

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA HIDRÁULICA E AMBIENTAL
CURSO DE MESTRADO EM RECURSOS HÍDRICOS**

**REGULARIZAÇÃO DE VAZÕES EM RESERVATÓRIOS ATRAVÉS
DOS MODELOS MENSAL E BI-SAZONAL: A DURAÇÃO DA
ESTAÇÃO SECA E A PROPOSTA DA EVAPORAÇÃO
EQUIVALENTE**

ERNANI CLEITON CAVALCANTE FILHO

FORTALEZA-CEARÁ

2007

ERNANI CLEITON CAVALCANTE FILHO

**REGULARIZAÇÃO DE VAZÕES EM RESERVATÓRIOS ATRAVÉS
DOS MODELOS MENSAL E BI-SAZONAL: A DURAÇÃO DA
ESTAÇÃO SECA E A PROPOSTA DA EVAPORAÇÃO
EQUIVALENTE**

**Dissertação submetida à coordenação do
Curso de Pós-graduação em Engenharia
Civil, área de Concentração em Recursos
Hídricos, da Universidade Federal do
Ceará, como requisito parcial para a
obtenção do grau de mestre.**

**ORIENTADORA: Prof^a. Ticiane M. de
Carvalho Studart**

FORTALEZA – CE

2007

Esta Dissertação foi submetida como parte integrante dos requisitos necessários para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil, na área de concentração de Recursos Hídricos, outorgado pela Universidade Federal do Ceará, e encontra-se à disposição dos interessados na Biblioteca Central da referida Universidade.

A citação de qualquer trecho desta Tese é permitida, desde que seja feita de acordo com as normas da ética científica.

Ernani Cleiton Cavalcante Filho

Aprovada em 27 / 08/ 2007

BANCA EXAMINADORA

Prof^a. Dra. Ticiania M. de Carvalho Studart (Orientadora),
Universidade Federal do Ceará

Prof. José Nilson Beserra Campos, PhD
Universidade Federal do Ceará

Henrique Vieira Costa Lima, Dr.
Companhia de Água e Esgoto do Ceará - CAGECE

*As chuvas do inverno, caindo no montes
Engrossam as fontes
Que aos rios vão dar
E cheios os rios, as águas fermente,
Em largas torrentes
Se lançam no mar.*

*E o mártir das secas suspira de mágoas
Ao ver essas águas
Que vão para o mar
Sabendo que em breve, aos homens, aos gados
Aos campos mirrados
Hão de elas faltar.*

*Mas feito o açude, erguida a barragem
Que tranca a passagem
Das águas para o mar,
Aí elas ficam as terras regando
Aos homens prestando
Serviço sem parar*

*E em torno das águas, levantam-se as choças
Verdejam as roças,
Floresce o pomar
A vida é mais fácil, há peixe em cardume.
E frutas e legumes
Não faltam no lar.*

*Se, pois nessas águas há tantas virtudes,
Construam-se açudes
Aos centos, aos mil,
E brotam searas nos ermos do agreste
E seco nordeste
Do nosso Brasil.*

Padre Antônio Tomás

Ao amigo e tio Beni (in memoriam) que durante bons anos me acompanhou como um filho e me ensinou a procurar o caminho do equilíbrio e da simplicidade.

Aos meus pais, Clery e Ernani, que sempre estimularam a vida aos estudos e pelo carinho e apoio em todas as minhas decisões.

AGRADECIMENTOS

Meus sinceros agradecimentos à querida amiga, Professora e Orientadora Ticiane Studart, pela sua paciência e sabedoria que concretizaram todo o ambiente para o desenvolvimento da pesquisa e por sempre esclarecer prontamente as dúvidas que surgiram.

Ao Professor José Nilson Beserra Campos, co-Orientador deste trabalho que contribuiu diretamente na pesquisa através do seu vasto conhecimento em hidrologia de reservatórios.

Aos professores do mestrado Horst FrischKorn, Suetônio Mota, Ernesto Pitombeira, Marco Aurélio Holanda e José Carlos de Araújo que no decorrer do curso ensinaram seus extensos conhecimentos, com coerência e precisão, esclarecendo dúvidas que por ventura existissem.

À minha namorada Elys que sempre esteve presente para mostrar o caminho do amor. E ao casal Henrique e Thays que constantemente clareiam minhas idéias.

À bibliotecária Umbelina Caldas Neta, da Biblioteca de pós-graduação do Centro de Tecnologia, por sua ajuda na minha estada em Fortaleza e no fornecimento do material de estudo.

Meus agradecimentos aos funcionários Beth, Xavier, Edjane, Erivelton e Dalia, do Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, que sempre estiveram dispostos a ajudar quando foi preciso.

Aos colegas do curso de mestrado e doutorado em Engenharia Civil que compartilharam da disciplina que uma pesquisa exige.

Aos colegas Fernando Neris e Renata Luna pela ajuda significativa durante o trabalho.

À Companhia e Gestão de Recursos Hídricos, COGERH, que disponibilizou informações de suma importância para esta pesquisa.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, CNPq, pelo incentivo à pesquisa no país, através de bolsas de estudo e outras formas.

Também levo meus agradecimentos a todos aqueles que contribuíram direta ou indiretamente para a realização deste trabalho, na pessoa do querido amigo Emmanuel Montenegro.

RESUMO

O Semi-árido brasileiro é marcado por fatores físicos e climáticos que influenciam diretamente na sobrevivência da população. O regime pluviométrico irregular, as altas taxas de evaporação e a predominância de solos cristalinos fazem do Ceará um Estado farto de rios intermitentes. Assim os reservatórios são dimensionados para regularizar vazões com caráter aleatório. Nesse contexto, o Método da Simulação Monte Carlo torna-se uma ferramenta de grande importância. O método gera séries sintéticas de vazões anuais, fragmenta essas vazões em vazões mensais (Método dos Fragmentos) e faz a operação simulada do reservatório.

A pesquisa faz uma comparação entre dois modelos de operação de reservatórios: o modelo mensal e o modelo bi-sazonal, para descobrir qual a evaporação equivalente (E_{eq}) nos dois modelos que origina uma mesma vazão regularizada (Q_{90}) e sua duração (meses). Também foi estudada a influência da modulação das retiradas de água no reservatório. Para tanto foi aplicado o Método de Monte Carlo no dimensionamento das vazões regularizadas pelos dois modelos em 50 reservatórios do Estado do Ceará.

Verificou-se que os valores de Q_{90} para o modelo mensal operado com retiradas constantes foram maiores em média, 5%, que os valores das vazões do modelo mensal modulado. Na região semi-árida do Estado os valores da evaporação E_{eq} atingiu seus maiores valores, aproximadamente 2400mm/ano nos Inhamuns, chegando em torno de 750mm/ano nas regiões serranas (clima tropical úmido e semi-úmido). Para a estação seca, foi observado que a estação de junho a janeiro se adequou ao clima tropical quente semi-árido, enquanto estações mais curtas como agosto a dezembro foram características de clima mais ameno, como por exemplo o litoral do Estado (clima tropical semi-úmido).

ABSTRACT

The Brazilian Semi-Arid Region is marked by physical and climatic factors that influence directly in the survival of the population. The irregular pluviometric regimen, the high taxes of evaporation and the crystalline ground predominance make the Ceará a satiated State of intermittent rivers. x the reservoirs are calculated to regularize outflows with random character. In this context, the Method of the Monte Carlo Simulation becomes a tool of great importance. The method generates synthetic series of annual outflows, breaks up these outflows in monthly outflows (Method Fragments) and makes the simulated operation of the resevoir.

The research makes a comparison enters two models of operation of reservoirs: the monthly model and the bi-sazonal model, to discover which the evaporation equivalent ($E_{eq.}$) in the two models that originates one same regularized outflow (Q_{90}) and its duration (months). Also was argued the influence of the modulation of the water withdrawals in the reservoir. For in such a way the Monte Carlo Method was applied in the sizing of the outflows regularized for the two models in 50 reservoirs from the State of the Ceará.

Were verified that 5% the values of Q_{90} for the operated monthly model with constant withdrawals was bigger on average, that the values of the outflows of the modulated monthly model. In the Semi-Arid Region of the State the values of the E_{eq} evaporation reached its bigger values, approximately 2400mm/ano in the Inhamuns, arriving around 750mm/ano in the monutains regions (humid and semi-humid tropical climate). For the dry station, it was observed that the June to January station if adjusted to the semi-arid hot tropical climate, while stations shorter as August to December was a characteristic of weak climate, as for example the coast of the State (semi-humid tropical climate).

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	10
TABELAS.....	11
1 - INTRODUÇÃO	14
1.1. Formulação do Problema.....	15
1.2. Objetivos.....	16
1.3. Organização do Trabalho.....	17
2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
2.1. Métodos de Dimensionamento de Reservatórios.....	18
2.2. Simulação Monte Carlo.....	21
2.3. Processo Estocástico e Geração de Séries Sintéticas.....	22
3 - METODOLOGIA	25
3.1. Dados Utilizados.....	25
3.1.1. Dados Cota x Volume Acumulado.....	27
3.1.2. Evaporações.....	27
3.1.3. Precipitação.....	28
3.1.4. Modulação Sazonal das Evaporações.....	28
3.1.5. Vazões Afluentes aos Reservatórios.....	30
3.2. Operação Simulada do Reservatório.....	31
3.2.1. Equação do Balanço Hídrico.....	31
3.2.2. Modulação Sazonal das Retiradas.....	32
3.2.3. Métodos para Solução do Balanço Hídrico.....	35
3.2.4 Esforço Computacional	37
3.3. Metodologia da Evaporação Equivalente E_{eq} e Duração da Estação Seca	40

4 – ANÁLISE DOS RESULTADOS	41
4.1. ANÁLISE DO MODELO MENSAL.....	41
4.2 ANÁLISE DAS ESTAÇÕES SECAS NO MODELO BI-SAZONAL.....	50
5 - CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	54
6 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	56
ANEXOS.....	58

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 – Vazões médias mensais afluentes ao açude Forquilha.

Figura 3.2 – Vazão sintética média anual, para o modelo bi-sazonal, ao açude Forquilha.

Figura 3.3 – Vazões médias mensais fragmentadas, Método dos Fragmentos, açude Forquilha.

Figura 4.1 – Desvio relativo (%) entre as vazões regularizadas pelos dois modelos de retirada, para os 50 reservatórios analisados, com f_k igual a 1.

Figura 4.2 – Desvio relativo (%) entre as vazões regularizadas pelos dois modelos de retirada, para os 50 reservatórios analisados, com f_k igual a 2.

Figura 4.3 – Desvio relativo (%) entre as vazões regularizadas pelos dois modelos de retirada, para os 50 reservatórios analisados, com f_k igual a 3.

Figura 4.4 – Desvio relativo entre as vazões regularizadas (Q_{90}) dos modelos mensal, com retirada constante e modulada.

Figura 4.5 – Histograma das vazões afluentes e das retiradas no reservatório Forquilha para f_k igual a 2.

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Açudes, com suas respectivas capacidades (hm^3) e região hidrológica.

Tabela 3.2 - Modulação Sazonal das Evaporações no açude Forquilha.

Tabela 3.3 - Modulação Sazonal das Retiradas no açude Forquilha.

Tabela 4.1 - Vazões regularizadas pelo modelo mensal (hm^3).

Tabela 4.2 - Desvio relativo, entre modelos, nas vazões regularizadas (Q_{90}).

Tabela 4.3 - Fator adimensional de retirada f_m , para o modelo mensal modulado.

Tabela 4.4 - Evaporação líquida comum nos dois modelos, mensal e bi-sazonal, e evaporação equivalente.

Tabela 4.5 - Estação seca nos 50 reservatórios a partir da evaporação equivalente.

1. INTRODUÇÃO

Reter e acumular águas superficiais nas regiões áridas e semi-áridas do mundo foi sempre a grande luta do homem para suprir as suas necessidades hídricas nas longas travessias de estiagem. Assim procederam os povos bíblicos do Oriente, os aborígenes da Austrália, os pastores mongóis da Ásia, os pigmeus do Saara dentre vários outros.

Nesse contexto, o semi-árido nordestino é marcado por fatores físicos e climáticos que influenciam diretamente na sobrevivência da população. Seu clima apresenta-se com alta variabilidade espacial e temporal de chuvas, associada a uma alta taxa de evaporação. O regime pluviométrico é irregular, com chuva concentrada em poucos meses do ano. Ademais, existe uma grande probabilidade de existirem anos extremamente chuvosos ou anos extremamente secos. O Ceará, no entanto, não está só, compartilha essas características com outros estados nordestinos.

As altas variabilidades das chuvas associadas à predominância de terreno cristalino resultam em rios intermitentes, agravando ainda mais esse cenário. Desse modo, para garantir o atendimento das demandas de água nos períodos de seca, aproveitando-se a água excedente dos meses úmidos, se faz necessária à construção de reservatórios de águas superficiais. Entretanto, as altas taxas de evaporação acarretam uma perda considerável nestes corpos hídricos.

Assim o conhecimento das perdas por evaporação é uma informação de suma importância para políticas de manejo dos recursos hídricos da região.

Como a presença de açudes é uma realidade constante no semi-árido, o entendimento do processo de armazenamento de águas é fundamental para se determinar qual o volume potencial disponível. A determinação da vazão regularizada por reservatórios tem sido objeto de muitos estudos e a convivência com a realidade motiva cientistas e planejadores da região na busca pelo método de dimensionamento mais apropriado.

Estudos climatológicos demonstram que o maior problema não é a escassez e sim a má distribuição das chuvas, aliada ao mau aproveitamento do escoamento superficial que corre para os rios e destes, com rapidez, para o mar. Isso demonstra que é imprescindível um sistema que proporcione um

armazenamento máximo das águas das chuvas, para vir a ser utilizado oportunamente. Desse modo, a construção de barragens sucessivas, de portes diversos, contribuirá decisivamente para fortalecer e viabilizar o abastecimento d'água, a piscicultura e as pequenas e médias irrigações.

Dois métodos se destacam na literatura, o Método das Matrizes de Transição e o Método da Simulação Monte Carlo. Ambos os métodos apresentam vantagens e desvantagens de acordo com seus limites, e vêm sendo aprimorados nos últimos anos.

Neste trabalho o método utilizado foi a Simulação Monte Carlo, ou seja, um processo estocástico com geração de séries sintéticas de vazões.

O modelo matemático formulado no dimensionamento de um reservatório tem um caráter estocástico, uma vez que as vazões naturais afluentes aos reservatórios são variáveis aleatórias associadas ao tempo, cujas realizações futuras são desconhecidas.

Portanto o problema da operação de reservatórios é um processo de tomada de decisão sob incertezas, onde o decisor deve utilizar ferramentas adequadas de análise estatística para orientá-lo nessa decisão.

1.1 Formulação do Problema

Na determinação do comportamento do reservatório, utiliza-se a metodologia do balanço hídrico do mesmo. O balanço consiste em atribuir regras de retirada de água do reservatório e estudar qual é o comportamento desse reservatório, em uma determinada série de vazões afluentes, caso essa regra de operação seja obedecida.

O balanço nada mais faz do que igualar as entradas e saídas do reservatório. Existem vários procedimentos disponíveis para a solução dessa equação. O presente trabalho analisará e comparará os resultados obtidos por dois procedimentos: o modelo mutuamente exclusivo com duas estações (ano dividido em estação seca e estação úmida – bi-sazonal) e o modelo simultâneo a nível mensal (ano dividido em doze meses). O primeiro considera o ano dividido em apenas duas estações - uma úmida e uma seca - e que todas as retiradas acontecem na estação seca e todos os aportes acontecem na estação úmida. Já

o segundo considera o balanço hídrico a nível mensal, com retiradas e aportes de água ocorrendo simultaneamente.

O Ceará, que tem capacidade potencial de acumulação de 17 bilhões de metros cúbicos, foi utilizado como estudo de caso, sendo selecionados 50 reservatórios nas várias regiões do Estado. As conclusões do trabalho, no entanto, não se restringem aos açudes estudados. Dar-se-á um caráter geral, ao se adotar distintos valores de capacidades diferentes da real.

Pretende-se assim através da procura pelo ponto de convergência entre as duas metodologias colocar à compreensão da sociedade, técnicas e conhecimentos a serem aplicados nas possíveis soluções do dimensionamento de reservatórios com ênfase na regionalização desta solução.

1.2 Objetivos da Pesquisa

A presente pesquisa tem enfoque na região semi-árida, em particular o Estado do Ceará, e seus objetivos gerais e específicos são apresentados a seguir:

- **Objetivo Geral**

O objetivo do presente trabalho é contribuir para a compreensão do processo de armazenamento de água em reservatórios superficiais em climas semi-áridos. Pretende-se comparar duas metodologias para a solução do balanço hídrico: a mensal (simultâneo) e a bi-sazonal (mutuamente exclusivo).

- **Objetivos específicos**

- 1) Analisar a influência da modulação das retiradas no modelo mensal;
- 2) Agregar conhecimento no que se refere à divisão das estações seca e úmida no modelo mutuamente exclusivo. Verificar o tamanho da estação seca em número de meses para a qual a vazão regularizada equivalente seja a mesma nos dois modelos, bi-sazonal e mensal;

- 3) Usualmente considera-se a estação úmida como sendo "de fevereiro a junho" e a estação seca "de julho a janeiro do ano seguinte". Pretende-se estudar melhor estes limites e verificar quais são realmente esses meses;
- 4) Propor um mapa de regionalização das estações secas e evaporações equivalentes aos dois modelos.

1.3 Organização do Trabalho

O trabalho foi dividido em seis capítulos. O presente capítulo introduz a problemática em questão; o dimensionamento de reservatórios no semi-árido nordestino, e trata da formulação do problema e da relevância do tema, bem como apresenta seus objetivos.

O segundo capítulo apresenta a revisão bibliográfica, onde é feito o levantamento histórico dos métodos de dimensionamento de reservatórios e do processo estocástico em hidrologia.

O terceiro capítulo contém o procedimento metodológico utilizado nos modelos para o ajuste do tamanho da estação seca e para a análise da modulação das retiradas no modelo mensal, bem como os dados utilizados na pesquisa e o programa computacional usado no dimensionamento da vazão regularizada.

O Capítulo quatro apresenta os resultados e estuda o comportamento dos dois modelos para as regras de operações utilizadas.

No quinto capítulo são descritas as conclusões e recomendações a que se chegou a partir dos resultados. E por fim na última parte são mostradas as referências bibliográficas.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A revisão bibliográfica da pesquisa trata dos seguintes temas. Inicialmente são apresentados alguns métodos de dimensionamento de reservatórios. Em seguida a simulação Monte Carlo é descrita juntamente com os trabalhos que lhes sucederam. Por fim trata-se do processo estocástico e da geração de séries sintéticas.

2.1 Métodos de Dimensionamento de Reservatórios

Os métodos de dimensionamento de reservatórios são classificados segundo Yevjevich (1965), em empíricos, analíticos e experimentais.

Os métodos empíricos utilizam o conceito de *Período Crítico*, os quais estimam a capacidade do reservatório através da diferença entre a retirada do reservatório, considerado inicialmente cheio, e a retirada em períodos de baixa vazão. A capacidade armazenada para um nível de garantia mais próximo do real também pode ser analisada através de outros métodos de período crítico que consideram séries históricas de vazões afluentes mínimas. (GOULD, 1961).

Também como método empírico, a técnica do diagrama de massas (RIPPL, 1883) surgiu como sendo o primeiro método para dimensionamento de reservatórios. O método de Rippl estima a capacidade de um reservatório de regularizar uma vazão igual à vazão afluente média anual. Esta técnica, porém, tem aplicação restrita a locais onde podem ser desprezadas as perdas por evaporação. Para incluir perdas por evaporação King (1920) modificou o método de Rippl.

O diagrama de Rippl, considerada uma metodologia simples, garante bons resultados no dimensionamento de açudes em regiões de clima temperado, onde o regime chuvoso é bem determinado e a evaporação é relativamente pequena, usando apenas a série histórica de vazões existentes.

No entanto, no semi-árido brasileiro, é muito difícil conseguir resultados satisfatórios usando apenas as séries históricas existentes.

Os trabalhos do engenheiro Francisco Aguiar (1934) são considerados um marco no dimensionamento dos açudes no NEB. Segundo Campos (1996)

ele atuou principalmente em três linhas: na estimativa do volume afluente médio anual de uma bacia hidrográfica; na proposta de um método para dimensionar a capacidade e o volume regularizado por um açude e na determinação da cheia secular que deve ser considerada no dimensionamento do vertedouro de um açude.

McMahon (1976) criou uma fórmula empírica obtida por regressão a partir de projetos que utilizaram o período crítico para 156 rios da Austrália (Equação 2.1).

$$\tau = C/\bar{x} = aCv^b \quad (2.1)$$

onde:

C = capacidade de armazenamento

\bar{x} = vazão afluente média anual

$$\tau = C/\bar{x}$$

C_v = coeficiente de variação da vazão afluente anual

a, b = constantes empíricas tabeladas por McMahon

Na técnica de Rippl, o conceito de reservatório de tamanho infinito estava implícito. Hazen (1914) apud McMahon (1986), usando o próprio diagrama de massas, introduziu o conceito de reservatório semi-infinito, que serve como suporte para o estudo da estocagem/regularização/garantia.

Os métodos analíticos são oriundos dos trabalhos de Hurst (1950), na bacia do Rio Nilo, no qual o método de Rippl recebeu um novo tratamento, através dos conceitos de “range” e déficit (Teoria do Range) passando do empírico para o analítico.

Moran (1954), através da chamada Teoria do Armazenamento (Theory of Storage) deu continuidade aos chamados métodos analíticos. Esta teoria admite que os deflúvios afluentes seguem uma determinada lei de probabilidade (log-normal, gama, modelos auto-regressivos, entre outros) e, através de cálculos analíticos, calcula o desempenho do reservatório. A teoria de Moran admite que o volume estocado por um reservatório segue uma cadeia markoviana para, a partir desse conceito, calcular as probabilidades de esvaziamento dos açudes.

Resultante dos trabalhos de Moran, o modelo de Thomas & Fiering em 1962 apud Maas et al (1962) gera séries sintéticas de vazão mensal utilizando parâmetros sazonais e estrutura de correlação que não considera as vazões sazonais como estacionárias. Para tanto, considerou o processo como markoviano.

Como o modelo apresentava-se pertinente apenas a regiões com rios perenes e regime chuvoso considerado regular, Matalas (1967) introduziu modificações logarítmicas na obtenção dos estimadores estatísticos, para desta forma assegurar que os deflúvios possuam caráter assimétrico.

A intermitência dos rios era um problema que impossibilitou o uso do modelo de Thomas & Fiering em regiões semi-áridas. Assim, Clarke (1973) propôs que se assumisse a não correlação entre meses com ou sem ocorrência de vazões.

Os métodos que utilizam a geração estocástica de dados, simulações de Monte Carlo, são os métodos experimentais. Para estes métodos, os deflúvios seguem uma lei de probabilidade e com a série sintética realiza a operação simulada do reservatório.

De acordo com Loucks, Stedinger e Haith (1981) “simulação” é definida como a solução de um problema de gerenciamento através de tentativa e erro. Assim sendo, a simulação e a simulação estocástica podem ser as técnicas mais usadas na avaliação de um sistema de recursos hídricos.

Gomes (2003) faz um estudo comparativo da discretização do método das Matrizes de Transição e compara com o método de Monte Carlo para o dimensionamento de reservatório, propondo uma faixa de aplicabilidade dos dois métodos.

2.2 Simulação Monte Carlo

O método de Monte Carlo é uma forma de resolver problemas usando números aleatórios e explorando suas propriedades estatísticas. O nome Monte Carlo foi dado a este método devido à cidade de mesmo nome. Seus cassinos, com jogos de “azar” apresentam o mesmo comportamento aleatório que é dado às variáveis da Simulação Monte Carlo onde, através de uma distribuição de probabilidades, definem-se os valores para cada variável.

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. Como as séries são distintas entre si, são obtidos diversos resultados provenientes das simulações, ao invés de um único resultado, caso apenas a série histórica estivesse disponível, permitindo ao planejador tomar sua decisão, baseado, não apenas em um evento isolado, mas na análise probabilística do fenômeno estudado (VOSE, 1996 apud STUDART, 2000). Embora o processo como um todo seja estocástico, para cada uma das séries sintéticas geradas, a simulação é um processo determinístico (FREY, 1998).

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;
- mudanças no modelo podem ser feitas rapidamente;

- o Método de Monte Carlo é amplamente reconhecido como uma técnica válida, de modo que os resultados de sua utilização podem ser facilmente aceitos.

Esse método surgiu, segundo Sobol (1994), em 1949 com a publicação do artigo “The Monte Carlo Method” e deve sua existência aos esforços de S. Ulam e J.von Neumann.

Por estas razões, a Simulação Monte Carlo vem sendo aplicada, há muitos anos, nos vastos campos da ciência e na Hidrologia, produzindo assim inúmeros trabalhos utilizando esta metodologia. Várias aplicações em hidrologia do Método de Monte Carlo são abordadas por Haan (1977).

Fiering (1962) aplicou a teoria de Monte Carlo para a otimização da capacidade de reservatório. Como critério de otimização ele usou o valor máximo esperado para os benefícios gerados com a irrigação, geração de energia elétrica e controle de enchentes sem restrições orçamentárias.

Até a alguns anos atrás, considerava-se como um dos pontos negativos do processo de simulação, o considerável esforço computacional quase sempre requerido. Entretanto, com a grande evolução dos computadores nos últimos anos, já se pode dizer que este fator não é mais considerado um problema tão grande como antigamente.

2.3 Processo Estocástico e Geração de Séries Sintéticas

Hazen (1914) foi o primeiro a reconhecer a importância de se estender os dados hidrológicos disponíveis, combinando vazões padronizadas anuais para os 14 rios do Nordeste Americano, com o intuito de produzir uma série sintética de 300 anos, No entanto devido à proximidade geográfica dos rios e o curto período de observações sua técnica apresentava limitações.

O procedimento de Sudler (1927), que consistiu em marcar em 50 cartões os registros de descarga anual da série observada, embaralhando-os, retirando-os sem reposição para produzir uma seqüência de 50 anos, e repetindo 20 vezes a operação obtendo 1000 anos de dados de vazão pode ser considerado o primeiro modelo verdadeiramente estocástico de geração de vazões.

Sarmiento (1989) realizou um estudo com diversos tipos de geração de vazões e aplicou a dois rios do Estado do Ceará, o rio Acaraú e o rio Bastiões.

Campos (1996) utilizou a geração sintética de deflúvios para os rios intermitentes do Nordeste brasileiro que apresentam uma longa estação de vazão nula seguida de uma estação úmida. Como estas características fazem com que os deflúvios anuais sejam serialmente independentes, as séries de vazões anuais podem ser obtidas pela função de densidade de probabilidade gama de dois parâmetros.

Para se operar um reservatório a nível mensal, ou seja, com o modelo simultâneo, é preciso desagregar as vazões anuais em mensais. O Método dos Fragmentos (SVANIDZE, 1980) produz vazões mensais por desagregação de vazões anuais pré-geradas por um modelo apropriado.

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.

Araújo (1991) assegura que o modelo de distribuição Gama II como método para desagregar vazões anuais em mensais para rios intermitentes do Semi-Árido nordestino apresenta bons resultados.

Odom e Lloyd (1964) sugeriram a divisão do ano em K estações para levar em conta a sazonalidade da vazão afluente.

White apud Campos (1987) propôs uma abordagem diferente para tratar da sazonalidade através de um modelo com variável sazonal, baseado em um diagrama em forma de onda, dividindo o ano em duas estações de tamanho variável.

Gould (1961) apud Campos (1987) modificou o modelo de Moran para levar em conta a sazonalidade e a auto-correlação mensal da vazão afluente. Usou a matriz de transição com período de tempo anual, mas considerando as vazões que ocorrem dentro de um ano, analisando o comportamento mensal. Assim, variações mensais na vazão afluente, auto-correlação mensal e retiradas mensais puderam ser incluídas no modelo.

A problemática da sazonalidade nas vazões dos rios do semi-árido é o foco principal desta pesquisa, no entanto a revisão do trabalho se deu basicamente nos processos estocásticos de dimensionamento de reservatórios

uma vez que os modelos de simulação, mensal e bi-sazonal, não são representados significativamente na literatura.

3. METODOLOGIA

A metodologia a ser seguida neste trabalho é a da simulação estocástica do reservatório. Ou seja, usar-se-á o método experimental de dimensionamento (Simulação Monte Carlo), o qual admite que os deflúvios anuais seguem uma determinada lei de probabilidade (no caso uma Distribuição Gama II), geram séries sintéticas de vazões e executam a operação simulada do reservatório.

Para a determinação da vazão regularizada utiliza-se a metodologia do balanço hídrico do mesmo. Dois modelos de operação foram utilizados na pesquisa, o mutuamente exclusivo, chamado aqui de “bi-sazonal” e o simultâneo que será representado como mensal.

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, através dos doze meses do ano.

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.

3.1. Dados Utilizados

Para analisar os dois modelos adotados na pesquisa foram selecionados 50 reservatórios no Estado do Ceará, Nordeste do Brasil (NEB), distribuídos nas 11 regiões hidrológicas do Estado (Tabela 3.1).

TABELA 3.1 – Açudes, com suas respectivas capacidades (hm³) e região hidrológica.

Reservatório	Capacidade (hm ³)	Região hidrológica
Pentecostes	395,6	Curu
Caxitoré	202,0	Curu
Edson Queiroz	254,0	Acaraú
Araras	891,0	Acaraú
Forquilha	50,1	Acaraú
Arneiroz	197,1	Alto Jaquaribe
Canoas	69,3	Alto Jaquaribe
Rivaldo Carvalho	19,52	Alto Jaquaribe
Favelas	30,1	Alto Jaquaribe
Muquem	47,6	Alto Jaquaribe
Orós	1940,0	Alto Jaquaribe
Poço da Pedra	52,0	Alto Jaquaribe
Trici	16,5	Alto Jaquaribe
Trussu	301,0	Alto Jaquaribe
Várzea do Boi	51,2	Alto Jaquaribe
Canafistula	13,12	Médio Jaguaribe
Ema	10,4	Médio Jaguaribe
Castanhão	6700,0	Médio Jaguaribe
Joaquim Távora	26,8	Médio Jaguaribe
Sto. Ant. Russas	24,0	Baixo Jaquaribe
Cipoada	86,1	Banabuiú
Fogareiro	118,8	Banabuiú
Quixeramobim	54,0	Banabuiú
Monsenhor Tabosa	12,1	Banabuiú
Pedras Brancas	434,0	Banabuiú
Poço do Barro	52,0	Banabuiú
São José II	29,1	Banabuiú
Trapia II	18,2	Banabuiú
Banabuiú	1601,0	Banabuiú
Patu	71,83	Banabuiú
Thomás Osterne	28,8	Salgado
Atalho II	108,25	Salgado
Cachoeira	34,33	Salgado
Olho d'água	21,0	Salgado
Lima Campos	66,4	Salgado
Rosário	47,2	Salgado
Manuel Balbino	37,18	Salgado
Prazeres	32,5	Salgado
Sto. Ant. Aracatiaçu	24,34	Litoral
Pacajus	240,0	Metropolitana
Pompeu Sobrinho	143,0	Metropolitana
Tucunduba	41,43	Coreaú
Carnaubal	87,7	Parnaíba
Jaburu II	116,0	Parnaíba
Jaburu I	220,0	Parnaíba
Colina	3,25	Parnaíba
Flor do Campo	111,3	Parnaíba
Cupim	4,55	Parnaíba
Realejo	31,55	Parnaíba
Barra Velha	99,5	Parnaíba

Fonte: Plano Estadual dos Recursos Hídricos do Ceará, 1996.

A localização de cada açude e dos postos pluviométricos é mostrada em anexo (Anexo I).

As regiões do Parnaíba, Salgado, Banabuiú e Alto Jaguaribe foram as regiões com maiores números de açudes envolvidos no trabalho. Isto se deve ao fato dos mesmos se localizar nas regiões onde o tipo climático Tropical Quente Semi-Árido é característico e assim facilitar a análise do comportamento dos reservatórios no que diz respeito as estações secas para o semi-árido cearense.

Contudo, ao incluir açudes das 11 bacias hidrográficas, pretende-se que os outros tipos de climas encontrados no Ceará se incorporem à presente pesquisa através do regime de chuvas e das evaporações anotadas nas regiões do Estado.

Os dados de cota x volume de cada reservatório, bem como as precipitações, evaporações, as modulações sazonais de evaporação e retirada, e as vazões afluentes, formaram o conjunto básico de informações necessárias à presente pesquisa.

3.1.1. Dados Cota x Volume Acumulado

As relações cota (m) x volume (hm^3), anexo II, tiveram como fonte o monitoramento da Companhia de Gestão de Recursos Hídricos (COGERH) e o Plano Estadual de Recursos Hídricos do Ceará (1992).

3.1.2. Evaporações

As evaporações características de cada reservatório foram aquelas medidas pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET, 1996) através do evaporímetro do tipo Atmômetro Piche. As estações evaporimétricas utilizadas foram as seguintes: Barbalha, Campos Sales, Quixeramobim, Crateús, Fortaleza, Iguatu, Jaguaruana, Morada Nova, Guaramiranga, Acaraú, Tauá e Sobral. As evaporações médias mensais de cada posto encontram-se no anexo III.

A associação de cada reservatório analisado com seu respectivo posto de evaporação foi feita respeitando a contigüidade entre ambos.

3.1.3 Precipitações

Os dados pluviométricos utilizados foram os valores médios, das séries pluviométricas mensais, medidos pela SUDENE (Superintendência de Desenvolvimento do Nordeste). No anexo IV os postos pluviométricos estão relacionados com os açudes usados no trabalho.

No anexo V, seguem os valores de precipitações médias mensais, em milímetros, de cada posto citado no anexo IV.

3.1.4. Modulação Sazonal das Evaporações

Para cada mês a evaporação líquida sobre os lagos dos reservatórios pode ser modulada de acordo com o exemplo da Tabela 3.2.

Os valores de e_i representam os coeficientes de distribuição das evaporações que foram utilizados para a modulação sazonal das evaporações na simulação dos reservatórios. Estes coeficientes são distribuídos ao longo dos doze meses de forma que resultem na porcentagem de cada valor de $E_i - P_i$ em relação à evaporação líquida total.

Os valores negativos para os coeficientes de distribuição significam que nesses meses as precipitações foram maiores que as lâminas evaporadas.

A metodologia que será aplicada no modelo mensal é a que segue na Tabela 3.2, entretanto a forma de modular as evaporações para o modelo bi-sazonal é descrita no item 3.2.2.

TABELA 3.2 – Modulação Sazonal das Evaporações no Açude Forquilha.

Mês	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Total
E_i (mm)	156,6	125,2	94,6	101,6	99,7	116,6	157,9	191,3	221,3	224,7	220,0	205,2	1914,7
P_i (mm)	66,8	141,3	224,0	213,3	118,0	24,4	10,7	1,5	1,0	2,1	4,8	19,5	826,4
$E_i - P_i$ (mm)	89,8	-16,1	-129,4	-111,7	-18,3	92,2	147,2	189,8	220,3	222,6	215,2	185,7	1088,3
$e_i = (E_i - P_i) / \Sigma(E_i - P_i)$	0,08	-0,01	-0,12	-0,10	-0,02	0,08	0,14	0,17	0,20	0,20	0,20	0,17	1,00

3.1.5. Vazões Afluentes aos Açudes

Os açudes do Estado do Ceará, no semi-árido nordestino, apresentam características hidrológicas típicas dos rios intermitentes, escoamentos ocorrendo em apenas alguns meses e grande variabilidade interanual.

As vazões afluentes no açude Forquilha, Figura 3.2, demonstra a característica da sazonalidade nos rios do Nordeste.

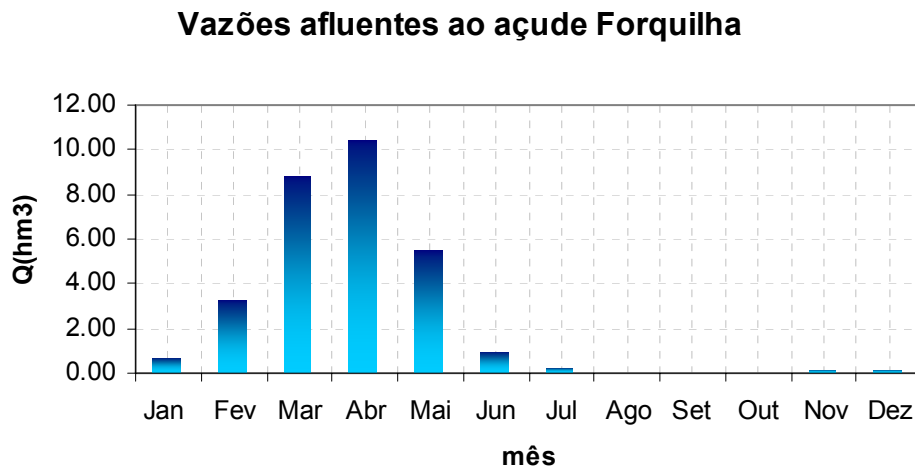


FIGURA 3.1 – Vazões médias mensais afluentes ao açude Forquilha.

As vazões médias mensais, afluentes aos 50 reservatórios encontram-se em anexo digital, ou seja, as séries históricas que foram utilizadas na geração das séries sintéticas.

3.2. Operação Simulada dos Reservatórios

Através da solução da equação do balanço hídrico, as vazões regularizadas, Q_{90} , 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, f_k igual a 1, 2 e 3.

Campos (1987) definiu f_k como sendo o fator adimensional de capacidade, a razão entre a capacidade K do reservatório e o volume médio afluente anual, μ .

3.2.1. Equação do Balanço Hídrico

A equação do balanço hídrico de um reservatório iguala as entradas e saídas do mesmo, como segue na equação abaixo:

$$dV/dt = E - S \quad (3.1)$$

onde:

E – representa todas as entradas no sistema;

S – representa todas as saídas; e

dV/dt – a variação do volume ao longo do tempo.

As entradas no sistema de um açude são as precipitações sobre o mesmo e as vazões afluentes. Já as evaporações e as retiradas para fins utilitários (tomada d'água) são as saídas aqui consideradas. E a forma da equação do balanço hídrico usada no simulador SimRes® é dada por:

$$V_{i+1} = V_i + (P_i - E_i) \times 1/2(A_{i+1} + A_i) + I_i - M_i - S_i \quad (3.2)$$

onde:

V_{i+1} e V_i como sendo os volumes de água estocados no reservatório no início dos meses $i+1$ e i ;

P_i a precipitação média sobre o espelho d'água do açude durante o mês i ;

E_i a evaporação média na superfície do lago durante o mês i ;

A_{i+1} e A_i representam as áreas do lago do açude no início dos meses $i+1$ e i , respectivamente.

I_i o volume afluyente ao reservatório durante o mês i ;

S_i o volume sangrado do reservatório; e

M_i representando a retirada do reservatório no mês i .

3.2.2. Modulação Sazonal das Retiradas

Como maior destino das águas de um açude, a irrigação, responsável por aproximadamente 70% da demanda de água a ser ofertada pelos gestores de recursos hídricos, exige do reservatório uma retirada sazonal e não constante como é o caso das retiradas para abastecimento humano.

Assim, com o objetivo de se aproximar da realidade de funcionamento do mesmo, as retiradas foram moduladas sazonalmente através dos coeficientes de distribuição das retiradas - e_{ir} . Tais coeficientes contidos como exemplo na Tabela 3.3 seguem a modulação das evaporações (Tabela 3.2), porém, nos meses com índices de precipitação maior que a evaporação (e_i negativo), as retiradas do reservatório são consideradas nulas, transferindo-as então para os demais meses.

Estes coeficientes, de evaporação e retirada, no modelo bi-sazonal foram representados conforme sua definição, ou seja, na primeira estação (úmida) as retiradas e evaporações são nulas, enquanto que na segunda estação (seca) são efetuadas todas as retiradas e evaporações.

Desta forma imputam-se os números zero e um aos referidos coeficientes quando os reservatórios são operados pelo modelo bi-sazonal.

Os 50 reservatórios foram simulados e operados sendo feita a modulação sazonal das retiradas de acordo com o procedimento apresentado na Tabela 3.3,

todavia, eles também foram operados considerando as retiradas constantes, com o intuito de comparar a resposta da vazão regularizada pelas duas metodologias. Assim os coeficientes serão todos constantes e iguais a unidade por doze (meses).

É obvio que os somatórios dos coeficientes de distribuição, tanto nas evaporações como nas retiradas, devem ser igual a 1.

TABELA 3.3 – Modulação Sazonal das Retiradas no Açude Forquilha.

Mês	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Total
Ei (mm)	156,6	125,2	94,6	101,6	99,7	116,6	157,9	191,3	221,3	224,7	220,0	205,2	1914,7
Pi (mm)	66,8	141,3	224,0	213,3	118,0	24,4	10,7	1,5	1,0	2,1	4,8	19,5	826,4
Ei - Pi (mm)	89,8	0,00	0,00	0,00	0,00	92,2	147,2	189,8	220,3	222,6	215,2	185,7	1362,8
$eir = (Ei - Pi) / \Sigma(Ei - Pi)$	0,07	0,00	0,00	0,00	0,00	0,07	0,11	0,14	0,16	0,16	0,16	0,14	1,00

3.2.3. Métodos para solução do balanço hídrico

Como modelo rápido de dimensionamento, os reservatórios são operados em nível de balanço hídrico através do modelo mutuamente exclusivo (modelo bi-sazonal). No entanto, o modelo simultâneo (mensal) tem importância significativa quando a operação do mesmo dá-se para fins de abastecimento.

Desta feita, procurou-se investigar, através da solução da equação do balanço hídrico os dois modelos.

➤ O modelo bi-sazonal

O modelo bi-sazonal considera para a solução da equação do balanço hídrico o ano dividido em duas estações uma seca e outra úmida. Foi utilizado no desenvolvimento do Diagrama Triangular de Regularização (Campos, 1996).

Através da distribuição de probabilidade Gamma II, as vazões sintéticas foram geradas com esse conceito, ou seja, as vazões não estão distribuídas ao longo dos doze meses, mas apenas na estação úmida, que é seguida da estação seca com vazões nulas.

Por sua vez, as retiradas acontecem do início da estação seca, quando os açudes estão com os deflúvios acumulados, ao início da próxima estação úmida. Na Figura 3.2 segue o exemplo do açude Forquilha.

Vazões sintéticas geradas pelo modelo bisazonal

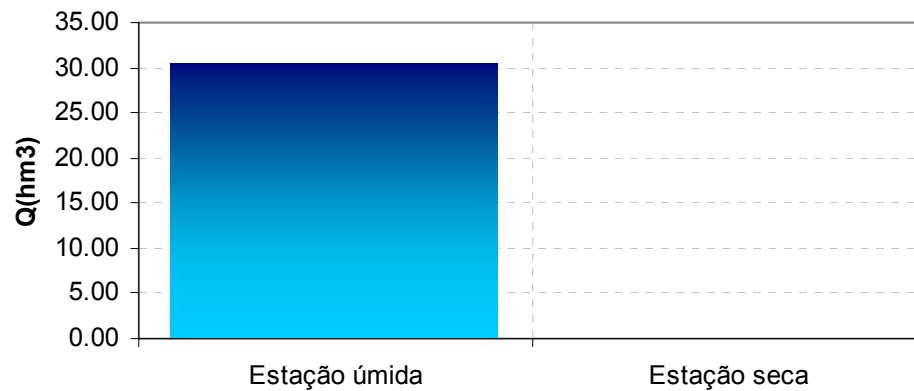


FIGURA 3.2 – Vazão sintética média anual, para o modelo bi-sazonal, ao açude Forquilha.

Foram testados os seguintes períodos para a estação seca: junho/dezembro, junho/janeiro, julho/dezembro, julho/janeiro, agosto/ dezembro e agosto/ janeiro.

Desta feita tem-se estações secas com oito, sete, seis e cinco meses de duração e as estações úmidas com quatro, cinco, seis e sete meses de duração. Os limites comumente adotados para estas estações são de sete meses para estação seca e cinco para a úmida.

➤ O modelo mensal

Neste modelo as entradas e saídas são efetuadas simultaneamente ao longo dos doze meses. Portanto, para as séries sintéticas de vazões, o modelo gera vazões distribuídas ao longo dos meses do ano.

Deste modo, o Método dos Fragmentos foi utilizado apenas no modelo mensal, para desagregação das vazões anuais em mensais. Novamente é utilizado o açude Forquilha para exemplificar as vazões fragmentadas (Figura 3.3).

Vazões fragmentadas açude Forquilha

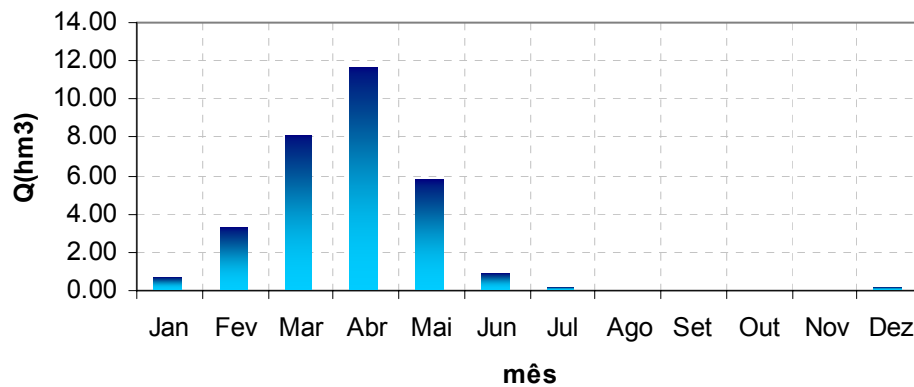


FIGURA 3.3 – Vazões médias mensais fragmentadas, Método dos Fragmentos, açude Forquilha.

3.2.4. Esforço Computacional

O software SimRes® (Campos et. al,1999) emprega uma metodologia de simulação computacional necessária e essencial ao gerenciamento sustentável dos Recursos Hídricos em regiões que apresentam irregularidades pluviométricas. O método 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. Sendo assim, o programa apresenta três módulos:

1) Geração - com foco nos regimes hidrológicos do semi-árido, onde os deflúvios anuais são serialmente independentes. Esse módulo dispõe das funções gama, normal e log-normal para gerações randômicas de deflúvios anuais.

A distribuição Gamma de dois parâmetros foi utilizada como distribuição de probabilidade na geração das séries sintéticas de vazões, cuja equação é:

$$P(x)=\beta^\alpha x^{\alpha-1} e^{-\beta x}/\Gamma(\alpha) \quad (3.3)$$

onde $\Gamma(\alpha)$ é a função Gamma e α e β são os dois parâmetros da distribuição, calculados pelo método dos momentos de acordo com as equações abaixo:

$$\mu = \alpha / \beta \quad (3.4)$$

$$\sigma^2 = \alpha / \beta^2 \quad (3.5)$$

Assim para cada série histórica tem-se uma média (μ) e um desvio padrão (σ^2). O coeficiente de variação dos deflúvios anuais (CV_{def}) foi aquele característico de cada reservatório, ou seja, cada reservatório apresenta seu respectivo coeficiente de variação próprio da série histórica.

São apresentadas, no anexo VI, as médias, os desvios e os coeficientes de variação das séries históricas de vazões afluentes aos reservatórios presentes na pesquisa.

2) Fragmentação - nesse módulo as vazões anuais são desagregadas em um intervalo de tempo mensal, com base em uma série de observações históricas mensais.

Na desagregação dos deflúvios anuais em mensais, foi adotado o Método dos Fragmentos (SVARNIDZE, 1964). O método consiste basicamente em duas amostragens: a descarga média anual (Q_i) e os fragmentos (f_i). Para se calcular os fragmentos $f_{i,j}$, para o mês j e ano i das séries de vazões mensais históricas utiliza-se a expressão 3.6.

$$f_{i,j} = \frac{Q_{i,j}}{\sum_{j=1}^{12} Q_{i,j}} \quad (3.6)$$

onde:

$Q_{i,j}$ = Vazão mensal histórica no mês j e ano i .

Portanto, observa-se que a soma dos fragmentos para o ano i é igual a unidade.

$$\sum_{j=1}^{12} f_{i,j} = 1 \quad (3.7)$$

Já com os fragmentos calculados, divide-se a série histórica em ordem crescente de seus valores para formar assim intervalos de classes conforme o número de anos da série histórica. Então as vazões mensais sintéticas são estimadas através da seguinte expressão:

$$Q_{i,j} = f_j^k Q_i^k \quad (3.8)$$

onde:

$Q_{i,j}$, vazão mensal sintética para o mês j do ano i;

f_j^k , o fragmento de desagregação no mês j associado ao intervalo de classe k;

Q_i^k , a vazão anual gerada pelo modelo anual, pertencente a classe k.

3) Simulação - módulo principal de cálculo que utiliza o Método de Monte Carlo na obtenção de vazões para o estudo detalhado do reservatório de acordo com os horizontes de simulação (1000, 2000, 3000, 4000 e 5000 anos, se necessário) em análise, a fim de obter uma vazão regularizada para o reservatório em estudo.

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.

Simulou-se todos os reservatórios para um horizonte de simulação de 5000 anos, para que o processo de armazenamento se encontrasse em seu estado de equilíbrio.

3.3. Metodologia da Evaporação Equivalente (E_{eq}) e Duração da Estação Seca

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 várias tentativas de simulação.

A evaporação líquida foi usada para determinar quando as vazões regularizadas pelos dois modelos são iguais, ou seja, deve-se simular os reservatórios até se descobrir qual evaporação é usada pelo modelo bi-sazonal que iguala às vazões regularizadas pelo modelo mensal. E como consequência determinar 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, tem-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}).

4. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo apresentam-se os resultados obtidos em todas as simulações realizadas para os cenários analisados. O presente capítulo foi dividido em duas partes para melhor compreensão dos resultados encontrados.

A primeira parte refere-se à análise dos resultados obtidos pelo modelo mensal sendo ele operado com retiradas constantes e moduladas. Assim, as vazões regularizadas pelas duas metodologias, para os três casos de capacidades hipotéticas, serão discutidas e exploradas, no sentido de se obter respostas às regras de operação aqui realizadas. Para tanto o uso de tabelas e gráficos é importante para auxiliar na apresentação dos resultados.

Na segunda parte estão os resultados pertinentes à comparação entre o modelo bi-sazonal e o mensal modulado. As lâminas de evaporação líquida nos reservatórios foram ajustadas, através de várias simulações para se atingir a convergência dos resultados, nas vazões regularizadas, Q_{90} .

Assim as estações foram divididas de acordo com a semelhança das lâminas evaporadas. E as estações secas foram dimensionadas para se propor o mapa de regionalização das estações e evaporações.

Dessa forma pretende-se entrar na discussão do problema de dimensionamento de reservatórios no semi-árido cearense apoiado nas técnicas utilizadas e atender os objetivos estabelecidos.

4.1. Análise do Modelo Mensal

Simulou-se cada reservatório utilizando o modelo mensal com retiradas constantes e moduladas. Observou-se que os valores de Q_{90} , no modelo com retiradas constantes, em todos os 50 reservatórios, se mostraram maiores ou iguais aos do modelo mensal modulado.

Na Tabela 4.1 são mostradas as vazões regularizadas obtidas pela simulação de cada reservatório no modelo mensal, para retiradas moduladas e constantes.

TABELA 4.1 – Vazões regularizadas pelo modelo mensal (hm³).

Açudes	Q ₉₀ Modulado			Q ₉₀ 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	55,0	66,6	39,0	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	10,0	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	2,0	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	365,5	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
Cipoda	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
Mons. 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
Trapia 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
Thomás Osterne	1,4	2,1	2,4	1,5	2,2	2,5
Atalho II	14,0	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

Açudes	Q ₉₀ Modulado			Q ₉₀ Constante		
	fK 1,0	fK 2,0	fK 3,0	fK 1,0	fK 2,0	fK 3,0
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	4,0	5,2	1,6	4,0	5,2

O reservatório Canafístula apresentou vazões regularizadas (Q₉₀) nulas nas duas metodologias de retiradas para f_k igual a um. Assim a evaporação líquida anual correspondente a estas vazões, no modelo bi-sazonal foi considerada como a menor lâmina que resultasse nos respectivos valores de Q₉₀.

A influência do aumento na média das vazões afluentes, no dimensionamento dos reservatórios estudados, através dos três valores de f_k considerados, foi observada para a maioria dos açudes, ou seja, em 42 açudes as vazões regularizadas foram sensíveis a variação de f_k.

Os açudes Trici e Flor do Campo apresentaram vazões iguais nos três casos, para as duas metodologias de retiradas, ou seja, se mostraram insensíveis ao fator de capacidade.

Já os açudes Forquilha, Trici, Canafístula, Olho d'água, Rosário, Manuel Balbino e Barra Velha apresentaram a mesma capacidade de regularização nas duas metodologias, porém obedecendo ao aumento de f_k.

Os valores dos coeficientes de correlação 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.

Para se analisar as vazões regularizadas pelos modelos foram utilizados os procedimentos estatísticos: desvio relativo e a correlação entre as vazões para o mesmo f_k.

TABELA 4.2 – Desvio relativo, entre os modelos, nas vazões regularizadas.

Açudes	Desvio relativo		
	fK 1,0	fK 2,0	fK 3,0
Pentecostes	0,09	0,05	0,03
Caxitoré	0,10	0,06	0,04
Edson Queiroz	0,06	0,04	0,03
Araras	0,09	0,07	0,04
Forquilha	0,00	0,00	0,00
Arneiroz	0,09	0,05	0,03
Canoas	0,06	0,07	0,04
Rivaldo Carvalho	0,11	0,09	0,09
Favelas	0,08	0,07	0,07
Muquem	0,05	0,03	0,04
Oros	0,07	0,05	0,04
Poço da Pedra	0,05	0,03	0,03
Trici	0,00	0,00	0,00
Trussu	0,08	0,05	0,04
Várzea do Boi	0,00	0,10	0,09
Canafístula	0,00	0,00	0,00
Ema	<u>0,20</u>	0,10	0,07
Castanhão	0,06	0,04	0,03
Joaquim Távora	0,13	0,06	0,04
Sto. Ant. Russas	0,09	0,05	0,03
Cipoada	0,08	0,05	0,04
Fogareiro	0,08	0,07	0,06
Quixeramobim	0,09	0,05	0,04
Mons. Tabosa	0,09	0,05	0,04
Pedras Brancas	0,07	0,07	0,06
Poço do Barro	0,09	0,08	0,08
São José II	0,09	0,06	0,05
Trapia II	0,11	0,06	0,06
Banabuiú	0,10	0,08	0,06
Patu	0,07	0,05	0,04
Thomás Osterne	0,07	0,05	0,04
Atalho II	0,05	0,03	0,03
Cachoeira	0,10	0,06	0,05
Olho d'água	0,00	0,00	0,00
Lima Campos	0,10	0,07	0,06
Rosário	0,00	0,00	0,00
Manuel Balbino	0,00	0,00	0,00
Prazeres	0,06	0,04	0,03
Sto. Ant. Aracatiaçu	0,07	0,05	0,05
Pacajus	0,09	0,05	0,03
Pompeu Sobrinho	0,06	0,07	0,03
Tucunduba	0,06	0,04	0,02
Carnaubal	0,14	<u>0,14</u>	<u>0,14</u>
Jaburu II	0,13	0,10	0,08
Jaburu I	0,15	0,10	0,07
Colina	0,00	0,12	0,08
Flor do Campo	0,09	0,09	0,09

Açudes	Desvio relativo		
	fK 1,0	fK 2,0	fK 3,0
Cupim	0,09	0,07	0,05
Realejo	0,13	0,13	0,05
Barra Velha	0,00	0,00	0,00
<i>Erro Médio</i>	<i>0,07</i>	<i>0,06</i>	<i>0,04</i>

Observa-se na Tabela 4.2 que o maior erro relativo entre os dois procedimentos realizados foram nas vazões regularizadas pelo açude Ema com 20% para $f_k=1$. Já para f_k um e dois, o açude Carnaubal apresentou os maiores desvios, 14%.

Entretanto, a média dos desvios relativos nos três casos foi menor que 7%, sendo sete, seis e quatro por cento, respectivamente para $f_k= 1, 2$ e 3.

Através dos valores do erro relativo entre os dois modelos de retiradas nota-se que as vazões regularizadas se aproximam entre si, à medida que cresce o valor de f_k . Ou seja, os desvios diminuem com o aumento de f_k .

Nas Figuras 4.1, 4.2, 4.3 os açudes são mostrados de acordo com sua numeração, para seus respectivos desvios, em porcentagem. Cada figura representa um f_k diferente. Importante observar que a numeração dos reservatórios é aquela estabelecida no item 3.1.

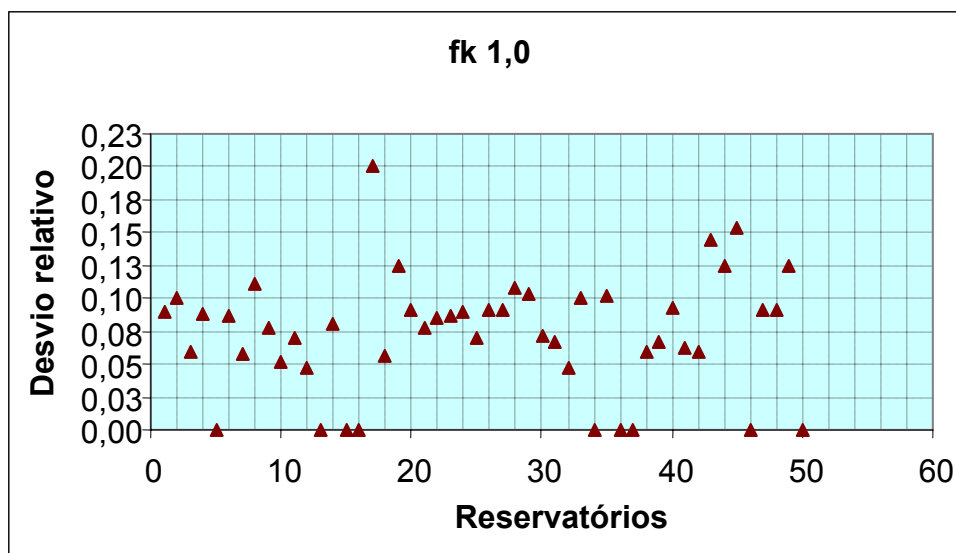


FIGURA 4.1 – Desvio relativo (%) entre as vazões regularizadas pelos dois modelos de retirada, para os 50 reservatórios analisados, com f_k igual a 1.

Observa-se na Figura 4.1 que a grande maioria dos açudes, 76% deles, apresentaram desvios entre 0,05 e 0,13.

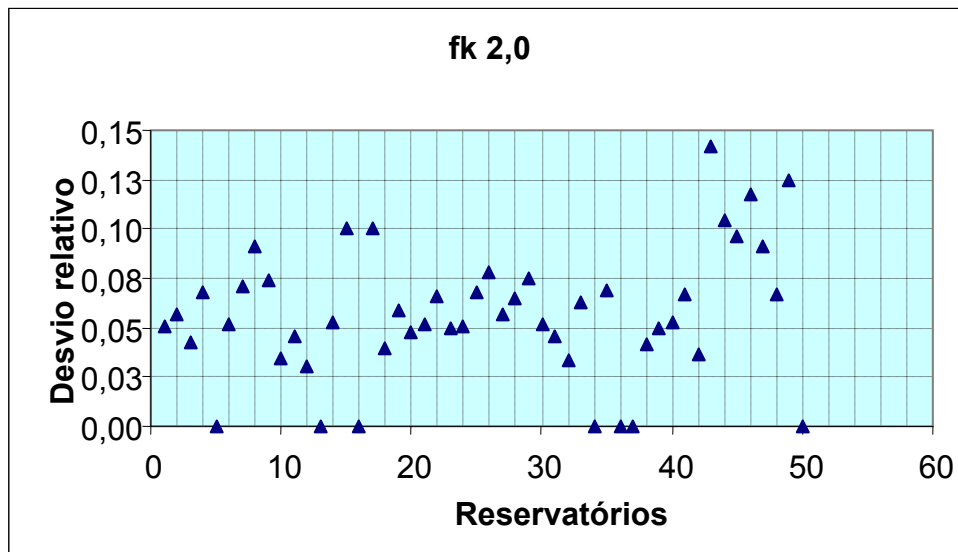


FIGURA 4.2 – Desvio relativo (%) entre as vazões regularizadas pelos dois modelos de retirada, para os 50 reservatórios analisados, com f_k igual a 2.

Nota-se então da Figura 4.2 que a faixa de desvio entre 0,03 e 0,10 foi responsável por conter 80% dos reservatórios.

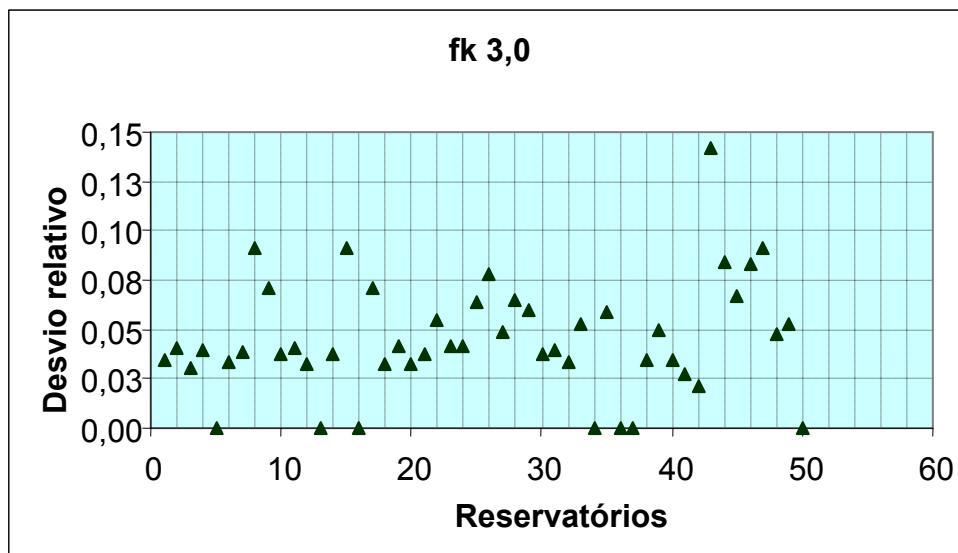


FIGURA 4.3 – Desvio relativo (%) entre as vazões regularizadas pelos dois modelos de retirada, para os 50 reservatórios analisados, com f_k igual a 3.

Já para f_k igual a três o intervalo de concentração dos desvios foi menor do que os dois anteriores, 0,03 a 0,09 e representou 82% dos açudes simulados.

Para descobrir uma equação que represente os dois modelos foram excluídos os valores extremos, considerou-se assim a amostra de açudes com desvios entre 0,05 e 0,15, ou seja, 80% dos reservatórios, no caso $f_k=1,0$.

Na Figura 4.6, os valores dos desvios são mostrados em função dos três f_k 's.

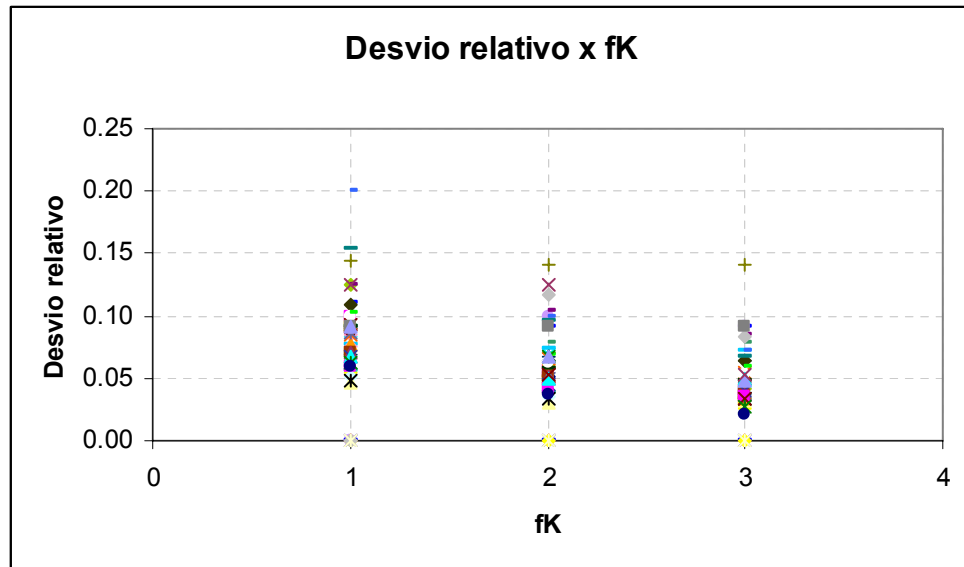


FIGURA 4.4 – Desvio relativo entre as vazões regularizadas (Q_{90}) dos modelos mensal, com retirada constante e modulada.

Para melhor análise dos resultados das vazões regularizadas o fator adimensional de retirada, f_m , será utilizado para excluir o efeito de escala nos valores obtidos de Q_{90} . Assim como definido por Campos (1996), o fator adimensional de retirada é dado pela razão entre o volume regularizado e o volume afluente médio anual.

Os valores do fator adimensional de retirada apresentados na Tabela 4.3 são os referentes ao volume regularizado pelo modelo mensal com retiradas moduladas.

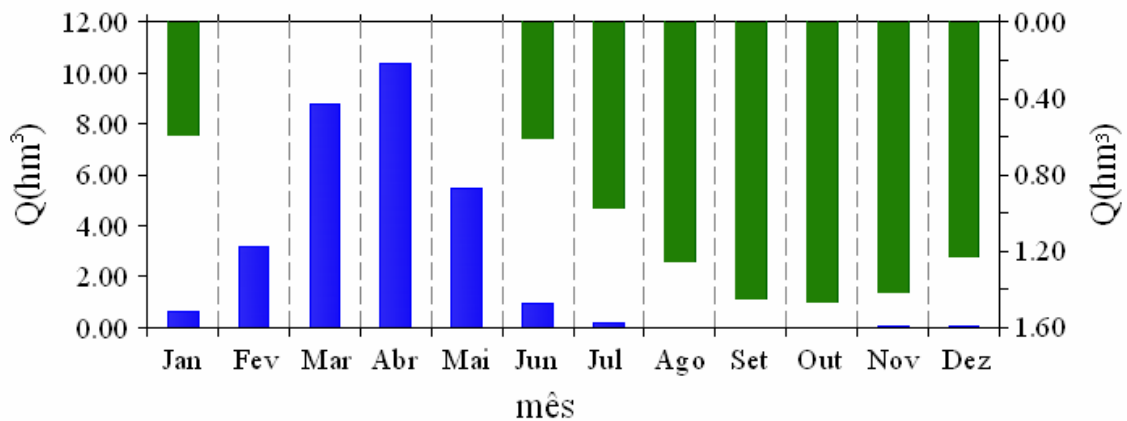
TABELA 4.3 – Fator adimensional de retirada f_m , para o modelo mensal modulado.

Açudes	f_m		
	$f_K 1,0$	$f_K 2,0$	$f_K 3,0$
Pentecostes	0,32	0,51	0,62
Caxitoré	0,28	0,44	0,53
Edson Queiroz	0,26	0,40	0,49
Araras	0,35	0,51	0,62
Forquilha	0,18	0,30	0,39
Arneiroz	0,08	0,13	0,17
Canoas	0,17	0,28	0,35
Rivaldo Carvalho	0,06	0,08	0,08
Favelas	0,07	0,08	0,08
Muquem	0,20	0,26	0,28
Oros	0,24	0,36	0,43
Poço da Pedra	0,17	0,28	0,34
Trici	0,05	0,05	0,05
Trussu	0,23	0,36	0,44
Várzea do Boi	0,02	0,03	0,04
Canafístula	0,00	0,03	0,05
Ema	0,04	0,09	0,13
Castanhão	0,25	0,36	0,44
Joaquim Távora	0,04	0,10	0,14
Sto. Ant. Russas	0,29	0,48	0,58
Cipoada	0,11	0,23	0,32
Fogareiro	0,24	0,28	0,29
Quixeramobim	0,24	0,40	0,51
Monsenhor Tabosa	0,18	0,32	0,42
Pedras Brancas	0,14	0,23	0,27
Poço do Barro	0,10	0,16	0,16
São José II	0,02	0,04	0,04
Trapia II	0,27	0,39	0,39
Banabuiú	0,17	0,23	0,28
Patu	0,21	0,33	0,42
Thomás Osterne	0,22	0,33	0,38
Atalho II	0,14	0,18	0,20
Cachoeira	0,15	0,24	0,29
Olho d'água	0,13	0,24	0,31
Lima Campos	0,18	0,27	0,32
Rosário	0,05	0,10	0,11
Manuel Albino	0,11	0,23	0,23
Prazeres	0,26	0,37	0,45
Sto. Ant. Aracatiaçu	0,05	0,07	0,07
Pacajus	0,43	0,61	0,71
Pompeu Sobrinho	0,08	0,15	0,18
Tucunduba	0,14	0,23	0,29
Carnaubal	0,11	0,12	0,12
Jaburu II	0,04	0,08	0,15
Jaburu I	0,50	0,69	0,78
Colina	0,00	0,03	0,07
Flor do Campo	0,06	0,06	0,06

Açudes	f_m		
	$f_k 1,0$	$f_k 2,0$	$f_k 3,0$
Cupim	0,08	0,22	0,31
Realejo	0,06	0,12	0,15
Barra Velha	0,03	0,09	0,11

Como era de se esperar, já que a capacidade de regularização dos reservatórios cresce com o aumento de f_k , os valores de f_m também crescem a medida que o reservatório é operado com vazões afluentes maiores que as vazões históricas.

Retiradas $f_k 2$



Vazões afluentes ao açude Forquilha

FIGURA 4.5 – Histograma das vazões afluentes e das retiradas no reservatório Forquilha para f_k igual a 2.

4.2. Análise das Estações Secas no Modelo Bi-sazonal

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 4.4. Os resultados mostram que as evaporações encontradas apresentaram, para os três f_k 's, correlação muito boa e em muitos açudes a lâmina evaporada foi a mesma.

As evaporações E_1 , E_2 e E_3 correspondem aos três f_k s e E_{eq} (evaporação equivalente) como sendo a média das três para a obtenção das estações.

TABELA 4.4 – Evaporação líquida comum nos dois modelos, mensal e bi-sazonal, e evaporação equivalente.

Açudes	E(m)			Eeq
	E ₁ (m)	E ₂ (m)	E ₃ (m)	
Pentecostes	1,00	1,06	1,11	1,06
Caxitoré	1,30	1,32	1,25	1,29
Edson Queiroz	0,90	0,91	0,91	0,91
Araras	1,22	1,00	0,95	1,06
Forquilha	1,33	1,27	1,29	1,30
Arneiroz	1,97	1,91	1,94	1,94
Canoas	1,95	1,97	1,93	1,95
Rivaldo Carvalho	1,56	1,63	1,65	1,61
Favelas	1,94	1,94	1,92	1,93
Muquem	1,88	1,98	1,94	1,93
Oros	1,56	1,48	1,49	1,51
Poço da Pedra	2,12	2,10	2,10	2,11
Trici	2,18	2,18	2,18	2,18
Trussu	1,46	1,44	1,47	1,46
Várzea do Boi	2,23	2,20	2,18	2,20
Canafístula	1,42	1,50	1,54	1,49
Ema	1,54	1,59	1,60	1,58
Castanhão	1,78	1,77	1,83	1,79
Joaquim Távora	1,34	1,36	1,34	1,35
St. Ant. Russas	1,35	1,44	1,45	1,41
Cipoada	1,73	1,71	1,69	1,71
Fogareiro	1,89	2,00	1,94	1,94
Quixeramobim	1,55	1,60	1,69	1,61
Mons. Tabosa	1,26	1,35	1,31	1,31
Pedras Brancas	1,58	1,53	1,50	1,54
Poço do Barro	1,80	1,78	1,78	1,79
São José II	1,50	1,46	1,48	1,48
Trapia II	1,30	1,42	1,44	1,39
Banabuiú	1,50	1,54	1,50	1,51
Patu	1,04	1,00	0,92	0,99
Thomás Osterne	1,30	1,30	1,33	1,31
Atalho II	2,02	1,93	1,86	1,94
Cachoeira	1,58	1,58	1,54	1,57
Olho d'água	1,44	1,47	1,49	1,47
Lima Campos	1,32	1,35	1,32	1,33
Rosário	1,63	1,63	1,63	1,63
Manuel Balbino	1,45	1,26	1,45	1,39
Prazeres	1,77	1,79	1,77	1,78
St. Ant. Araatiação	1,32	1,33	1,35	1,33
Pacajus	0,73	0,81	0,81	0,78
Pompeu Sobrinho	1,46	1,46	1,51	1,48
Tucunduba	0,72	0,76	0,71	0,73
Carnaubal	2,35	2,16	2,16	2,22
Jaburu II	2,18	2,18	2,13	2,16
Jaburu I	0,84	0,87	0,87	0,86
Colina	1,90	2,10	2,35	2,12

Açudes	E(m)			
	E₁(m)	E₂(m)	E₃(m)	E_{eq}
Flor do Campo	2,20	2,20	2,20	2,20
Cupim	2,35	2,45	2,48	2,43
Realejo	2,30	2,30	2,30	2,30
Barra Velha	2,40	2,45	2,40	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 (Q_{90}) iguais.

Na Tabela 4.5 seguem as estações secas pertinentes a cada açude.

TABELA 4.5 – Estação Seca nos 50 reservatórios a partir da evaporação equivalente.

Açude	Estação Seca
Jaburu I	Ago/Dez
Pacajus	Ago/Dez
Araras	Ago/Dez
Thomás Osterne	Ago/Dez
Tucunduba	Ago/Dez
Edson Queiroz	Ago/Jan
Manuel Balbino	Ago/Jan
Canafistula	Ago/Jan
Caxitoré	Ago/Jan
Joaquim Távora	Jul/Dez
Lima Campos	Jul/Dez
Monsenhor Tabosa	Jul/Dez
Olho d'água	Jul/Dez
Trapiá II	Jul/Dez
Pentecoste	Jul/Jan
Oros	Jul/Jan
Realejo	Jul/Jan
Sto. Ant. de Russas	Jul/Jan
Cipoada	Jul/Jan
Pedras Brancas	Jul/Jan
Trussu	Jul/Jan
Rosário	Jul/Jan
Patu	Jun/Dez
Pompeu Sobrinho	Jun/Dez
Jaburu II	Jun/Dez
Flor do Campo	Jun/Dez
Colina	Jun/Dez
Cachoeira	Jun/Dez
Banabuiú	Jun/Dez
Carnaubal	Jun/Dez
Ema	Jun/Dez

Açude	Estação Seca
São José II	Jun/Dez
Forquilha	Jun/Dez
Sto. Ant. de Aracat.	Jun/Dez
Rivaldo Carvalho	Jun/Jan
Cupim	Jun/Jan
Atalho II	Jun/Jan
Quixeramobim	Jun/Jan
Arneiroz	Jun/Jan
Canoas	Jun/Jan
Barra Velha	Jun/Jan
Castanhão	Jun/Jan
Fogareiro	Jun/Jan
Favelas	Jun/Jan
Muquem	Jun/Jan
Poço da Pedra	Jun/Jan
Poço do Barro	Jun/Jan
Prazeres	Jun/Jan
Trici	Jun/Jan
Várzea do Boi	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.

Nos anexos VII e VIII encontram-se os mapas referentes às evaporações equivalentes e as estações secas.

5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A análise do dimensionamento de reservatórios através do balanço hídrico utilizando os modelos mensal e bi-sazonal foi o objetivo principal da presente pesquisa. No modelo mensal duas regras de operação nas retiradas foram testadas e comparadas. E o tamanho da estação seca, no modelo bi-sazonal, referente a cada açude onde as vazões regularizadas pelos dois modelos sejam as mesmas foi o resultado encontrado para a análise da influência da sazonalidade das vazões afluentes nas regiões do semi-árido cearense.

Como estudo de caso foram utilizados 50 reservatórios representativos das regiões climáticas do Estado do Ceará, onde através do Método de Monte Carlo, ou seja uma simulação estocástica, foram geradas séries sintéticas de vazões a partir das vazões históricas de cada açude, realizando assim a operação simulada dos mesmos. As vazões regularizadas resultantes da aplicação da presente metodologia foram vazões com nível de garantia anual de 90%.

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 os três diferentes f_k s o comportamento dessas vazões foi o mesmo.

Já para as 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 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.

Na região dos Inhamuns, onde o clima é predominantemente semi-árido, a evaporação E_{eq} tem seus maiores valores, próximos a 2400mm/ano. Esses valores caíram na região do semi-árido do Cariri (clima semi-árido brando) e na faixa litorânea. O mesmo comportamento deu-se nas áreas serranas (clima tropical úmido e semi-úmido) chegando a aproximadamente 750mm/ano.

A estação seca e a evaporação equivalente discutidas aqui 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.

Uma forma de integrar o dimensionamento através dos dois modelos (mensal e bi-sazonal) é seguir uma metodologia que utilize os dados da evaporação equivalente e para tanto pode ser elaborado um mapa de isolinhas que atenda os valores encontrados neste trabalho e também se realize um aumento da amostra, com o objetivo de expandir as informações acerca da estação seca.

Os fatos e considerações abordados no trabalho refletem a necessidade de integrar criteriosamente o conhecimento da sazonalidade das vazões no semi-árido, bem como da evaporação, na implementação de políticas de gerenciamento buscando extrair o melhor desempenho do reservatório no cumprimento de suas funções sem trazer prejuízo à região, à população ou ao meio ambiente. No entanto, é necessário se entender o fenômeno da variabilidade das vazões naturais e da evaporação para se conviver com eles, já que seus efeitos não se evitam, mas se gerenciam.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARAÚJO, J.K. (1991). **Método dos Fragmentos Aplicado a Rios Intermitentes: Avaliação dos Erros Introduzidos no Cálculo da Disponibilidade de Reservatórios.** Fortaleza, Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Universidade Federal do Ceará (Dissertação de Mestrado).

CAMPOS, J.N.B. **A Procedure for Reservoir Sizing on Intermittent Rivers Under High Evaporation Rate.** Fort Collins, Colorado State University. PhD Thesis, 1987.

CAMPOS, J.N.B. **Dimensionamento de Reservatórios: O Método do Diagrama Triangular de Regularização.** Edições UFC. 1996

CLARKE, R.T. **Mathematical Models in Hydrology.** FAO Irrigation and Drainage Paper, N°19, 1973.

FIERING, M.B. "Queuing Theory and Simulation in Reservoir Designing." **Transactions of the American Society of Civil Engineers.** vol.127 Part I, 1962.

Frey, H.C. "Quantitative Analysis of Variability and Uncertainty in Energy and Environmental Systems". In: **AYYUB, B.M. (Ed.), Uncertainty Modeling and Analysis in Civil Engineering.** CRC Press LLC, Florida, (1998).

GOMES, F.F.C. **Análise da discretização do Método das Matrizes de Transição e estudo comparativo com Método de Simulação de Monte Carlo para dimensionamento de reservatórios.** Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Ceará, 2003.

GOULD, B.W. "Statistical Methods for Estimating the Design Capacity of Dams" **Journal of Institution of Engineers of Australia,** vol. 33, 1961.

HAAN, C.T. **Statistical Methods in Hydrology.** Iowa State University. Press, Iowa, 1977.

HAZEN, A. "Storage to be Provided in Impounding Reservoirs for Water Supply." **Transactions, American Society of Civil Engineers.** , vol 77, 1914.

HURST, H.E. "Long-term Storage Capacity of Reservoirs." **Proceedings of American Society of Civil Engineers,** separate n° 11, abril de 1950.

LOUCKS, D.P., STEDINGER, J.R. and HAITH, D.A. **Water Resources Systems Planning and Analysis.** Englewood Cliff, N.J. Prentice Hall, Inc., 1981.

MAAS, A. et al. **Design of Water Resources System**. Havard University Press, USA, 1962.

MATALAS, N. C. Mathematical Assessment of Synthetic Hydrology. **Water Resources Research**, v.3, p.937-945, 1967.

McMAHON, T.A. "Preliminary Estimation of Reservoir Storage for Australian Streams." **Transactions of the Institution of Engineers**, vol.CE18,N^o2, Australia , 1976.

McMAHON, T.A. MEIN, R. G. River and reservoir yield. Littleton, Colorado: **Water Resources**, 1986.

MORAN, P.A.P. "A Probability Theory of Dams and Storage System." **Australian Journal of Applied Science**, vol 5, 1954.

ODOOM, S and LLOYD, E.H. "Probability Theory of Reservoirs With Seasonal Input" **Journal of Hydrology**, 2:1, 1964.

RIPPL, W. "Capacity of Storage Rservoirs for Waters Supply." **Minutes of Proceodings of The Institution of Civil Engineers**, vol 71, 1883.

SARMENTO, F. J. **Aplicabilidade de Métodos de Geração de Vazão no Semi-Árido do Nordeste do Brasil**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 1989.

SOBOL,I.M. **A Primer for the Monte Carlo Method**. Florida: CRC Press, 1994.

SRIKANTHAN, R.; McMAHON, T. A. Stochastic Generation of Monthly Flows for Ephemeral Streams. **Journal of Hydrology**, N^o47, 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.

SUDLER, C.E. Storage Required for the Regulation of Streamflow. **Transactions of the American Socirty of Civil Engineers**, vol.91, 1927.

SVANIDZE, G.G. Mathematical Modeling of Hydrology Series (for Hydroelectric and Water Resources Computations). **Water Resources Publications**, Fort Colins, Colorado, U.S.A,1980.

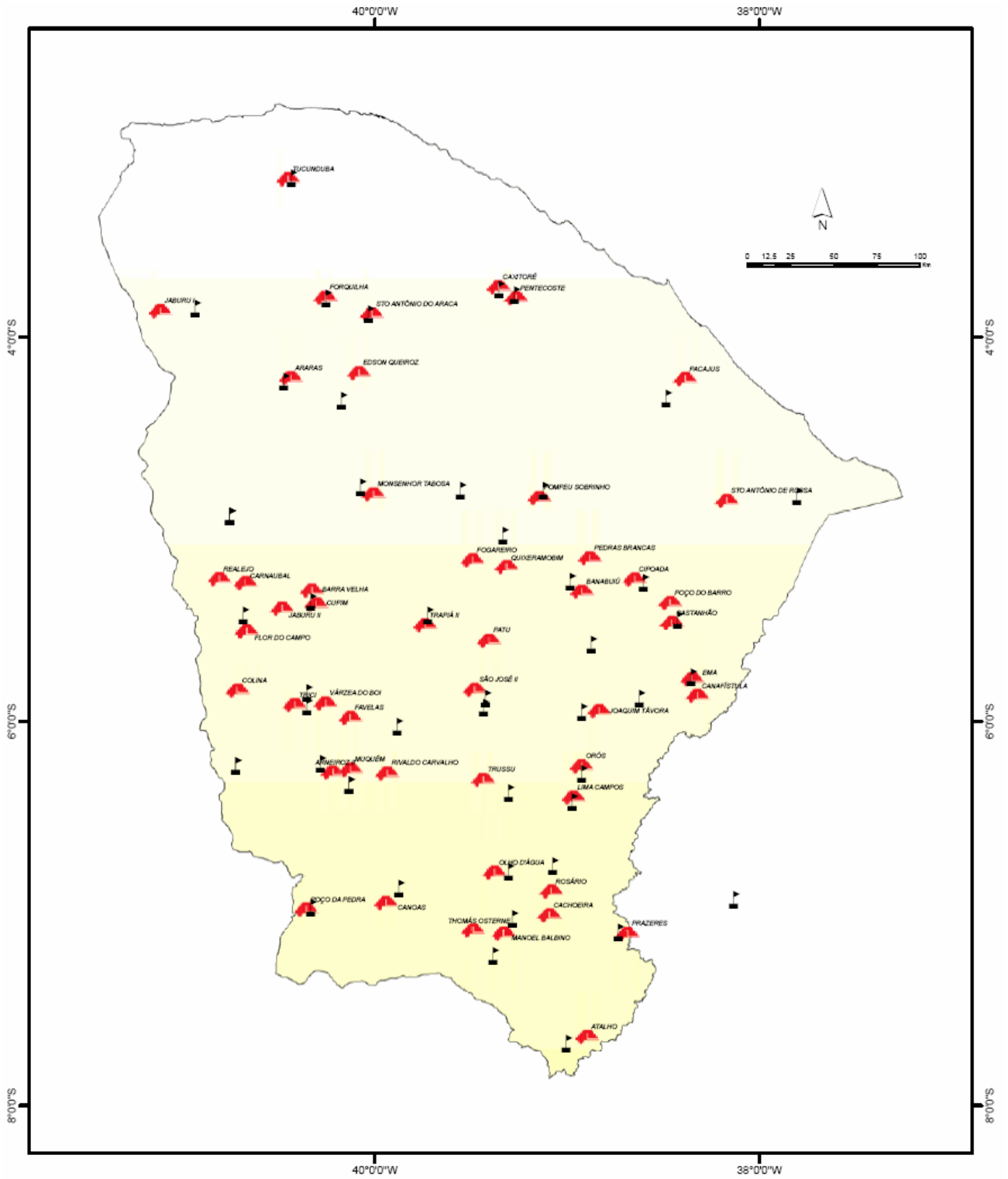
VOSE, D. "Quantitative Risk Analysis". **A Guide to Monte Carlo Simulation Modelling**, England, 1996.

YEVJEVICH, V. "The Aplication of Surplus, Deficit an Range in Hydrology." **Hydrology paper 10** Colorado State University, 1965.

ANEXOS

ANEXO I

Localização dos açudes simulados e dos postos pluviométricos



ANEXO II

Dados cota x volume acumulado (hm³).

Açudes	Cota	Volume (hm³)
Caxitoré *	50	0
	55	10
	60	25
	65	65
	70	140
	75	245
	80	385
	85	500
Quixeramobim *	182	0
	183,5	0,09
	183,6	0,12
	184,5	0,6
	185,5	1,21
	186,5	2,05
	187,5	3,12
	188,5	4,65
	189,5	6,8
	190,5	9,8
	191,5	13,55
	192,5	18
	193,5	23,6
	194,5	29,9
	195,5	36,8
	196,5	44,4
	197,5	54
	201,5	107,52
	203,5	131,76
	206	163,32
	208,5	194,88
	211	226,44
	213,5	258
	216	289,56
	218,5	321,12
	221	352,68
	223,5	384,24
	226	415,8
228,5	447,36	
231	478,92	
233,5	510,48	
236	542,04	
Jaburu I **	675	0
	680	0,17
	685	0,83
	690	3,8
	695	10,4
	700	22,5
	705	43,7
	710	75,4

Açudes	Cota	Volume (hm³)
Realejo *	309	0
	310	0,003
	311	0,0012
	312	0,044
	313	0,132
	314	0,317
	315	0,637
	316	1.162
	317	1.917
	318	2.976
	319	4.400
	320	6,16
	321	8,41
	322	11,23
	323	14,37
	324	17,83
	325	21,83
	Arneiroz *	326
327		31,55
328		37,27
339,5		0
340		0,02
345		3
350		17
355		56
Canoas *	360	129
	365	239
	370	404
	375	500
	350	0
	355	0,01
	360	0,06
	365	0,61
	370	2,39
	375	6,14
380	13,38	
385	25,83	
390	46,78	
393	69,25	
395	83,85	

	715	117,46
	720	169,9
	723,08	210
	724	223

* PERH
** COGERH

Açudes	Cota	Volume (hm³)
Cipoada *	87	0
	88	0,01
	89	0,07
	90	0,3
	91	0,8
	92	1,71
	93	3,02
	94	4,71
	95	6,89
	96	9,67
	97	13,12
	98	17,25
	102	36,86
	104	46,15
	106	58,02
	108	69,89
	110	81,76
	112	93,63
	114	105,5
	116	117,37
	118	129,24
	120	141,11
	122	152,98
Castanhão *	55	0
	60	100
	70	450
	80	750
	85	1200
	90	2000
	100	4450
	110	8700
Carnaubal *	284	0
	285	0,02
	286	0,15
	287	0,49
	288	1,3
	289	2,73
	290	4,79
	291	7,6
	292	11,11
	293	15,54
	294	21,24
	295	28,31

Açudes	Cota	Volume (hm³)
Lima Campos *	163	0
	164	0,02
	165	0,28
	165,8	0,86
	166	1,08
	167	2,45
	168	4,64
	169	8,2
	170	12,51
	171	17,96
	172	24,92
	173	33,82
	174	44,82
	175	58,27
	175,3	64,3
	175,4	66,37
	175,6	74,48
	177	93,65
	178	116,62
	179	142,63
	180	172,49
	181	200
Joaquim Távora *	100	0
	102	0,04
	104	0,6
	106	2,01
	108	4,61
	110	8,7
	112	15,2
	114	23,66
	118	52,49
Favelas *	422	0
	424	0,4
	426	1
	428	2,3
	430	5,2
	432	10,5
	434	18
	436	30
	438	200
Poço da Pedra *	520	0
	525	0,27
	530	2,29

	296	36,89
	297	47,04
	298	58,8
	299	72,3
	300	87,69

	535	34,44
	540	50
	545	78,34
	550	146,97
	555	200

Açudes	Cota	Volume (hm³)
Ema *	11	0
	12	0,01
	13	0,04
	14	0,11
	15	0,27
	16	0,53
	17	0,98
	18	1,66
	19	2,58
	20	3,77
	21	5,24
	22	7,03
	23	9,15
	23,5	10,39
	27,5	22,46
	28	25,36
	29	29,08
	30	32,47
	31	35,94
Pedras Brancas *	100	0
	102	0,03
	104	0,16
	106	0,66
	108	2,2
	110	5,94
	112	12,79
	114	24,84
	116	44,45
	118	75
	120	119,28
	122	178,04
	124	259,17
	125	303,16
	127	434,05
	129	600
Poço do Barro *	105	0
	107,5	0
	108	0,98

Açudes	Cota	Volume (hm³)
Prazeres *	52	0
	55	0,03
	60	0,21
	65	0,65
	70	1,61
	75	3,34
	80	6,26
	85	10,78
	90	17,2
	95	25,82
	98	32,5
	100	38,73
	102	200
Olho d'água *	327	0
	330	0,03
	332,5	0,45
	335	1,61
	337,5	3,46
	340	5,96
	342,5	9,1
	345	12,6
	347,5	16,77
	349,82	21
	350	21,34
	353	200
São José II *	233	0
	235	0,16
	238	1,5
	240	3,03
	245	11,49
	247	17
	250	29,15
	255	60,51
	260	200
Trapiá II *	486	0
	488	0,01
	490	0,05
	492	0,19

	109	1,65
	110	3,2
	111	4,67
	112	6,4
	113	8,64
	114	11,33
	115	14,56
	116	18,26
	117	26,01
	118	28,53
	119	35,06
	120	43,2
	121	200

	494	0,52
	496	1,09
	498	2
	500	3,41
	502	5,31
	504	7,72
	506	10,67
	508	14,13
	510	18,19
	512	22,83
	513	25,44
	515	200

Açudes	Cota	Volume (hm³)
Trici *	417	0
	418	0,01
	419	0,04
	420	0,11
	421	0,2
	422	0,34
	423	0,55
	424	0,85
	425	1,26
	426	1,82
	427	2,59
	428	3,66
	429	5,05
	430	6,88
	431	9,32
	432	12,1
	433	16,5
	433,5	16,5
	434	200
Trussu *	223	0
	225	0,09
	226	0,24
	227	0,47
	228	0,93
	229	1,79
	230	3,09
	231	4,85
	232	7,15
	233	10,1
	234	13,7
	235	17,89
	236	22,54
	237	27,44

Açudes	Cota	Volume (hm³)
Várzea do Boi *	96	0
	97	0,05
	98	0,16
	99	0,29
	100	0,76
	101	1,64
	102	3,24
	103	5,86
	104	9,89
	105	15,27
	106	22,54
	107	31,91
	108	42,18
	109	53
	110	65,46
	111	200
Fogareiro *	207,5	0
	210	0,01
	215,5	0,03
	215	0,14
	217,5	0,66
	220	2,28
	222,5	5,79
	225	12,17
	227,5	22,35
	230	37,87
	232,5	60,7
	236,2	118,81
	237,5	146,08
	240	200,21
	241,6	248,33
	242,5	275,39
	244	500

	238	32,77
	239	38,76
	240	46,13
	241	54,78
	242	64,18
	243	74,59
	244	86,05
	245	98,62
	246	112,15
	247	126,53
	248	142,02
	249	158,64
	250	176,53
	251	195,66
	252	215,9
	253	237,49
	254	263

	245	750,5
	246	980,8
	247	1350
Muquem *	245	0
	250	2,14
	255	7,14
	260	20
	265	40,15
	266,82	47,64
	270	63,5
	275	200

Açudes	Cota	Volume (hm³)
Patu *	100	0
	102	0,07
	104	0,19
	106	0,48
	108	1,02
	110	1,94
	112	3,32
	114	5,3
	116	8,2
	118	12,3
	120	17,7
	122	24,6
	124	35
	126	43,5
	128	56,2
	129,88	70,8
	130	71,8
	132	90,5
	134	112,5
	136	138,5
	138	166,4
	140	202,2
Banabuiú **	90	0
	91	0,01
	92	0,02
	93	0,06
	94	0,16

Açudes	Cota	Volume (hm³)
P. Sobrinho **	200	0
	205	8,5
	207,2	16,5
	208	20,3
	209	25,75
	210	32,75
	211	40,25
	212	50
	213	61,25
	214	73
	215	86,25
	216	102
	217	118
	218	134,2
	218,5	143
Thomás Osterne *	416	0
	422	0,6
	425	1,93
	430	4,5
	435	11,49
	440	24,73
	441	28,1
	445	45,01
	447	200
St. Ant. Russas *	1	0
	2	0,08
	3	0,32

	95	0,36
	96	0,67
	97	1,17
	98	1,93
	99	2,97
	100	4,44
	101	6,47
	102	9,12
	103	12,4
	104	16,5
	105	21,2
	106	26,39
	106,71	30,29
	107,5	41,5
	112,5	111,5
	117,5	201,5
	122,5	321,5
	127,5	521,5
	132,5	751,5
	137,5	1,141
	142,5	1,601
	143,5	1,676

	4	0,89
	5	2,08
	6	3,8
	7	5,79
	8	9,6
	9	15,4
	10	21,77
	11	29,72
	15	82,32
	17	105,15
	19,5	135,4
	22	165,7
	24,5	195,97
	27	226,25
	29,5	256,52
	32	286,8
	34,5	317,07
	37	347,35
	39,5	377,62
	42	407,9
	44,5	438,2
	47	468,5
	49,5	498,72

Açudes	Cota	Volume (hm³)
Pacajus **	22	0
	23	0,01
	24	0,16
	25	0,81
	26	2,87
	27	7,1
	28	13,6
	29	22,6
	30	34,7
	31	50,1
	32	68,9
	33	91,4
	34	117,2
	35	145,4
	36	175,4
	37	207,2
	38	240
	39	278,3
	40	312,9
	41	348,4
	42	384
	43	419,5

Açudes	Cota	Volume (hm³)
Forquilha *	98	0
	99	0,03
	100	0,13
	101	0,44
	102	1,13
	103	2,36
	104	4,25
	105	6,81
	106	10,18
	107	14,4
	108	19,49
	109	25,52
	110	32,43
	111	40,17
	112	50,13
	113	58,61
	114	67,46
	115	76,31
	116	85,16
	117	94,01
	118	102,86
	119	111,71

	44	455,1
	45	490,6
	46	526,2
	47	561,7
	48	597,3
	49	632,8
	50	668,4
Canafístula	90	0
	91	0,026
	92	0,132
	93	0,371
	94	0,819
	95	1,51
	96	2,514
	97	3,881
	98	5,638
	99	7,738
	100	10,2
	101	13,12
	105	33,075

Pentecoste **	39	0
	42	5
	45	25
	48	60
	51	125
	54	220
	58	396
	62	572
	66	748
	70	924
	74	1100
	78	1276
	82	1452
	86	1628
	90	1804
	94	1980

Açudes	Cota	Volume (hm³)
Tucunduba **	98	0
	99	0,1
	100	0,39
	101	1,2
	102	2,55
	103	4,7
	104	7,88
	105	12,1
	106	17,27
	107	23,8
	108	31,3
	109	41,43
	110	52,85
	111	66,21
	112	76,98
	113	88,6
	114	100,22
	115	111,83
	116	123,45
	117	135,06
	118	146,7
	119	158,29
	120	169,9
	121	181,52
	122	193,13
	123	204,75

Açudes	Cota	Volume (hm³)
Mons. Tabosa*	634	0
	642	0,64
	647	2,42
	650	4,83
	652	7,3
	655,1	12,1
	657	15,4
	660	22,72
	665	200
	666	205,3
	667	262,4
	668	319,5
	669	376,6
	670	433,7
	671	490,8
	672	547,9
	673	605
	674	662,1
	675	719,2
	676	776,3
	677	833,4
	678	890,5
	679	947
	680	1005
Cachoeira	287	0
	289	0,55

	124	216,4
	125	227,98
	126	239,6
	127	251,21
	128	262,8
	129	274,44
	130	286,1
	131	297,67
	132	309,3
	133	320,9
	134	332,5
	135	344,13
	136	355,7
	137	367,36
	138	379
	139	390,59
	140	402,2
	141	413,82
	142	425,4

	291	1,25
	293	2,5
	295	5
	297	8,26
	299	12,83
	301	18,55
	303	25,44
	305	34,33
	307	200

Açudes	Cota	Volume (hm³)
Araras	119	0
	120	0,06
	121	0,15
	122	0,6
	123	1,2
	124	1,9
	125	3,73
	126	5,2
	127	7,8
	128	10,9
	129	15,5
	130	20,02
	131	25,9
	132	32,8
	133	41,2
	134	52
	135	64,16
	136	80
	137	98,8
	138	117,9
	139	138
	140	158
	141	187
	142	215
	143	248
	144	286
	145	334,2

Açudes	Cota	Volume (hm³)
Barra Velha	320	0
	321	0,63
	322	1,26
	323	1,88
	324	3,2
	325	5,66
	326	9,43
	327	15,09
	328	22,26
	329	32,07
	330	41,51
	331	56
	332	68,87
	333	86,8
	334	99,5
	334	105,67
	335	126,43
	336	147,19
	337	167,95
	338	188,71
	339	209,47
Colina	88	0
	89	0,008
	90	0,02
	91	0,07
	92	0,16
	93	0,29

	146	392,4
	147	444,6
	148	502
	149	563
	150	629,09
	151	713,8
	152	789,88
	153	1000
	154	1080,4
	155	1199,3
	156	1318,2
	157	1437
	158	1555,9
	159	1674,8
	160	1793,7
	161	1912,6
Atalho II	390	0
	395	1,6
	400	7,25
	405	16,95
	410	30,22
	415	48,7
	420	74,38
	425	108,25
	430	300

	94	0,48
	95	0,86
	96	1,450
	97	2,210
	98	3,250
	99	4,300
	100	5,500
	101	6,800
	102	8,200
	103	10,000
	104	12,600
Ed. Queiroz	175	0
	180	8,9
	185	27,7
	190	63,6
	195	125
	200	221,9
	201	254
	205	385,6

Açudes	Cota	Volume (hm³)
Cupim	90	0
	91	0,02
	92	0,09
	93	0,25
	94	0,56
	95	1,09
	96	1,91
	97	3,06
	98	4,55
	99	6,5
	100	8,14
	101	9,86
	102	11,58
	103	13,3
	104	15,02
	105	16,74
	106	18,46
	107	20,18
	108	21,9
	109	23,62
	110	25,34

Açudes	Cota	Volume (hm³)
Flor do Campo	335	0
	336	0,1
	337	0,3
	338	1,200
	339	2,900
	340	5,500
	341	9,000
	342	13,400
	343	18,800
	344	25,300
	345	32,800
	346	41,800
	347	52,300
	348	64,500
	349	78,300
	350	93,900
	351	111,300
	352	130,600
	353	151,900
	354	175,100
	355	200,100

	111	27,06
	112	28,78
	113	30,5
	114	32,22
	115	33,94
	116	35,66
	117	37,38
	118	39,1
	119	40,82
	120	42,54
	121	44,26
	122	45,98
	123	47,7
	124	49,42
	125	51,14

	356	225,200
	357	257,800
	358	286,300
	359	310,080
	360	335,000
	361	361,000
	362	395,000
Rivaldo Carvalho	0	0
	1	0,015
	2	0,118
	3	0,397
	4	0,94
	5	1,836
	6	3,173
	7	5,039
	7,56	6,428
	8	7,521
	9	10,71
	10	14,69
	12	200

Açudes	Cota	Volume (hm³)
Jaburu II	88	0
	89	0,11
	90	0,27
	91	0,57
	92	1,3
	93	2,95
	94	6,02
	95	10,75
	96	16,65
	97	25
	98	32,8
	99	49,82
	100	67,44
	101	88,69
	101,57	102,9
	102	113,62
	102,08	116
	102,5	127,69
	103	133,17
	104	140,21
	105	147,24
	106	154,28
	107	161,31
	108	168,35
	109	175,38
	110	182,42

Açudes	Cota	Volume (hm³)
Manuel Balbino	397	0
	398	0,01
	399	0,034
	400	0,067
	401	0,109
	402	0,161
	403	0,227
	404	0,32
	405	0,447
	406	0,609
	407	0,81
	408	1,071
	409	1,410
	410	1,846
	411	2,379
	412	2,997
	413	3,751
	414	4,685
	415	5,798
	416	7,086
	417	8,545
	418	10,231
	419	12,193
	420	14,440
	421	16,930
	422	19,667

Orós	162	0
	165	3,41
	170	22,55
	175	77,22
	180	173,85
	185	351,34
	186	413,12
	190	660,22
	195	1183,27
	199.5	1956,26
	200	2038,81
	205	3342,81
	210	5203,57
	215	8000

	423	22,667
	424	25,913
	425	29,421
	426	33,197
	427	37,18
	428	41,400
	429	46,045
	430	50,946
	433	200
Rosário	270	0
	271	0,018
	272	0,059
	273	0,181
	274	0,485
	275	1,051
	276	1,889
	278	4,489
	280	9,200
	282	15,919
	284	24,207
	286	34,545
	288	47,218
	289	54,621
	290	62,978
	291	72,374
	292	82,810
	293	200

Açudes	Cota	Volume (hm³)
St. Ant. Aracatiaçu **	79	0
	80	0,14
	81	0,3
	82	0,55
	83	1,08
	84	1,94
	85	3,05
	86	4,4
	87	6
	88	7,9
	89	10,08
	90	12,94
	91	16,47
	92	20,22
	93	24,34
	94	29
	95	34,5
	96	39,44
	97	44,52

98	49,6
99	54,68
100	59,76
101	64,84
102	69,92
103	75
104	80,08
105	85,16
106	90,24
107	95,32
108	100,4
109	105,48
110	110,56
111	115,64
112	120,72
113	125,8
114	130,88
115	135,96
116	141,04
117	146,12
118	151,2
119	156,28
120	161,36
121	166,44
122	171,52
123	176,6
124	181,68
125	186,76
126	191,84
127	196,92
128	202
129	207,08
130	212,16

ANEXO III

Evaporação mensal medida com atmômetro Piche, em milímetros.

Postos	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Total
Acaraú	153,8	96,2	81,5	76,4	90,9	110,0	154,3	195,1	224,0	242,2	228,5	203,4	1856,3
Barbalha	160,0	124,3	107,7	100,5	145,8	161,3	224,8	268,7	292,8	262,9	223,7	216,1	2288,6
Campos Sales	175,2	119,2	102,0	102,9	154,4	183,4	235,2	302,2	312,7	281,9	275,7	248,8	2493,6
Crateús	213,3	148,5	115,2	96,4	125,5	168,2	268,3	321,6	342,0	398,3	380,3	326,8	2904,4
Fortaleza	120,1	95,5	72,4	68,1	84,6	94,7	118,3	151,8	167,8	173,5	168,1	154,3	1469,2
Guaramiranga	58,8	41,0	29,3	33,1	30,7	33,9	42,8	60,7	73,6	97,6	78,2	75,0	654,7
Iguatu	161,4	113,6	89,5	86,4	100,9	147,1	188,1	217,8	218,9	236,6	214,9	212,8	1988,0
Jaguaruana	195,6	142,5	98,0	91,7	107,0	121,5	161,2	195,1	240,2	230,4	224,9	196,5	2004,6
Morada Nova	207,7	149,8	87,7	90,1	112,4	128,7	179,6	243,8	246,7	279,3	259,9	249,5	2235,2
Quixeramobim	189,0	136,9	102,9	81,8	83,6	108,2	149,0	206,8	245,9	282,3	241,3	241,8	2069,5
Sobral	156,6	125,2	94,6	101,6	99,7	116,6	157,9	191,3	221,3	224,7	220,0	205,2	1914,7
Tauá	220,3	160,9	119,2	129,2	131,7	166,2	225,9	247,9	273,7	307,8	289,7	275,5	2548,0

Fonte: INMET (1990)

ANEXO IV

Relação dos açudes com o respectivo posto pluviométrico e suas coordenadas.

	Açudes	Posto Pluviométrico	Lat. (°)	Long. (°)
1.	Pentecostes	Pentecoste	3-47	39-16
2.	Caxitoré	Caxitoré	3-45	39-21
3.	Edson Queiroz	Santa Quitéria	4-20	40-10
4.	Araras	Araras	4-14	40-28
5.	Forquilha	Forquilha	3-48	40-15
6.	Arneiroz	Arneiroz	6-20	40-08
7.	Canoas	Assaré	6-52	39-52
8.	Rivaldo Carvalho	Arneiroz	6-20	40-08
9.	Favelas	Marruás	6-02	39-53
10.	Muquem	Estreito	6-13	40-17
11.	Oros	Oros	6-16	38-55
12.	Poço da Pedra	Poço da Pedra	6-58	40-20
13.	Trici	Santo Antônio	5-51	40-21
14.	Trussu	Iguatu	6-22	39-18
15.	Várzea do Boi	Várzea do Boi	5-55	40-21
16.	Canafístula	Ema	6-14	40-43
17.	Ema	Ema	5-46	38-21
18.	Castanhão	Jaguaribe	5-53	38-37
19.	Joaquim Távora	Nova Floresta	5-57	38-55
20.	Sto. Ant. Russas	Jaguaruana	4-50	37-48
21.	Cipoada	Carnaúbas	5-17	38-36
22.	Fogareiro	Coroatá	5-02	39-20
23.	Quixeramobim	Madalena	4-48	39-33
24.	Monsenhor Tabosa	Monsenhor Tabosa	4-47	40-04
25.	Pedras Brancas	Pedras Brancas	5-10	38-52
26.	Poço do Barro	Castanhão	5-28	38-25
27.	São José II	Ibicua	5-56	39-26
28.	Trapiá II	Pedra Branca	5-27	39-43
29.	Banabuiú	Banabuiú	5-16	38-59
30.	Patu	Patu	5-53	39-25
31.	Thomas Osterne	Crato	7-13	39-23
32.	Atalho II	Jati	7-41	39-01
33.	Cachoeira	Aurora	6-56	38-08
34.	Olho d'água	Várzea Alegre	6-47	39-18
35.	Lima Campos	Lima Campos	6-25	38-58
36.	Rosário	Patos	6-45	39-04
37.	Manuel Balbino	Caririaçu	7-02	39-17
38.	Prazeres	Cuncas	7-06	38-44
39.	Sto. Ant. Aracatiaçu	Aracatiaçu	3-53	40-02
40.	Pacajus	Chorozinho	4-19	38-29
41.	Pompeu Sobrinho	Pompeu Sobrinho	4-48	39-07
42.	Tucunduba	Tucunduba	3-10	40-26
43.	Carnaubal	Riacho da Mata	4-56	40-45
44.	Jaburu II	Riacho da Mata	4-56	40-45
45.	Jaburu I	Ubajara	3-51	40-56
46.	Colina	Parambu	6-14	40-43

47.	Flor do Campo	Novo Oriente	5-27	40-41
48.	Cupim	Riacho da Mata	4-56	40-45
49.	Realejo	Riacho da Mata	4-56	40-45
50.	Barra Velha	Independência	5-23	40-20

Fonte: SUDENE

ANEXO V

Precipitações médias mensais, milímetros.

Açude	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Total
Caxitoré	60,2	116,9	223,5	201,1	121,4	48,5	30,9	4,0	3,4	3,7	3,4	21,8	825,3
Araras	90,7	142,6	233,8	225,2	101,7	23,2	7,1	1,5	0,3	3,1	6,9	30,1	866,8
Rivaldo Carvalho	73,2	109,3	157,6	106,8	44,8	15,9	7,4	4,1	4,4	8,6	14,3	34,2	577,8
Canafistula	62,1	122,7	214,7	192,4	114,4	47,7	20,5	5,1	2,2	3,6	4,1	18,8	826,1
Cachoeira	107,6	185,1	227,2	180,1	70,4	23,5	7,9	3,2	6,8	14,0	21,2	49,1	870,9
Rosário	99,4	166,1	220,3	161,6	69,2	21,2	11,8	4,0	5,9	9,2	16,9	48,0	829,0
Manuel Balbino	134,6	237,6	273,6	202,0	67,7	28,0	15,9	5,8	8,5	16,8	37,3	66,8	1082,5
Oros	79,8	127,4	221,0	174,4	89,8	26,1	12,4	2,9	4,3	10,2	7,6	27,6	785,9
Atalho II	92,3	123,6	176,1	109,8	36,8	18,1	8,0	1,8	4,9	14,9	40,4	56,8	687,6
Colina	78,3	93,4	146,4	120,4	37,0	9,7	6,9	2,3	4,1	8,6	17,8	39,3	564,7
Cupim	66,6	128,1	166,7	129,7	52,2	18,0	4,9	2,7	0,8	2,4	8,9	25,3	618,0
Flor do Campo	107,5	145,1	224,9	223,2	70,5	21,4	8,2	6,7	3,9	10,1	22,9	50,3	893,0
Jaburu II	107,5	145,1	224,9	223,2	70,5	21,4	8,2	6,7	3,9	10,1	22,9	50,3	893,0
Edson Queiroz	65,0	138,0	237,5	203,4	88,8	23,3	9,4	2,6	0,6	0,9	5,6	22,5	799,3
Pentecoste	56,3	124,2	195,1	201,9	102,5	42,0	22,7	6,8	3,6	2,4	3,9	16,4	798,2
Forquilha	66,8	141,3	224,0	213,3	118,0	24,4	10,7	1,5	1,0	2,1	4,8	19,5	826,4
Arneiroz	73,2	109,3	157,6	106,8	44,8	15,9	7,4	4,1	4,4	8,6	14,3	34,2	577,8
Canoas	90,0	135,2	180,0	122,1	40,5	10,4	5,6	4,6	6,8	13,4	23,2	47,4	679,8
Favelas	61,4	106,0	167,0	144,9	71,8	30,0	19,0	7,0	4,9	7,3	5,5	22,0	633,4
Muquem	77,0	92,5	148,3	140,6	57,0	18,4	7,3	4,9	3,8	5,0	12,1	24,7	607,8
Poço da Pedra	94,6	126,3	180,5	107,5	36,4	7,3	2,5	1,3	2,9	13,9	30,1	52,9	664,5
Trici	51,9	80,9	127,0	99,2	46,7	17,4	7,1	1,8	3,0	2,4	8,6	27,3	485,6
Trussu	98,8	152,3	216,9	155,0	73,7	29,6	12,7	6,5	8,6	12,3	10,2	39,3	800,4
Várzea do Boi	47,1	92,9	130,7	125,2	41,5	20,0	8,0	3,5	5,5	4,8	4,1	17,9	498,9
Ema	62,1	122,7	214,7	192,4	114,4	47,7	20,5	5,1	2,2	3,6	4,1	18,8	826,1
Castanhão	66,2	106,2	183,7	154,5	89,7	29,3	12,7	4,2	3,4	1,5	4,6	17,7	680,7
Joaquim Távora	64,8	120,7	198,4	182,2	104,1	38,9	17,2	4,0	6,2	5,1	9,3	21,5	782,0
St. Ant. Russas	42,7	126,8	208,2	179,1	110,3	46,8	23,4	3,3	2,3	1,6	3,0	12,1	754,7
Cipoda	58,4	107,8	181,3	171,6	112,0	48,5	20,4	3,8	1,5	2,1	7,9	12,0	732,1
Fogareiro	40,8	80,4	133,5	160,3	89,5	43,2	23,1	4,2	1,4	1,0	3,3	14,7	606,6
Quixeramobim	59,6	83,9	156,6	167,4	91,9	42,7	39,7	6,9	0,3	0,4	2,5	18,8	669,7
Monsenhor Tabosa	62,5	107,8	161,1	142,8	81,9	30,2	19,8	6,4	1,4	2,6	5,5	27,4	655,9
Pedras Brancas	67,5	119,5	194,4	188,6	111,9	47,4	25,0	3,8	1,0	1,9	5,0	18,8	785,2
Poço do Barro	94,6	126,3	180,5	107,5	36,4	7,3	2,5	1,3	2,9	13,9	30,1	52,9	664,5
São José II	70,7	115,9	187,0	177,6	108,2	43,9	19,9	10,2	5,1	4,4	9,1	27,7	783,7
Trapiá II	66,1	117,3	184,6	178,1	111,2	70,9	43,3	21,3	9,4	3,9	9,3	21,4	863,3
Banabuiú	59,9	113,5	181,1	157,7	107,3	46,0	25,1	3,1	1,2	2,7	7,8	16,9	678,6
Patu	63,9	100,4	179,8	186,2	109,9	52,9	22,7	12,2	7,5	3,9	7,6	17,7	772,5
Thomas Osterne	150,7	221,5	278,6	181,5	62,5	21,8	8,1	4,5	9,2	26,2	47,7	85,2	1098
Olho d'água	133,0	206,4	245,7	175,7	62,4	27,7	11,1	5,4	10,3	17,8	23,8	57,6	979,3
Lima Campos	81,0	134,2	214,7	167,2	81,3	26,4	13,5	4,4	4,9	10,6	17,2	31,0	784,4
Prazeres	88,3	162,2	216,8	148,2	52,5	24,6	10,4	3,4	4,4	9,8	19,9	37,3	766,7
St. Ant. Aracatiaçu	57,4	103,6	175,1	171,8	107,8	51,5	24,8	4,1	1,1	2,7	6,1	20,4	729,3
Pacajus	52,5	116,8	218,7	196,7	111,2	41,5	17,2	1,9	2,7	2,4	6,7	23,1	794,1
Pompeu Sobrinho	57,4	103,6	175,1	171,8	107,8	51,5	24,8	4,1	1,1	2,7	6,1	20,4	729,3
Tucunduba	88,2	172,0	276,3	254,7	139,9	35,5	11,7	3,0	1,5	0,4	3,7	19,2	1009
Carnaubal	67,0	126,6	219,8	217,4	87,1	21,8	10,4	2,9	0,6	4,9	6,5	44,0	836,0
Jaburu I	67,0	126,6	219,8	217,4	87,1	21,8	10,4	2,9	0,6	4,9	6,5	44,0	836,0
Barra Velha	66,6	128,1	166,7	129,7	52,2	18,0	4,9	2,7	0,8	2,4	8,9	25,3	618,0

Realejo	67,0	126,6	219,8	217,4	87,1	21,8	10,4	2,9	0,6	4,9	6,5	44,0	836,0
---------	------	-------	-------	-------	------	------	------	-----	-----	-----	-----	------	-------

Fonte: SUDENE

ANEXO VI

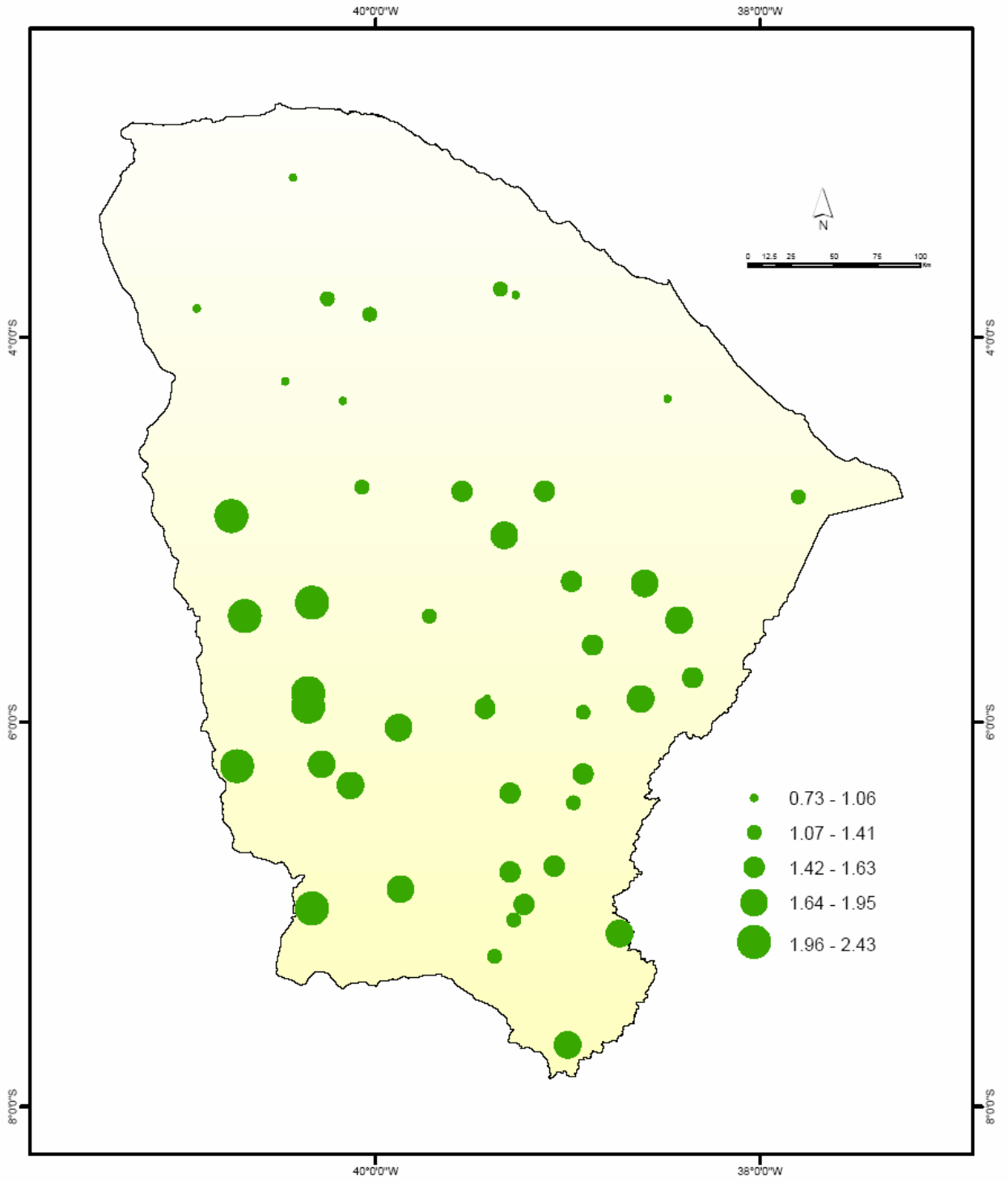
Média (hm^3), desvio (hm^3) e Cv's das séries históricas de vazões.

Açudes	Média (μ)	Desvio(σ)	CV
Arneiroz	151,79	199,54	1,31
Banabuiú	323,55	431,94	1,34
Barra Velha	46,80	61,47	1,31
Edson Queiroz	78,37	108,97	1,39
Flor do Campo	16,05	20,46	1,27
Jaburu I	40,8	25,85	0,63
Canafístula	5,91	11,24	1,90
Oros	1029,1	1446,1	1,41
Cupim	12,95	17,01	1,31
Rosário	6,18	7,75	1,25
Manuel Balbino	0,87	1,12	1,29
Araras	609,9	661,3	1,09
Rivaldo Carvalho	12,34	17,93	1,45
Atalho II	98,24	203,86	2,08
Cachoeira	6,13	7,48	1,22
Canoas	28,26	37,15	1,31
Carnaubal	80,95	103,21	1,27
Castanhão	1463,50	2068,36	1,41
Caxitoré	126,31	151,43	1,20
Cipoada	32,25	49,92	1,55
Ema	9,65	18,38	1,90
Favelas	32,38	52,11	1,61
Fogareiro	262,98	333,29	1,27
Forquilha	29,65	37,19	1,25
Jaburu II	50,81	66,73	1,31
Joaquim Távora	16,13	30,71	1,90
Lima Campos	24,78	27,54	1,11
Monsenhor Tabosa	242,01	304,45	1,26
Muquem	54,52	78,87	1,45
Olho d'água	5,49	8,00	1,46
Pacajus	160,29	126,13	0,79
Patu	55,26	89,65	1,62
Pedras Brancas	158,50	245,32	1,55
Pentecostes	451,66	525,61	1,16
Poço da Pedra	35,14	46,20	1,31
Poço do Barro	29,33	45,55	1,55
Pompeu Sobrinho	19,0	31,45	1,65
Prazeres	6,18	7,75	1,25
Quixeramobim	133,35	176,77	1,33
Realejo	11,72	15,40	1,31
Santo Ant. Russas	92,32	94,26	1,02
São José II	13,88	21,12	1,52

St. Ant. Aracatiaçu	54,03	119,52	2,21
Thomas Osterne	6,34	8,36	1,32
Trapiá	15,03	18,04	1,20
Trici	25,74	40,61	1,58
Trussu	69,86	91,83	1,31
Tucunduba	111,49	116,52	1,05
Várzea do Boi	55,34	89,17	1,61

ANEXO VII

Mapa regionalização das evaporações equivalentes (E_{eq})



ANEXO VIII

Mapa regionalização das Estações Secas

