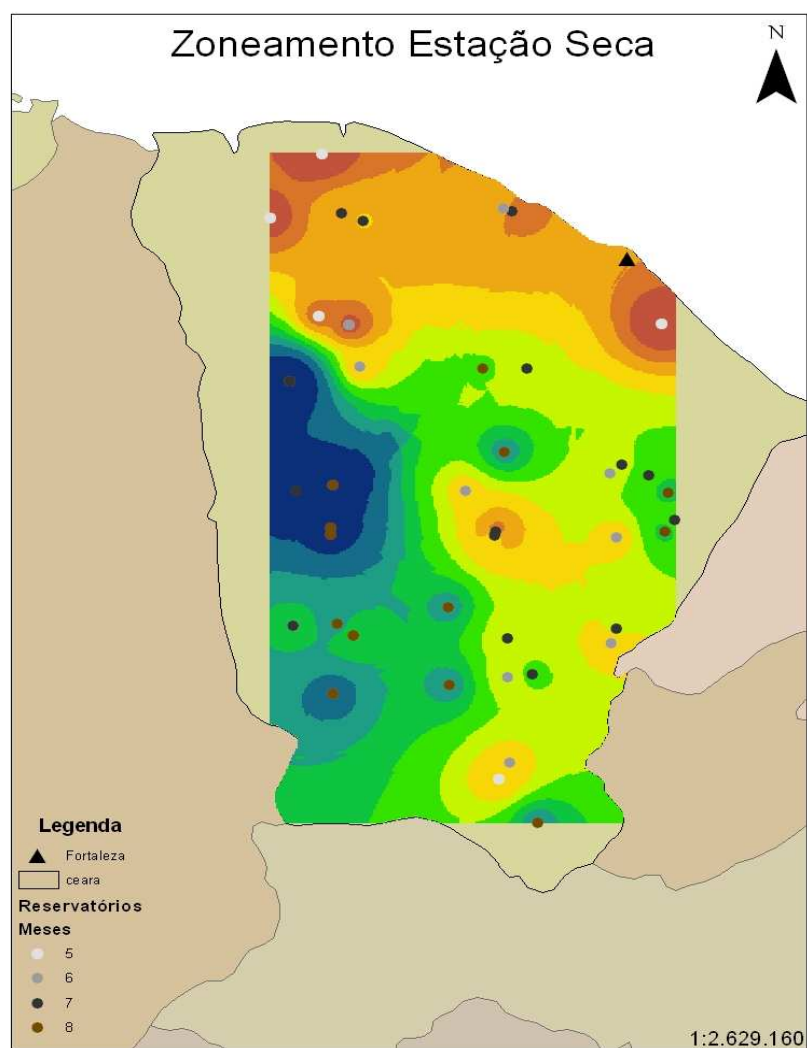


Figura 5: Mapa de zoneamento das estações secas.

CONCLUSÕES

No que se refere às regras de operação de retirada (modulada e constante) para as vazões regularizadas pelo modelo mensal, pode-se concluir que:

- nos 50 açudes as vazões regularizadas pelo modelo mensal, com retiradas de água do reservatório, consideradas constantes foram menores em média, 5%, que as vazões obtidas através da operação com retirada modulada;

Para as durações das estações secas do modelo bi-sazonal observa-se que:

- foram registradas estações secas com durações de 5, 6, 7 e 8 meses;
- os meses observados referentes as estações secas foram junho à dezembro, junho à janeiro, julho à dezembro, julho à janeiro, agosto à dezembro e agosto à janeiro;
- a estação seca junho à janeiro foi a estação com maior representatividade na amostra estudada, sendo observada em 16 reservatórios;
- a duração de 8 meses para a estação seca e 4 meses na estação úmida foi registrada em aproximadamente 32% dos reservatórios;
- a estação seca com duração de 7 meses foi observada em 40% da amostra.

A duração da estação seca regional para o Estado do Ceará permite determinar com maior precisão o fator adimensional de evaporação o que significa um ganho para aplicar o Diagrama Triangular de Regularização.

A estação seca e a evaporação equivalente discutidas no artigo podem resultar em objeto de pesquisa para trabalhos posteriores e uma forma de entrar nesta problemática é estudar com maior precisão, através de uma escala menor de tempo, a convergência entre os valores das vazões regularizadas que igualam o dimensionamento nos dois modelos.

BIBLIOGRAFIA

- CAMPOS, J. N. B. *A procedure for reservoir sizing on intermittent rivers under high evaporation rate*. Colorado State University. Fort Collins, Co. 1987.
- CAMPOS, J. N. B. *Regularização de Vazão em Rios Intermitentes*. Universidade Federal do Ceará. Fortaleza. 1990.
- CAMPOS, J. N. B. *Modeling the Yield-Evaporation-Spill in the Reservoir Storage Process: The Regulation Triangle Diagram*. Water Resources Manage. 2010. 3487-3511.
- CAMPOS, J.N.B. *Dimensionamento de Reservatórios: O Método do Diagrama Triangular de Regularização*. Edições UFC. 1996
- MORAN, P.A.P. *A Probability Theory of Dams and Storage System*. Australian Journal of Applied Science, vol 5, 1954.
- SRIKANTHAN, R.; McMAHON, T. A. *Stochastic Generation of Monthly Flows for Ephemeral Streams*. Journal of Hydrology, No47, 1980.
- STUDART, T.M.C. *“Análises de Incertezas na Determinação de Vazões Regularizadas em Clima Semi-Áridos”*. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Ceará, 2000.
- VOSE, D. *Quantitative Risk Analysis. A Guide to Monte Carlo Simulation Modelling*, England, 1996.
- YEVJEVICH, V. *Lectures notes from course in Water Storage Capacity and Design*. Fort Collins, Co. 1978.