



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA

**CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
CURSO DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL
CAMPUS II - CAMPINA GRANDE**

**OPERAÇÃO DE RESERVATÓRIOS NO SEMI-ÁRIDO
CONSIDERANDO CRITÉRIOS DE QUALIDADE DE ÁGUA**

ADRIANA DAMASCENO DE MELO

CAMPINA GRANDE

2005

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL
UNIDADE ACADÊMICA DE ENGENHARIA CIVIL
ÁREA DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL**

Adriana Damasceno de Melo

**OPERAÇÃO DE RESERVATÓRIOS NO SEMI-ÁRIDO
CONSIDERANDO CRITÉRIOS DE QUALIDADE DE ÁGUA**

Campina Grande - PB

2005

Adriana Damasceno de Melo

**OPERAÇÃO DE RESERVATÓRIOS NO SEMI-ÁRIDO
CONSIDERANDO CRITÉRIOS DE QUALIDADE DE ÁGUA**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação de Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Campina Grande, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do Título de Mestre em Engenharia Civil e Ambiental, área de Engenharia Sanitária e Ambiental.

Orientadores: Prof^o Dr. Carlos de Oliveira Galvão
Prof^a Dra. Beatriz Susana Ovruski de Ceballos

Campina Grande - PB

2005



FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCC

M528o Melo, Adriana Damasceno de

Operação de reservatórios no semi-árido considerando critérios de qualidade de água / Adriana Damasceno de Melo.- Campina Grande: UFCC, 2005.
88f. : il.

Inclui Bibliografia.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia.

Orientadores: Carlos de Oliveira Galvão,
Beatriz Susana Ovruski de Ceballos.

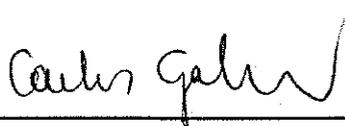
1— Qualidade de água 2— Quantidade de água 3— Gestão integrada 4—
Operação quali-quantitativa de água 5— Reservatórios 6— Semi-árido I — Título

CDU 628.13:504.062.2

Adriana Damasceno de Melo

**OPERAÇÃO DE RESERVATÓRIOS NO SEMI-ÁRIDO
CONSIDERANDO CRITÉRIOS DE QUALIDADE DE ÁGUA**

BANCA EXAMINADORA



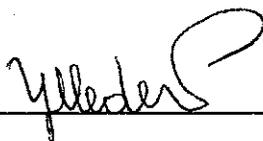
Prof. Dr. Carlos de Oliveira Galvão (orientador)

Universidade Federal de Campina Grande



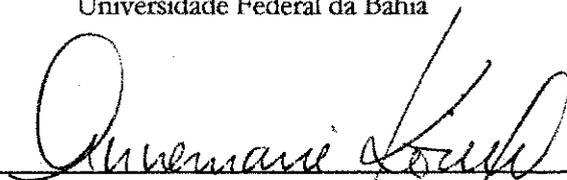
Profa. Dra. Beatriz Susana Ovruski de Ceballos (orientadora)

Universidade Federal de Campina Grande



Profa. Dra. Yvonilde Dantas Pinto de Medeiros (examinador externo)

Universidade Federal da Bahia



Profa. Dra. Annemarie König (examinador interno)

Universidade Federal de Campina Grande

Aos meus pais, Alberto e Valda, pelo exemplo de vida, fé e coragem, pela força tão sublime sem a qual eu nada seria.

AGRADECIMENTOS

Em especial a Deus, Pai de infinita bondade, que permitiu que eu chegasse onde hoje estou. Colocou em meus caminhos, em cada situação deste trabalho, verdadeiros anjos, ajudando e vibrando positivamente para que tudo se encaminhasse. Quando e onde precisei, sempre estive apoiada. Nada seria possível sem a Sua vontade.

Aos meus amados pais e irmãos, por serem meus inseparáveis amigos nas dificuldades do caminho, me dando apoio, força e coragem para seguir adiante. Por acreditarem em mim e me apoiarem em todas as decisões.

Ao orientador, Prof. Dr. Carlos de Oliveira Galvão, pela amizade, paciência, valiosos ensinamentos e conselhos. Toda minha gratidão e admiração.

A Prof. Dra. Beatriz O. de Ceballos, por suas valiosas contribuições para expansão de meus conhecimentos e pelo apoio maternal. Modelo de profissional e amiga.

Aos meus amigos, Renato Mahon, Klécia Forte, Alysson Guimarães, Eudes Moreira e Tatiana Tavares, pela amizade sincera, pela hospitalidade, pelo carinho e pelo apoio incondicional nos difíceis momentos dessa jornada. Pela grande amizade que construímos para sempre.

Aos colegas do Laboratório de Hidráulica 2, Rodolfo, Isabelle, Gustavo, Marília, Iana, Socorro, Ana Cristina, Josivan, Isabel, sem exceção, pela amizade, pela convivência, pelo carinho e apoio.

Aos colegas da Área de Engenharia Sanitária e Ambiental, em especial à Prof^a Dra. Annemarie König, profissional admirável pelo dinamismo, boa vontade e dedicação.

A Dra. Célia Regina Diniz, pela contribuição com os dados em perfil do açude Boqueirão, pela atenção e boa vontade; pela amizade e carinho.

Ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) pelo apoio financeiro para elaboração da presente pesquisa.

A todos aqueles que, direta ou indiretamente, contribuíram para elaboração deste trabalho.

RESUMO

No semi-árido brasileiro, em época de escassez de água, os baixos níveis dos reservatórios influenciam sua qualidade, podendo gerar um quadro de degradação para o corpo hídrico e, até mesmo, inviabilizar a qualidade da água para o tratamento destinado ao abastecimento urbano. Com a intenção de prevenir e mitigar situações de colapso quali-quantitativo de água decorrente de eventos extremos, este trabalho se propôs a conceber um sistema de gestão integrada de qualidade e quantidade de água em reservatórios de abastecimento humano no semi-árido, considerando, em particular, os sistemas de monitoramento de qualidade de água e de previsão hidrometeorológica existentes. O estudo de caso para desenvolvimento e aplicação da metodologia foi o açude Epitácio Pessoa, conhecido popularmente como açude Boqueirão, situado em plena região semi-árida, na Paraíba, responsável pelo abastecimento de água de várias cidades, entre as quais Campina Grande, com mais de 400 mil habitantes. Para construção do sistema de gestão integrada quali-quantitativa foi necessário investigar a possibilidade de modelagem do comportamento qualitativo do reservatório em função de um parâmetro quantitativo. Para isto estudaram-se os dados de qualidade monitorados pela companhia de saneamento (CAGEPA), dados de estudos limnológicos em perfil do reservatório e dados quantitativos fornecidos pelo órgão responsável pelo serviço de monitoramento hidrometeorológico (LMRS/PB). Selecionaram-se os parâmetros qualitativo (Sólidos Dissolvidos Totais - SDT) e quantitativo (variação do nível do reservatório) a serem modelados, foram concebidos um modelo conceitual e um modelo operacional de manejo quali-quantitativo da água para o açude e, por fim, foi proposto um sistema de gestão integrada. As principais conclusões do trabalho foram: (a) é possível implantar modelos de operação quali-quantitativa de água simples e funcionais para reservatórios da região semi-árida do Nordeste em médio prazo que prognostiquem e simulem a qualidade na tomada d'água, a partir da previsão hidrometeorológica e da qualidade atual da água no reservatório, servindo de base nas tomadas de decisões operacionais no manejo do mesmo, tendo em vista que as informações necessárias estarão disponíveis para os principais reservatórios da região; (b) na ausência de rede de monitoramento da qualidade da água, é possível utilizar, para avaliações preliminares, dados provenientes do monitoramento regular que as companhias de abastecimento de água realizam sob exigência da Portaria 518/04 do Ministério da Saúde; (c) os dados das concentrações de SDT em perfil vertical, nos ciclos mensal e nictemeral, da coluna de água do açude Epitácio Pessoa, forneceram informações relevantes e decisivas para elaboração do modelo conceitual de operação de reservatórios no semi-árido proposto neste trabalho, como por exemplo, a definição da estação ideal para realização das descargas de fundo com vistas ao manejo do reservatório para redução das concentrações de SDT.

Palavras-chave: qualidade de água, quantidade de água, gestão integrada, operação quali-quantitativa de água, reservatórios, semi-árido.

ABSTRACT

In the Brazilian semiarid region, during drought periods, the water quality in reservoirs is highly influenced by their low storage levels. Water treatment for urban supply may not be feasible if water quality becomes very low. This dissertation presents a system for the integrated management of water quantity and quality in water supply reservoirs in this region. This system considers, particularly, the regional characteristics of the water quality monitoring network and the seasonal climate forecasting information. Boqueirão reservoir was selected for development and application of the methodology. It supplies the city of Campina Grande and its surroundings, with a population of over 400 thousand inhabitants. To elaborate the integrated management system it was necessary to investigate the possibility of modeling the qualitative behavior of the reservoir and its relationship with a quantitative parameter. For that, quality data monitored by the water supply company (CAGEPA), data from limnology studies in the reservoir and quantitative data supplied by the State water resources department (LMRS/PB) were analyzed. Both the qualitative and the quantitative parameters to be used in the modeling process were selected (respectively, Total Dissolved Solids – TDS – and the monthly reservoir storage level variation). Then a conceptual model and an operational model were conceived and, finally, an integrated management system was proposed. The main conclusions are: (a) it is possible to build such a management system, simple and functional, that considers both water quality and quantity criteria, able to simulate in the medium-term the future water quality in the reservoir intake using the climate forecasts and the present water quality indices in the reservoir, serving as base for operational decision making, since the necessary information will be available for the major reservoirs in the region; (b) in the absence of information from an appropriate water quality monitoring network, it is feasible to use, for the sake of preliminary assessments, the data from the monitoring performed by the water supply companies, as required by the Brazilian Ministry of Health 518/04 Act.; (c) TDS concentration data, measured during monthly and diurnal cycles along the depth in Boqueirão reservoir, supplied relevant and decisive information for the elaboration of the conceptual reservoir operation model proposed in this work, such as, for instance, the definition of the ideal season for accomplishment of the bottom discharges in order to make possible the reduction of the concentrations of TDS.

Keywords: water quality, water quantity, integrated management, quali-quantitative water operation, reservoirs, semiarid.

SUMÁRIO

RESUMO	v
ABSTRACT	vi
LISTA DE FIGURAS	ix
LISTA DE TABELAS	xi
Capítulo 1 – INTRODUÇÃO	1
1.1 Apresentação	1
1.2 Objetivos	3
1.3 Estrutura da Dissertação	3
Capítulo 2 - FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	5
2.1 Qualidade da Água.....	5
2.1.1 Considerações Gerais.....	5
2.1.2 Alterações na Qualidade da Água	8
2.1.3 Sólidos Dissolvidos Totais.....	9
2.1.4 Importância da Determinação de Sólidos.....	12
2.2 Aspectos Legais Relacionados à Conservação da Água Bruta e à Qualidade da Água para o Consumo Humano.....	13
2.2.1 Política Nacional de Recursos Hídricos	14
2.2.2 Normas e Padrão de Potabilidade da Água.....	16
2.2.3 Classificação das Águas	18
2.3 Comportamento da Qualidade da Água em Reservatórios.....	19
2.3.1 Dinâmica dos Lagos e Reservatórios	20
2.3.2 Estratificação.....	23
2.3.3 Salinidade	24
2.3.4 Cálcio, Magnésio, Sódio, Potássio e Cloreto.....	25
2.4 Qualidade e Quantidade de Água na Gestão de Recursos Hídricos	25
2.5 Modelagem Quali-Quantitativa de Água em Reservatórios	27
2.5.1 Integração de Modelos de Qualidade e Quantidade de Água.....	30

2.6 Previsão Meteorológica e Gestão de Recursos Hídricos no Nordeste Brasileiro	32
2.7 Considerações	33
Capítulo 3 - METODOLOGIA	35
3.1 Etapas Metodológicas.....	35
3.2 Estudo de Caso – Açude Epitácio Pessoa	36
3.3 Levantamento dos Dados	38
3.4 Seleção dos Dados.....	41
3.5 Modelagem da Qualidade da Água	42
3.6 Concepção do Modelo de Operação Quali-Quantitativo.....	43
Capítulo 4 - RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	45
4.1 Aspectos Qualitativos do Açude Boqueirão em Termos de SDT	45
4.1.1 Análise dos Dados.....	45
4.1.2 Modelagem da Série Total.....	49
4.1.3 Modelagem das Séries Sazonais.....	51
4.1.4 Análise dos Dados de SDT na Coluna de Água.....	55
4.1.5 Modelo de Descarga de Fundo	60
4.2 Sistema de Gestão Integrada da Qualidade e Quantidade de Água	62
4.2.1 Modelo Conceitual.....	62
4.2.2 Modelo Operacional.....	64
4.2.3 O Sistema Integrado.....	66
Capítulo 5 – CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	69
Capítulo 6 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	72
ANEXOS	78
ANEXO A	79
ANEXO B	82

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 -	Esquema da determinação dos sólidos de uma amostra	10
Figura 3.1 -	Mapa de localização do açude Epitácio Pessoa (Boqueirão) - PB	37
Figura 3.2 -	Representação esquemática das profundidades de coleta dos dados no açude Boqueirão, num ponto próximo à captação de água realizada pela CAGEPA	39
Figura 3.3 -	Esquema para construção de um modelo de operação quali-quantitativo de água em reservatórios do semi-árido	43
Figura 4.1 -	Série histórica completa dos dados de SDT e do volume armazenado no açude Boqueirão adquiridos junto à CAGEPA e ao LMRS/PB, respectivamente. Período de janeiro de 1988 a outubro de 2004	46
Figura 4.2 -	Comportamento das concentrações de SDT em relação ao volume armazenado no açude Boqueirão no período de junho de 1998 a outubro de 2004. Série adotada para modelagem	46
Figura 4.3 -	Correlação entre os dados de SDT observados em campo e os dados de SDT previstos pelo modelo de qualidade de água	50
Figura 4.4 -	Comportamento dos SDT observados ao longo do tempo (SDT _{obs}) e os SDT previstos (SDT _{prev}) pelo modelo de qualidade de água obtido ..	50
Figura 4.5 -	Comportamento das concentrações de SDT em relação ao volume armazenado no açude Boqueirão nas estações secas	51
Figura 4.6 -	Comportamento das concentrações de SDT em relação ao volume armazenado no açude Boqueirão nas estações chuvosas	52
Figura 4.7 -	Relação entre a variação de SDT e a variação do volume armazenado no açude Boqueirão para estação chuvosa	53
Figura 4.8 -	Comportamento da variação de SDT observada ao longo do tempo (var SDT obs) e o comportamento da variação de SDT calculada (var SDT calc) pelo modelo gerado para estação chuvosa	53
Figura 4.9 -	Comportamento da variação de SDT observada ao longo do tempo (var SDT obs) e o comportamento da variação de SDT calculada (var SDT calc) pelo modelo gerado para estação chuvosa incluindo os dados de janeiro/04	54
Figura 4.10 -	Distribuição de SDT ao longo de quatro profundidades (100%, 50%, 1% e 0% de incidência de luz), na coluna de água de um ponto central do açude Boqueirão no período de maio/02 a março/03, no horário de 8 a 10 horas	56

- Figura 4.11** - Comparação da qualidade de água no ponto de captação com a água nas profundidades 1% de luz e fundo, no açude Boqueirão, nos meses de maio/02, novembro/02, janeiro/03 e março/03 57
- Figura 4.12** - Variação vertical e nictemeral das concentrações de SDT nos meses de nov/02 (a), jan/03 (b), maio/02 (c) e mar/03 (d) no açude Boqueirão, em duas estações secas (4.12a e 4.12b) e duas chuvosas (4.12c e 4.12d) .. 59
- Figura 4.13** - Esquema do modelo conceitual de operação quali-quantitativa de água para reservatórios do semi-árido baseado no balanço de SDT 63
- Figura 4.14** - Esquema do modelo operacional quali-quantitativo de água para reservatórios do semi-árido em termos do parâmetro SDT 64
- Figura 4.15** - Organograma do sistema de gestão integrada da qualidade e quantidade de água para reservatórios do semi-árido 67

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 -	Classificação das águas quanto à salinidade segundo o Sistema Internacional de Unidades e a Resolução CONAMA nº 357/05 (anteriormente, Resolução CONAMA 020/86)	12
Tabela 2.2 -	Classes de água doce e seus respectivos usos segundo Resolução CONAMA nº 357/05	19
Tabela 4.1 -	Correspondência entre a porcentagem de luz incidente em diferentes profundidades (100%, 50%, 1% e 0% de incidência de luz) e sua expressão em metros, em um ponto central do açude Boqueirão, em coletas realizadas entre 8 e 10 horas (período de maio/02 a março/03) ...	56
Tabela 4.2 -	Níveis de alerta para operação quali-quantitativa de reservatórios do semi-árido	66

INTRODUÇÃO

1.1 Apresentação

A água tem sido gradativamente reconhecida como um recurso escasso devido à suas limitações quantitativas e qualitativas, sejam de origem natural ou antrópica. A escassez quantitativa da água constitui fator limitante ao desenvolvimento sócio-econômico de uma região e, não menos importante, a escassez qualitativa gera problemas sérios à saúde pública, ao ambiente em geral e à economia.

O semi-árido brasileiro tem como uma de suas características marcantes a alta variabilidade climática espaço-temporal que se manifesta na forma de eventos extremos de seca ou cheias. As secas periódicas de grande intensidade que assolam essa região introduzem significativa vulnerabilidade aos sistemas hídricos, refletindo em impactos traumáticos sobre consideráveis contingentes populacionais.

Com a intenção de reduzir a vulnerabilidade climática a que o semi-árido nordestino está submetido, iniciou-se, em 1909, com a criação do Departamento Nacional de Obras Contra as Secas (DNOCS), na época denominado de Inspeção Federal de Obras Contra as Secas (IFOCS), uma política de açudagem, resultando na implantação da infra-estrutura hídrica hoje existente. Mas somente a construção de reservatórios para armazenamento de água não resolveria o problema da escassez do semi-árido nordestino, que mais tarde foi agravada pela poluição decorrente do aumento da demanda advinda dos mais variados usos a que a água tem sido submetida.

No Nordeste, a variabilidade dos deflúvios, juntamente com as altas taxas de evaporação e o aumento da demanda, acompanhados do declínio da qualidade da água, concorrem decisivamente para que os rendimentos hidrológicos dos açudes sejam baixos. Os reservatórios são ambientes sensíveis e de complexidades física, química e biológica pouco conhecidas. Em época de escassez, os baixos níveis influenciam a qualidade da água, podendo gerar um quadro de degradação para o corpo hídrico e, até mesmo, disponibilizar uma água de qualidade inviável para o tratamento destinado ao abastecimento humano.

Deste modo, deve-se promover o desenvolvimento dos recursos hídricos através do uso racional e sustentável e, para isto, a gestão de recursos hídricos que integre a qualidade e quantidade de água está sendo reconhecida como imperativo social.

Do ponto de vista teórico essa integração quali-quantitativa da água não é difícil, mas na prática é raramente alcançada, porque a abrangência dos estudos das variações qualitativa e quantitativa dos recursos hídricos engloba aspectos climáticos, geomorfológicos e antrópicos, entre outros, além de dependerem de informações confiáveis, tanto no que diz respeito à demanda como à oferta de água.

A oferta de água só poderá ser adequadamente estimada se existirem redes de monitoramento que gerem dados sobre variáveis de interesse no âmbito da quantidade e da qualidade da água, o que ainda não é efetivo no Brasil. Quase a totalidade dos mananciais do Nordeste, por exemplo, necessitam do monitoramento qualitativo, com vistas ao gerenciamento integrado. Entretanto, há, atualmente, avanços institucionais nos Estados do Nordeste no sentido de implantar ou aperfeiçoar suas redes de monitoramento de qualidade de água, incluindo os reservatórios. Além disso, as companhias de abastecimento, por determinação da Portaria nº 518/04 ou por exigências próprias, também realizam monitoramento da qualidade da água bruta dos mananciais.

Por outro lado, já se verificam grandes progressos nas pesquisas relativas à previsão hidrometeorológica de médio e longo prazo. No Nordeste do Brasil através da previsão climática é possível obter um alto acerto na previsão da precipitação para a quadra chuvosa de fevereiro a maio com antecedência de até quatro meses.

A gestão integrada da qualidade e quantidade de água para o semi-árido é uma necessidade real e que demanda de atenção. Para isto é necessária uma visão interdisciplinar que busque integrar os aspectos qualitativos e quantitativos da água dentro da realidade da vulnerabilidade climática do semi-árido nordestino, considerando os atuais contextos técnico, científico e legal em que a gestão dos recursos hídricos se encontra; este é o foco desta dissertação.

O estudo de caso para desenvolvimento e aplicação deste trabalho foi o açude Epitácio Pessoa (Boqueirão) - PB. Trata-se de um reservatório situado em plena região semi-árida, na região dos Cariris Velhos, na Paraíba, a de menor índice pluviométrico do Brasil, responsável pelo abastecimento de água de várias cidades, entre as quais Campina Grande, com mais de 400 mil habitantes.

1.2 Objetivos

Geral

Conceber um sistema de gestão integrada de qualidade e quantidade de água em reservatórios de abastecimento humano no semi-árido nos atuais contextos técnico, científico e legal, considerando, em particular, os sistemas de monitoramento de qualidade de água e de previsão hidrometeorológica existentes. Procura-se prevenir e mitigar situações de colapso quali-quantitativo de água decorrente de eventos extremos.

Específicos

- Estudar o comportamento do parâmetro de qualidade de água Sólidos Dissolvidos Totais no açude Epitácio Pessoa – PB, ao nível de captação e ao longo do perfil vertical da coluna de água, nos ciclos mensais e nictemerais.

- Construir um modelo matemático de qualidade de água para ser utilizado na simulação e/ou previsão qualitativa em reservatórios no semi-árido nordestino.

- Construir um modelo simples e prático de operação de reservatórios no semi-árido, que apóie a gestão integrada quali-quantitativa de água utilizando informações sobre a previsão hidrometeorológica.

1.3 Estrutura da Dissertação

Inicia-se, no Capítulo 2, pela revisão dos aspectos de relevância para compreensão do comportamento dos corpos hídricos lênticos, com ênfase aos reservatórios do semi-árido nordestino e ao parâmetro de qualidade Sólidos Dissolvidos Totais (SDT), bem como trata também da operação de reservatórios considerando aspectos qualitativos e quantitativos de água. No mesmo capítulo, há uma breve abordagem sobre a previsão meteorológica no semi-árido nordestino e os aspectos legais e institucionais relacionados à conservação da água destinada ao consumo humano.

A metodologia empregada no trabalho é descrita em detalhes no Capítulo 3. Apresentam-se os procedimentos seguidos desde a seleção, análise e modelagem dos dados quali-quantitativos de água até a construção do modelo de operação para a gestão integrada de reservatórios de abastecimento humano no semi-árido.

O Capítulo 4 apresenta e discute os resultados da aplicação da metodologia, buscando compreender e modelar o comportamento quali-quantitativo do reservatório estudo de caso a partir de dados de qualidade monitorados pela companhia de saneamento, dados de estudos limnológicos e informações sobre a previsão hidrometeorológica, com vistas à elaboração do sistema de gestão integrada da qualidade e quantidade de água. As conclusões e recomendações constam no Capítulo 5.

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A água é um bem precioso e insubstituível, insumo básico essencial à vida em todas as suas formas. Além de ser um elemento vital para existência da própria vida na Terra, a água é um recurso natural que pode propiciar saúde, conforto e riqueza ao homem, por meio de seus incontáveis usos, dos quais se destacam o abastecimento das populações, a irrigação, a produção de energia, a navegação, o uso industrial, pesca e lazer.

A água doce, presente em rios, lagos e lençóis subterrâneos, é essencial à maior parte das atividades humanas, e, no entanto, trata-se de um bem escasso: corresponde a menos de 0,3% do volume total da água do planeta. E, por ser depositária de boa parte dos resíduos gerados pelas atividades humanas, a água doce de boa qualidade torna-se cada vez mais rara (BEZERRA & MUNHOZ, 2000).

A disponibilidade de água em qualidade e quantidade adequadas para os diversos usos é um fator determinante no processo de desenvolvimento econômico e social de uma comunidade. Atender a esta demanda constitui um dos maiores desafios do homem na atualidade, devido ao comprometimento da qualidade e à escassez crescente das águas.

Neste capítulo serão abordados os aspectos qualitativos da água, em especial o que diz respeito ao parâmetro Sólidos Dissolvidos Totais (SDT); aspectos legais voltados à conservação da sua qualidade; a qualidade da água em reservatórios; aspectos quali-quantitativos na gestão de recursos hídricos; a construção de modelos operacionais que integre os aspectos qualitativos e quantitativos da água de reservatórios para a gestão de recursos hídricos e sobre a previsão meteorológica na gestão de recursos hídricos.

2.1 Qualidade da Água

2.1.1 Considerações Gerais

Qualidade é definida através de um conjunto de parâmetros mensuráveis que, apresentando valores compatíveis com a legislação ou com os padrões pré-estabelecidos, será

qualidade boa, caso contrário, será melhor ou pior que o esperado. Quando se refere a “qualidade da água” é difícil encontrar uma definição simples e completa devido à grande complexidade de fatores determinantes e a grande quantidade de opções de variáveis disponíveis para descrever as condições de um corpo d’água. Além disso, a qualidade da água vai depender também do uso que se quer dar a essa água.

Assim, Araújo & Santaella (2003) definem qualidade da água como o termo empregado para expressar a adequabilidade desta para os mais diversos fins: abastecimento doméstico, uso industrial e agrícola, para recreação, dessedentação animal, aquicultura, piscicultura, etc. A avaliação da qualidade da água é, portanto, o estudo das características físicas, químicas e biológicas da água, relativas aos efeitos humanos e usos propostos, particularmente aqueles que afetam a saúde pública e do ecossistema em si (GASTALDINI & MENDONÇA, 2001).

Os parâmetros que representam as características físicas, químicas e biológicas da água são indicadores da sua qualidade e constituem impurezas quando alcançam valores superiores aos estabelecidos para determinado uso (CALIJURI & OLIVEIRA, 2000). Por exemplo, uma água bruta destinada ao consumo humano não pode ter uma concentração de SDT superior a 500 mg/L segundo as Resoluções CONAMA n° 020/86 e n° 357/05, apesar da Portaria n° 518/04 do Ministério da Saúde, no seu artigo 16°, aceitar a concentração de até 1000 mg/L de SDT na água depois de tratada para abastecer a população.

A qualidade do meio ambiente aquático apresenta variações temporais e espaciais devido a fatores internos e externos ao corpo d’água, seja de origem natural ou antrópica, o que torna a avaliação da qualidade de um corpo hídrico complexa. Portanto, quando se realiza o monitoramento da qualidade da água a função é verificar as tendências da qualidade do meio aquático e observar como este está sendo afetado por contaminantes, atividades antrópicas e/ou processos de tratamento de efluentes, e a avaliação da qualidade da água tem o objetivo de verificar se a qualidade está adequada a determinado uso (GASTALDINI & MENDONÇA, 2001).

A descrição da qualidade de um corpo hídrico pode ser feita de várias formas, tais como análises físicas e químicas, testes biológicos, ou por descrições semi-quantitativas e qualitativas como índices bióticos, levantamento de espécies e odores (*Ibid*, 2001), podendo, as determinações, serem realizadas no campo ou em laboratório. Os principais parâmetros físicos, químicos e biológicos que definem a qualidade da água são: cor, turbidez, pH, alcalinidade, dureza, demanda química de oxigênio (DQO), demanda bioquímica de oxigênio (DBO), oxigênio dissolvido (OD), nitratos, nitritos, amônia, nitrogênio total, sílica reativa, cloretos, sulfatos,

fosfatos, metais pesados, sólidos, coliformes, fertilizantes, pesticidas, fitoplâncton, zooplâncton, clorofila a., penetração de luz e produção primária.

A avaliação completa de qualidade da água deve ser fundamentada nos componentes hidrológico, físico e químico e biológico (GASTALDINI & MENDONÇA, 2001):

a) Variáveis hidrológicas

É essencial o conhecimento do regime hidrológico para a discussão sobre as análises de qualidade da água e dos impactos de lançamento de efluentes sobre os corpos receptores. Assim, medições de vazões são necessárias para cálculos de fluxo de massa e de balanço de massa utilizados em modelos de qualidade de água. As principais variáveis hidrológicas são:

Velocidade – a capacidade do corpo hídrico de assimilar e transportar poluentes depende da sua velocidade de fluxo.

Descarga líquida – é dada pelo volume de fluxo por unidade de tempo. A descarga influencia na quantidade de sólidos dissolvidos e em suspensão em um corpo d'água.

Nível d'água – o acompanhamento do nível d'água é fundamental para definição do regime hidrológico em lagos, reservatórios e lençóis freáticos.

Transporte sólido – consiste em material particulado em suspensão transportado pelo corpo aquático. Esse material é originado da erosão da superfície do solo da bacia hidrográfica, do desbarrancamento de margens, da ressuspensão de material do fundo e do lançamento de efluentes no corpo hídrico.

b) Características físicas e químicas

As condições climáticas, geomorfológicas e geoquímicas existentes na bacia de drenagem do corpo d'água determinam suas características individuais físicas e químicas. Assim, parâmetros como sólidos dissolvidos totais, condutividade e potencial redox fornecem uma classificação geral dos corpos d'água. O conteúdo mineral, avaliado pela determinação do total de sólidos dissolvidos, é uma característica essencial da qualidade de um corpo d'água, resultante do balanço entre dissolução e precipitação. O oxigênio dissolvido é outro componente vital para qualquer corpo d'água, por ser essencial às formas de vida biológica aeróbia e por influenciar nos processos metabólicos e na solubilidade de metais. Material particulado é um importante fator para a qualidade de água, por influenciar nos processos de adsorção-desorção.

c) Características biológicas

O desenvolvimento da flora, fauna e de microrganismos em águas superficiais é governado por uma grande quantidade de condições ambientais que vão definir e selecionar as espécies e as atividades fisiológicas dos organismos individuais naquele ambiente aquático. Assim, a produção primária de matéria orgânica, na forma de fitoplâncton e macrófitas, por exemplo, é mais intensa em lagos e reservatórios e mais limitada em rios. A qualidade de um corpo d'água em função de suas características físicas e químicas podem ser avaliadas por métodos analíticos, mas para a caracterização biológica é necessária uma descrição qualitativa e quantitativa.

2.1.2 Alterações na Qualidade da Água

O ciclo hidrológico é o princípio unificador fundamental de tudo o que se refere à água no planeta. Os processos de evaporação e precipitação no ciclo hidrológico agem como um gigantesco destilador fazendo com que circule água pura. No entanto, a água só é realmente “pura” quando encontrada no estado de vapor, pois as impurezas começam a se acumular assim que a condensação ocorre. Na atmosfera, gases dissolvem-se nas gotas de chuva e, estas, uma vez que atingem a superfície, dissolvem substâncias do solo adquirindo outras impurezas como cálcio, magnésio, sódio, bicarbonatos, cloretos, sulfatos e nitratos; aparecem também traços de alguns metais como chumbo, cobre, manganês, e uma série de compostos orgânicos provenientes em grande parte dos processos de decomposição que ocorrem no solo. As águas superficiais e subterrâneas passam a ter impurezas que sofrerão variações com a geologia local, vegetação e clima (PORTO *et al.*, 1991). A tudo isso se somam ainda os mais diferentes compostos provenientes das atividades humanas que afetam o ar, o solo e a água.

A composição da chuva varia com as condições meteorológicas (intensidade, duração e tipo de chuva, regime de ventos, estação do ano, etc.), com a presença ou não de vegetação e também com a presença de carga poluidora. Próximo ao oceano, a água da chuva apresenta características semelhantes à água do mar com concentrações proporcionais de elementos como sódio, potássio, magnésio, cloro e cálcio; distante da costa, os elementos presentes são provenientes de partículas do solo que podem conter sílica, alumínio e ferro, por exemplo, e elementos cuja emissão é de origem biológica, como nitrogênio e enxofre. Em áreas de centros urbanos e pólos industriais podem ser encontrados, nas águas da chuva, poluentes como dióxido de enxofre (SO₂), óxidos de nitrogênio (NO_x), ou ainda chumbo, zinco e outros, reflexo das condições da qualidade do ar (PORTO *et al.*, 1991).

A qualidade das águas superficiais é bastante influenciada pela composição da água da chuva. Segundo Tundisi *et al.* (2002), Esteves (1998) e Wright (1981c) as chuvas são responsáveis pelo carreamento de grande variedade de íons para dentro do corpo hídrico; o que depende do clima e da litologia da região, da vegetação circundante, do ecossistema aquático (lótico ou lêntico) e do uso e ocupação que se faz do solo da bacia hidrográfica. A água da chuva ao atingir o solo e escoar sobre ele proporciona dissolução e arraste de materiais diversos para os rios, lagos e oceanos. Assim, as impurezas comumente encontradas nas águas superficiais incluem íons como cálcio, magnésio, sódio, potássio, bicarbonatos, cloretos, sulfatos, nitratos e outros; aparecem ainda traços de chumbo, cobre, arsênio, manganês, e um largo espectro de compostos orgânicos. Os compostos orgânicos são provenientes da decomposição da matéria orgânica de origem animal e vegetal, e podem incluir resíduos de áreas agrícolas e despejos de efluentes de origem doméstica e industrial, podendo incluir desde ácidos húmicos até compostos orgânicos sintéticos como detergentes, pesticidas e solventes (PORTO *et al.*, 1991).

Em se tratando de lagos ou reservatórios, as primeiras chuvas, principalmente, causam maior turbulência e trazem maior carga de SDT, tendo em vista que vêm lavando a bacia hidrográfica e alcançam o corpo hídrico ainda com reduzido volume, podendo até mesmo ressuspender material das zonas mais profundas.

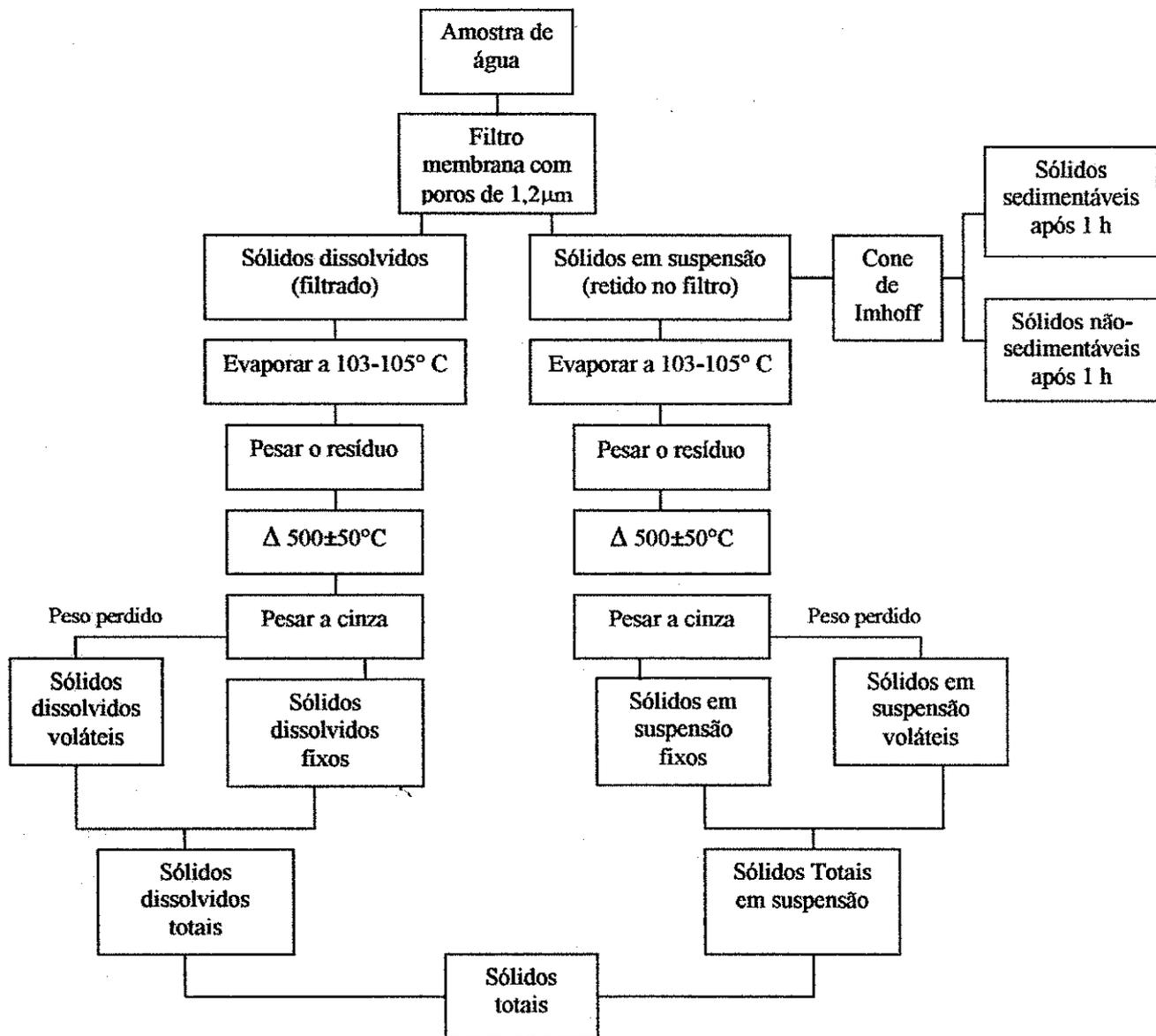
2.1.3 Sólidos Dissolvidos Totais

Todas as impurezas da água contribuem para a carga de sólidos presentes nos corpos d'água. Assim, a natureza dos materiais sólidos dissolvidos e não dissolvidos é muito variável e ocorrem em grande quantidade, apresentando uma ampla variedade de materiais orgânicos e inorgânicos, sendo, portanto, difícil de quantificar e caracterizar.

Na determinação de sólidos, os testes são empíricos em caráter e relativamente fáceis de serem realizados. Os métodos gravimétricos são usados para quase todas as determinações de sólidos, com exceção dos sólidos sedimentáveis e da estimativa de sólidos dissolvidos pela medida de condutividade específica. Os maiores problemas nas análises de sólidos dizem respeito aos testes específicos destinados a informar sobre a quantidade dos vários tipos de sólidos presentes, como por exemplo: dissolvidos, suspensos, voláteis e fixos (SAWYER *et al.*, 1994).

Em geral, quando se fala em sólidos presentes em uma amostra de água, refere-se à matéria que permanece como resíduo após evaporação e secagem a uma temperatura entre 103° e 105°C (SILVA & OLIVEIRA, 2001; APHA, 1998; SAWYER *et al.*, 1994). Os sólidos podem ser

classificados, na prática, de acordo com seu tamanho (sólidos suspensos e dissolvidos) e características químicas (sólidos voláteis e fixos), como descrito na Figura 2.1.



FONTE: Adaptado de Porto *et al.* (1991).

Figura 2.1 – Esquema da determinação dos sólidos de uma amostra

Os sólidos dissolvidos incluem os colóides e os efetivamente dissolvidos. A separação entre sólidos em suspensão e sólidos dissolvidos é feita utilizando-se uma membrana filtrante com poro igual a 1,2 µm. Qualquer partícula que passe pela membrana é considerada dissolvida e, aquela que fica retida, é considerada em suspensão (SILVA & OLIVEIRA, 2001; APHA, 1998; SAWYER *et al.* 1994).

Quanto à caracterização química, os sólidos podem ser classificados em voláteis e fixos. Com a calcinação da amostra a 500±50°C, o resíduo, na forma de cinza, é considerado o material

sólido fixo, admitido, no geral, como sendo o material inorgânico da amostra. O material que foi perdido com a calcinação são os sólidos voláteis, a parte orgânica da amostra. Entretanto, é impreciso caracterizar-se os sólidos voláteis unicamente como orgânicos, pois existem alguns sais minerais que se volatilizam a essas temperaturas (APHA, 1998; SAWYER *et al.* 1994).

Os sólidos dissolvidos totais consistem em sais inorgânicos e pequenas quantidades de matéria orgânica. Os principais íons presentes em lagos, responsáveis pela formação de sais na água são os cátions: cálcio (Ca^{2+}), magnésio (Mg^{2+}), sódio (Na^+), potássio (K^+), ferro (Fe^{3+}) e manganês (Mn^{2+}); e os ânions: cloreto (Cl^-), sulfato (SO_4^{2-}), carbonato (CO_3^{2-}) e bicarbonato (HCO_3^-). Vários fatores podem influenciar na composição iônica dos corpos d'água, como: a geologia da área de drenagem dos afluentes, a geologia da bacia de acumulação do lago e o regime de chuvas, sendo que se deve levar em conta também, o tipo e grau de influência antrópica a que esses corpos aquáticos estão submetidos (ESTEVEZ, 1998).

Em água potável, a maioria dos materiais está na forma dissolvida, usualmente numa concentração entre 20 e 1000 mg/L (SAWYER *et al.*, 1994). Em todos os outros meios líquidos, a quantidade de material suspenso e de colóides não-dissolvidos contribuem com a degradação e poluição. Os lodos representam um caso extremo em que a maior parte do material sólido se encontra sob a forma não-dissolvida e a fração dissolvida é de menor importância.

Excesso de sólidos dissolvidos na água pode causar alterações de sabor e problemas de corrosão de tubulações e equipamentos hidráulicos. Para águas de abastecimento, permite-se um valor máximo de 500 mg/L de sólidos dissolvidos totais (Resolução CONAMA n° 020, de 18/06/86, atual Resolução CONAMA n° 357, de 17/03/05). Quanto aos sólidos em suspensão, estes são limitados na legislação através dos valores de turbidez. Como dito, sólidos em suspensão aumentam a turbidez prejudicando aspectos estéticos da água e a produtividade do ecossistema pela diminuição da penetração da luz (PORTO *et al.*, 1991).

A concentração de sólidos dissolvidos totais em amostras de águas superficiais podem dar uma idéia das taxas de intemperização das rochas através da caracterização química desses sólidos. Sabe-se que a parte fixa dos sólidos dissolvidos representa o material inorgânico da amostra, assim, em regiões com altos índices pluviométricos e com rochas insolúveis como o granito, o escoamento superficial apresentará baixos valores de sólidos dissolvidos totais se comparados com amostras de regiões onde há presença de rochas como o arenito. Ou seja, pode-se caracterizar a litologia de uma região através dos íons mais freqüentemente encontrados na água (PORTO *et al.*, 1991). Lembrando que parte dos sólidos dissolvidos totais é referente à matéria orgânica (trata-se da fração volátil), que poderá apresentar-se em maior ou menor

quantidade de acordo com o uso e ocupação do solo da bacia hidrográfica desse corpo hídrico. A salinidade está incluída nos sólidos dissolvidos totais, pois, usualmente, a parte fixa dos sólidos dissolvidos é a principal contribuição à salinidade da água (SAWYER *et al.*, 1994).

2.1.4 Importância da Determinação de Sólidos

A influência dos fatores antrópicos na qualidade das águas (uso e ocupação do meio físico e as atividades sócio-econômicas) é de importância crescente, tornando-se necessário distinguir as características naturais da água daquelas geradas pela ação do homem.

A classificação mundial das águas é feita com base nas suas características naturais de salinidade em: água doce, salobra e salina (REBOUÇAS, 2002). O Sistema Internacional de Unidades (SI) determina essa classificação das águas mundiais, com maior precisão, segundo o teor de Sólidos Dissolvidos Totais (SDT), pois os constituintes em solução na água não são somente sais. Diferentemente, a legislação ambiental vigente no Brasil (Resolução CONAMA n° 357/05) classifica as águas do território brasileiro de acordo com a sua salinidade, como pode ser observado na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Classificação das águas quanto à salinidade segundo o Sistema Internacional de Unidades e a Resolução CONAMA n° 357/05 (anteriormente, Resolução CONAMA 020/86)

	SI (mg/L)	CONAMA (‰)
Água doce	SDT inferior a 1.000	Salinidade igual ou inferior a 0,5
Água salobra	SDT entre 1000 e 10.000	Salinidade entre 0,5 e 30
Água salina	SDT acima de 10.000	Salinidade igual ou superior a 30

FONTE: adaptado de Rebouças (2002).

A determinação de sólidos dissolvidos totais é importante para verificar a conveniência de uma água para o abastecimento humano, animal, para a irrigação e para a indústria. Em casos em que é necessário reduzir a agressividade da água, o tipo de procedimento a ser usado será definido pelo conteúdo de sólidos totais que a compõem. O controle da corrosão é freqüentemente realizado por meio da produção de água estabilizada através do ajuste do pH, da alcalinidade e da temperatura que dependem desses compostos que integram os denominados sólidos totais, dentre eles ácidos minerais fortes, ácidos fracos e sais hidrolisáveis, tais como os sulfatos de alumínio e de ferro, carbonatos, bicarbonatos e hidróxidos (SAWYER *et al.*, 1994).

2.2 Aspectos Legais Relacionados à Conservação da Água Bruta e à Qualidade da Água para o Consumo Humano

O homem tem percebido, nas últimas décadas, que seu padrão de desenvolvimento significa risco para a permanência da sua espécie caso continue o aumento populacional, a crescente necessidade de produção de insumos agropecuários e de bens de consumo, com a conseqüente degradação do meio ambiente. Compreendeu que o caminho para garantir a qualidade de vida para as presentes e futuras gerações é a busca do desenvolvimento em harmonia com as limitações ecológicas dos recursos naturais. A água é, dentre os recursos naturais, aquele que merece especial atenção por ser fundamental na preservação da vida tendo em vista que se trata do solvente universal, constituindo cerca de 60 a 70% do peso do ser humano e até 90% em alguns animais (TUNDISI, 2003).

A Conferência Mundial sobre o Meio Ambiente Humano, em Estocolmo (Suécia, 1972), foi o primeiro fórum mundial a debater questões ambientais. Um dos temas foi a água, embora sem grande relevo. Nos 20 anos que se seguiram, os recursos hídricos foram discutidos em reuniões, simpósios e congressos locais, regionais e internacionais. A partir da Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente e Desenvolvimento, na cidade do Rio de Janeiro (ECO-92), as reuniões específicas sobre recursos hídricos, com destaque para a hidrologia, a limnologia e a qualidade física, química e sanitária, tornaram-se mais freqüentes, em níveis nacionais, continentais e mundial; foram promovidas e aprimoradas leis específicas para águas em diversas nações (BERBERT, 2003).

Vários eventos foram e são promovidos, buscando esforços cada vez maiores para a conscientização sobre os recursos hídricos, mas, de todos eles, a Conferência do Rio de Janeiro foi o que produziu o documento mais completo de recomendações, denominado Agenda 21. Esta apresenta de maneira abrangente as propostas de trabalho acordadas para sete das principais áreas que envolvem os setor de água doce (AGENDA 21 GLOBAL, 1992):

- Desenvolvimento e manejo integrado dos recursos hídricos.
- Avaliação dos recursos hídricos.
- Proteção dos recursos hídricos, da qualidade da água e dos ecossistemas aquáticos.
- Abastecimento de água potável e saneamento.
- Água e desenvolvimento urbano sustentável.
- Água para produção sustentável de alimentos e desenvolvimento rural sustentável.

- Impactos da mudança do clima sobre os recursos hídricos.

As propostas da Agenda 21 objetivam garantir que se mantenha uma oferta adequada de água de boa qualidade para toda a população do planeta, preservando, ao mesmo tempo, as funções hidrológicas, biológicas e químicas dos ecossistemas, adaptando as atividades humanas aos limites da capacidade da natureza e combatendo vetores de moléstias relacionadas com a água. Suas propostas incentivam a criação de tecnologias inovadoras, inclusive o aperfeiçoamento de tecnologias nativas para aproveitar plenamente os recursos hídricos limitados e protegê-los da poluição (AGENDA 21 GLOBAL, 1992).

No Brasil, embora a base legal de aproveitamento dos recursos hídricos exista desde 1934, no Código de Águas, foi somente depois da edição da nova Constituição Federal de 1988 e da Conferência da ONU sobre Desenvolvimento Sustentável no Rio de Janeiro (ECO-92), é que teve início o avanço nas questões legais pertinentes às águas. O marco inicial de uma nova fase para os recursos hídricos brasileiros foi a criação da Lei nº 9.433, de 08/01/97, que instituiu os instrumentos e as instituições essenciais à gestão dos recursos hídricos. A criação da Secretaria de Recursos Hídricos (SRH), no Ministério do Meio Ambiente (MMA), e da Agência Nacional de Águas (ANA) constituíram o segundo grande marco desse processo legal (BERBERT, 2003).

Adiante são abordados alguns aspectos legais que norteiam as ações e a postura da sociedade e dos órgãos responsáveis pela gestão dos recursos hídricos ante a qualidade da água. É dada ênfase à conservação da água bruta e à qualidade da água para o consumo humano no âmbito nacional.

2.2.1 Política Nacional de Recursos Hídricos

A Lei 9.433, de 08/01/97, que dispõe sobre a Política Nacional de Recursos Hídricos, estabelece meios legais e direciona a sociedade brasileira para um novo modelo de gestão das águas. Em seu Capítulo III, Título I, define as diretrizes gerais de ação para a implementação da Política Nacional de Recursos Hídricos (BRASIL, 1997):

Art. 3. Constituem diretrizes gerais de ação para implementação da Política Nacional de Recursos Hídricos:

- I - a gestão sistemática dos recursos hídricos, sem dissociação dos aspectos de quantidade e qualidade;*
- II - a adequação da gestão de recursos hídricos às diversidades físicas, bióticas, demográficas, econômicas, sociais e culturais das diversas regiões do País;*
- III - a integração da gestão de recursos hídricos com a gestão ambiental;*

IV - a articulação do planejamento de recursos hídricos com o dos setores usuários e com os planejamentos regional, estadual e nacional;

V - a articulação da gestão de recursos hídricos com a do uso do solo;

VI - a integração da gestão das bacias hidrográficas com a dos sistemas estuarinos e zonas costeiras.

A diretriz geral estabelecida pela Lei 9.433/97, que trata da “gestão sistemática dos recursos hídricos, sem dissociação dos aspectos de quantidade e qualidade” (artigo 3º, inciso I), é de muita importância para que haja maior integração desses aspectos no âmbito institucional, tendo em vista que a qualidade e quantidade de água muitas vezes são tratadas em diferentes instituições da administração pública. Enfatizar a integração quantidade-qualidade dos recursos hídricos remete à necessidade de melhorar a articulação Ambiental-Política das águas (CAMPOS, 2003) para, então, ser possível obter maiores avanços técnicos e científicos no gerenciamento quali-quantitativo dos corpos hídricos.

No Capítulo IV, Título I, da Lei 9.433/97, são definidos os cinco instrumentos da Política Nacional de Recursos Hídricos (BRASIL, 1997):

Art. 5º. São instrumentos da Política Nacional de Recursos Hídricos:

I - os Planos de Recursos Hídricos;

II - o enquadramento dos corpos de água em classes, segundo os usos preponderantes da água;

III - a outorga dos direitos de uso de recursos hídricos;

IV - a cobrança pelo uso de recursos hídricos;

V - a compensação a municípios (art. 24º, vetado);

VI - o Sistema de Informações sobre Recursos Hídricos.

O “enquadramento dos corpos de água em classes, segundo seus usos preponderantes” é adotado pela Lei 9.433/97 como um instrumento de gestão de recursos hídricos, mas a competência para o enquadramento nas classes definidas pela Resolução CONAMA 020/86 (atual CONAMA 357/05) é dos órgãos ambientais. A Lei 9.433/97 objetiva com esse instrumento assegurar que os corpos de água tenham qualidade compatível com os usos que lhes forem atribuídos e agir preventivamente para reduzir custos com tratamento de água e combate à poluição (artigo 9º, incisos I e II).

Quanto a considerar o “enquadramento dos corpos de água em classes” como instrumento de gestão propriamente dito, não há um consenso nos meios técnicos (CAMPOS, 2003). Olhando pelo lado de que o enquadramento dispõe sobre os padrões de qualidade dos corpos de água, ele poderia ser classificado como um instrumento. Por outro lado, quando se considera o enquadramento como um padrão de qualidade que se deseja alcançar para o corpo de água, o mesmo poderia também ser classificado como uma meta ambiental (RIBEIRO, 2000).

2.2.2 Normas e Padrão de Potabilidade da Água

O padrão de potabilidade da água para consumo humano, em vigor no Brasil, é o estabelecido pelo Ministério da Saúde através da Portaria nº 518, de 25 de março de 2004. Esta Portaria estabelece, além do padrão de potabilidade, os procedimentos e responsabilidades relativos ao controle e vigilância da qualidade da água para consumo humano. Apresenta requisitos para características físicas e organolépticas (cor, turbidez, odor e sabor), características químicas (54 substâncias potencialmente tóxicas, dentre substâncias orgânicas, inorgânicas, agrotóxicos, cianotoxinas e outros), características microbiológicas para controle de microrganismos patogênicos e também limites de radioatividade; bem como estabelece planos mínimos de amostragem.

Esta Norma tem função específica de proteção à saúde, sendo aplicável a toda água destinada ao consumo humano proveniente de manancial superficial ou subterrâneo, com exceção das águas envasadas (padrões de qualidade estabelecidos em legislação específica). O Anexo - A mostra os padrões de potabilidade fixados por esta Portaria.

Antes mesmo da promulgação da Constituição Federal de 1988, o decreto federal nº 79.367 de 09/03/1977 atribuía ao Ministério da Saúde competência para elaborar normas sobre o padrão de potabilidade da água, a serem observadas em todo o território nacional. Desde então o Ministério da Saúde sancionou 4 portarias que dispõem sobre potabilidade de água para consumo humano: Portaria 56Bsb/1977, Portaria 36GM/1990, Portaria 1.469/2000 e Portaria 518/2004 (esta última idêntica à Portaria 1.469/00, à exceção de prazos para adaptação e alguns quesitos técnicos).

A Portaria 518/04 trouxe diversos avanços em relação à Portaria 36GM/90, destacando-se: a incorporação do princípio da descentralização das ações do Sistema Único de Saúde (SUS); visão sistêmica da qualidade da água; definição clara de deveres e responsabilidades de cada esfera de governo e dos responsáveis pela produção e distribuição de água e, principalmente, a garantia ao consumidor do direito à informação sobre a qualidade da água a ele oferecida, seja pelos

sistemas e soluções alternativas de abastecimento de água ou pelo setor saúde, como se observa a seguir (MINISTÉRIO DA SAÚDE DO BRASIL, 2004):

“Art. 7º. São deveres e obrigações das Secretarias Municipais de Saúde:

(...)

II – *sistematizar e interpretar os dados gerados pelo responsável pela operação do sistema ou solução alternativa de abastecimento de água, assim como, pelos órgãos ambientais e gestores de recursos hídricos, em relação às características da água nos mananciais, sob a perspectiva da vulnerabilidade do abastecimento de água quanto aos riscos à saúde da população;*

(...)

IV – *efetuar, sistemática e permanentemente, avaliação de risco à saúde humana de cada sistema de abastecimento ou solução alternativa, por meio de informações sobre:*

a) *a ocupação da bacia contribuinte ao manancial e o histórico das características de suas águas;*

(...)

VI – *garantir à população informações sobre a qualidade da água e riscos à saúde associados, nos termos do inciso VI do artigo 9º desta Norma;*

VII – *manter registros atualizados sobre as características da água distribuída, sistematizados de forma compreensível à população e disponibilizados para pronto acesso e consulta pública;*

(...)

Art. 9º. Aos responsáveis pela operação de sistema de abastecimento de água incube:

(...)

III – *manter avaliação sistemática do sistema de abastecimento de água, sob a perspectiva dos riscos à saúde, com base na ocupação da bacia contribuinte ao manancial, no histórico das características de suas águas, nas características físicas do sistema, nas práticas operacionais e na qualidade da água distribuída;*

(...)

V – *promover, em conjunto com os órgãos ambientais e gestores de recursos hídricos, as ações cabíveis para a proteção do manancial de abastecimento e de sua bacia contribuinte, assim como efetuar controle das características das suas águas, nos termos do artigo 19º desta Norma, notificando imediatamente a autoridade de saúde pública sempre que houver indícios de risco à saúde ou sempre que amostras coletadas apresentarem*

resultados em desacordo com os limites ou condições da respectiva classe de enquadramento, conforme definido na legislação específica vigente (se refere à Resolução CONAMA 357/05, antiga 020/86);

VI – fornecer a todos os consumidores, nos termos do Código de Defesa do Consumidor (se referindo ao artigo 6º, inciso III e artigo 31º do CDC), informações sobre a qualidade da água distribuída, mediante envio de relatório, dentre outros mecanismos, com periodicidade mínima anual e contendo, no mínimo, as seguintes informações:

a) descrição dos mananciais de abastecimento, incluindo informações sobre sua proteção, disponibilidade e qualidade da água;

(...)

VII – manter registros atualizados sobre as características da água distribuída, sistematizados de forma compreensível à população e disponibilizados para pronto acesso e consulta pública;

(...)

Na Portaria 518/04 (bem como na Portaria 1.469/00) se verifica também a exigência do monitoramento da qualidade da água bruta para avaliar a compatibilidade entre suas características e o tipo de tratamento (MINISTÉRIO DA SAÚDE DO BRASIL, 2004):

Art. 19º. *Os responsáveis pelo controle da qualidade da água de sistemas e de soluções alternativas de abastecimento supridos por manancial superficial devem coletar amostras semestrais da água bruta, junto do ponto de captação, para análise de acordo com os parâmetros exigidos na legislação vigente de classificação e enquadramento de águas superficiais (se referem à Resolução CONAMA 357/05, antiga 020/86), avaliando a compatibilidade entre as características da água bruta e o tipo de tratamento existente.*

Deve ser comentado que nas duas últimas Portarias do Ministério da Saúde foi dado ênfase ao monitoramento de cianobactérias e cianotoxinas, definindo limites para o padrão de potabilidade e os planos mínimos de amostragem.

2.2.3 Classificação das Águas

A Resolução CONAMA (Conselho Nacional do Meio Ambiente) nº 357, de 17 de março de 2005 (que substituiu recentemente a Resolução CONAMA nº 020/86), no seu artigo 2º, parágrafos I, II e III, classifica as águas do território brasileiro em águas doces, salobras e salinas, de acordo com a concentração de sais existentes na água. As águas doces, salobras e salinas do território Nacional, são classificadas, segundo a qualidade requerida para os seus usos preponderantes, em treze classes de qualidade. Na Tabela 2.2 apresenta-se um resumo dos usos

preponderantes das classes relativas à água doce em que a Classe Especial pressupõe os usos mais nobres e a classe 4, os menos nobres.

Os corpos hídricos devem ter os seus usos prioritários definidos por legislação (o enquadramento das águas estaduais cabe aos órgãos estaduais) e, a partir daí, com base nos critérios de qualidade da água, são estabelecidos limites para todos os parâmetros que interferem com os usos a que são destinados.

Tabela 2.2 – Classes de água doce e seus respectivos usos segundo Resolução CONAMA nº 357/05

USO	CLASSE				
	Especial	1	2	3	4
Abastecimento para consumo humano	X (A)	X (B)	X(C)	X(D)	
Preservação do equilíbrio natural das comunidades aquáticas	X				
Preservação dos ambientes aquáticos em unidades de conservação de proteção integral	X				
Proteção das comunidades aquáticas		X	X		
Recreação de contato primário		X (E)	X (E)		
Recreação de contato secundário				X	
Irrigação		X (F)	X (G)	X (H)	
Proteção das comunidades aquáticas em Terras Indígenas		X			
Aqüicultura e atividade de pesca			X		
Pesca amadora				X	
Dessedentação de animais				X	
Navegação					X
Harmonia paisagística					X

(A) com desinfecção; (B) após tratamento simplificado; (C) após tratamento convencional; (D) após tratamento convencional ou avançado; (E) conforme Resolução CONAMA nº 274, de 2000; (F) hortaliças que são consumidas cruas e de frutas que se desenvolvam rentes ao solo que são ingeridas cruas sem remoção da película; (G) de hortaliças, plantas frutíferas e de parques, jardins, campos de esporte e lazer, com os quais o público possa vir a ter contato direto; (H) de culturas arbóreas, cerealíferas e forrageiras.

FONTE: Resolução CONAMA nº 357/05 (modificado)

Para cada uma das classes corresponde uma qualidade a ser mantida no corpo d'água, que é expressa por padrões de VMP (valor máximo permissível) que estabelecem e definem essa qualidade. A Resolução CONAMA nº 357/05 apresenta também condições, padrões e exigências para o lançamento de efluentes de qualquer fonte poluidora, direta ou indiretamente, nos corpos de água, expressos no seu Capítulo IV.

2.3 Comportamento da Qualidade da Água em Reservatórios

As águas interiores apresentam características de qualidade muito variadas, que lhes são conferidas pelos ambientes de origem, por onde circulam, percolam ou onde são armazenadas

(REBOUÇAS, 2002). Quando se refere à qualidade da água de lagos e reservatórios, as características desses corpos hídricos são ainda mais complexas, porque se tratam de ambientes lânticos.

2.3.1 Dinâmica dos Lagos e Reservatórios

Antigamente eram necessários somente pequenos sistemas de acumulação, apenas para suprimento de água. Hoje já existem imensos, complexos e sofisticados reservatórios com os mais diferentes objetivos e finalidades, tais como: abastecimento de água, regularização da vazão de cursos d'água, obtenção de energia elétrica, irrigação, navegação e recreação entre outros, de acordo com as características e necessidades de cada região. Os lagos artificiais brasileiros, formados principalmente pelo represamento de rios, possuem várias formas sinônimas de serem denominados: represas, reservatórios, açudes, etc., tendo em vista que se tratam de ecossistemas que apresentam mesma origem e finalidade (ESTEVEES, 1998).

Os reservatórios são uma das formas mais visíveis da interferência do homem nas condições naturais, na busca da satisfação de suas necessidades básicas. Infelizmente, essa interferência tem trazido consigo alguns impactos ambientais negativos e, em muitos casos, tem sido difícil controlar as influências antrópicas nesses ambientes que, de forma direta ou indireta, afetam a saúde humana e ambiental. E isso é agravado nas regiões onde há uma maior sensibilidade desses corpos hídricos à degradação, devido as suas características naturais de vulnerabilidade às condições adversas de clima, como é o caso do semi-árido nordestino.

Por isso, tem-se procurado estudar e compreender o comportamento de lagos e reservatórios no que diz respeito à qualidade e quantidade de água em busca de modelos matemáticos simplificados dos indicadores globais de qualidade de água para simular e/ou prever condições indesejáveis na qualidade da água para os diferentes usos, seja de origem antrópica ou naturais (NOGUEIRA, 1991).

No Nordeste, por exemplo, a construção de açudes teve início no tempo do Brasil Império, com a criação do açude de Cedro no Estado do Ceará. Mas somente após a grande seca de 1944/1945, que assolou o Nordeste, se iniciou efetivamente essas construções. Até 1980, por volta de 35 anos depois, já existiam no Nordeste cerca de 806 médios e grandes açudes (PAIVA, 1982 *apud* ESTEVES, 1998; REBOUÇAS, 2002). Estes ecossistemas são de fundamental importância sócio-econômica para esta região, sendo suas principais funções, além do armazenamento de água para fornecimento à população humana e animais, a regularização de

cursos d'água, irrigação, geração de energia hidroelétrica e o aumento da produção protéica da região, através da piscicultura.

A natureza dos problemas de qualidade da água nos lagos e reservatórios (ambientes lênticos) difere substancialmente dos problemas equivalentes nos rios e estuários (habitats lóticos). Mesmo que, na maior parte das situações, os elementos que venham contribuir para a existência dos problemas possam ser semelhantes para ambos os ambientes, a escala temporal-espacial dos fenômenos que ocorrem nos corpos d'água lênticos é bastante distinta das escalas dos rios e estuários. Assim, os processos físicos, químicos e biológicos apresentam características, intensidades e importâncias também diferenciadas (NOGUEIRA, 1991).

Lagos e reservatórios geralmente são tratados de forma conjunta na literatura, portanto, convém destacar suas principais diferenças. Lagos são corpos naturais de água cujo movimento é bastante lento, quando comparado aos movimentos dos rios. A atividade geológica natural é a principal responsável pelo surgimento dos lagos, podendo levar milhares de anos, mas eles podem surgir também a partir de eventos catastróficos e súbitos. Os reservatórios são ambientes formados pela ação direta do homem, como o barramento artificial de um vale natural ou a formação artificial de lagos, não associados a uma bacia de drenagem natural, e com as vazões afluentes sujeitas a controle (NOGUEIRA, 1991).

As diferenças entre um lago e um reservatório estão relacionadas, principalmente, com os objetivos para os quais o reservatório foi construído. Quando se constrói um reservatório, este deve dispor de água suficiente em qualidade e quantidade para atender aos usos para os quais foi projetado (STRASKRABA & TUNDISI, 1999).

Neste sentido, a distinção mais substancial entre lagos e reservatórios é a controlabilidade das vazões defluentes destes últimos. No caso de reservatórios destinados ao abastecimento de água ou à geração de energia elétrica, esse controle permite que o nível d'água seja alterado com bastante rapidez, provocando mudanças nas características das margens por essa flutuação, podendo vir a causar impactos severos nos habitats aquáticos. Uma outra importante distinção é que, nos reservatórios, as vazões defluentes não são sempre originadas na superfície, como nos lagos naturais, pois, nos reservatórios, a água é retirada a partir de vários níveis e mais comumente das profundidades maiores (NOGUEIRA, 1991).

Lagos são corpos d'água interiores sem comunicação direta com o mar e suas águas têm, em geral, baixo teor de íons dissolvidos quando comparadas com as águas oceânicas. Exceção aos lagos localizados em regiões áridas ou submetidas a longos períodos de secas, nos quais o teor de íons dissolvidos pode ser alto, pois a intensa evaporação não é compensada pela precipitação.

Nestas condições, o teor de sais dissolvidos pode ser muitas vezes superior ao da água do mar (ESTEVES, 1998).

Para compreender a complexidade de lidar com a qualidade da água em reservatórios, é importante destacar algumas características que os diferencia dos rios. Nos rios, a dominância das velocidades longitudinais torna desprezível a influência dos fenômenos que ocorrem nas direções vertical e transversal. Portanto, os fatos e eventos de maior importância ecológica estão ligados ao transporte longitudinal e à sucessão espacial das comunidades ao longo do curso d'água. Nos lagos e reservatórios, com algumas exceções, o seu tamanho e a profundidade fazem com que as vazões afluentes e defluentes sejam, como regra geral, de importância extremamente reduzida. Assim, a análise dos fenômenos físicos, químicos e biológicos, e de suas complexas interações, se dá apenas ao longo da direção vertical, sem a necessidade de consideração mais detalhada de sua hidrodinâmica (HENDERSON-SELLERS, 1984 *apud* NOGUEIRA, 1991).

A limnologia física dos reservatórios é bem distinta da dos lagos naturais. Dentro do reservatório, as correntes de densidade carregam sedimentos que se depositam em áreas que em outros tempos eram varridas pelo escoamento do rio. Nas proximidades da barragem, os padrões de estratificação térmica e química são marcadamente diferentes das ocorrências em corpos naturais (NOGUEIRA, 1991). Outra diferença diz respeito às características hidráulicas, em que, dependendo do tipo da tomada de água do reservatório, estes apresentam grande instabilidade limnológica. Na verdade, os reservatórios podem ser considerados, na sua grande maioria, como um estágio intermediário entre um rio e um lago (entre um ambiente lótico e lêntico), por apresentarem baixo tempo de residência da água (ESTEVES, 1998).

Uma característica física de fundamental importância em lagos ou reservatórios para a determinação da qualidade de suas águas é o seu tempo de residência ou tempo de retenção hidráulica. Por questão de origem, o tempo de retenção hidráulica diferencia os lagos dos reservatórios, sendo muito superior naqueles que nestes (STRASKRABA & TUNDISI, 1999). O tempo de residência nos reservatórios é controlado segundo as regras de operação do mesmo, o que afeta diretamente os seguintes processos: a) reciclagem e acúmulo de nutrientes no sedimento e na água; b) crescimento sustentado do fitoplâncton, que requer tempo de residência de 2 a 3 semanas; c) crescimento e desenvolvimento de macrófitas aquáticas; d) concentração e acúmulo de elementos químicos no reservatório; e) o próprio estado trófico do reservatório; entre outros (NOGUEIRA, 1991).

Neste contexto, é importante ressaltar que as dimensões físicas de um lago natural ou artificial interagem fortemente com os fatores meteorológicos e edáficos para determinar a

natureza do lago como um ambiente e, em consequência, a de seus habitantes (NOGUEIRA, 1991).

2.3.2 Estratificação

A estratificação nos lagos e reservatórios introduz no processo de análise da qualidade da água uma dimensão inexistente no estudo dos ambientes lóticos. É um fenômeno de fundamental importância para organização e o funcionamento dos ecossistemas lacustres.

A estratificação constitui-se basicamente em um acomodamento de camadas de fluido, ao longo da direção vertical, em decorrência de gradientes de densidade. O aquecimento diferenciado da massa d'água do corpo do lago ao longo da profundidade provoca diferença de temperaturas e, conseqüente, a formação de camadas de diferentes densidades, que formam uma barreira física, impedindo que se misturem. Se a energia do vento não for suficiente para misturá-las, o calor não se distribui uniformemente, criando a condição de estabilidade térmica. Quando ocorre este fenômeno, o ecossistema aquático está estratificado termicamente (ESTEVES, 1998). A duração e o período da estratificação dependem diretamente das condições climáticas e da morfometria do lago (forma, tamanho da bacia e profundidade média).

Na estratificação térmica, os estratos formados freqüentemente estão diferenciados física, química e biologicamente. Podem ocorrer casos em que a estratificação térmica proporciona a formação de camadas de diferentes densidades influenciadas pela distribuição heterogênea da salinidade, concentração de sólidos dissolvidos e de sólidos em suspensão (ESTEVES, 1998).

Os ambientes lênticos, portanto, apresentam grande suscetibilidade física, química e biológica aos efeitos da temperatura. Do ponto de vista físico, observam-se mudanças ambientais provocadas pelos fenômenos de estratificação, mistura e desestratificação, em sintonia com os ciclos climatológicos e hidrológicos (NOGUEIRA, 1991).

No geral, a diferença de densidade na coluna d'água, estabelece três regiões distintas: uma superficial, de maior temperatura e menor densidade, chamada epilímnio; uma profunda, de menor temperatura e maior densidade, o hipolímnio; e uma região intermediária chamada de metalímnio (ESTEVES, 1998; NOGUEIRA, 1991; WRIGHT, 1981c).

O processo de estratificação e desestratificação térmica nos lagos e reservatórios é o resultado do balanço de calor entre a água armazenada e as contribuições externas, que incluem radiação solar e atmosférica, troca condutiva de calor entre a atmosfera e a água, e a temperatura da água dos tributários. O lago perde calor por radiação da superfície por evaporação, por condução e através das vazões defluentes. Como os processos de aquecimento e resfriamento

ocorrem em uma camada superficial relativamente fina, se não houver mistura vertical para destruir o gradiente de calor, logo à superfície, ocorrerá estratificação térmica. Outras funções de força que influem diretamente na natureza da estratificação térmica e de densidade são o vento e a precipitação. De maneira global, nas regiões tropicais, o vento e a precipitação são os reguladores efetivos do fenômeno da estratificação (DINIZ, 2005; ESTEVES, 1998; NOGUEIRA, 1991; WRIGHT, 1981a; 1981b).

Diniz (2005), Barbosa (2002), Esteves (1998) e Wright (1981a; 1981b; 1981c) chamam a atenção para o fenômeno de estratificação e desestratificação diária a que os lagos e reservatórios de clima tropical estão submetidos. Durante o dia, ocorre a estratificação pelo aquecimento da camada superficial e, à noite, tem-se a desestratificação pela ação combinada dos ventos e do resfriamento da camada superior, provocando a mistura total a cada 24 horas. Há casos, no semi-árido, por exemplo, em que ocorrem misturas em menos de 24 horas, podendo haver várias estratificações e misturas ao longo do dia (lagos meromíticos, polimíticos, etc.) A atuação do vento na desestratificação é facilitada pela ausência de montanhas nas proximidades, ou quando o espelho d'água do lago ou reservatório possui grande área em relação à profundidade do corpo d'água, etc. (ESTEVES, 1998).

Importante mencionar que, do ponto de vista químico e biológico, ocorrem mudanças ao longo do tempo nos lagos e reservatórios devido ao aporte de elementos por tributários, por escoamento superficial direto e pelas águas das chuvas. Segundo Nogueira (1991) a introdução de nutrientes e íons, entre outros elementos, nos lagos e reservatórios, coloca em movimento uma série de eventos que, em boa parte, dependem da estrutura térmica do lago tanto para determinação de sua intensidade como para a sua localização temporal e espacial. Isto provoca, em longo prazo, o inevitável acúmulo desses elementos que influenciam, conseqüentemente, as características desses ambientes, tornando-os mais cristalinos ou, até mesmo, poluídos. Para isto basta que os aportes sejam superiores às retiradas.

2.3.3 Salinidade

A salinidade é formada pelos íons presentes na água, os quais contribuem com as concentrações de SDT. A salinidade corresponde ao peso, em gramas, dos sais presentes em 1000g de água. Entre os principais íons responsáveis pela formação de sais em águas interiores, destacam-se, dentre os cátions: cálcio, magnésio, sódio, potássio; e dos ânions: bicarbonato, carbonato, cloreto e sulfato. Vários fatores contribuem com as grandes diferenças entre os valores de salinidade nos ecossistemas aquáticos, dentre eles (ESTEVES, 1998):

- a intensidade diferenciada de intemperização e composição das rochas e solos da bacia de drenagem;
- o grau de influência e composição das águas subterrâneas;
- a precipitação atmosférica;
- o grau de influência marinha;
- balanço entre evaporação e a precipitação.

A salinidade pode ter influência sobre a estratificação dos corpos d'água, visto que a densidade da água aumenta com a elevação da concentração de sais (ESTEVES, 1998).

2.3.4 Cálcio, Magnésio, Sódio, Potássio e Cloreto

De modo geral, pode-se dizer que nas águas continentais, os principais ânions são bicarbonato e carbonato, enquanto que, o principal cátion é o cálcio, muito embora exceções podem ocorrer. Dentre elas, podem ser citados os açudes nordestinos, estudados por Wright (1981a), que mostrou que, com o decorrer da estiagem, ocorre aumento da concentração de cloreto nas águas represadas, onde a concentração pode chegar a 2100 ppm. Segundo Wright (1937) *apud* Esteves (1998), as secas prolongadas, típicas da região semi-árida do Nordeste brasileiro, refletem nos ecossistemas lacustres proporcionando alta concentração de cloretos e carbonatos.

Os padrões de distribuição vertical dos principais cátions e ânions ocorrem em função da profundidade do corpo d'água. Nos mais profundos, com possibilidade de estratificação térmica, pode haver acentuado aumento das concentrações de íons específicos no hipolímio (camada mais profunda do lago, escura e mais fria), com a conseqüente elevação dos valores de condutividade elétrica nesta região da coluna d'água (ESTEVES, 1998).

2.4 Qualidade e Quantidade de Água na Gestão de Recursos Hídricos

Até recentemente, a importância da água era reconhecida apenas do ponto de vista da quantidade, enquanto a qualidade teve sua importância reconhecida lenta e gradativamente à medida que se verificou que dela dependem a saúde e o bem-estar das populações, e por se tratar de um fator limitante ao desenvolvimento sócio-econômico de uma região caso haja escassez, seja qualitativa ou quantitativa. O uso desregrado da água, bem como o descuido com os lançamentos de efluentes nos corpos hídricos e com o uso que se faz do solo, desconsiderando a capacidade do corpo hídrico de autodepuração, somado à crescente demanda por água fez com

que esta se tornasse cada vez mais poluída e escassa, refletindo na qualidade de vida das populações quando a mesma passou a não ser suficiente em qualidade e em quantidade para os diferentes usos (ARAÚJO & SANTAELLA, 2003).

Assim, é impossível alcançar o desenvolvimento sustentável sem que se faça referência à água em quantidade e qualidade. Deve-se buscar a gestão dos recursos hídricos de forma integrada, garantindo, um aproveitamento otimizado com um mínimo de conflitos, tendo em vista a importância da água tanto em relação a seus usos diversos quanto à manutenção de sua qualidade e quantidade (CALIJURI & OLIVEIRA, 2000).

A gestão de recursos hídricos que considere a integração da qualidade e quantidade da água vem sendo abordada e discutida nos diferentes âmbitos da sociedade. O marco que efetivou essa nova visão da gestão das águas no Brasil foi a Política Nacional de Recursos Hídricos (Lei 9.433/97) que tem como uma das diretrizes para sua implementação a “gestão integrada da qualidade e quantidade de água”.

Buscando a minimização dos conflitos provenientes da alocação dos corpos hídricos superficiais para que atendam as demandas de água em quantidade e qualidade, a legislação brasileira previu a criação dos comitês de bacia hidrográfica composto pela sociedade civil organizada, representantes de órgãos estaduais e municipais e usuários, onde são discutidas as questões referentes a outorgas, planos de bacia, saneamento básico e problemas de disponibilidade hídrica superficial e subsuperficial em termos qualitativos e quantitativos. Esta é, sem dúvida, uma das questões de relevância, principalmente nos períodos de forte estiagem.

As secas são fenômenos freqüentes no país e acarretam graves problemas sociais e econômicos, não só onde o processo é mais intenso, caso do semi-árido nordestino, como também nas regiões centro-oeste, sul e sudeste. Muitas vezes a atenuação do problema da seca passa de fato pela mobilização de novas reservas de água, com a construção de novos açudes ou a implementação de transposição de bacias. No entanto, muitos dos problemas podem ser resolvidos ou mitigados apenas com a adoção de medidas não-estruturais, tanto na gestão dos estoques de água existentes quanto na gestão da demanda por água (BEZERRA & MUNHOZ, 2000).

Um outro ponto relevante que merece consideração, diz respeito aos elevados índices de evaporação no semi-árido. É uma variável crítica dentro do balanço hídrico de regiões semi-áridas, chegando a representar 92% do volume precipitado anual médio. A quantificação detalhada da evaporação e análise de sua influência no comportamento de um reservatório localizado no semi-árido são critérios indispensáveis de decisão na escolha do local para

construção de uma barragem, no dimensionamento de tal projeto e na adequação das regras de operação de um reservatório objetivando o manejo eficiente da água e sua conservação em qualidade e quantidade (FONTES *et al.*, 2003).

Segundo Azevedo *et al.* (2000), a crescente complexidade do gerenciamento de recursos hídricos, tanto no planejamento como na solução de conflitos por água em quantidade e qualidade, tem necessitado do emprego de técnicas e instrumentos capazes de auxiliar na tomada de decisão dos técnicos direta ou indiretamente responsáveis por sua operação. Para auxílio nas tomadas de decisões os atores envolvidos na gestão de recursos hídricos podem contar com o emprego de ferramentas denominadas de “sistemas de apoio à decisão”.

Nos sistemas de apoio a decisão referentes à gestão integrada de recursos hídricos têm sido empregados modelos matemáticos para a simulação da qualidade da água. Embora os processos hidrológico, físico, químico e biológico que ocorrem num corpo d’água sejam bastante complexos e ainda não perfeitamente equacionados, os modelos conseguem englobá-los de forma simplificada e prática. Sua utilização proporciona não só a simulação de eventos identificando os fatores que afetam a qualidade da água, como também a simulação de condições futuras e alternativas propostas para o corpo d’água, auxiliando no seu manejo (GASTALDINI & TEIXEIRA, 2001).

Os modelos matemáticos são essenciais para a gestão de recursos hídricos, seja de quantidade ou de qualidade da água. Têm como finalidade a simulação e/ou otimização de um processo de produção ou controle, seja de energia elétrica ou de produção de água para abastecimento público, para assim obter-se a melhor forma de operação dentro de uma bacia hidrográfica. Modelos quali-quantitativos podem funcionar separadamente ou de forma integrada, isto é, simulando quantidade e qualidade da água simultaneamente, dando suporte à tomada de decisão quanto às vazões que podem ser liberadas ou captadas de um curso d’água, ou do volume de água que pode ser descarregado ou que deve ser mantido num reservatório, etc. (ALBANO, 2004).

2.5 Modelagem Quali-Quantitativa de Água em Reservatórios

Modelos são geralmente estruturados para fornecer uma descrição matemática próxima da realidade, com a inclusão dos principais fenômenos de interesse. Por outro lado, quando se trata de modelos destinados a atividades de planejamento e gerenciamento voltados a ambientes lacustres, freqüentemente trazem simplificações tanto da hidrodinâmica como da ecologia desses sistemas (NOGUEIRA, 1991).

É importante ressaltar que lagos e reservatórios são ambientes aquáticos diferentes (item 2.3.1), mas que muitas vezes se faz menção aos ambientes lacustres ao lidar com modelos para reservatórios pelo fato de apresentarem semelhanças em alguns aspectos físicos e comportamentais, e pelo fato de os aspectos limnológicos, para modelagem matemática, serem mais estudados e compreendidos nos ambientes lacustres.

Com relação ao seu possível uso, os modelos matemáticos de lagos e reservatórios podem ser classificados nas seguintes categorias (NOGUEIRA, 1991):

a) Modelos para planejamento a longo prazo – são adequados para prever os efeitos sobre a qualidade da água decorrentes de estratégias alternativas de manejo desses corpos d'água.

b) Modelos operacionais de curto prazo – são adequados para o controle diário da qualidade da água através de indicadores como crescimento de algas, perfil de oxigênio dissolvido e outros.

Com relação a estruturação espacial, os modelos podem ainda ser classificados nas seguintes categorias (ALBANO & PORTO, 2003; TUCCI, 1998; NOGUEIRA, 1991):

a) Modelo zero-dimensional – são modelos matemáticos nos quais são desconsiderados quaisquer gradientes espaciais das variáveis. Desconsideram os efeitos hidrodinâmicos que afetam escoamentos e tratam o corpo d'água como um vaso de reação totalmente misturado, adotando-se uma única concentração para todo o corpo, a qual pode, entretanto, ser variável no tempo. Esse tipo de modelo é utilizado em nível de planejamento.

b) Modelo unidimensional – são modelos utilizado para a simulação de fenômenos que ocorrem de forma dominante em uma única direção. Para lagos e reservatórios podem ser utilizados modelos unidimensional vertical ou longitudinal. O primeiro considera a direção vertical como sendo a dimensão dominante, nela ocorrendo os principais processos de transferência de energia e massa. Este tipo de modelo é aplicável a reservatórios com grande profundidade e grande tempo de residência. O modelo unidimensional longitudinal é usado para analisar a variação longitudinal no reservatório e é utilizado para reservatórios com pouca profundidade e baixo tempo de residência.

c) Modelo bidimensional – são modelos que simulam os fenômenos desprezando uma das direções. Podem ser bidimensional no plano (despreza as variações na vertical) e bidimensional no perfil (despreza as variações na transversal). Lagos com pequena estratificação e onde as termoclinas se inclinam horizontalmente tipicamente requerem esse tipo de representação. Albano & Porto (2003) acrescentam ainda o “modelo bidimensional em plano

horizontal com múltiplas camadas”, onde incluem gradientes verticais considerando a existência de duas ou mais camadas superpostas. Aplicáveis em situações em que existe estratificação com camadas possuindo densidades bem distintas.

d) Modelo tridimensional – modelo em que há fenômenos representativos e importantes nas três direções. Simulam simultaneamente os fluxos vertical e em ambas as direções horizontais (transversal e longitudinal). Necessita de maior quantidade de dados medidos em campo para melhor precisão dos resultados gerados.

Mesmo tendo definido a finalidade do modelo matemático de lagos e reservatórios e a estrutura espacial adotada para ele, quando se trata de manejar a qualidade da água com seus componentes físicos, químicos e biológicos, o modelo poderá se tornar extremamente complexo. Segundo Straskraba *et al.* (1993) *apud* Calijuri & Oliveira (2000), a complexidade em manejar a qualidade da água de um reservatório é devida à natureza dinâmica desse sistema, à interferência do homem e à variabilidade nos procedimentos de operação sobre os processos ecológicos.

A descrição, ainda que muito geral, até agora feita dos diversos fenômenos que ocorrem em um lago ou reservatório e os problemas de qualidade da água a eles associados, permite perceber quão complicadas são suas inter-relações e a conseqüente dificuldade de analisá-las de forma conjunta. Deve-se buscar, sempre que possível, a utilização de modelos simples, de reduzido número de parâmetros e cujas hipóteses básicas possam ser entendidas e, portanto alteradas, quando necessário, antes de serem utilizados modelos mais complexos (NOGUEIRA, 1991).

Os tipos de modelos de qualidade de água disponíveis quanto à forma de solução, segundo Dahl & Wilson (2000) *apud* Albano (2004) são:

a) Modelos de estado (uniforme): envolvem equações algébricas e são usados para aplicações onde a dinâmica do sistema (lago ou represa) não é muito rápida e nem muito pequena quando comparada com a escala de tempo de interesse;

b) Modelos dinâmicos: incorporam derivadas envolvendo equações temporais e espaciais;

c) Modelos de caixa preta: são formulados com base em correlações matemáticas; utilizam uma série longa de dados para apresentar uma boa resposta, sem conhecimento prévio do problema modelado e, portanto, sem a necessidade de um significado físico;

d) Modelos de princípios teóricos (entradas-saídas): utilizam-se de leis e equações científicas formando a base do modelo. Parâmetros desconhecidos são calculados estaticamente de forma a se obter resultados compatíveis entre os valores simulados e os reais;

e) *Modelos de tempo contínuo: utilizando equações diferenciais para aplicação das equações de conservação é a melhor forma de representar fenômenos de qualidade de água;*

f) *Modelos de tempo discreto.*”

2.5.1 Integração de Modelos de Qualidade e Quantidade de Água

A integração dos aspectos qualitativos e quantitativos da água na gestão de recursos hídricos é algo que vem sendo tratado há algum tempo, mas que ainda não é efetivo no que diz respeito a lagos e reservatórios, principalmente quando se refere à região semi-árida do Brasil. Muitos trabalhos tem sido desenvolvidos buscando essa integração e fazendo estes levantamentos quali-quantitativos. Adiante são apresentados alguns trabalhos que propõem metodologias para gestão quali-quantitativa de água para diferentes situações, seja para rios ou para lagos e reservatórios.

Albano (2004) desenvolveu uma interface computacional que integra dois modelos matemáticos, sendo um modelo de quantidade de água em rede de fluxo (AQUANET) e outro de qualidade de água aplicado em represas (CE-QUAL-R1). Essa metodologia foi aplicada à represa Jaguari-Jacaréi no Sistema Cantareira em São Paulo como alternativa de gerenciamento quali-quantitativo de água. A interface possibilitou a simulação de retirada de água em diversos níveis da coluna d'água analisando os impactos dessa retirada sobre o perfil de temperatura da água na represa a partir das vazões resultantes do modelo de quantidade.

Chaves *et al.* (2004) propuseram uma metodologia em que utiliza técnicas de otimização e inteligência artificial para a simulação e operação de reservatórios considerando a quantidade e a qualidade da água. O estudo de caso para aplicação da metodologia proposta foi o reservatório de Barra Bonita (SP). Os resultados obtidos mostraram que a metodologia sustenta um eficaz e útil ferramental para operação de reservatórios, buscando aumentar os benefícios da qualidade de água otimizando sua quantidade e o custo.

Teixeria & Porto (2004) apresentaram uma metodologia para gerenciamento de bacias hidrográficas integrando os aspectos de quantidade e qualidade de água, onde utilizam o módulo AlocaLS, responsável pelo gerenciamento otimizado de quantidade de água em uma bacia hidrográfica, e o modelo QualidadeCLS, que determina os parâmetros de qualidade de água para cada valor de vazão otimizada. Ambos os modelos foram conectados ao Sistema AcquaNet, utilizam o mesmo banco de dados e podem analisar integralmente os aspectos de quantidade e qualidade de água. O sistema AcquaNet é capaz de considerar o impacto dos lançamentos de efluentes industriais e esgotos domésticos em rios, considerando períodos chuvosos ou secos

através da utilização de séries temporais de vazões. A aplicação prática do modelo foi na bacia do rio Piracicaba (SP). O sistema mostrou-se eficiente como uma ferramenta capaz de gerenciar de forma integrada os aspectos de quantidade e qualidade de água e também de determinar as concentrações dos poluentes e relacionar níveis de tratamentos para os lançamentos de efluentes descarregados no corpo d'água.

Lind & Dávalos-Lind (2002) associam o declínio no volume de água dos últimos 20 anos no Lago Chapala (no México) com a causa dos vários problemas de qualidade. São explorados cinco problemas: extensiva infestação pela planta jacinto de água ou baronesa (*Eichhornia crassipes*), declínio de peixes nativos, limitação da produção de fitoplâncton (base da cadeia alimentar), "blooms" algais resultando em problemas no tratamento de água e presença de metais tóxicos nos peixes do lago. O trabalho mostra que deve ser mantido o nível mínimo da água no lago de 1.521 m, o que irá requerer significativas mudanças nas práticas sócio-econômicas e políticas nos cinco Estados que usufruem o lago, e medidas de conservação por parte de Guadalajara para reduzir a quantidade de água retirada.

Gastaldini et al. (2001) estudaram a correlação entre os parâmetros de qualidade de água e as variáveis hidrológicas para o reservatório do Arroio Vacai-Mirim (RS), durante dois anos, e verificaram que tiveram maior interferência na qualidade o rebaixamento do nível da água no reservatório no dia da coleta e as vazões médias afluentes ao reservatório nos 7 e 15 dias anteriores à coleta. Apenas a dureza e a alcalinidade apresentaram correlações maiores que 0,7 com essas variáveis hidrológicas, sendo positivas com os rebaixamentos de nível e negativas com as vazões afluentes. Os outros parâmetros de qualidade apresentaram correlações baixas. Os autores não dão informações, entretanto, sobre o nível de água, mas apenas sobre o rebaixamento. A variável hidrológica que apresentou menor correlação com os parâmetros de qualidade foi a precipitação (totais em 1, 3, 7, 15 e 30 dias anteriores à coleta), medida próxima ao reservatório.

Azevedo et al. (2000) apresentaram um sistema de apoio a decisão que leva em consideração os aspectos quali-quantitativos das águas superficiais. Para a simulação das alternativas de planejamento foram usados em conjunto os modelos matemáticos MODSIM e QUAL2E-UNCAS. O uso do sistema de apoio a decisão em um estudo de caso na bacia do rio Piracicaba (SP) mostrou que é necessário aumentar tanto os níveis de tratamento de efluentes urbanos e industriais, assim como aumentar a oferta de água. Foram propostas medidas como programas de conservação, reúso da água e construção de novos reservatórios.

2.6 Previsão Meteorológica e Gestão de Recursos Hídricos no Nordeste Brasileiro

Ao longo dos anos tem-se observado em todo o mundo que o clima é um condicionante fundamental para o desenvolvimento das populações. A variabilidade climática pode produzir impactos negativos significativos no desenvolvimento dos países e comprometer a sustentabilidade das populações, por isso é muito importante que se conheça e compreenda o comportamento climático de uma região para que seja possível prever os processos hidroclimáticos e planejar medidas mitigadoras para os possíveis impactos que a sociedade está sujeita (TUCCI & BRAGA, 2003).

O regime de chuvas no nordeste brasileiro (NEB) varia entre 500 e 2.000 mm anuais, sendo que, no semi-árido, as precipitações máximas se concentram no período de fevereiro a maio (SOUZA FILHO, 2003). Assim, na maior parte da região Nordeste, a precipitação é escassa, apresentando distribuição espacial irregular e alta variabilidade interanual. Esta variabilidade causa secas severas e enchentes em anos diferentes. Um exemplo dessa alta variabilidade pode ser observado, por exemplo, no Polígono das Secas, onde a precipitação total média anual é menor que 800 mm, caindo para 500 mm no interior, com algumas localidades com precipitação da ordem de 300 mm, como é o caso de Cabaceiras na Paraíba. Dentro do Polígono das Secas existem sub-regiões serranas onde a precipitação total média anual ultrapassa os 1.000 mm. No litoral e Zona da Mata (leste da região, fora do Polígono das Secas), a precipitação chega a mais de 2.000 mm (SEMARH, 2001).

Desta forma, a variabilidade climática gera impactos em todo o sistema de recursos hídricos, demandando adaptações e ajustes a esta realidade através dos instrumentos e práticas de gestão de recursos hídricos. As previsões de tempo e de variações climáticas representam uma nova ferramenta para o desenvolvimento sustentável, à medida que oferecem melhorias substanciais no manejo dos recursos hídricos e, conseqüentemente, na qualidade de vida para as populações das regiões mais vulneráveis aos impactos da variabilidade climática, como é o caso do nordeste brasileiro (SOUZA FILHO, 2003). Uma alternativa é melhorar os sistemas de operação de reservatório de curto prazo incorporando previsão climática (SOUZA FILHO & PORTO, 2003).

Atualmente, a previsão da evolução dos sistemas meteorológicos nas regiões tropicais é feita para 24 horas com um acerto de cerca de 85 a 90% para os parâmetros atmosféricos (como ventos, precipitação pluviométrica, pressão à superfície, temperatura do ar, insolação, umidade

relativa, etc.) e é válida para uma área do tamanho de uma região metropolitana como a do Recife (SEMARH, 2001).

A previsão climática pode ser feita com no máximo 4 meses de antecedência e para um grupo de 3 a 4 meses. Só é válida para uma grande região como o norte do Nordeste do Brasil (cerca de 500.000 km²), podendo variar muito os parâmetros climáticos, como a precipitação total e a temperatura do ar, tanto no tempo cronológico como no espaço. Dependendo de valores extremos de variáveis atmosféricas e oceânicas, o acerto dessa previsão pode chegar a 90%. É possível que essa previsão climática seja melhorada, no futuro, e se consiga fazê-la para regiões menores e grupos menores de meses (SEMARH, 2001).

Para Souza Filho & Porto (2003), o gerenciamento de recursos hídricos tem como foco, atualmente, construir um sistema para administrar a escassez relativa dos recursos hídricos e os conflitos oriundos da mesma. Assim, o gerenciamento dos recursos hídricos tem quatro grandes macro funções: oferta, demanda, conflito e políticas públicas. Existem algumas medidas e propriedades que um sistema de gestão de recursos hídricos deve realizar ou possuir neste ambiente de crescente incerteza, tais como: analisar a vulnerabilidade das ações estruturais e não estruturais dos sistemas hídricos considerando as mudanças climáticas e a variabilidade climática; analisar a flexibilidade e capacidade de adaptação do sistema; considerar a água como uma política pública; realizar gestão da oferta; melhorar os sistemas de operação de reservatórios de curto prazo incorporando previsão climática; melhorar as ferramentas de operação de reservatórios de longo prazo com vistas a incorporar as incertezas oriundas da variabilidade climática; programas de gerenciamento da demanda, etc.

2.7 Considerações

Neste capítulo foram abordadas questões sobre as características hidrológicas e climáticas do semi-árido nordestino que deixam esta região vulnerável às condições adversas; a escassez hídrica proporcionada pelo acelerado processo de açudagem sem planejamento, pelo avanço da poluição e pelo aumento da demanda proveniente dos múltiplos usos da água; a importância da gestão de recursos hídricos que integre os aspectos qualitativos e quantitativos da água; a complexidade que envolve os estudos referentes ao comportamento de lagos e reservatórios e como a previsão meteorológica pode auxiliar na gestão de recursos hídricos.

Diante disso, tem-se verificado maiores atenções para questão do manejo racional dos reservatórios e, para o semi-árido, há uma expectativa no sentido de conceber metodologias que permitam o manejo de recursos hídricos que integre qualidade e quantidade de água como uma

alternativa para redução da escassez e melhoria da qualidade da água dos reservatórios, pois para esta região se verificam séries temporais de monitoramento quali-quantitativos para os principais reservatórios e progressos nas pesquisas relativas a previsão hidrometeorológica, meios estes que podem ser utilizados na construção de modelos de operação quali-quantitativa.

METODOLOGIA

A seguir, mostram-se os procedimentos utilizados para a elaboração de um sistema de gestão integrada da qualidade e quantidade de água para reservatórios do semi-árido que auxilie na prevenção e minimização dos impactos negativos proporcionados pelos eventos extremos de seca sobre a qualidade da água dos reservatórios com vistas ao abastecimento humano.

A metodologia deste trabalho buscou conceber um modelo de operação de reservatórios que apóie a gestão quali-quantitativa da água. A intenção foi construir um modelo simples e prático com o que se adquiriu no âmbito técnico e científico para o açude Epitácio Pessoa (Boqueirão) – PB, adotado como caso-teste para aplicação e avaliação da modelagem. Para isso, este trabalho teve como base a Resolução CONAMA nº 020/86, a atual Resolução CONAMA nº 357/05, a Portaria nº 518/04 do Ministério da Saúde que tratam do assunto e os dados adquiridos dos monitoramentos hidrológico e de qualidade de água do açude.

3.1 Etapas Metodológicas

As etapas metodológicas adotadas para realização deste trabalho estão listadas a seguir, sendo as que necessitam de maior detalhamento discutidas ao longo deste capítulo. Os procedimentos metodológicos foram:

- Avaliação das Resoluções CONAMA nº 020/86 e nº 357/05 no que diz respeito aos padrões de qualidade para água doce de classes 2 e 3, destinadas ao abastecimento humano;
- avaliação da Portaria nº 518/04 do Ministério da Saúde, no que se refere à vigilância da qualidade da água bruta para tratamento de potabilização;
- caracterização do reservatório estudo de caso e levantamento dos dados qualitativos e quantitativos do mesmo;
- escolha do parâmetro de qualidade de água, a partir da série histórica do monitoramento qualitativo da água bruta realizado pela companhia de saneamento, para ser modelado com o parâmetro de quantidade;

- análise e investigação da possibilidade de modelagem do comportamento dos dados de qualidade da série histórica do reservatório em função do parâmetro quantitativo;
- estudo do comportamento dos dados qualitativos em perfil no reservatório nos ciclos mensal e nictemeral;
- elaboração de um modelo conceitual de operação quali-quantitativa de água em reservatórios para o semi-árido a partir da interpretação das características comportamentais da série histórica do parâmetro de qualidade escolhido e do seu comportamento em perfil no reservatório para as duas estações climáticas do ano;
- construção de um modelo de operação de reservatórios do semi-árido fundamentado no balanço quali-quantitativo da água do reservatório e na previsão hidrometeorológica;
- apresentação do sistema de gestão integrada da qualidade e quantidade de água para reservatórios no semi-árido.

3.2 Estudo de Caso - Açude Epitácio Pessoa

Para o desenvolvimento deste trabalho, o caso-teste para aplicação e avaliação da modelagem foi o açude Epitácio Pessoa, doravante denominado de açude Boqueirão. Trata-se de um reservatório de grande importância sócio-econômica na região polarizada pela cidade de Campina Grande, no Estado da Paraíba, além de ser responsável pelo abastecimento desta cidade e de todo o compartimento da Borborema, somando mais de 400 mil habitantes.

O açude Boqueirão está localizado entre 07°28'04" e 07°33'32" de latitude Sul e entre 036°08'23" e 036°16'51" de longitude Oeste. Está inserido na região hidrográfica do Alto Paraíba (12.389,14 km²) (Figura 3.1), uma das maiores bacias hidrográficas do Estado da Paraíba (GALVÃO & GOMES FILHO, 2003), na região dos Cariris Velhos, com menor índice pluviométrico do Brasil (precipitações entre 150 e 300mm anuais) (SILVA *et al.*, 1987). O clima desta região é semi-árido, quente e seco, com máximas de 34°C e mínimas de 18°C (SILVA *et al.*, 1987).

A sub-bacia hidrográfica do Alto Paraíba juntamente com a sub-bacia hidrográfica do Taperoá (região do Alto Paraíba) e as regiões do Médio e do Baixo Paraíba constituem a bacia do rio Paraíba, uma das mais importantes bacias hidrográficas do Nordeste, com uma área de 20.213 km² (LMRS, 2004).

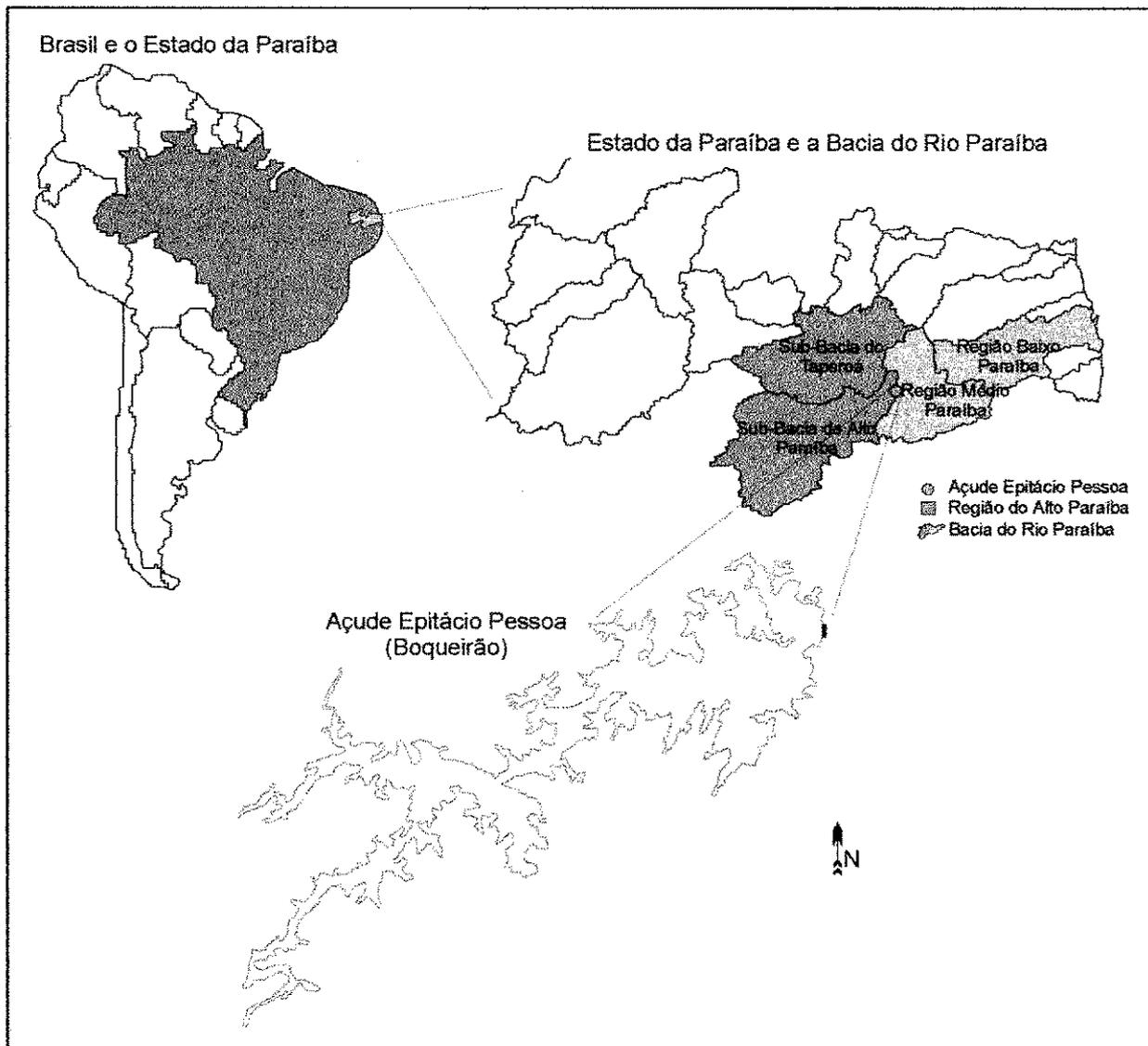


Figura 3.1 – Mapa de localização do açude Epitácio Pessoa (Boqueirão) - PB.

O açude Boqueirão represa as águas dos rios Paraíba do Norte e Taperoá. Constitui-se de uma represa com uma adutora de 17,2 km até a estação de tratamento de água no distrito de Gravatá de Boqueirão. É responsável pelo abastecimento de água das cidades de Campina Grande e todo o compartimento da Borborema (municípios de Boqueirão, Pocinhos, Queimadas, Caturité, Riacho de Santo Antônio, e distritos de Galante e São José da Mata) (RÊGO *et al.*, 2001). Até fevereiro de 1999, suas águas eram liberadas através da descarga para o abastecimento urbano e rural, perenização do rio e diluição dos efluentes de mais de 14 municípios a jusante, dentre eles: Alcantil, Pilar, Santa Rita, Natuba e Mojeiro (SOUZA, 2001).

A capacidade máxima de armazenamento foi estimada no projeto original do açude em 536.000.000 m³, mas com erros técnicos na relação cota-área-volume e, posteriormente, com

realização de nova batimetria, verificou-se grande diferença da curva cota-área-volume em relação à anterior (RÊGO *et al.*, 2001). Portanto, não se tem a capacidade original do reservatório, de forma que, atualmente, com dados da batimetria realizada em 2004, a capacidade máxima de armazenamento do reservatório está estimada em 411.000.000 m³ (LMRS, 2005).

O açude Boqueirão foi construído pelo DNOCS (Departamento Nacional de Obras Contra as Secas) entre 1952 e 1956, tendo sido inaugurado em janeiro de 1957 pelo presidente Juscelino Kubtscheck, consolidando, assim, na sua inauguração, a política da construção de açudes do Governo Federal que era apresentada como solução definitiva para deficiência hídrica para a região Nordeste (SOUZA, 2001). Originalmente, o açude tinha seus usos previstos para: abastecimento humano, irrigação, perenização do rio, piscicultura, turismo e geração de energia (RÊGO *et al.*, 2000), mas este não foi implantado, bem como os projetos de piscicultura e turismo aconteceram em pequena escala. Atualmente, a principal destinação de suas águas é para o abastecimento urbano.

O nome Boqueirão foi dado ao açude Epitácio Pessoa pelo fato que o rio Paraíba fez, com o passar dos milhares de anos, um corte (uma abertura) na serra do Carnoió formando um “boqueirão”. O nome oficial do açude é uma homenagem ao único presidente do país nascido no Estado da Paraíba, o qual, no seu governo, intensificou o programa de açudagem através do Ministério de Viação e Obras Públicas (SOUZA, 2001).

Na bacia do rio Paraíba, o açude Boqueirão é o principal reservatório. Em plena região semi-árida, este reservatório passou, nos últimos dez anos, por períodos de escassez que quase causaram o colapso do sistema de abastecimento da cidade de Campina Grande e região. Segundo Guimarães *et al.* (2005), a evolução temporal dos dados da água do açude Boqueirão demonstraram que a sua qualidade ainda não é problemática, mas que apresenta em processo gradativo de deterioração (com vistas ao abastecimento urbano), que pode ser acelerado ou não com as crises quantitativas de água, sendo necessário, o quanto antes, a implantação de um sistema de gestão quali-quantitativa da água.

3.3 Levantamento dos Dados

A partir da Portaria nº 518/04 do Ministério da Saúde verificou-se a possibilidade de se utilizar os dados do monitoramento realizado pelas companhias de saneamento, na ausência de uma rede de monitoramento ou complementarmente a uma rede já existente, como fonte de dados de qualidade da água. O artigo 19º desta Portaria estabelece que os responsáveis pelo controle da qualidade da água de sistemas de abastecimento supridos por manancial devem

coletar junto ao ponto de captação, amostras da água bruta, no mínimo semestralmente, para análise de acordo com os parâmetros exigidos pela Resolução CONAMA n° 020/86, a atual Resolução CONAMA n° 357/05 (que classifica e enquadra os corpos d'água do território nacional segundo seus usos preponderantes).

Para compreender e modelar o comportamento quali-quantitativo da água do açude Boqueirão foram utilizadas três fontes de dados:

1 - Série histórica dos dados de qualidade da água do açude Boqueirão de abril/88 a outubro/04 fornecidos pela Companhia de Água e Esgotos do Estado da Paraíba (CAGEPA). Tratam-se de parâmetros de qualidade físicos e químicos, sendo eles: aspecto, sabor, odor a frio, odor a quente, temperatura, cor aparente, turbidez, pH, sólidos dissolvidos totais, dióxido de carbono, oxigênio consumido, amônia, nitrato, nitrito, alcalinidade de hidróxidos, alcalinidade de carbonatos, alcalinidade de bicarbonatos, alcalinidade total, cálcio, magnésio, dureza, ferro, cloreto, sulfato, condutividade e salinidade. Estes dois últimos começaram a ser determinados a partir de fevereiro de 2004.

2 - Dados de qualidade da coluna d'água do açude Boqueirão, referentes a coletas mensais, fornecidos por Diniz *et al.* (2005), e coletas nictemerais realizadas por Diniz *et al.* (2004). As amostragens foram realizadas na região central do reservatório (zona limnética), em um ponto próximo à torre de captação de água da CAGEPA, em quatro profundidades, de acordo com o percentual de luz incidente (100%, 50%, 1% e 0% de luz), como se verifica na Figura 3.2. Os dados mensais abrangem o período de amostragem entre maio de 2002 e março de 2003, com coletas realizadas entre 8 e 10 horas da manhã. Foram realizadas quatro coletas nictemerais (24 horas, com coletas a cada três horas), duas na estação chuvosa (maio/02 e março/03) e duas na estação seca (novembro/02 e janeiro/03).

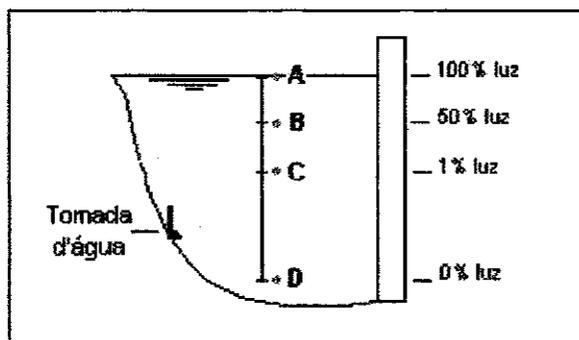


Figura 3.2 – Representação esquemática das profundidades de coleta dos dados no açude Boqueirão, num ponto próximo à captação de água realizada pela CAGEPA.

3 – Série histórica diária dos volumes do açude Boqueirão fornecidas pelo Laboratório de Meteorologia, Recursos Hídricos e Sensoriamento Remoto do Estado da Paraíba (LMRS/PB) referentes ao período de janeiro/88 a outubro/04. Esses dados são provenientes das leituras em réguas limnométricas relacionadas com a curva cota-área-volume do reservatório. Os dados hidrológicos do açude Boqueirão passaram a ser monitorados pelo LMRS a partir de 1994, antes o Departamento Nacional de Obras Contra as Secas (DNOCS) era responsável pela coleta destes dados.

Uma questão que deve ser comentada refere-se à qualidade dos dados que se obtém quando se decide trabalhar com os dados fornecidos pelas companhias de abastecimento. Sabe-se que é de fundamental importância para interpretação do comportamento da qualidade de um corpo hídrico e no desenvolvimento de uma modelagem que se tenha dados em quantidade e qualidade. As companhias de abastecimento realizam o monitoramento da água bruta do manancial de captação com a finalidade de somente verificar se o corpo hídrico está de acordo com os limites e/ou condições estabelecidos pela Resolução CONAMA nº 357/05 referentes a sua classificação, ou seja, verificar se os padrões legais de qualidade da água bruta estão sendo obedecidos ou não. Portanto, a análise desses dados pode apresentar resultados pouco acurados e precisos, não representando um material de muita qualidade para interpretações mais precisas do comportamento daquele corpo aquático. Outra questão é que as companhias, em sua maioria, não detêm séries longas, pois o monitoramento da água bruta com frequência regular é uma exigência recente no âmbito nacional através das Portarias do Ministério da Saúde (desde a Portaria nº 036/GM-MS/90, Portaria 1.469/01 e, a atual em vigor, Portaria 518/04).

Tendo em vista que as companhias de saneamento somente cumprem com suas obrigações, ao se decidir lidar com dados dessa origem, se deve ter em mente que eles não são os ideais e que fornecerão somente uma compreensão geral da evolução do comportamento da qualidade da água no reservatório em questão. Características comuns das séries de dados das companhias são: pontos de amostragem não georeferenciados, mudança constante na frequência de amostragem, má qualidade dos dados por erros de coleta ou análise, forma de armazenamento dos dados que dificulta a recuperação ou acesso.

A série histórica dos dados de qualidade do açude Boqueirão monitorados pela CAGEPA é referente ao período de 1988 aos dias atuais. Esses dados não apresentaram regularidade das coletas e do local de amostragem. Inicialmente as coletas eram realizadas anualmente, depois semestralmente, havendo anos em que não ocorreu coleta de dados qualitativos e anos em que houve coleta mensal e, até mesmo, semanal. Esses dados de qualidade até 1998 foram coletados no próprio reservatório e, a partir daquele ano, as coletas passaram a ser realizadas na entrada da

Estação de Tratamento de Água (ETA) de Gravatá (município de Queimadas, próximo ao açude Boqueirão) após a água bruta ter percorrido uma tubulação de 17,2 km a partir do reservatório. Os dados são arquivados brutos (laudos do laboratório, em papel), sendo difíceis de consultar (velhos, rasurados, faltam algumas informações de datas e horários de coletas). Para uso neste trabalho, os dados com valores duvidosos ou incompletos foram excluídos da série.

3.4 Seleção dos Dados

A variação do volume armazenado no reservatório foi escolhida como sendo o parâmetro quantitativo para modelagem. É na variação do volume armazenado no reservatório que se pode utilizar a previsão meteorológica para prever afluências e somente no volume do reservatório é possível interferir no comportamento da qualidade da água do mesmo através de ações de liberação ou retenção de água. O balanço hídrico no reservatório, chave para o modelo de operação, está resumido na variação temporal do volume do mesmo, como mostra a equação abaixo:

$$V_{i+1} = V_i + P_i + Q_i - E_i - C_i - J_i \quad (\text{Equação 3.1})$$

Onde:

V – volume armazenado no reservatório

i – intervalo de simulação atual e i+1 é o próximo intervalo de simulação

P – volume de água precipitado sobre o reservatório

Q – volume afluente ao reservatório

E – volume de água perdido por evaporação e infiltração do reservatório

C – volume retirado do reservatório para consumo

J – volume liberado pelo reservatório para jusante.

Após a obtenção dos dados qualitativos, verificaram-se quais os parâmetros tinham melhor relação com a variação do volume armazenado no reservatório. Nesta fase os parâmetros com as séries mais completas, com os dados mais coerentes e que apresentassem importante significado ambiental para a finalidade desta pesquisa foram permanecendo na seleção e, por fim, optou-se trabalhar com o parâmetro Sólidos Dissolvidos Totais (SDT).

3.5 Modelagem da Qualidade da Água

Neste trabalho utilizou-se da modelagem estatística para construção do modelo de qualidade de água (balanço de SDT) para reservatórios. O modelo estatístico fornece equações do tipo caixa preta, que geram saídas a partir de entradas, ou seja, não consideram os processos físicos, químicos e biológicos do reservatório. Mas é adequado ao propósito de construir um modelo simples e prático o suficiente para aproveitar as informações de qualidade de água e que sirva como ferramenta de apoio ao processo de gestão integrada de recursos hídricos.

Para realização da modelagem matemática foi necessário fazer uma seleção a partir da série completa dos dados e organizar uma série homogênea de dados qualitativos. Assim, selecionou-se o período da série que apresentava coletas realizadas no mesmo local (entrada da ETA) e que apresentava no mínimo uma coleta por mês, sendo ela realizada nos 10 primeiros dias do mês. Da série de dados de volume armazenado no reservatório, selecionou-se o valor referente à data da coleta do dado de qualidade.

Para um modelo matemático que abordasse aspectos qualitativos e quantitativos, buscou-se a melhor relação entre SDT e volume armazenado no reservatório com a finalidade de representar a previsibilidade de SDT em função da previsão hidrometeorológica. Para isso, utilizou-se os programas MATLAB e SPSS para análises de regressão linear múltipla e, para as correlações simples, o programa Excel. As equações obtidas e seus respectivos gráficos são apresentados e discutidos nos resultados deste trabalho (Capítulo 4).

Análise de regressão é uma metodologia estatística que utiliza a relação entre duas ou mais variáveis quantitativas (ou qualitativas) de tal forma que uma variável pode ser prevista a partir da outra ou outras. A análise de regressão linear tem por objetivo descrever, através de um modelo matemático, a relação entre variáveis interdependentes, partindo de n observações das mesmas. Tal modelo prevê o valor de uma variável (a variável dependente), dado que seja conhecido o valor da variável associada (variável independente) (CRESPO, 1994). A análise de regressão linear múltipla indica que a previsão da variável dependente é feita com base em duas ou mais variáveis independentes (KAZMIER, 1982).

Segundo Matos (1995), a regressão é a tentativa de relacionar um conjunto de observações de certas variáveis, designadas genericamente por X_k ($k = 1, 2, \dots, n$), com as leituras de uma certa grandeza Y . No caso da regressão linear, está subjacente uma relação do tipo: $Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_n X_n + e_n$, onde $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n$ são os parâmetros do modelo (coeficientes de regressão) e X_1, X_2, \dots, X_n são os valores das variáveis preditoras, muitas vezes

designadas por variáveis explicativas, uma vez que tentam explicar as razões da variação de Y . Esta consiste em estimar os valores dos parâmetros $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n$, através da minimização da soma dos quadrados dos desvios.

Para obtenção de uma equação preditiva para SDT num tempo t (Y), utilizou-se da análise de regressão linear múltipla, onde foi admitido que a variação do volume armazenado no reservatório (X_1) de um tempo $t-1$ para t e a concentração de SDT em $t-1$ (X_2), são as variáveis independentes. A intenção foi de obter uma relação que permita, diante das observações das variáveis X_1 e X_2 , prever o correspondente valor de Y (variável dependente).

3.6 Concepção do Modelo de Operação Quali-Quantitativo

O modelo de operação quali-quantitativo de água em reservatórios tem seu princípio básico de construção muito simples, como pode ser observado na Figura 3.3.

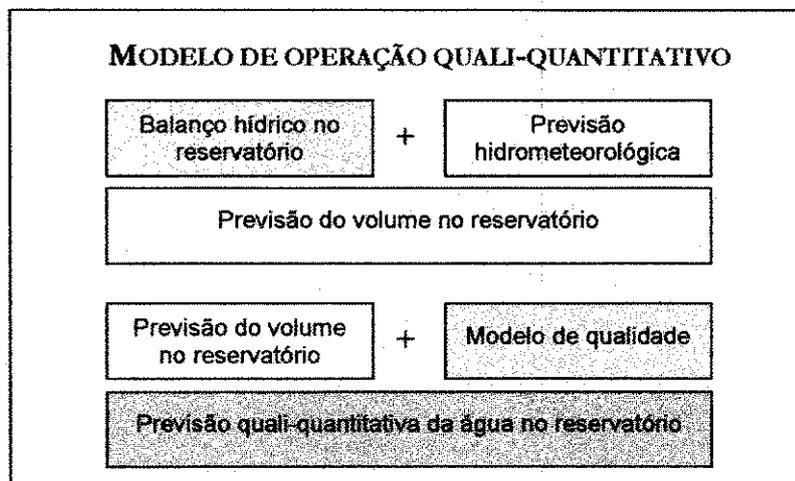


Figura 3.3 – Esquema para construção de um modelo de operação quali-quantitativo de água em reservatórios do semi-árido.

A concepção do modelo de operação quali-quantitativo, como visto na Figura 3.3, trata da integração de um modelo de balanço hídrico a um modelo de qualidade de água. A operação será realizada a partir da previsão meteorológica que, juntamente com o balanço hídrico no reservatório, fornecerá a previsão do volume no reservatório. As informações geradas, quando aplicadas ao modelo de qualidade de água, fornecerão uma previsão quali-quantitativa da água para o reservatório.

Mas não basta prever e/ou simular a qualidade da água no reservatório. Para a construção de um sistema de gestão integrada quali-quantitativa de água são necessárias medidas de ação para melhoria dessa qualidade quando necessário. Para isso optou-se por trabalhar, no modelo de

operação do reservatório, com níveis de alerta (modelo de alerta) e em construir um modelo de descarga de fundo.

Níveis de alerta são valores estabelecidos para o reservatório como níveis gradativos críticos de operação, seja ela qualitativa ou quantitativa. Têm a função de indicar o momento da tomada de decisão de acordo com a situação que o nível indica que o reservatório se encontra. O modelo de alerta foi definido de acordo com as características do reservatório e para cada nível foram sugeridas medidas de ação.

A principal medida para redução das concentrações de SDT adotada neste trabalho foi a descarga de fundo. Para isso foi necessária a construção de um modelo de descarga de fundo. Sua função é a de estimar o volume de água a ser descarregado do reservatório de acordo com o seu volume armazenado e a previsão hidrometeorológica que proporcione uma determinada redução nas concentrações de SDT. Isto é apresentado nos resultados desse trabalho (Capítulo 4).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados da aplicação da metodologia mostrada no Capítulo 3. A ênfase das análises é dada à construção de um sistema de gestão integrada da qualidade e quantidade de água para reservatórios do semi-árido a partir da análise e interpretação dos dados de SDT (Sólidos Dissolvidos Totais) e do volume armazenado no açude Boqueirão, e da Resolução CONAMA nº 020/86, atual CONAMA nº 357/05.

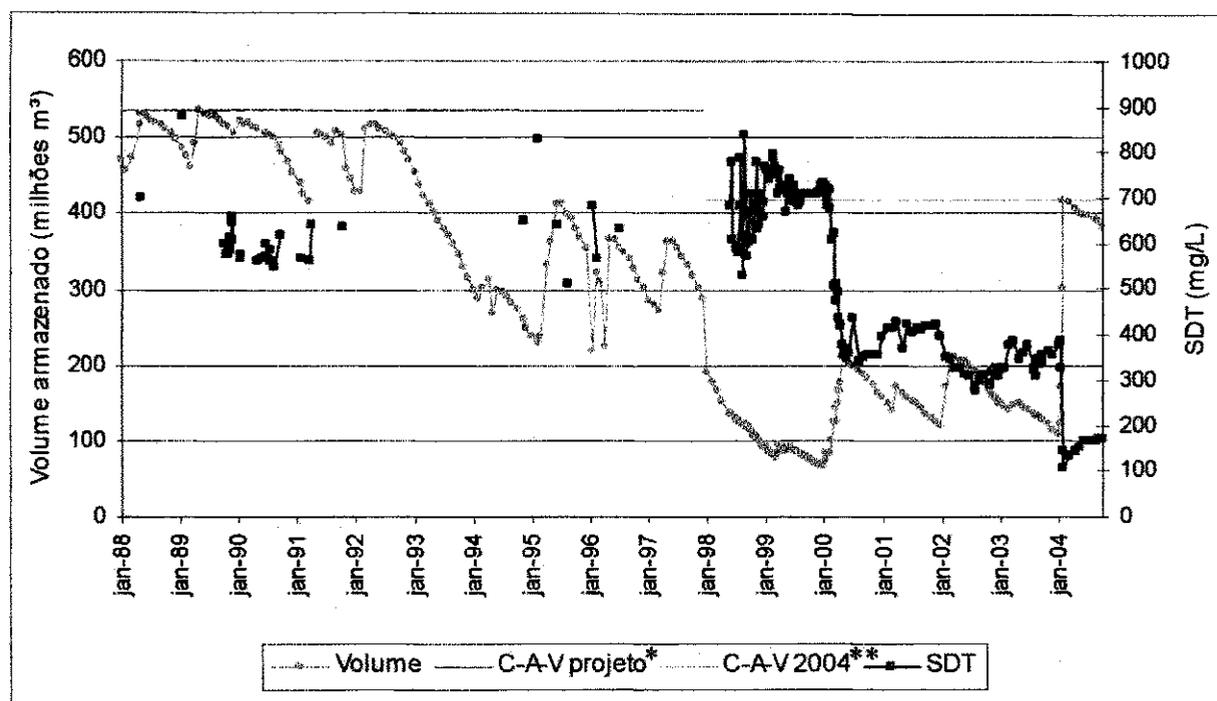
Apresenta-se, inicialmente, o comportamento da qualidade da água no açude Boqueirão baseando-se na relação entre os parâmetros SDT e o volume armazenado ao longo dos anos, e o modelo de qualidade de água para SDT elaborado a partir desses parâmetros. Em seguida, apresenta-se o modelo de operação quali-quantitativo de reservatórios do semi-árido e a proposta de um sistema de gestão integrada da qualidade e quantidade de água.

4.1 Aspectos Qualitativos do Açude Boqueirão em Termos de SDT

Importante ressaltar que, neste trabalho, quando se faz menção à qualidade de água está se referindo às questões que envolvem o parâmetro de qualidade SDT, selecionado para este estudo, mas destaca-se que a qualidade de um corpo hídrico é dada por uma série de parâmetros físicos, químicos e biológicos, e não somente de um parâmetro tomado à parte.

4.1.1 Análise dos Dados

Os dados de qualidade e de quantidade da água do açude Boqueirão adquiridos não apresentavam homogeneidade entre as séries (Anexo B), fato que fez com que se limitasse a série a ser modelada. Mas, para se obter uma compreensão mais ampla do comportamento das concentrações de SDT e sua relação com o volume armazenado no reservatório ao longo dos anos, optou-se por apresentar na Figura 4.1, os dados completos. A Figura 4.2 mostra a série adotada para modelagem neste trabalho, que abrange o período de junho de 1998 a outubro de 2004.



* Curva Cota-Área-Volume do projeto do reservatório (1957)

** Curva Cota-Área-Volume de batimetria realizada em 2004

Figura 4.1 – Série histórica completa dos dados de SDT e do volume armazenado no açude Boqueirão adquiridos junto à CAGEPA e ao LMRS/PB, respectivamente. Período de janeiro de 1988 a outubro de 2004.

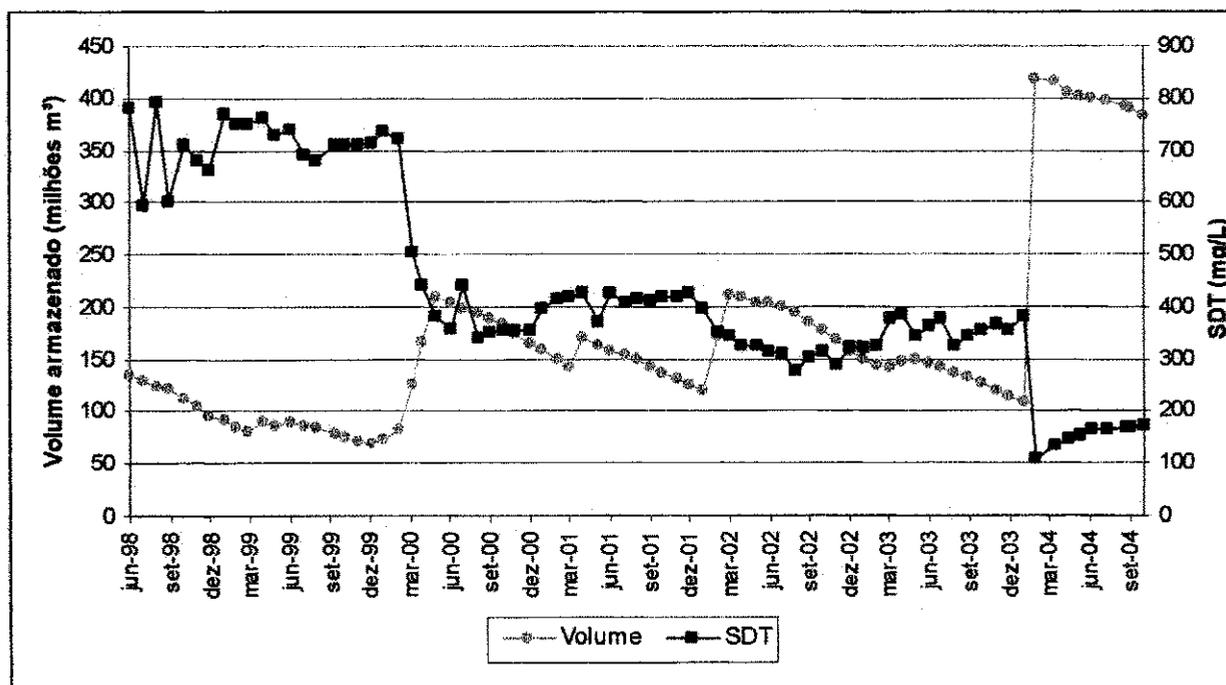


Figura 4.2 – Comportamento das concentrações de SDT em relação ao volume armazenado no açude Boqueirão no período de junho de 1998 a outubro de 2004. Série adotada para modelagem.

Observando a Figura 4.1, pode-se afirmar que as concentrações de SDT apresentaram-se altas até início de 2000, com valores acima de 510 mg/L e, em janeiro de 1989, atingiram a concentração de 880 mg/L. Tendo em vista que a Resolução CONAMA n° 020/86, atual Resolução CONAMA n° 357/05, determina a concentração de 500 mg/L como limite máximo de SDT para corpos hídricos de água doce de classe 2 e 3 (destinados ao abastecimento humano), o reservatório apresentava-se, então, naquele período, com sua qualidade irregular em termos de SDT, para a potabilização.

Ainda observando a Figura 4.1, ao analisar o comportamento de SDT em relação ao volume armazenado no reservatório verifica-se que, no período de 1995 a 1996, as concentrações de SDT estavam altas (em média, 650 mg/L) enquanto o reservatório apresentava também elevado volume armazenado (mais de 60% da sua capacidade); e nos anos de 1998 a início de 2000, as concentrações de SDT apresentavam-se ainda altas (em torno de 680 mg/L) quando o reservatório atingia, nesse período, os mais baixos volumes armazenados, em torno de 31%, chegando a 15% da sua capacidade de armazenamento. Assim, não se pode afirmar que as concentrações de SDT foram elevadas no período de 1998 a 2000 devido ao baixíssimo volume no reservatório nesse período, tendo em vista que as concentrações de SDT já estavam altas desde os anos anteriores. Portanto, o volume armazenado no reservatório não é um dado que pode ser tomado individualmente para explicar a variação das concentrações de SDT e, mesmo sendo um fator de muita influência no comportamento dessas concentrações, outras questões devem estar envolvidas nesse processo.

As atividades antrópicas são causadoras de fortes influências na qualidade das águas. Segundo Mota (2003) as principais fontes de poluição das águas superficiais são: as águas pluviais carreando impurezas da superfície do solo, os resíduos sólidos, pesticidas, fertilizantes, alterações nas margens, provocando carreamento de solo como consequência da erosão, etc. Além disso, atividades como aqüicultura e agropecuária devem ser fiscalizadas com rigor e praticadas dentro dos requisitos exigidos pelo órgão ambiental, para reduzir ao máximo as interferências no solo, vegetação, ar, etc. e, conseqüentemente, nos corpos hídricos.

Pela Figura 4.2, verifica-se que, a partir do aumento do volume no reservatório nos meses de janeiro a maio de 2000 (estação chuvosa), houve uma redução considerável nas concentrações de SDT atingindo 500 mg/L já em março. As concentrações de SDT não mais ultrapassaram, desde então, o limite máximo permitido pelas Resoluções CONAMA 020/86 e 357/05. Mesmo quando o reservatório teve seu volume reduzido a 26,6% em janeiro de 2002 e 25% no início de janeiro de 2004 (antes das fortes chuvas), a água apresentou concentrações baixas, de 395 mg/L e 380mg/L, respectivamente, não sendo o baixo volume um fator decisivo no aumento da

concentração de SDT. Outros fatores podem ter contribuído para esse fato, como: afluências de água de melhor qualidade que a do reservatório no início de 2000 e 2004; estratificação química proporcionando maiores concentrações de SDT nas zonas mais profundas do reservatório (saindo da coluna d'água); redução nas concentrações de SDT devido a saídas com a água que é captada para o abastecimento.

É importante ressaltar que a cidade de Campina Grande passou por uma crise no abastecimento de água durante a seca de 1997 a 2000 (REGO *et al.*, 2000). Neste período de ameaça de colapso total de abastecimento, a primeira medida tomada foi a suspensão da descarga de fundo do reservatório, que até então era responsável pela perenização do rio Paraíba, a jusante do açude, através de uma vazão variável de descarga. Assim, até 1998, o açude Boqueirão tinha saída constante da água do fundo, possibilitando redução nas concentrações de SDT e/ou evitando maior concentração de SDT nesta região do reservatório, pelo menos na área próxima à parede da barragem, o que não impediu que as concentrações de SDT permanecessem altas no reservatório.

Outra questão importante a ser destacada, nessa época, é que a última medida tomada para evitar reduções maiores do volume no reservatório, foi a suspensão da irrigação, que aconteceu no dia 03/03/99 (REGO *et al.*, 2001). Segundo esses autores, a irrigação era realizada a montante do reservatório, margeando a sua bacia hidráulica, ou seja, havia uma influência direta no corpo d'água de produtos químicos advindos dos fertilizantes e pesticidas carregados para dentro do açude. Se houvesse informações sobre a quantidade de água utilizada na irrigação que retorna para o açude, a quantidade de fertilizantes/pesticidas aplicados, do escoamento e percolação desses elementos para o açude, seria possível verificar se as concentrações de SDT se mantiveram altas no reservatório no período que antecedeu a suspensão da irrigação devido aos íons carregados por esta atividade.

Ainda na Figura 4.2, outra questão relevante foi o expressivo aumento do volume armazenado no reservatório com as chuvas que ocorreram a partir de janeiro de 2004, que fez com que as concentrações de SDT alcançassem os valores mais baixos da série. O açude sangrou no dia 01 de fevereiro de 2004, evento que foi muito apreciado, já que o mesmo não sangrava fazia 15 anos (SEMARH/DNOCS, 2005), e apresentou, na ocasião, uma concentração de 107 mg/L de SDT. Em seguida, o volume armazenado no reservatório começou a reduzir, mesmo ainda sob a estação chuvosa (menor afluição), e a concentração de SDT foi gradativamente aumentando (diferente do que ocorreu na estação chuvosa de 2000), permanecendo ainda baixa, alcançando a concentração de 171 mg/L em outubro de 2004. Acredita-se que um dos motivos das baixas concentrações de SDT neste mês foi devido a descarga de SDT com o volume

sangrado do reservatório. Este fato só poderia ser melhor verificado se a série estudada fosse mais longa e apresentasse outros momentos em que o reservatório atingiu sua capacidade máxima e sangrou.

Em geral, a Figura 4.2 retrata o comportamento esperado para SDT em relação ao volume, onde à medida que o volume aumenta reduzem-se as concentrações de SDT em maior ou menor grau. Mas observa-se, também, que o mesmo não se verificou quando houve reduções do volume armazenado no reservatório, que muito raramente reflete em aumento na concentração de SDT, mesmo quando se sabe que os baixos volumes no reservatório aumentam as possibilidades de mistura e entrada na coluna de água de sais das zonas mais profundas do mesmo. Aumento nas concentrações de SDT só foram verificados em janeiro a março de 2001 e no ano de 2004 (ambos no período de estação chuvosa).

É importante ressaltar que os dados de SDT são referentes a somente um ponto de coleta da água no reservatório (realizado, na verdade, na entrada da ETA a 17,2 km do reservatório). Portanto, não são dados que representam o comportamento de SDT no reservatório de forma precisa, mas que através deles se tem uma noção dessas concentrações ao longo dos anos, sendo, portanto, suficientes para o objetivo da modelagem matemática.

4.1.2 Modelagem da Série Total

Uma vez conhecida a relação entre comportamento de SDT (parâmetro qualitativo adotado) e o comportamento do volume armazenado no açude Boqueirão (parâmetro quantitativo), buscou-se construir um modelo que simule este comportamento e que possa apoiar as tomadas de decisão em relação às ações de descargas de fundo a serem aplicadas ao reservatório como medida de gestão, com a intenção de melhorar ou evitar maior deterioração da qualidade da água em termos de SDT. Portanto, depois de selecionados e organizados os dados de SDT e dos volumes armazenados no reservatório (série de junho/98 a outubro/04, Figura 4.2), através da análise de regressão linear múltipla obteve-se a Equação 4.1:

$$SDT_{i+1} = 75,8 + 0,783.SDT_i - 0,86 \times 10^{-7} . \Delta V_{i \rightarrow i+1} \quad (\text{Equação 4.1})$$

Onde:

SDT_{i+1} – previsão de SDT para o próximo mês, em mg/L;

SDT_i – valor de SDT do mês atual (mg/L);

$\Delta V_{i \rightarrow i+1}$ – variação estimada do volume no reservatório do mês atual ao próximo mês, obtida da previsão hidrometeorológica, em m³.

Esta equação apresentou um coeficiente de determinação (R^2) de 0,817 o que significa um bom ajuste, como pode ser observado na Figura 4.3.

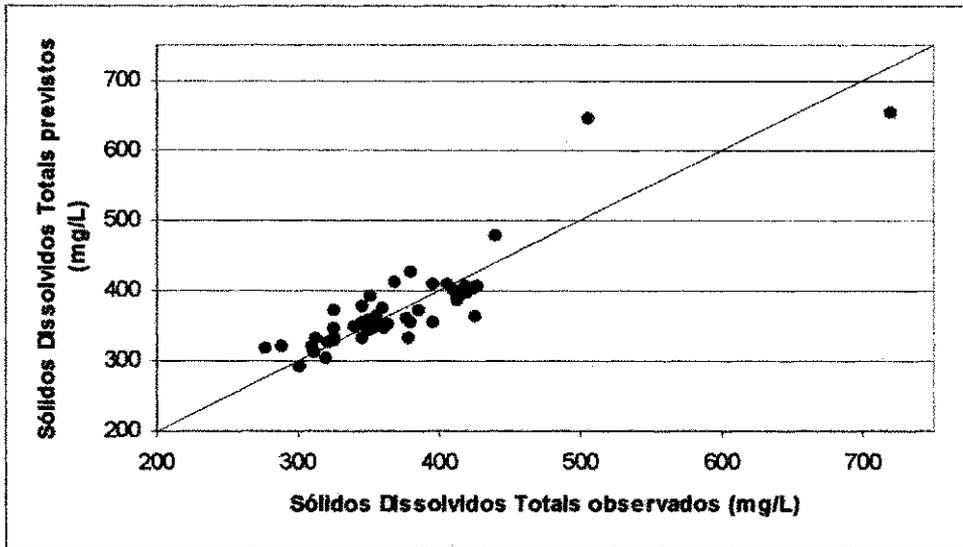


Figura 4.3 – Correlação entre os dados de SDT observados em campo e os dados de SDT previstos pelo modelo de qualidade de água.

Numa outra forma de representação (Figura 4.4) verifica-se que, dentro da finalidade de construir um sistema de apoio à decisão que auxilie nas ações de descarga de fundo de acordo com a previsão hidrometeorológica de um mês para o outro, a que se propôs este trabalho, o modelo não é adequado.

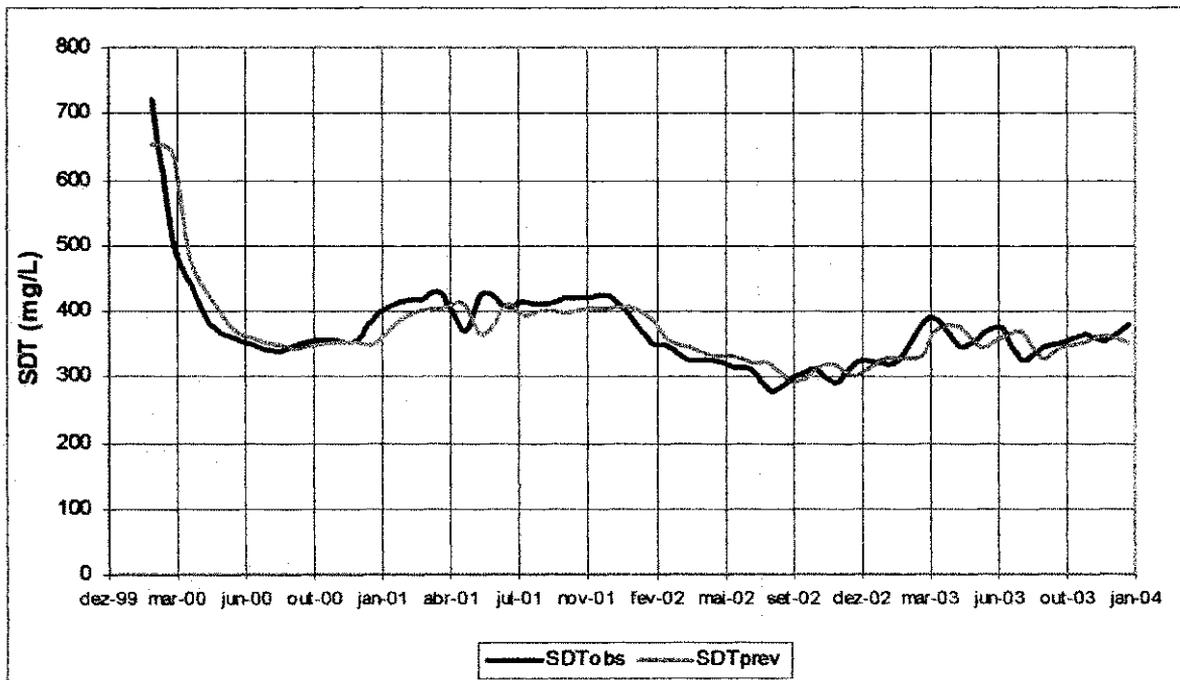


Figura 4.4 – Comportamento dos SDT observados ao longo do tempo (SDTobs) e os SDT previstos (SDTprev) pelo modelo de qualidade de água obtido.

Observa-se pela Figura 4.4 que o modelo, apesar de apresentar um R^2 alto, não está realizando uma boa previsão para SDT, apresentando uma defasagem de um mês entre a variável prevista e a real (observada). A variável de gestão, que é representada pela variação do volume no reservatório, apresentou, na equação, um coeficiente pouco expressivo, na ordem de 10^{-7} . Assim, não seria possível planejar ações de gestão com base na variação estimada do volume do reservatório sobre a variável qualitativa (STD). Este modelo foi descartado.

4.1.3 Modelagem das Séries Sazonais

Uma outra forma de modelar a série de dados é dividi-la em duas, uma contendo a seqüência dos meses chuvosos de cada ano e outra os meses secos.

Na Figura 4.5 observa-se o comportamento de SDT em relação ao comportamento do volume armazenado no reservatório somente nos meses definidos como estações secas.

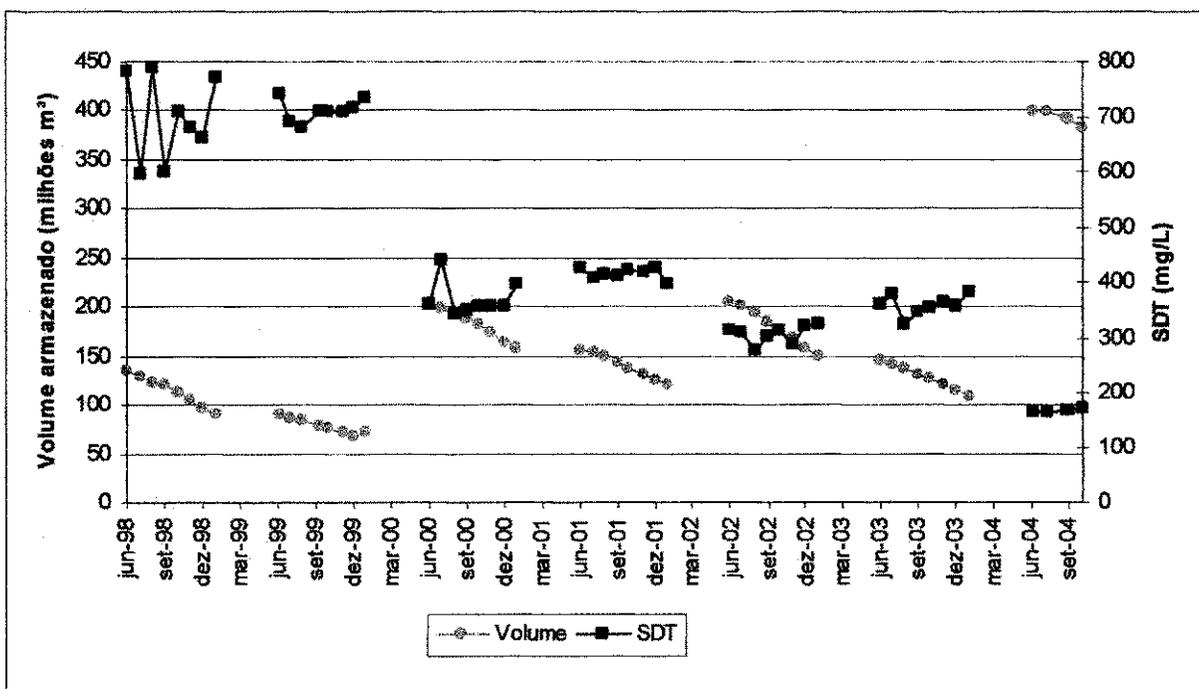


Figura 4.5 - Comportamento das concentrações de SDT em relação ao volume armazenado no açude Boqueirão nas estações secas.

Verifica-se, através da Figura 4.5, que, nas estações secas, as concentrações de SDT permanecem praticamente as mesmas quando comparadas às concentrações do início com as do final de cada estação, podendo-se considerar, então, que não houve variação relevante de SDT nestas estações. Para as estações secas, os dados disponíveis não mostram, como poderia se esperar, acréscimo nas concentrações de SDT em virtude da redução de volume pelo efeito da evaporação e/ou das demandas. Há flutuações das concentrações de SDT, embora dentro de uma faixa de variação que não evidencia tendências de redução ou de acréscimo no período.

O comportamento observado para SDT nas estações secas difere daquelas das estações chuvosas, como pode ser verificado na Figura 4.6. Nela observa-se que as concentrações de SDT apresentaram uma relação inversa à variação do volume armazenado no reservatório. Verifica-se que, quando ocorre um aumento considerável do volume armazenado, as concentrações de SDT apresentam fortes reduções.

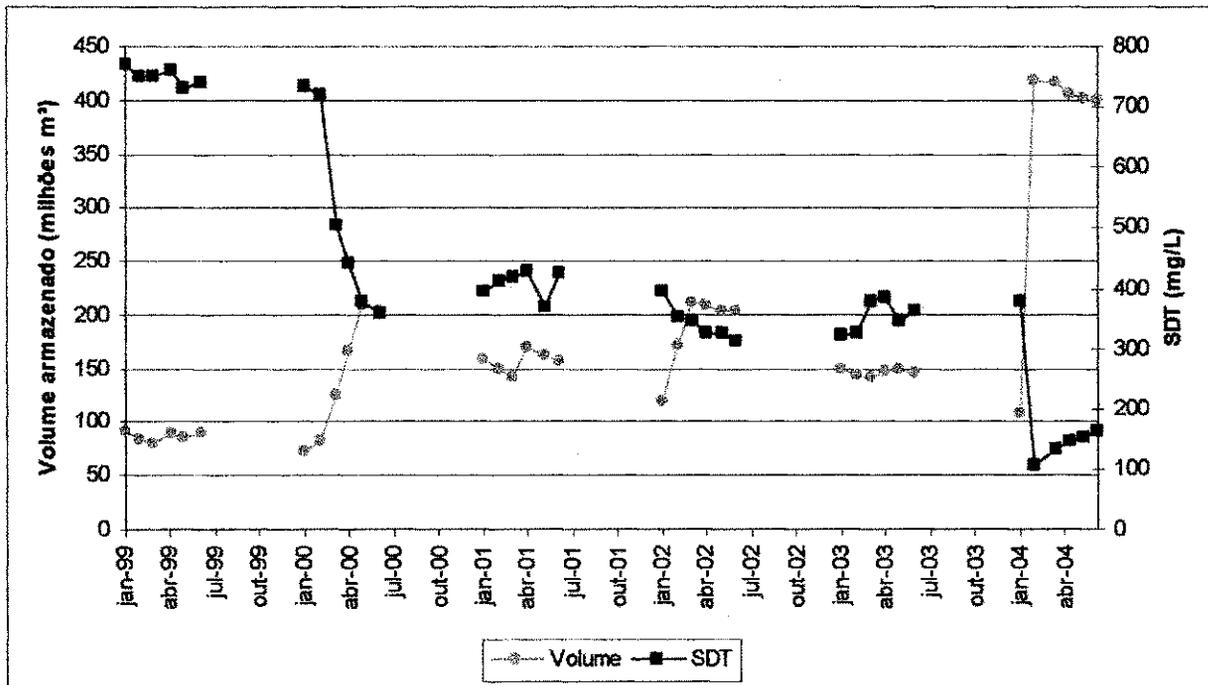


Figura 4.6 – Comportamento das concentrações de SDT em relação ao volume armazenado no açude Boqueirão nas estações chuvosas.

Diante do comportamento das concentrações de SDT mostrado nas Figuras 4.5 e 4.6, verificou-se a possibilidade de modelá-lo nas duas estações em separado. Para estação seca, considerou-se que os SDT não apresentam variação relevante nas suas concentrações em relação à variação do volume, e para estação chuvosa buscou-se modelar a variação das concentrações de SDT em relação à variação do volume armazenado no reservatório.

Importante ressaltar que, para a modelagem na estação chuvosa, não foram incluídos os dados referentes aos meses de janeiro. Essa decisão foi tomada partindo da premissa de que se trata de um mês não previsível em termos meteorológicos e não incluído nas previsões realizadas pelos centros estaduais de previsão.

Observa-se, nas Figuras 4.7 e 4.8, que quanto maior for a variação positiva do volume armazenado no reservatório maior será a variação negativa na concentração de SDT. À medida que há aumento no volume de água no reservatório, há maior redução nas concentrações de SDT. Pode-se afirmar, também, que com os dados dessas seis estações chuvosas, o aumento do volume armazenado causa redução da concentração de SDT quando esse aumento é superior a

cerca de 8 milhões de m³ e que, para acréscimos de volume menores que 8 milhões de m³, haveria aumento na concentração de SDT (Figura 4.7).

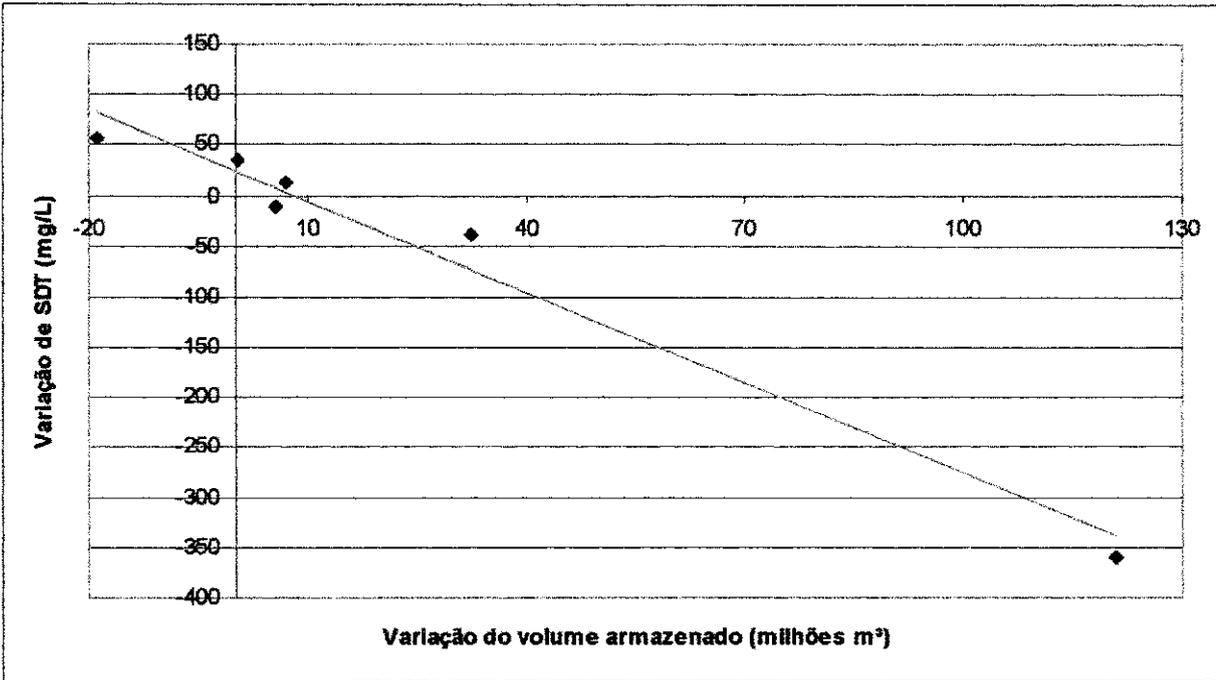


Figura 4.7 – Relação entre a variação de SDT e a variação do volume armazenado no açude Boqueirão para estação chuvosa.

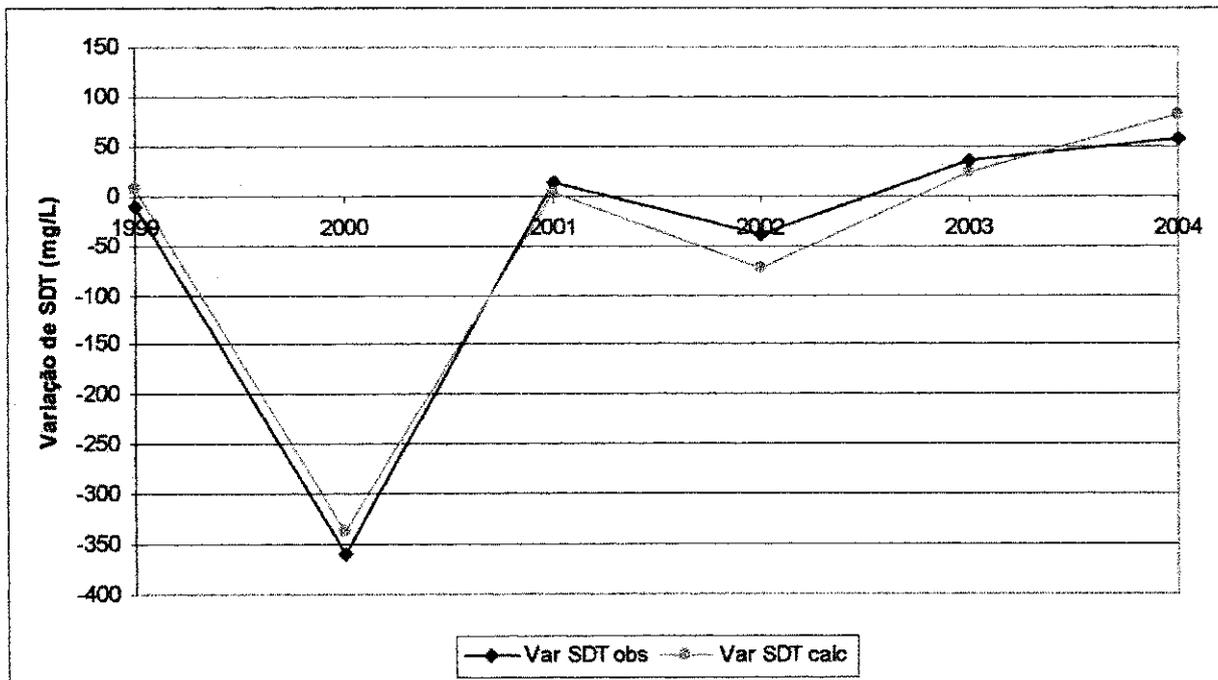


Figura 4.8 – Comportamento da variação de SDT observada ao longo do tempo (var SDT obs) e o comportamento da variação de SDT calculada (var SDT calc) pelo modelo gerado para estação chuvosa.

O modelo obtido para a relação entre o comportamento da variação de SDT e a variação do volume no açude Boqueirão para estação chuvosa apresentou um coeficiente de determinação (R^2) de 0,984 e está representado na Equação 4.2.

$$\Delta SDT = 25,024 - 3 \times 10^{-6} \cdot \Delta Vol \quad \text{Equação (4.2)}$$

Onde:

ΔSDT – variação da concentração de SDT numa estação chuvosa (mg/L);

ΔVol – variação do volume armazenado no reservatório numa estação chuvosa (m^3).

Um comentário que cabe ser feito é em relação às grandes afluências ocorridas no mês de janeiro de 2004. Essas afluências proporcionaram uma grande redução nas concentrações de SDT, seguida de um aumento gradativo das concentrações nos meses seguintes.

O fato é que o modelo da Equação 4.2 não foi construído com os dados de janeiro. Na Figura 4.9 é apresentado um gráfico mostrando como a Equação 4.2 preveria o comportamento de SDT para a variação de volume ocorrida em janeiro/04, tendo em vista que neste mês ocorreram as maiores afluências de volume de toda a série histórica.

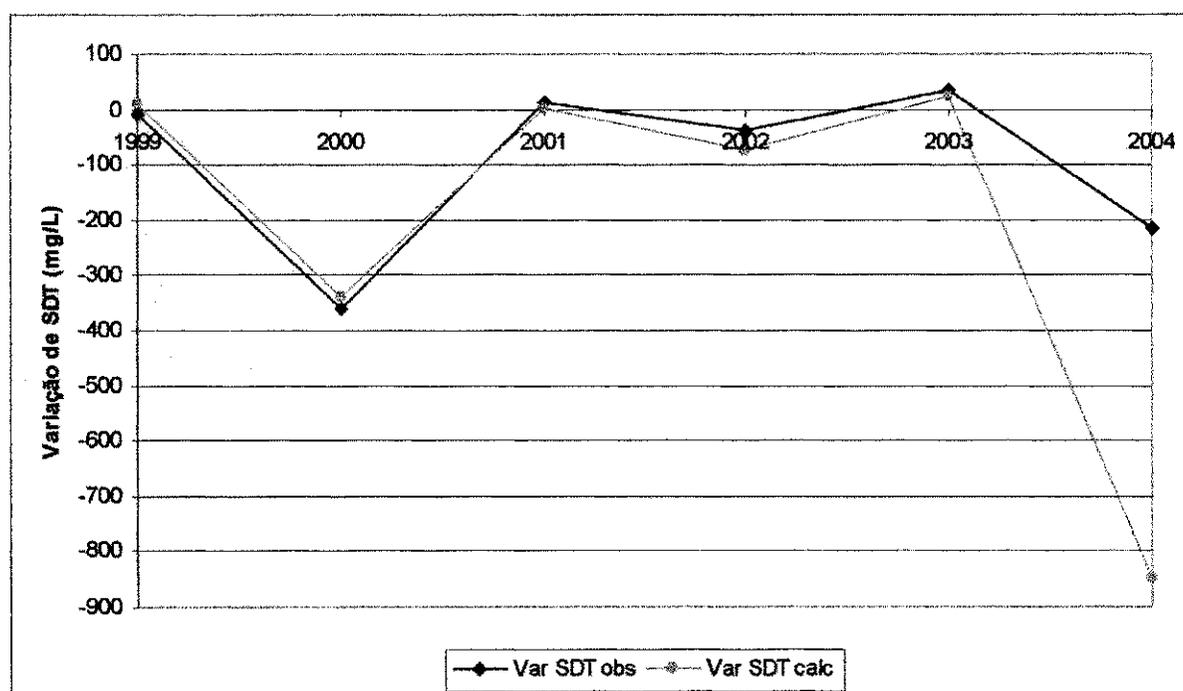


Figura 4.9 – Comportamento da variação de SDT observada ao longo do tempo (var SDT obs) e o comportamento da variação de SDT calculada (var SDT calc) pelo modelo gerado para estação chuvosa incluindo os dados de janeiro/04.

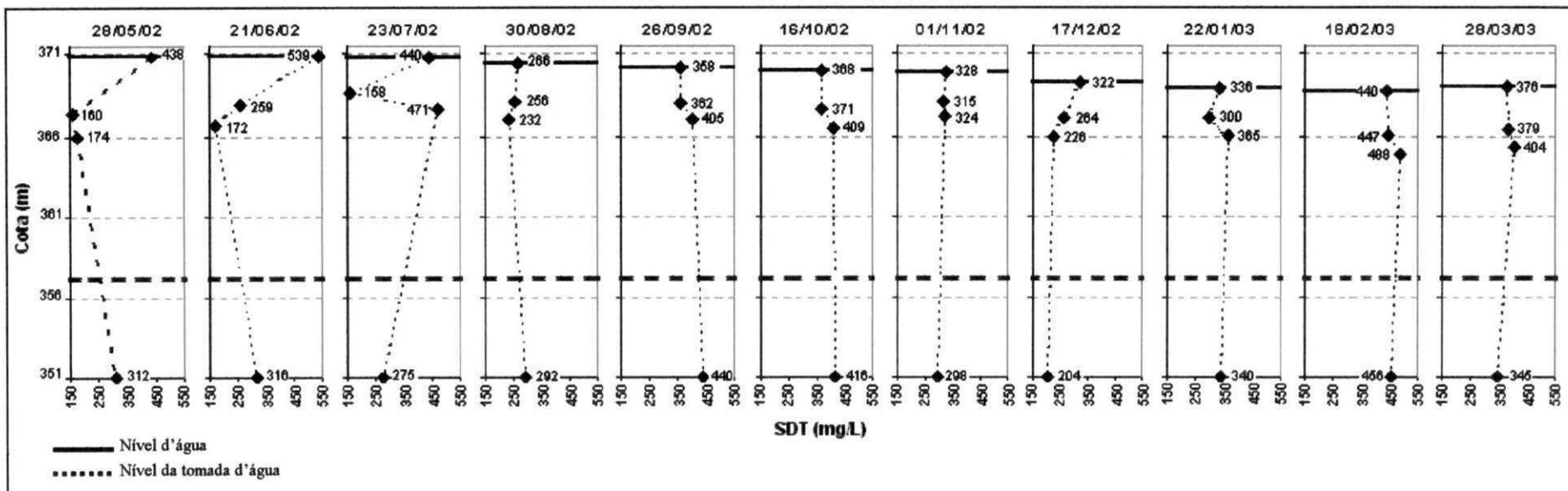
Observa-se que o modelo estima uma redução de SDT muito grande devido à amplitude das chuvas de janeiro/04, o que de fato não ocorreu. Na verdade, a extensão da série disponível é muito curta para calibração de um modelo confiável. Fica claro que o processo de redução das concentrações de SDT com o aumento do volume armazenado não é simples.

4.1.4 Análise dos Dados de SDT na Coluna de Água

A intenção de compreender e modelar o comportamento de SDT em profundidade é de poder prever a qualidade da água no reservatório, em termos de SDT, ao nível de captação da água para abastecimento. Segundo Esteves (1998), corpos d'água mais profundos, como é o caso do açude Boqueirão, apresentam possibilidade de estratificação térmica, podendo ocorrer acentuado aumento na concentração dos principais íons no hipolímnio.

Para compreender o comportamento das concentrações de SDT ao longo da coluna d'água do açude Boqueirão, utilizaram-se dados de pesquisa desenvolvida neste reservatório por Diniz *et al.* (2004) e Diniz *et al.* (2005). A Figura 4.10 mostra o comportamento mensal de SDT em quatro profundidades, referenciadas segundo a porcentagem de luz incidente (100%, 50%, 1% e 0% de luz) ao longo da coluna d'água, com dados coletados entre 8 e 10 horas, sendo uma única coleta para cada profundidade por mês. A Tabela 4.1 apresenta as profundidades das coletas segundo as porcentagens de luz incidente.

A Figura 4.10 permite observar que as concentrações de SDT apresentaram flutuações entre os meses, em todas as profundidades. Essas flutuações foram muito expressivas nas três primeiras profundidades nos meses chuvosos (maio a julho/02), medindo-se, ao nível da superfície, por exemplo, 438 mgSDT/L, em maio/02, 539 mgSDT/L, em junho/02 e 440 mgSDT/L, em julho/02, sugerindo fortemente aportes externos. Os declínios acentuados em 3,5, 3 e 2,2 metros de profundidade (50% de luz incidente) em maio, junho e julho indicaram muito provável diluição e/ou estratificação química. No fundo e próximo à captação, as concentrações foram mais baixas que na superfície, variando entre 275 e 316 mgSDT/L, nesses mesmos meses. A repetição da distribuição de SDT durante esses três meses sugere estratificação no horário amostrado. Entretanto, por ter sido apenas uma amostragem para cada profundidade num único horário, não se pode inferir a estabilidade desse comportamento ao longo do dia.



FONTE: Diniz *et al.* (2005).

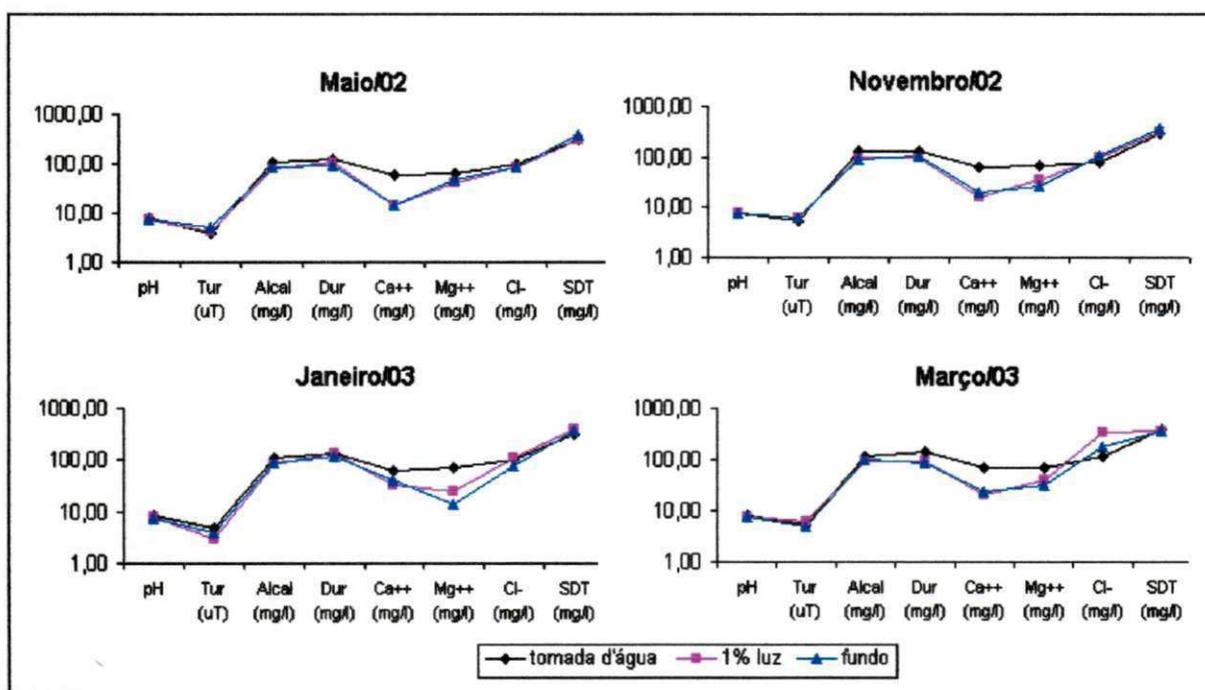
Figura 4.10 – Distribuição de SDT ao longo de quatro profundidades (100%, 50%, 1% e 0% de incidência de luz), na coluna de água de um ponto central do açude Boqueirão no período de maio/02 a março/03, no horário de 8 a 10 horas.

Tabela 4.1 – Correspondência entre a porcentagem de luz incidente em diferentes profundidades (100%, 50%, 1% e 0% de incidência de luz) e sua expressão em metros, em um ponto central do açude Boqueirão, em coletas realizadas entre 8 e 10 horas (período de maio/02 a março/03).

% luz	Profundidade (m)										
	Mai/02	Jun/02	Jul/02	Ago/02	Set/02	Out/02	Nov/02	Dez/02	Jan/03	Fev/03	Mar/03
100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
50	3,5	3	2,2	2,4	2,2	2,4	1,8	2,2	1,8	2,7	2,4
1	5	4,3	3,2	3,5	3,2	3,5	2,7	3,2	2,7	4	3,5
0	20	19,92	19,7	19,39	19,12	18,91	18,72	18,21	17,79	17,72	17,88

Nos meses seguintes, de estiagem (agosto/02 a janeiro/03¹), e nos dois primeiros da próxima estação chuvosa (fevereiro e março/03), as flutuações foram menos acentuadas em toda a coluna de água. Nos meses de seca, se verificaram menores concentrações na superfície (266 a 368 mgSDT/L), enquanto no fundo e próximo à captação as concentrações foram mais variáveis (entre 204 e 440 mgSDT/L), atingindo valores maiores que nas chuvas, sugerindo ausência ou menor estratificação e evidenciando a concentração de sais nas camadas mais profundas. Nos dois meses seguintes, que correspondem ao início do período chuvoso, não se destaca a estratificação de SDT como nos três meses do período chuvoso anterior, mais sim se evidencia o aumento das concentrações de SDT na superfície e nas camadas inferiores (345 – 456 mgSDT/L).

Em geral, as variações de SDT na camada do fundo, onde se encontra a tomada d'água, podem estar relacionadas com as estratificações térmicas e com os fluxos hidráulicos provocados pela captação, principalmente nos meses de estiagem (agosto/02 a janeiro/03), onde se verifica maior amplitude dessas variações. Isso pode ser mais claramente verificado na Figura 4.11, onde se apresentam, de forma comparativa, resultados da qualidade da água no ponto de captação, com a qualidade da água a 1% de luz e no fundo no açude Boqueirão.



FONTE: Diniz (2005).

Figura 4.11 – Comparação da qualidade da água no ponto de captação com a água nas profundidades 1% de luz e fundo, no açude Boqueirão, nos meses de maio/02, novembro/02, janeiro/03 e março/03.

¹ – Diniz et al. (2005), DINIZ (2005) e DINIZ et al. (2004) consideram janeiro como sendo um mês de transição entre a estação seca e chuvosa, adotando-o em seus trabalhos como um mês de estação seca.

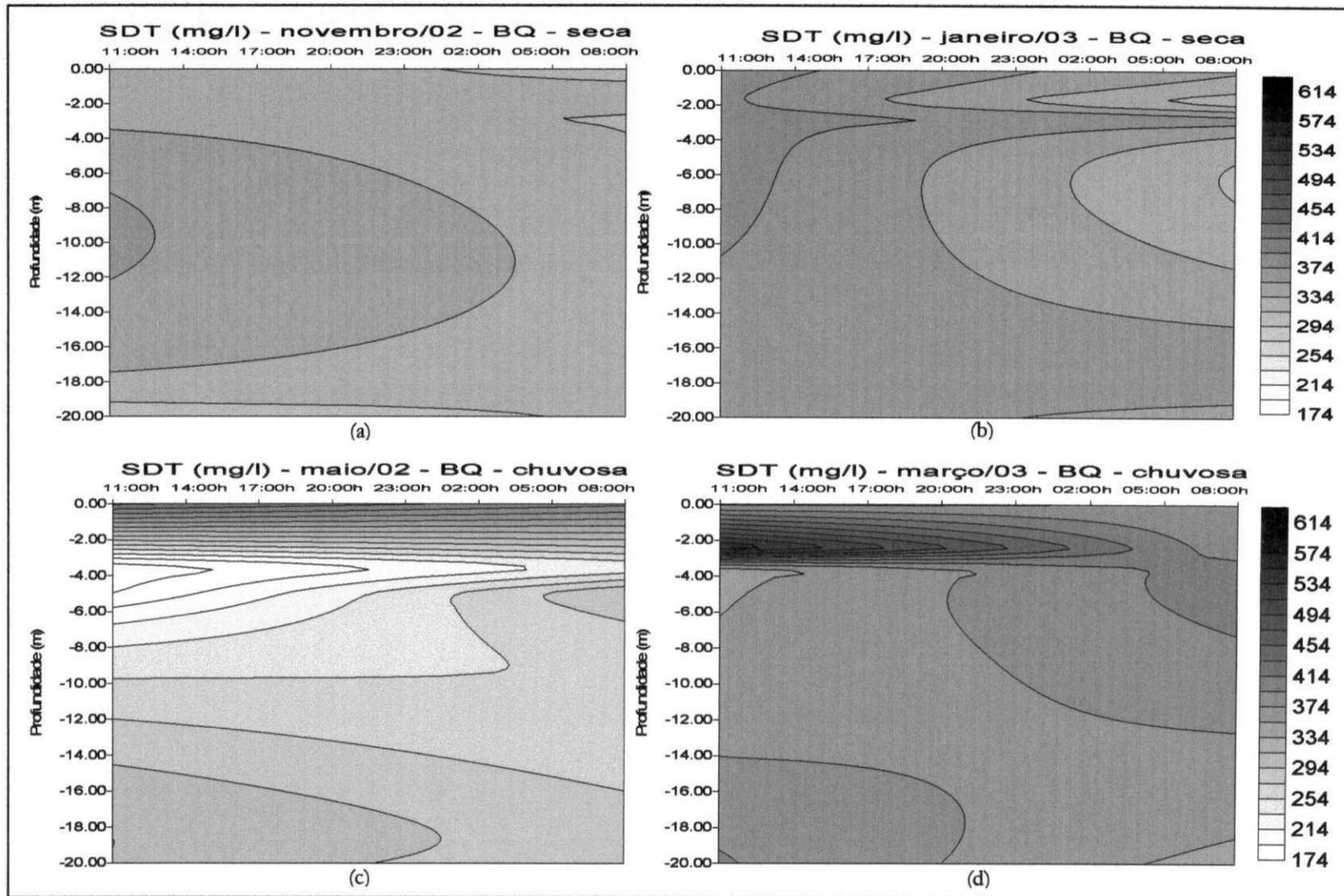
Na Figura 4.11 verifica-se que a qualidade da água na captação não mostrou variações acentuadas para maioria dos parâmetros em relação à qualidade nas profundidades referentes a 1% (3 - 5 m) e 0% (≈ 20 m) de luz. Mas verificou-se que para dureza (que apresenta o bicarbonato de cálcio como um dos seus principais componentes), cálcio e magnésio – que participam na composição de SDT – as concentrações foram levemente maiores na água ao nível de captação que nas outras profundidades. Segundo Diniz (2005), a maior concentração desses íons na tomada d'água sugere que os mecanismos de captação podem estar favorecendo a re-introdução de sais das zonas mais profundas do reservatório na coluna d'água.

A intenção de estudar os ciclos nictemerais foi a de enriquecer a análise dos dados de SDT em profundidade para confirmar ou não o comportamento mensal observado nas análises entre 8 e 10 horas. Esta análise permite avaliar a distribuição e mobilidade de SDT num ciclo de 24 horas ao longo da coluna d'água. Na Figura 4.12, observa-se o comportamento nictemeral de SDT ao longo da profundidade, referente a quatro amostragens, sendo duas realizadas na estação seca e duas na estação chuvosa.

As Figuras 4.12a e 4.12b (dois ciclos nictemerais de verão) permitem verificar a existência de pouca estratificação de SDT ao longo do dia e escassa variação na concentração de SDT ao longo da coluna d'água. A Figura 4.12a mostra estratificação de SDT até 2 horas da madrugada, seguido de mistura e nova ocorrência de estratificação a partir das 5 horas, quando recomeça o aquecimento das camadas superiores. Pela Figura 4.12b verificam-se estratificações maiores e um pouco mais duradouras na primeira camada. As estratificações visualizadas em ambas figuras da estação seca pouco afetaram as camadas mais profundas.

Na estação chuvosa (Figuras 4.12c e 4.12d) as estratificações foram mais fracionadas em camadas de pouca profundidade na superfície, onde se verificam também as maiores concentrações de SDT. As estratificações foram mais amplas nas maiores profundidades ou, até mesmo, ausentes, como se observa no mês de março/03 (Figura 4.12d).

Comparando os perfis de estação seca com os da estação chuvosa (Figura 4.12) verifica-se que na primeira houve maiores misturas nas camadas superficiais e em algumas horas ao longo de toda a coluna d'água. As desestratificações podem ser resultado da influência dos ventos e do baixo nível da água no reservatório no período do trabalho de campo, que se apresentava entre 35% e 45% da sua capacidade de armazenamento (Anexo B). Segundo Diniz (2005), o açude Boqueirão apresenta padrões diários de estratificação e mistura, condicionados pela ação dos ventos e da profundidade.



FONTE: Diniz *et al.* (2004)

Figura 4.12 – Variação vertical e nictemeral das concentrações de SDT nos meses de nov/02 (a), jan/03 (b), maio/02 (c) e mar/03 (d) no açude Boqueirão, em duas estações secas (4.12a e 4.12b) e duas chuvosas (4.12c e 4.12d).

Em geral, observam-se, nos ciclos nictemerais, que as estratificações das camadas mais profundas são menos acentuadas que na superfície em ambas as estações, embora cada dia, seja de verão ou de inverno, tenha apresentado um comportamento particular. Verificou-se também que ambas as estações apresentaram estratificações durante o dia e tendência à mistura ou misturas à noite.

Pode-se afirmar, portanto, que os estudos dos perfis mensais, num único dia por mês, num único ponto no reservatório representaram os comportamentos globais de SDT, mostrando maior variação desse parâmetro no fundo do reservatório, principalmente no período de estiagem; e que os ciclos nictemerais representam bem as principais características que definem o comportamento de verão (estação seca) e de inverno (estação chuvosa) em relação à distribuição vertical e horária de SDT. O ideal para a modelagem seria usar dados de SDT provenientes de um maior número de coletas por mês, realizando para cada uma delas perfis nictemerais mais longos que de 24 horas e seriam recomendáveis perfis de 48 ou 72 horas.

Outra questão importante a destacar é que as profundidades trabalhadas, equivalentes a 100%, 50%, 1% e 0% de luz (por Diniz *et al.* (2004) com objetivos limnológicos para avaliar distribuição de macronutrientes e de fitoplâncton), limitam a visualização mais detalhada da distribuição das concentrações de SDT em intervalos menores ao longo da coluna d'água, após 4 m de profundidade.

A compreensão do comportamento dos dados de SDT em perfil vertical nos ciclos mensal e nictemeral da coluna de água do açude Boqueirão foram decisivos na elaboração do modelo conceitual apresentado no item 4.2.1.

4.1.5 Modelo de Descarga de Fundo

Partindo das análises anteriores, propõe-se um modelo que calcula o volume de água da descarga de fundo que deve ser praticada no reservatório se a previsão hidrometeorológica apontar para grandes afluições com a chegada da estação chuvosa. Este modelo, juntamente com o modelo de balanço de SDT (modelo de qualidade de água – Equação 4.2), simula o comportamento das concentrações de SDT no reservatório em longo prazo, considerando a qualidade da água a ser alcançada ou mantida com vistas ao abastecimento urbano.

No item anterior, verificou-se que as concentrações de SDT variaram muito pouco ao longo da profundidade e do horário na estação seca em relação à chuvosa, ocorrendo misturas em alguns horários do ciclo diário. Portanto, admitiu-se que a estação seca é a melhor época para aplicar a descarga de fundo.

Com o valor da concentração de SDT do reservatório ao final da estação seca (admitindo-se que a concentração é representativa para todo o reservatório) e, diante de uma previsão de estação chuvosa de muita afluência, pode-se estimar a descarga a ser aplicada que proporcione uma redução na concentração de SDT após as chuvas previstas.

A decisão do volume de água a ser descartado do reservatório deve ser baseada no volume da previsão hidrometeorológica para a próxima estação chuvosa e no volume atual no reservatório. Assim, a concentração de SDT, após a estação chuvosa será menor e não causará prejuízos na quantidade da água armazenada no reservatório, disponível para o abastecimento.

O volume de descarga de fundo é dado pela Equação 4.3:

$$V_D = \frac{M_1/C_2 - V_1 - V_{chu}}{C_1/C_2 - 1} \quad (\text{Equação 4.3})$$

Onde:

V_D – volume de descarga de fundo (m^3)

M_1 – massa de SDT atual = $C_1 * V_1$ (Kg)

C_1 – concentração atual de SDT (Kg/ m^3)

V_1 – volume armazenado atual (m^3)

C_2 – concentração de SDT que se pretende alcançar (Kg/ m^3)

V_{chu} – volume afluente previsto para estação chuvosa (m^3)

Ao calcular a concentração de SDT para próxima estação seca com o volume afluente previsto (Equação 4.1):

- Se a concentração calculada for maior que a concentração que se pretende alcançar, será necessária uma descarga de fundo (Equação 4.3);

- Se o valor calculado após as chuvas for um valor menor que a concentração pretendida, não será necessária uma descarga de fundo.

Quando for necessária a descarga:

- a equação verifica o quanto de massa de SDT deverá ser reduzida para atingir uma melhor concentração deste parâmetro;

- a partir da massa que deve ser retirada, calcula-se o volume de descarga que proporcione esta retirada (a equação considera a massa de SDT constante);
- a nova concentração terá que ser menor que a concentração calculada anteriormente.

Condições para o modelo de descarga:

- A descarga será realizada se o volume de descarga for menor que o volume afluente previsto.
- A descarga será feita com base no volume previsto de chuvas e o volume atual do reservatório.
- Se o volume de descarga recomendado for muito alto devido à alta concentração de SDT no reservatório e não há boa previsão de aumento do volume com a estação chuvosa, recomenda-se uma descarga de fundo parcial desse volume (definida com base no volume afluente previsto) antes da estação chuvosa.

4.2 Sistema de Gestão Integrada da Qualidade e Quantidade de Água

4.2.1 Modelo Conceitual

O modelo conceitual proposto neste trabalho para a operação quali-quantitativa de água em reservatórios do semi-árido foi baseado nas características comportamentais verificadas para o parâmetro SDT em perfil e da série histórica dos dados da água do açude Boqueirão que prevaleceram nas duas estações climáticas do ano. Essas características foram avaliadas segundo literaturas voltadas ao assunto, pesquisas desenvolvidas em reservatórios do semi-árido e das discussões apresentadas no item 4.1 referentes ao comportamento de SDT no açude Boqueirão.

O modelo proporciona uma visão geral de como, teoricamente, é o comportamento da qualidade da água em termos de SDT no açude Boqueirão, a partir das interpretações dos dados de SDT e volume armazenado, da previsão hidrometeorológica e das ações de manejo a serem praticadas. Seu objetivo é possibilitar que o reservatório seja manejado de forma que a qualidade da sua água seja mantida com as concentrações de SDT apropriadas ao abastecimento humano ou evitar que essa qualidade se deteriore. O modelo conceitual é apresentado esquematicamente na Figura 4.13:

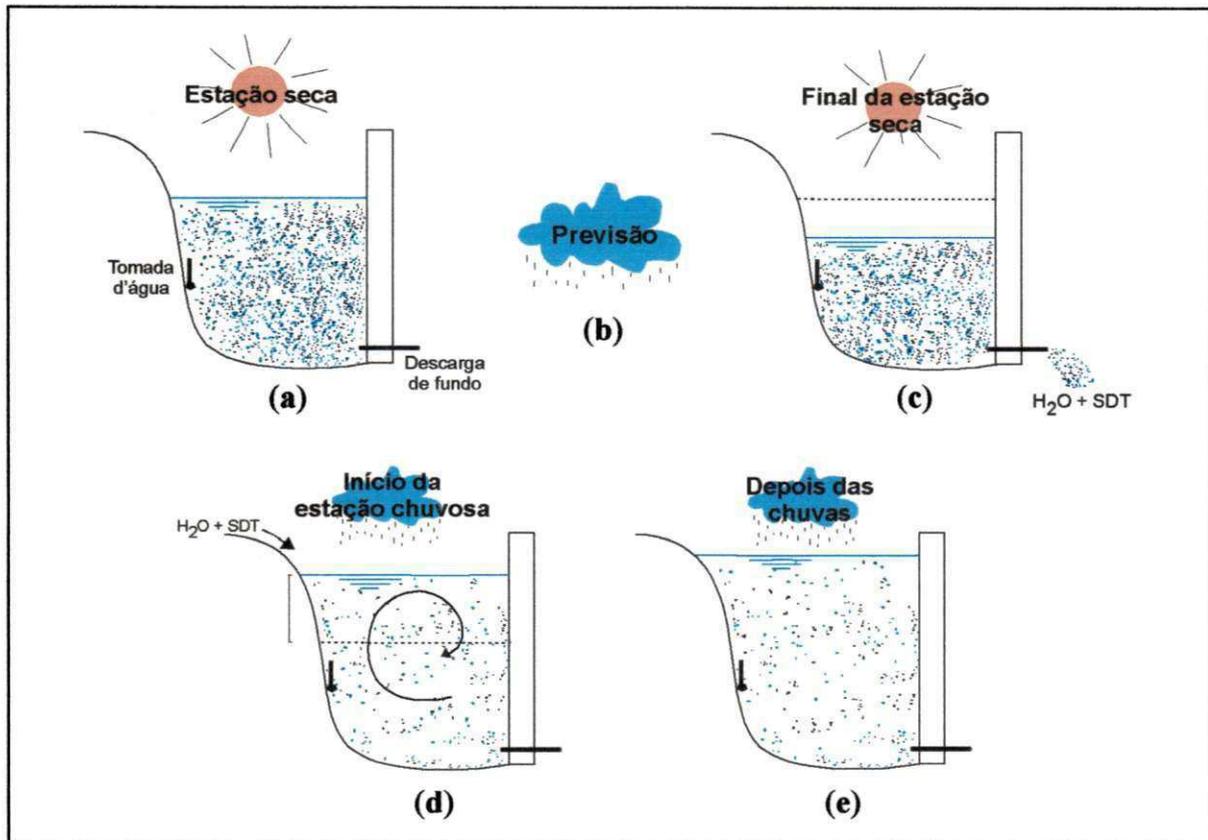


Figura 4.13 – Esquema do modelo conceitual de operação quali-quantitativa de água para reservatórios do semi-árido baseado no balanço de SDT.

17a - Na estação seca monitora-se a concentração de SDT no reservatório. Para águas destinadas ao abastecimento humano, segundo as Resoluções CONAMA n° 020/86 e n° 357/05, o reservatório deve apresentar no máximo SDT de 500 mg/L. Se a concentração de SDT no reservatório na estação seca estiver maior que este limite, devem-se adotar medidas corretivas.

17b – Para isto, estima-se, através da previsão hidrometeorológica, como será a próxima estação chuvosa. Se a previsão for de muita afluência, pode-se fazer o planejamento de descarga de fundo como medida para redução da concentração de SDT.

17c – Com a descarga de fundo realizada já no final da estação seca é descartada uma certa massa de SDT juntamente com a água.

17d - Com as primeiras chuvas, haverá turbulência na água do reservatório com o progressivo aumento no seu volume e novo aporte de SDT (seja pela lavagem da bacia hidrográfica ou por eventuais revolvimentos de SDT das zonas mais profundas do reservatório).

17e – Após a estação chuvosa o reservatório apresentará concentrações de SDT menores que na estação seca anterior (**17a**), ou, pelo menos, apresentará uma concentração de SDT menor que teria caso não tivesse sido aplicada a descarga de fundo.

4.2.2 Modelo Operacional

Depois de apresentado o modelo conceitual será apresentado neste tópico o modelo de operação quali-quantitativo de água propriamente dito, representado esquematicamente na Figura 4.14.

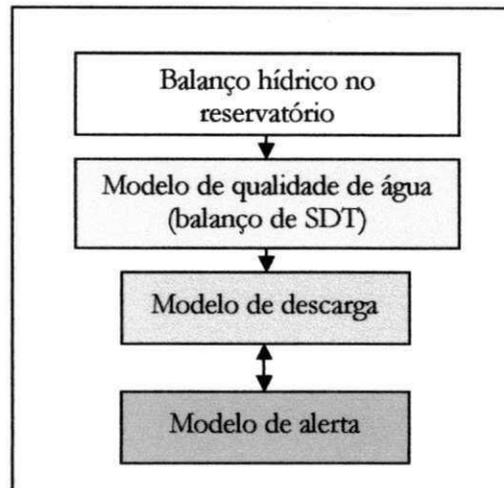


Figura 4.14 – Esquema do modelo operacional quali-quantitativo de água para reservatórios do semi-árido em termos do parâmetro SDT.

O modelo de operação quali-quantitativo de água é responsável pela previsão, estimativa e melhoria da qualidade da água no reservatório em termos de SDT, sem que o mesmo apresente problemas quantitativos de água. Será capaz de realizar o que foi conceitualmente definido com a ação integrada desses quatro modelos:

- Modelo de balanço hídrico – a partir da previsão meteorológica realiza o balanço hídrico no reservatório e disponibiliza os volumes armazenados previstos para o reservatório nos meses da estação chuvosa;

- Modelo de qualidade de água para SDT (Equação 4.2) – com os volumes armazenados previstos no balanço hídrico realiza o balanço de SDT no reservatório;

- Modelo de descarga de fundo (Equação 4.3) – com os dados de SDT previstos para os próximos meses, define volumes de descargas de fundo a serem realizadas para que o reservatório alcance a concentração de SDT desejada;

- Modelo de alerta - para que o modelo de operação quali-quantitativo fosse mais prático e funcional, definiram-se níveis de alerta para serem empregados durante as simulações, auxiliando preventivamente na operação do reservatório.

Através dos níveis de alerta, o modelo é capaz de determinar o momento e o tipo da tomada de decisão de acordo com a gravidade da situação, apontando em quais estações secas

será necessário intervir com medidas de gestão, evitando, assim, que o sistema entre em colapso qualitativo e/ou quantitativo num futuro próximo.

Os níveis de alerta são definidos em função do objetivo a que se propõe a operação do reservatório e de acordo com a realidade vivenciada localmente, pois devem ser funcionais, trazendo a problemática e suas possibilidades de gestão para o tomador de decisão. Os níveis de alerta devem representar bem a realidade do ambiente que está sendo objeto de tomada de decisão e apresentar valores limites das situações críticas de forma gradativa.

Propõem-se três níveis de alerta para a operação quali-quantitativa do açude Boqueirão com base na Resolução CONAMA nº 020/86, atual Resolução CONAMA nº 357/05, para corpos hídricos de água doce de classes 2 e 3. O modelo de operação utiliza cada nível de alerta como valores de sobreaviso. Assim, após a modelagem, a concentração de SDT simulada se enquadrará em um dos níveis de alerta como sendo a concentração que o reservatório apresentará na próxima estação seca. De acordo com o nível de alerta o usuário será notificado das ações possíveis a serem tomadas no final da estação seca atual para que o reservatório não atinja a concentração indesejada após a estação chuvosa.

As medidas de ação a serem adotadas para que o reservatório melhore a qualidade da água em termos de SDT ou que evite uma certa deterioração são: descarga de fundo e/ou retenção de água no reservatório a partir de racionamento. Os níveis de alerta e as respectivas medidas de ação a serem praticadas podem ser observados na Tabela 4.2.

Observando a Tabela 4.2, verifica-se que a faixa definida para os níveis de alerta das concentrações de SDT é pequena. Os níveis de alerta para o parâmetro SDT adotados foram baseados nos valores reais desse parâmetro para o açude Boqueirão. Para esta região, concentrações de SDT abaixo de 400 mg/L são difíceis de ser mantidas, pois apresentam naturalmente característica de altas concentrações. Em outros tipos de corpos hídricos ou em outras regiões seria possível maior número de níveis de alertas com as concentrações de SDT melhor distribuídas.

Tabela 4.2 – Níveis de alerta para operação quali-quantitativa de reservatórios no semi-árido

Níveis de alerta	Concentração	Medidas de ação
Nível de alerta 1	$SDT \leq 400 \text{ mg/L}$	Não é necessário medida de gestão da qualidade da água
Nível de alerta 2	$400 \text{ mg/L} < SDT \leq 500 \text{ mg/L}$	Pequena descarga de fundo para garantir baixas concentrações de SDT após a estação chuvosa
Nível de alerta 3	$SDT > 500 \text{ mg/L}$	Além da descarga de fundo, poderá ser necessário adotar medidas de racionamento.

O nível de alerta 1 trata de uma faixa de qualidade da água, em termos de SDT, ideal para o açude Boqueirão ($\leq 400 \text{ mg/L}$). Neste nível o açude encontra-se numa margem muito segura para as concentrações de SDT, não sendo necessário, por isso, nenhum tipo de medida de gestão.

O nível de alerta 2 é considerado a faixa em que o reservatório inicia um período de redução de sua qualidade, mesmo que ainda em concentrações satisfatórias. Como medida de segurança e conservação da qualidade da água é necessário, nessa fase, que haja pequena descarga de fundo, que só não seria aplicada caso a previsão hidrometeorológica não fosse favorável.

No nível de alerta 3 o reservatório já se encontra com concentração de SDT superior ao limite máximo definido pela Resolução CONAMA 357/05. Nesta faixa são necessárias medidas de ação mais rigorosas, com maiores descargas de fundo. Se uma descarga grande for uma medida inviável no período, é necessário começar a reter água no reservatório através de medidas de racionamento em maior ou menor grau dependendo das previsões hidrometeorológicas. A intenção deverá ser a de prolongar o máximo possível reduções severas no volume armazenado no reservatório até que cheguem grandes afluências.

4.2.3 O Sistema Integrado

A Figura 4.15 apresenta um organograma do sistema de gestão integrada da qualidade e quantidade de água para reservatórios no semi-árido proposto neste trabalho. Nesta figura, o sistema de gestão é dividido em três partes: aquisição de dados, modelo quali-quantitativo da água do reservatório e modelo de operação quali-quantitativo da água.

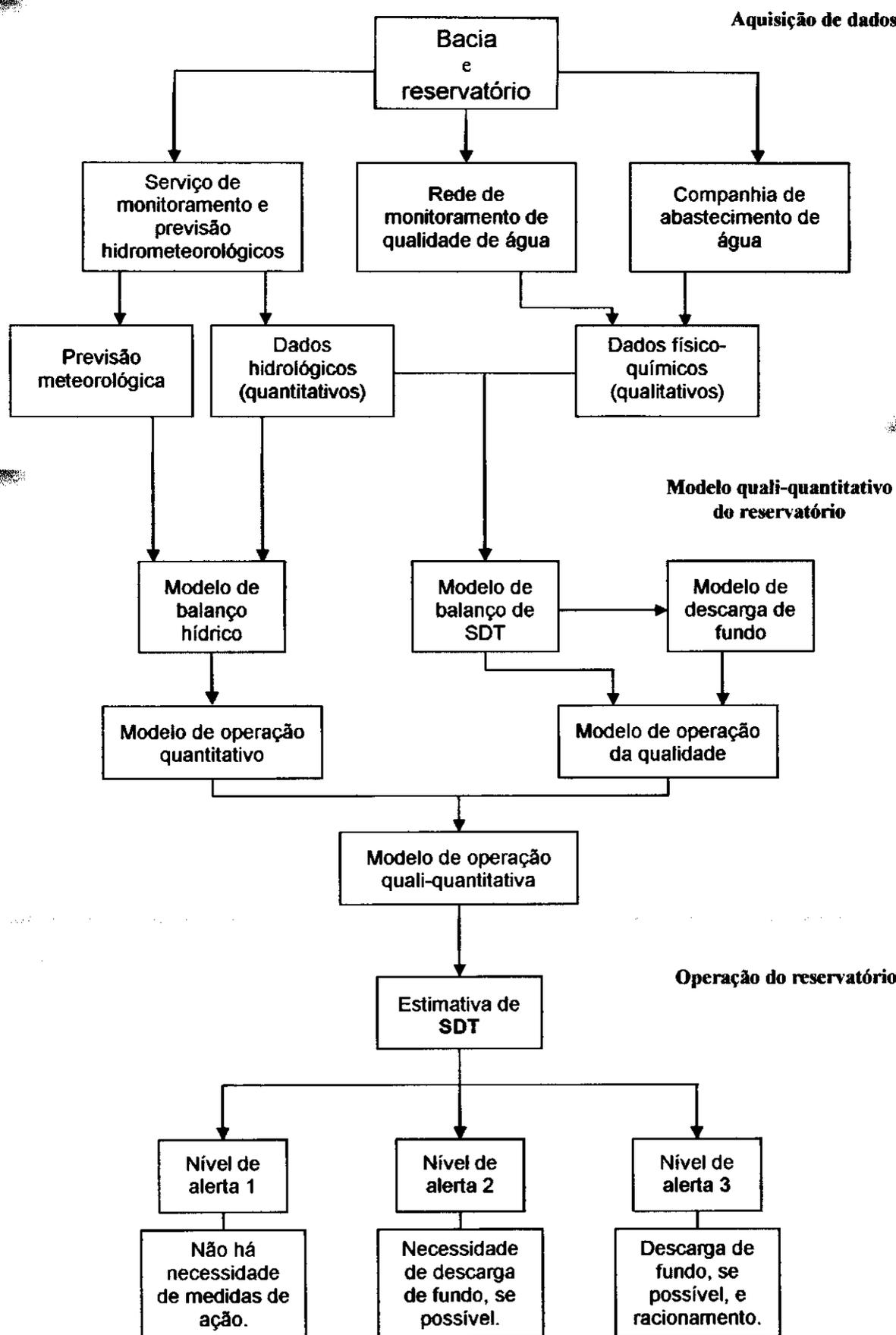


Figura 4.15 – Organograma do sistema de gestão integrada da qualidade e quantidade de água para reservatórios do semi-árido.

Aquisição de dados. Além das redes de monitoramento de qualidade da água já implantadas ou previstas nos Planos Estaduais, as companhias de saneamento são outra alternativa de aquisição de dados qualitativos. Os dados hidrológicos e de previsão meteorológica são fornecidos pelo órgão responsável pelo serviço de monitoramento e previsão hidrometeorológicos.

Modelo quali-quantitativo do reservatório. Para elaboração do modelo de operação quantitativo é necessário um modelo de previsão hidrometeorológica construído a partir de um modelo de balanço hídrico e de dados de previsão meteorológica. Para elaboração do modelo de operação qualitativo para SDT é necessário um modelo de qualidade de água que realize o balanço de SDT no reservatório e um modelo que simule as descargas de fundo. Os modelos de operação quantitativo e qualitativo de água para reservatórios do semi-árido trabalhando em conjunto formam um modelo de operação quali-quantitativo de água.

Operação do reservatório. Com o modelo de operação quali-quantitativo em mãos é possível operar o reservatório a partir da estimativa de SDT atual. Trabalhando preventivamente (como visto no modelo conceitual, item 4.2.1), é necessário verificar a concentração de SDT no reservatório na estação seca e simular, a partir desta concentração e da previsão hidrometeorológica, a concentração de SDT após a estação chuvosa.

De acordo com o nível de alerta que a concentração de SDT estimada se enquadrar, são tomadas as devidas medidas preventivas (descarga e/ou racionamento) que influenciarão no volume armazenado no reservatório (balanço hídrico), refletindo numa redução nas concentrações de SDT no mesmo (balanço de SDT) para que, após a estação chuvosa, se obtenha uma melhor concentração de SDT.

CONCLUSÕES

Neste trabalho foi concebido um sistema de gestão integrada da qualidade e quantidade de água para reservatórios no semi-árido, com base em dados de qualidade monitorados pela companhia de saneamento, dados de estudos limnológicos e informações sobre a previsão hidrometeorológica para o açude Epitácio Pessoa (PB). As principais conclusões resultantes deste exercício foram:

- A implantação de modelos de operação de reservatórios que considerem os aspectos qualitativos e quantitativos de forma integrada, como suporte à gestão da oferta de água, pode ser realizada para a região semi-árida do Nordeste em médio prazo, tendo em vista que as informações necessárias estarão disponíveis para os principais reservatórios da região.

- Com dados qualitativos e hidrológicos de um reservatório para abastecimento humano no semi-árido, é possível construir um modelo de operação quali-quantitativo de água simples e funcional que prognostique e simule a qualidade na tomada d'água, a partir da previsão hidrometeorológica e da qualidade atual da água no reservatório, servindo de base nas tomadas de decisões operacionais no manejo do mesmo.

- Na ausência de rede de monitoramento da qualidade da água, é possível utilizar, para avaliações preliminares da qualidade da água, dados do monitoramento regular que as companhias de abastecimento realizam sob exigência da Portaria nº 518/04 do Ministério da Saúde. Entretanto, adequadas redes de monitoramento na bacia e no próprio reservatório são essenciais para uma gestão satisfatória.

- Não foi possível simular cenários de qualidade de água para o açude Epitácio Pessoa, em decorrência da curta série de dados disponíveis do parâmetro de qualidade SDT, que não permitiu calibrar um modelo de qualidade de água para este açude que represente adequadamente o seu comportamento em relação aos SDT, principalmente no que diz respeito ao aumento nas concentrações de SDT em função da variação do volume armazenado no reservatório.

- O açude Epitácio Pessoa apresenta comportamento típico de ambientes polimíticos quentes, com padrões diários de estratificação e mistura e concentração dos sais (SDT) nas regiões mais profundas do reservatório e próximas à captação, nas estiagens, como evidenciaram os estudos mensais de distribuição vertical de SDT.

- As variações de SDT na zona mais profunda do açude Epitácio Pessoa, onde se encontra a tomada de água, podem estar relacionadas com as estratificações térmicas e com os fluxos hidráulicos provocados pela captação, que podem estar favorecendo a reintrodução de sais das zonas mais profunda na coluna de água, principalmente nos meses de estiagem, quando ocorreram as maiores amplitudes dessas variações.

- O conjunto dos estudos dos dados qualitativos da água do açude Epitácio Pessoa permitiu definir a estação seca como a melhor época para aplicar descargas de fundo no reservatório: os dados da série histórica (CAGEPA) serviram para verificar que a variação de SDT é pouco expressiva dentro de uma estação seca sazonal; os dados mensais da coluna de água mostraram maiores flutuações temporais de SDT nas camadas mais profundas nas estiagens; e os resultados dos ciclos nictemerais indicaram estratificações menos acentuadas nas camadas mais profundas em relação à superfície em ambas as estações e pouca variação de SDT ao longo da profundidade e dos diferentes horários da estação seca em relação à chuvosa, ocorrendo misturas em alguns horários do ciclo diário. Essas características foram relevantes e decisivas para elaboração do modelo conceitual de operação de reservatórios no semi-árido proposto neste trabalho.

RECOMENDAÇÕES

Recomenda-se, para trabalhos futuros, considerar a modelagem de outros parâmetros de qualidade de água com vistas ao manejo operacional quali-quantitativo de reservatórios no semi-árido nordestino.

Para estudos limnológicos em perfil que busquem compreender o comportamento dos parâmetros de qualidade de água em reservatórios com vistas ao abastecimento humano, devem-se realizar coletas em intervalos menores ao longo da coluna de água, principalmente após 4 m de profundidade (incidência de luz menor que 1%), que é a zona, no caso do açude Epitácio Pessoa, onde se encontra a tomada de água.

Para modelagem matemática do comportamento da qualidade da água em reservatórios em perfil, o ideal seria usar dados de SDT provenientes de um maior número de coletas por mês, realizando para cada uma delas perfis nictemerais mais longos que de 24 horas, seriam recomendáveis perfis de 48 ou 72 horas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGENDA 21 GLOBAL.** 1992. Disponível em <http://www.mma.gov.br/?id_estrutura=18&id_conteudo=578>. Acesso em: 01 fev. 2005.
- ALBANO, G. D. Integração de um modelo matemático de quantidade de água em rede de fluxo (ACQUANET) com um modelo matemático de qualidade de água em represas (CE-QUAL-R1) - estudo de caso: represa Jaguari-Jacareí – Sistema Cantareira.** 2004. 230 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Hidráulica) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária, São Paulo, 2004.
- ALBANO, G. D.; PORTO, R. L. L. Integração de modelos matemáticos de quantidade e de qualidade de água – proposta de gerenciamento de sistemas produtores de abastecimento público.** In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 15, 2003, Curitiba. Anais... Curitiba: ABRH, 2003. CD-ROM.
- APHA - AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION. Standard methods for examination of water and wastewater.** 20th ed. Washington D. C.: American Public Health Association, 1998, CD-ROM.
- ARAÚJO, J. C.; SANTAELLA, S. T. Gestão da qualidade.** In: CAMPOS, N.; STUDART, T. (Ed.). **Gestão das águas: princípios e práticas.** 2 ed. Porto Alegre: ABRH, 2003. p. 159-180.
- AZEVEDO, L. G. T.; GATES, T. K.; FONTANE, D.G. et al. Integration of water quantity and quality in strategic river basin planning.** In: **Journal of water resources planning and management.** Vol. 126, No. 2, p. 85-97. March/April, 2000.
- BARBOSA, J. E. L. Dinâmica do fitoplâncton e condicionantes limnológicos nas escalas de tempo (nictemeral/sazonal) e de espaço (horizontal/vertical) no açude Taperoá II: trópico semi-árido paraibano.** 2002. 202 f. Tese (Doutorado em Ecologia e Recursos Naturais) - Universidade Federal de São Carlos, São Paulo, 2002.

- BERBERT, C. O. O desafio das águas. In: MARTINS, R. C.; VALENCIO, N. F. L.S. (Org.). **Uso e gestão dos recursos hídricos no Brasil: desafios teóricos e político-institucionais**. São Carlos: RiMA, 2003. v. II. p. 81-97.
- BEZERRA, M. C. L.; MUNHOZ, T. M. T. (Coord.). **Gestão dos recursos naturais: subsídios à elaboração da Agenda 21 brasileira**. Brasília: Ministério do Meio Ambiente; Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis; Consórcio TC/BR/FUNATURA, 2000. 200p.
- BRASIL. **Lei Federal n. 9.433, de 8 de janeiro de 1997**. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, regulamenta o inciso XIX do art. 21 da Constituição Federal e altera o art. 1º da Lei 8.001, de 13 de março de 1990, que modificou a Lei nº 7.990, de 28 de dezembro de 1989. Disponível em: <<http://www.cnrh-srh.gov.br>>. Acesso em: 28 fev. 2004.
- CALIJURI, M. C.; OLIVEIRA, H. T. Manejo da qualidade da água: uma abordagem metodológica. In: CASTELLANO, E. G.; CHAUDHRY, F. H. (Ed.). **Desenvolvimento sustentado: problemas e estratégias**. São Carlos: EESC-USP, 2000. p. 39-58 : il.
- CAMPOS, N. Política de águas. In: CAMPOS, N.; STUDART, T. (Ed.). **Gestão das águas: princípios e práticas**. 2 ed. Porto Alegre: ABRH, 2003. p. 27-42.
- CHAVES, P.; TSUKATANI, T.; KOJIRI, T. Operation of storage reservoir for water quality by using optimization and artificial intelligence techniques. In: **Mathematics and computers in simulation**. Ed. Elsevier. 2004.
- CRESPO, A. A. **Estatística fácil**. 11. ed. Editora Saraiva, 1994.
- DAHL, M.; WILSON, D. **Modelling of water quality**. Karlstad University. SE 651-88. Technical report. Suécia. Setembro, 2000. 58p. Disponível em: http://www.ee.kau.se/forskinq/ModSim/mod_waterq.pdf. Acesso em: 04 junho 2003.
- DINIZ, C. R.; CEBALLOS, B. S. O.; BARBOSA, J. E. L.; KÖNIG, A.; PEDROZA, A. S. **Dados de qualidade mensais coletados no período de maio/02 a mar/03 no açude Epitácio Pessoa em quatro profundidades**. Dados não publicados. Comunicação pessoal, 2005.
- DINIZ, C. R. **Ritmos nictemerais e distribuição espaço-temporal de variáveis limnológicas e sanitárias em dois açudes do trópico semi-árido (PB)**. 2005. 194 f. Tese (Doutorado em Recursos Naturais) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2005.
- DINIZ, C. R.; CEBALLOS, B. S. O.; BARBOSA, J. E. L.; KÖNIG, A.; PEDROZA, A. S. **Diurnal rhythms and vertical of variable limnologicals, in a dry and rain season at the Epitácio Pessoa reservoir, state of Paraíba, Brazil**. In: SIMPOSIO INTERNAZIONALE DI INGEGNERIA SANITARIA AMBIENTALE, 2004, Taormina – Itália. Anais... Taormina - Itália: ANDIS, 2004. CD-ROM.

- ESTEVEVES, F. A. **Fundamentos de limnologia**. 2. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 1998, 602p.
- FONTES, A. S.; OLIVEIRA, J. I. R.; MEDEIROS, Y. D. P. **A evaporação em açudes no semi-árido nordestino do Brasil e a gestão das águas**. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 15, 2003, Curitiba. Anais... Curitiba: ABRII, 2003. CD-ROM.
- GALVÃO, C. O.; GOMES FILHO, M. F. **Previsão de volume armazenado no açude Boqueirão para o ano de 2003 a partir da previsão de chuvas para o norte do Nordeste**. [Campina Grande]: UFCG, 2003, 5p.
- GASTALDINI, M. C. C.; MENDONÇA, A. S. F. Conceitos para a avaliação da qualidade da água. In: PAIVA, J. B. D., PAIVA, E. M. C. D. (Org.). **Hidrologia aplicada à gestão de pequenas bacias hidrográficas**. Porto Alegre: ABRH, 2001. p. 428-451.
- GASTALDINI, M. C. C.; PAIVA, E. M. C. D.; PAIVA, J. B. D. **Inter-relações entre dados de monitoramento de qualidade da água e hidrológico – aplicação ao reservatório do Arroio Vacaf-Mirim**. Revista brasileira de engenharia sanitária e ambiental. V. 6, n. 1 – jan/mar 2001 e n. 2 – abr/jun 2001. p. 23-29. Nota técnica.
- GASTALDINI, M. C. C.; TEIXEIRA, E. C. Avaliação da qualidade da água. In: PAIVA, J. B. D., PAIVA, E. M. C. D. (Org.). **Hidrologia aplicada à gestão de pequenas bacias hidrográficas**. Porto Alegre: ABRH, 2001. p. 453-490.
- GUIMARÃES, A. O.; MELO, A. D.; CEBALLOS, B. S. O.; GALVÃO, C. O.; RIBEIRO, M. M. R. **Aspectos da gestão do açude Epitácio Pessoa (PB) e variação da qualidade da água**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 23, 2005, Campo Grande: ABES, 2005. No prelo.
- HENDERSON-SELLERS, B. **Engineering limnology**. London: Pitman Publishing Limited, 1984.
- KAZMIER, L. J. **Estatística aplicada à economia e administração**. Coleção Shaum. Do original: Scaums outline of theory and problems of business statistics, 1976. Rio Grande do Sul: UFRGS, McGraw-hill do Brasil, 1982.
- LIND, O. T. & DÁVALOS-LIND, L. O. Interaction of water quantity with water quality: the Lake Chapala example. In: **Hydrobiologia**. 467: 159-167, 2002.
- LMRS – Laboratório de Meteorologia, Recursos Hídricos e Sensoriamento Remoto. **Curva cota-área-volume de 2003 do açude Boqueirão**. Campina Grande, 2005. Comunicação pessoal.
- LMRS – Laboratório de Meteorologia, Recursos Hídricos e Sensoriamento Remoto. **Batimetria apoiada por GPS: açude Boqueirão**. Relatório Técnico. [Campina Grande]: UFPB, [2004], 15p.
- MATOS, M. A. **Manual operacional para a regressão linear**. FEUP. 1995.

- MINISTÉRIO DA SAÚDE DO BRASIL. **Portaria n. 518, de 25 de março de 2004**. Norma de qualidade da água para consumo humano em todo o território nacional. Brasília: 2004. Disponível em: <http://lproweb.procempa.com.br/pmpa/prefpoa/sms/usu_doc/portaria_n_518_w2.pdf>. Acesso em: 08 jun. 2004.
- MOTA, S. **Introdução à engenharia ambiental**. 3 ed. Rio de Janeiro: ABES, 2003. 416p.: il.
- NOGUEIRA, V. P. Q. Qualidade da água em lagos e reservatórios. In: PORTO, R. L. L. (Org.). **Hidrologia ambiental**. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 1991. Coleção ABRH de Recursos Hídricos; v. 3, p. 165-210.
- PAIVA, M. P. **Grandes represas do Brasil**. Brasília: Editerra, 1982. 292p.
- PORTO, M. F. A.; BRANCO, S. M.; LUCA, S. J. Caracterização da qualidade da água. In: PORTO, R. L. L. (Org.). **Hidrologia ambiental**. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 1991. Coleção ABRH de Recursos Hídricos, v. 3, p. 27-66.
- REBOUÇAS, A. C. Água doce no mundo e no Brasil. In: REBOUÇAS, A. C.; BRAGA, B.; TUNDISI, J. G. (Org.). **Águas doces no Brasil: capital ecológico, uso e conservação**. 2. ed. São Paulo: Escrituras Editora, 2002. p. 01-37.
- RÊGO, J. C.; ALBUQUERQUE, J. P. T.; RIBEIRO, M. M. R. **Uma análise da crise 1998-2000 no abastecimento d'água de Campina Grande-PB**. In: SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DO NORDESTE, 4, 2000, Natal. Anais... Natal: ABRH, 2000. v. 02. p. 459-468.
- RÊGO, J. C.; RIBEIRO, M. M. R.; ALBUQUERQUE, J. P. T.; GALVÃO, C. O. **Participação da sociedade na crise 1998-2000 no abastecimento d'água de Campina Grande-PB, Brasil**. In Fourth Inter-American Dialogue on Water Management. Foz do Iguaçu: ABRH/IAWR. 2001. CD-ROM.
- RIBEIRO, M. M. R. **Alternativas para a outorga e a cobrança pelo uso da água: simulação de um caso**. 2000. 196 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2000.
- SAWYER, C. N.; McCARTY, P. L. and PARKIN, G. F. **Chemistry for environmental engineering**. 4th edition. New York: McGraw-Hill, Inc.1994. p 567-576.
- SEMARH – Secretaria Extraordinária do Meio Ambiente, dos Recursos Hídricos e Minerais do Estado da Paraíba. Unidade estadual de gerenciamento do PROÁGUA. **Plano diretor de recursos hídricos da bacia hidrográfica do rio Paraíba**: relatório final de diagnóstico. TOMO 1. Julho/2001.
- SEMARH / DNOCS – Secretaria Extraordinária do Meio Ambiente, dos Recursos Hídricos e Minerais do Estado da Paraíba. Departamento Nacional de Obras Contra as Secas. **Informações históricas sobre o volume armazenado no açude Boqueirão**. Campina Grande, 2005. Comunicação pessoal.

- SILVA, M. A. V. BRAGA, C.; AGUIAR, M. J. N.; NITZCHE, M. H. SILVA, B. B.; VENTURA, E. **Atlas climatológico do Estado da Paraíba**. 2. ed. Campina Grande: Núcleo de Meteorologia Aplicada, UFPB, 1987.
- SILVA, S. A.; OLIVEIRA, R. **Manual de análises físico-químicas de águas de abastecimento e residuárias**. Campina Grande: O Autor, 2001. p 77-88; 115-124.
- SOUZA FILHO, F. A. Variabilidade e mudança climática nos semi-áridos brasileiros. In: TUCCI, C. E. M.; BRAGA, B. (Org.). **Clima e recursos hídricos no Brasil**. Porto Alegre: ABRH, 2003. Coleção ABRH de Recursos Hídricos, v. 9, p. 77-116.
- SOUZA FILHO, F. A.; PORTO, R. L. L. **Gerenciamento de recursos hídricos e a variabilidade climática nos semi-áridos brasileiros**. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 15, 2003, Curitiba. Anais eletrônicos...Curitiba: ABRH, 2003. CD-ROM.
- SOUZA, C. A. F. **Águas: legislações e políticas para uma utilização racional, o caso dos irrigantes do açude Epitácio Pessoa – Boqueirão – Paraíba – Brasil**. 2001. 145 f. Dissertação (Mestrado Interdisciplinar em Ciências da Sociedade) – Universidade Estadual da Paraíba. Campina Grande: UEPB, 2001.
- STRASKRABA, M.; TUNDISI, J. G. Reservoir ecosystem functioning: theory and application. In: TUNDISI, J. G.; STRASKRABA, M. (Eds.). **Theoretical reservoir ecology and its applications**. Sao Carlos: Brazilian Academy of Sciences/International Institute of Ecology/Backhuys Publishers, 1999. p. 565-583.
- STRASKRABA, M.; TUNDISI, J. G.; DUNCAN, A. State-of-the-art of reservoir limnology and water quality management. In: STRASKRABA, M.; TUNDISI, J. G.; DUNCAN, A. (Eds.). **Comparative reservoir limnology and water quality management**. (Developments in Hydrobiology: 77). Dordrecht, Kluwer Academic Publishers, 1993. p. 213-288.
- TEIXEIRA, C. A.; PORTO, R. L. L. **Gerenciamento de bacias hidrográficas integrando os aspectos de quantidade e qualidade de água**. In: SIMPÓSIO LUSO-BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 11, 2004, Natal. Anais... Natal: ABES, 2004. CD-ROM.
- TUCCI, C. E. M. **Modelos hidrológicos**. Porto Alegre: Ed. Universidade/UFRGS/Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 1998. p. 537-656.
- TUCCI, C. E. M.; BRAGA, B. Clima e recursos hídricos. In: TUCCI, C. E. M.; BRAGA, B. (Org.). **Clima e recursos hídricos no Brasil**. Porto Alegre: ABRH, 2003. Coleção ABRH de Recursos Hídricos, v. 9, p. 1-29.
- TUNDISI, J. G. **Água no século XXI: enfrentando a escassez**. São Carlos: RiMA, IIE, 2003.
- TUNDISI, J. G.; TUNDISI, T. M.; ROCHA, O. Limnologia de águas interiores. Impactos, conservação e recuperação de ecossistemas aquáticos. In: REBOUÇAS, A. C.; BRAGA, B.;

TUNDISI, J. G. (Org.). **Águas doces no Brasil: capital ecológico, uso e conservação**. 2. ed. São Paulo: Escrituras Editora, 2002. p. 195-225.

WRIGHT, S. **Chemical conditions in some waters of notheast Beazil**. A. Acad. Bras. Ci., 9:278-306. 1937.

WRIGHT, S. Alguns dados da physica e da chimica das aguas dos açudes Nordestinos. Boletim da Inspeçtoria Federal de Obras Contra as Secas, v.1, n.4, abr. 1934. In: **Boletim Técnico do Departamento Nacional de Obras Contra as Secas**. Fortaleza, 39 (1): 21-31, jan./jun. 1981a.

WRIGHT, S. Da physica e da chimica das aguas do Nordeste do Brasil. II. Chloretos e carbonatos. Boletim da Inspeçtoria Federal de Obras Contra as Secas, v.2, n.5, nov. 1934. In: **Boletim Técnico do Departamento Nacional de Obras Contra as Secas**. Fortaleza, 39 (1): 33-45, jan./jun. 1981b.

WRIGHT, S. Da physica e da chimica das aguas do Nordeste do Brasil. III. Condições thermicas. Boletim da Inspeçtoria Federal de Obras Contra as Secas, v.8, n.2, out./dez. 1937. In: **Boletim Técnico do Departamento Nacional de Obras Contra as Secas**. Fortaleza, 39 (1): 47-60, jan./jun. 1981c.

ANEXOS

ANEXO A - Padrão de potabilidade fixado pela Portaria nº 518/04 do Ministério da Saúde

Tabela 1 - Padrão microbiológico de potabilidade da água para consumo humano

PARÂMETRO	VMP ⁽¹⁾
Água para consumo humano⁽²⁾	
<i>Escherichia coli</i> ou coliformes termotolerantes ⁽³⁾	Ausência em 100ml
Água na saída do tratamento	
Coliformes totais	Ausência em 100ml
Água tratada no sistema de distribuição (reservatórios e rede)	
<i>Escherichia coli</i> ou coliformes termotolerantes ⁽³⁾	Ausência em 100ml
Coliformes totais	Sistemas que analisam 40 ou mais amostras por mês: ausência em 100ml em 95% das amostras examinadas no mês; Sistemas que analisam menos de 40 amostras por mês: apenas uma amostra poderá apresentar mensalmente resultado positivo em 100ml

NOTAS:

(1) Valor Máximo Permitido.

(2) água para consumo humano em toda e qualquer situação, incluindo fontes individuais como poços, minas, nascentes, dentre outras.

(3) a detecção de *Escherichia coli* deve ser preferencialmente adotada.

Tabela 2 - Padrão de potabilidade para substâncias químicas que representam risco à saúde

PARÂMETRO	UNIDADE	VMP ⁽¹⁾
INORGÂNICAS		
Antimônio	mg/L	0,005
Arsênio	mg/L	0,01
Bário	mg/L	0,7
Cádmio	mg/L	0,005
Cianeto	mg/L	0,07
Chumbo	mg/l	0,01
Cobre	mg/L	2
Cromo	mg/L	0,05
Fluoreto ⁽²⁾	mg/L	1,5
Mercúrio	mg/l	0,001
Nitrato (como N)	mg/L	10
Nitrito (como N)	mg/L	1
Selênio	mg/L	0,01
ORGÂNICAS		
Acrilamida	µg/L	0,5
Benzeno	µg/L	5
Benzo[a]pireno	µg/L	0,7

Tabela 2 - Padrão de potabilidade para substâncias químicas que representam risco à saúde

PARÂMETRO	UNIDADE	VMP ⁽¹⁾
Cloreto de Vinila	µg/L	5
1,2 Dicloroetano	µg/L	10
1,1 Dicloroetano	µg/L	30
Diclorometano	µg/L	20
Estireno	µg/L	20
Tetracloro de Carbono	µg/L	2
Tetracloroetano	µg/L	40
Triclorobenzenos	µg/L	20
Tricloroetano	µg/L	70
AGROTÓXICOS		
Alaclor	µg/L	20,0
Aldrin e Dieldrin	µg/L	0,03
Atrazina	µg/L	2
Bentazona	µg/L	300
Clordano (isômeros)	µg/L	0,2
2,4 D	µg/L	30
DDT (isômeros)	µg/L	2
Endossulfan	µg/L	20
Endrin	µg/L	0,6
Glifosato	µg/L	500
Heptacloro e Heptacloro epóxido	µg/L	0,03
Hexaclorobenzeno	µg/L	1
Lindano (γ-BHC)	µg/L	2
Metolacloro	µg/L	10
Metoxicloro	µg/L	20
Molinato	µg/L	6
Pendimetalina	µg/L	20
Pentaclorofenol	µg/L	9
Permetrina	µg/L	20
Propanil	µg/L	20
Simazina	µg/L	2
Trifluralina	µg/L	20
CIANOTOXINAS		
Microcistinas ⁽³⁾	µg/L	1,0
DESINFETANTES E PRODUTOS SECUNDÁRIOS DA DESINFECCÃO		
Bromato	mg/L	0,025
Clorito	mg/L	0,2
Cloro livre ⁽⁴⁾	mg/L	5
Monocloramina	mg/L	3
2,4,6 Triclorofenol	mg/L	0,2
Trihalometanos Total	mg/L	0,1

NOTAS:

(1) Valor Máximo Permitido.

(2) Os valores recomendados para a concentração de íon fluoreto devem observar à legislação específica vigente relativa à fluoretação da água, em qualquer caso devendo ser respeitado o VMP desta Tabela.

(3) É aceitável a concentração de até 10 µg/L de microcistinas em até 3 (três) amostras, consecutivas ou não, nas análises realizadas nos últimos 12 (doze) meses.

(4) Análise exigida de acordo com o desinfetante utilizado.

Tabela 3 - Padrão de radioatividade para água potável

PARÂMETRO	UNIDADE	VMP ⁽¹⁾
Radioatividade alfa global	Bq/L	0,1 ⁽²⁾
Radioatividade beta global	Bq/L	1,0 ⁽²⁾

NOTAS:

(1) Valor máximo permitido.

(2) Se os valores encontrados forem superiores aos VMP, deverá ser feita a identificação dos radionuclídeos presentes e a medida das concentrações respectivas. Nesses casos, deverão ser aplicados, para os radionuclídeos encontrados, os valores estabelecidos pela legislação pertinente da Comissão Nacional de Energia Nuclear - CNEN, para se concluir sobre a potabilidade da água.

Tabela 4 - Padrão de aceitação para consumo humano

PARÂMETRO	UNIDADE	VMP ⁽¹⁾
Alumínio	mg/L	0,2
Amônia (como NH ₃)	mg/L	1,5
Cloreto	mg/L	250
Cor Aparente	uH ⁽²⁾	15
Dureza	mg/L	500
Etilbenzeno	mg/L	0,2
Ferro	mg/L	0,3
Manganês	mg/L	0,1
Monoclorobenzeno	mg/L	0,12
Odor	-	Não objetável ⁽³⁾
Gosto	-	Não objetável ⁽³⁾
Sódio	mg/L	200
Sólidos dissolvidos totais	mg/L	1.000
Sulfato	mg/L	250
Sulfeto de Hidrogênio	mg/L	0,05
Surfactantes	mg/L	0,5
Tolueno	mg/L	0,17
Turbidez	UT ⁽⁴⁾	5
Zinco	mg/L	5
Xileno	mg/L	0,3

NOTAS:

(1) Valor máximo permitido.

(2) Unidade Hazen (mg Pt-Co/L).

(3) critério de referência

(4) Unidade de turbidez.

ANEXO B – Série de SDT (fornecida pela CAGEPA) e de volumes armazenados (fornecida pelo LMRS/PB) do açude Boqueirão

Data	Local da coleta	SDT (mg/L)	Volume (m³)
05/01/88	-	-	468.951.463
05/02/88	-	-	456.340.845
05/03/88	-	-	472.892.281
24/04/88	Barragem	702	516.371.381
05/05/88	-	-	531.266.601
05/06/88	-	-	527.956.553
05/07/88	-	-	523.727.046
05/08/88	-	-	520.600.888
05/09/88	-	-	515.819.707
05/10/88	-	-	510.670.742
05/11/88	-	-	504.786.210
05/12/88	-	-	498.507.597
20/01/89	Barragem	880	485.896.980
05/02/89	-	-	474.468.608
05/03/89	-	-	463.040.236
05/04/89	-	-	491.414.125
05/05/89	-	-	535.680.000
05/06/89	-	-	531.634.385
05/07/89	-	-	528.508.227
05/08/89	-	-	527.956.553
05/09/89	-	-	523.727.046
06/10/89	Barragem	600	518.210.298
16/10/89	Barragem	598	-
19/10/89	Barragem	577	-
23/10/89	Barragem	576	-
01/11/89	Barragem	589	513.429.116
07/11/89	Barragem	615	-
10/11/89	Barragem	587	-
13/11/89	Barragem	609	-
16/11/89	Barragem	593	-
18/11/89	Barragem	657	-
21/11/89	Barragem	643	-
27/11/89	Barragem	607	-
05/12/89	-	-	507.176.801
09/01/90	Barragem	574	523.175.371
16/01/90	Barragem	566	-
19/01/90	Barragem	578	-
05/02/90	-	-	517.474.731
05/03/90	-	-	520.049.214
05/04/90	-	-	513.796.899
02/05/90	Barragem	560	510.302.959
29/05/90	Barragem	567	-
15/06/90	Barragem	573	505.889.560
25/06/90	Barragem	598	-
09/07/90	Gravatá - Barragem	586	502.211.728
20/07/90	Gravatá - Barragem	561	-
10/08/90	Gravatá - Barragem	549	499.453.354
19/09/90	-	616	489.837.798

Data	Local da coleta	SDT (mg/L)	Volume (m ³)
05/10/90	-	-	479.985.753
05/11/90	-	-	466.586.972
05/12/90	-	-	452.794.109
31/01/91	Gravatá	567	439.001.246
05/02/91	-	-	425.602.465
21/03/91	Gravatá - Barragem	563	414.234.333
05/04/91	Barragem	640	
05/05/91	-	-	504.970.102
05/06/91	-	-	504.234.536
05/07/91	-	-	499.821.137
05/08/91	-	-	491.020.043
05/09/91	-	-	509.751.284
09/10/91	Gravatá	638	504.418.427
05/11/91	-	-	458.311.254
05/12/91	-	-	444.912.473
05/01/92	-	-	429.937.365
05/02/92	-	-	427.966.956
05/03/92	-	-	511.774.091
05/04/92	-	-	517.658.623
05/05/92	-	-	518.026.406
05/06/92	-	-	512.141.875
05/07/92	-	-	508.096.259
05/08/92	-	-	504.418.427
05/09/92	-	-	499.821.137
05/10/92	-	-	492.990.452
05/11/92	-	-	480.773.916
05/12/92	-	-	469.345.544
05/01/93	-	-	453.188.191
05/02/93	-	-	437.819.001
05/03/93	-	-	424.026.138
05/04/93	-	-	411.136.752
05/05/93	-	-	399.778.955
05/06/93	-	-	388.765.333
05/07/93	-	-	378.440.063
05/08/93	-	-	369.491.495
05/09/93	-	-	358.477.873
05/10/93	-	-	346.434.182
05/11/93	-	-	328.890.176
05/12/93	-	-	314.786.171
05/01/94	-	-	299.306.166
05/02/94	-	-	288.642.162
05/03/94	-	-	301.370.167
05/04/94	-	-	311.346.170
05/05/94	-	-	267.000.000
05/06/94	-	-	298.962.166
05/07/94	-	-	295.522.165
05/08/94	-	-	290.706.163
05/09/94	-	-	281.083.467
05/10/94	-	-	273.156.649
10/11/94	Barragem	650	260.036.398

Data	Local da coleta	SDT (mg/L)	Volume (m ³)
05/12/94	-	-	249.649.533
05/01/95	-	-	237.075.959
15/02/95	Barragem	830	228.329.125
05/03/95	-	-	237.622.636
05/04/95	-	-	330.954.177
05/05/95	-	-	362.952.157
10/06/95	Barragem	640	412.857.631
05/07/95	-	-	410.792.577
10/08/95	Barragem	510	398.746.428
05/09/95	-	-	392.551.266
05/10/95	-	-	380.160.941
05/11/95	-	-	367.082.265
05/12/95	-	-	352.626.887
16/01/96	-	680	219.349.008
13/02/96	-	566	320.290.173
05/03/96	-	-	310.658.170
05/04/96	-	-	224.049.762
05/05/96	-	-	366.049.738
05/06/96	-	-	366.049.738
11/07/96	-	630	354.003.589
05/08/96	-	-	349.530.183
05/09/96	-	-	339.554.180
05/10/96	-	-	327.514.176
05/11/96	-	-	312.378.170
05/12/96	-	-	301.026.166
05/01/97	-	-	285.202.161
05/02/97	-	-	279.443.436
05/03/97	-	-	270.969.940
05/04/97	-	-	321.322.174
05/05/97	-	-	362.952.157
05/06/97	-	-	362.607.981
05/07/97	-	-	352.626.887
05/08/97	-	-	343.338.181
05/09/97	-	-	331.986.177
05/10/97	-	-	317.882.172
05/11/97	-	-	302.402.167
05/12/97	-	-	287.610.162
05/01/98	-	-	189.900.020
05/02/98	-	-	177.511.336
05/03/98	-	-	165.211.101
05/04/98	-	-	153.156.944
28/05/98	Chegada na ETA	681	136.360.000
04/06/98	Chegada na ETA	780	135.203.250
10/06/98	-	608	134.377.000
29/06/98	-	590	130.080.500
06/07/98	-	595	128.262.750
13/07/98	-	584	127.271.250
20/07/98	-	580	125.784.000
27/07/98	-	680	124.296.750
03/08/98	-	790	123.140.000

Data	Local da coleta	SDT (mg/L)	Volume (m³)
10/08/98	Chegada na ETA	530	121.652.750
17/08/98	-	612	120.826.500
21/08/98	Chegada na ETA	840	120.000.250
31/08/98	Chegada na ETA	571	118.308.200
02/09/98	Chegada na ETA	600	120.923.940
08/09/98	-	610	119.652.769
10/09/98	Chegada na ETA	605	119.017.183
14/09/98	Chegada na ETA	605	118.063.805
21/09/98	Chegada na ETA	670	116.315.945
05/10/98	Chegada na ETA	710	112.661.328
13/10/98	Chegada na ETA	610	110.595.675
18/10/98	Chegada na ETA	610	109.006.711
26/10/98	Chegada na ETA	680	107.099.954
03/11/98	Chegada na ETA	680	105.223.142
09/11/98	Chegada na ETA	780	103.923.811
16/11/98	Chegada na ETA	630	102.191.369
23/11/98	Chegada na ETA	710	100.458.927
29/11/98	Chegada na ETA	640	99.015.226
03/12/98	Chegada na ETA	660	96.134.299
09/12/98	Chegada na ETA	670	94.751.889
14/12/98	Chegada na ETA	660	93.369.479
21/12/98	Chegada na ETA	690	91.710.587
04/01/99	Chegada na ETA	770	90.992.129
08/01/99	Chegada na ETA	760	90.220.985
18/01/99	Chegada na ETA	760	88.164.603
25/01/99	Chegada na ETA	740	86.879.364
01/02/99	Chegada na ETA	750	83.877.468
08/02/99	Chegada na ETA	760	82.774.095
17/02/99	Chegada na ETA	790	81.670.722
22/02/99	Chegada na ETA	795	80.689.946
01/03/99	Chegada na ETA	750	79.463.976
08/03/99	Chegada na ETA	770	78.265.682
15/03/99	Chegada na ETA	710	83.387.080
22/03/99	Chegada na ETA	710	92.678.274
29/03/99	Chegada na ETA	720	91.710.587
05/04/99	Chegada na ETA	760	90.497.706
12/04/99	Chegada na ETA	730	89.516.930
19/04/99	Chegada na ETA	730	88.536.154
26/04/99	Chegada na ETA	720	87.432.781
03/05/99	Chegada na ETA	730	86.819.796
10/05/99	Chegada na ETA	730	86.084.214
17/05/99	Chegada na ETA	670	90.620.303
24/05/99	Chegada na ETA	710	91.295.864
31/05/99	Chegada na ETA	740	90.375.109
07/06/99	Chegada na ETA	740	89.639.527
14/06/99	Chegada na ETA	730	88.903.945
28/06/99	Chegada na ETA	730	87.064.990
05/07/99	Chegada na ETA	690	86.206.811
12/07/99	Chegada na ETA	690	85.593.826
19/07/99	Chegada na ETA	710	84.980.841

Data	Local da coleta	SDT (mg/L)	Volume (m ³)
27/07/99	Chegada na ETA	710	84.245.259
03/08/99	Chegada na ETA	680	83.387.080
09/08/99	Chegada na ETA	690	82.651.498
16/08/99	Chegada na ETA	710	81.793.319
23/08/99	Chegada na ETA	710	80.935.140
30/08/99	Chegada na ETA	710	80.076.961
13/09/99	Chegada na ETA	710	78.048.164
20/09/99	Chegada na ETA	710	77.069.333
27/09/99	Chegada na ETA	710	76.199.261
05/10/99	Chegada na ETA	710	75.111.671
13/10/99	Chegada na ETA	710	74.241.599
18/10/99	Chegada na ETA	710	73.589.045
25/10/99	Chegada na ETA	710	72.718.973
08/11/99	Chegada na ETA	710	71.087.588
13/11/99	Chegada na ETA	710	70.435.034
16/11/99	Chegada na ETA	710	69.999.998
22/11/99	Chegada na ETA	710	69.129.926
29/11/99	Chegada na ETA	715	68.151.095
06/12/99	Chegada na ETA	715	68.346.392
13/12/99	Chegada na ETA	715	67.536.996
20/12/99	Chegada na ETA	730	66.626.425
27/12/99	Chegada na ETA	730	65.817.028
03/01/00	Chegada na ETA	735	72.501.455
10/01/00	Chegada na ETA	730	73.915.322
17/01/00	Chegada na ETA	717	81.915.916
24/01/00	Chegada na ETA	700	83.754.871
31/01/00	Chegada na ETA	682	83.141.886
07/02/00	Chegada na ETA	720	82.038.513
14/02/00	Chegada na ETA	678	82.161.110
21/02/00	Chegada na ETA	610	99.728.565
28/02/00	Chegada na ETA	620	125.618.750
09/03/00	Chegada na ETA	506	125.618.750
13/03/00	Chegada na ETA	510	124.957.750
20/03/00	Chegada na ETA	476	144.876.760
27/03/00	Chegada na ETA	491	148.898.564
03/04/00	Chegada na ETA	440	165.757.778
10/04/00	Chegada na ETA	420	164.937.762
17/04/00	Chegada na ETA	425	176.964.659
24/04/00	Chegada na ETA	380	209.013.737
02/05/00	Chegada na ETA	380	209.013.737
08/05/00	Chegada na ETA	370	209.650.861
15/05/00	Chegada na ETA	360	208.058.051
22/05/00	Chegada na ETA	350	206.465.242
05/06/00	Chegada na ETA	360	202.961.060
03/07/00	Chegada na ETA	440	198.501.193
07/08/00	Chegada na ETA	340	194.678.449
04/09/00	Chegada na ETA	350	187.988.648
03/10/00	Chegada na ETA	355	182.431.430
01/11/00	Chegada na ETA	355	174.231.273
04/12/00	Chegada na ETA	355	164.391.085

Data	Local da coleta	SDT (mg/L)	Volume (m³)
02/01/01	Chegada na ETA	396	158.125.055
05/02/01	Chegada na ETA	413	149.371.717
05/03/01	Chegada na ETA	417	141.564.687
03/04/01	Chegada na ETA	427	170.404.533
07/05/01	Chegada na ETA	368	163.297.731
04/06/01	Chegada na ETA	426	156.469.018
09/07/01	Chegada na ETA	406	152.447.214
03/08/01	Chegada na ETA	415	148.661.987
03/09/01	Chegada na ETA	410	142.747.570
01/10/01		420	136.029.500
06/11/01	Chegada na ETA	419	130.245.750
03/12/01	Chegada na ETA	424	125.123.000
02/01/02	Chegada na ETA	395	119.835.000
04/02/02	-	352	171.771.226
04/03/02	Chegada na ETA	345	211.243.671
01/04/02	Chegada na ETA	326	209.332.299
06/05/02	Chegada na ETA	325	203.598.184
03/06/02	Chegada na ETA	313	204.235.308
01/07/02	Chegada na ETA	310	200.094.002
01/08/02	Chegada na ETA	277	193.404.201
05/08/02	Chegada na ETA	284	192.129.953
02/09/02	Chegada na ETA	301	184.891.477
01/10/02	Chegada na ETA	312	176.691.320
01/11/02	Chegada na ETA	289	167.124.471
19/11/02	Chegada na ETA	320	161.384.361
02/12/02	Chegada na ETA	320	157.651.901
09/12/02	Chegada na ETA	329	155.759.288
16/12/02	Chegada na ETA	316	154.339.828
23/12/02	Chegada na ETA	308	152.210.638
30/12/02	Chegada na ETA	311	150.318.024
02/01/03	Chegada na ETA	322	149.371.717
03/02/03	Chegada na ETA	326	144.341.001
06/03/03	Chegada na ETA	378	142.299.298
01/04/03	Chegada na ETA	385	147.310.751
02/05/03	Chegada na ETA	345	148.610.017
02/06/03	Chegada na ETA	361	144.712.220
01/07/03	Chegada na ETA	377	141.371.252
01/08/03	Chegada na ETA	325	136.655.507
04/08/03	Chegada na ETA	321	136.313.860
18/08/03	Chegada na ETA	308	133.922.325
25/08/03	Chegada na ETA	347	132.897.381
01/09/03	Chegada na ETA	345	131.872.437
15/09/03	Chegada na ETA	336	129.822.550
22/09/03	Chegada na ETA	346	128.455.959
29/09/03	Chegada na ETA	340	127.089.367
01/10/03	Chegada na ETA	353	126.747.719
03/11/03	Chegada na ETA	365	120.288.354
01/12/03	Chegada na ETA	355	114.568.084
05/01/04	Chegada na ETA	380	107.417.747
22/01/04	Chegada na ETA	326	122.671.800

Data	Local da coleta	SDT (mg/L)	Volume (m³)
19/01/04	Chegada na ETA	386	172.723.515
27/01/04	Chegada na ETA	143	301.762.966
02/02/04	Chegada na ETA	107	418.088.514
16/03/04	Chegada na ETA	134	415.521.113
14/04/04	Chegada na ETA	145	405.618.282
11/05/04	Chegada na ETA	154	402.068.085
09/06/04	Chegada na ETA	164	399.251.431
13/07/04	Chegada na ETA	165	398.547.268
26/08/04	Chegada na ETA	168	392.209.796
04/09/04	Chegada na ETA	169	390.449.388
05/10/04	Chegada na ETA	171	381.999.426