

Modelo estatístico para acompanhamento das condições sanitárias do reservatório Billings^(*)

João Luiz Barreiros de Araujo (1)
Helvio Mation (2)
Luiz Gonzaga da Silva (3)

1. INTRODUÇÃO

O processo de desenvolvimento industrial que retirou o país da condição de monocultor cafeeiro, precipitando-o no mundo moderno, centralizou-se na Região Sudeste e apresentou seu epicentro na cidade de São Paulo.

Este surto, explosivo, teve origem histórica e, conseqüentemente, multicausal, sendo resultante de processos iterativos de acumulação de capital, assalariamento de mão-de-obra, migrações internas, fornecimento de matérias-primas, concentração urbana, formação da rede de transportes etc. Hoje, a Região Metropolitana de São Paulo, situada quase que totalmente na Bacia do Alto Tietê, com 0,09% da superfície do país, gera mais de 40% de sua produção industrial e abriga 14 milhões de habitantes, mais de 10% da população do país.

Acompanhando e tirando proveito deste desenvolvimento, a empresa multinacional "Light and Power" implantou, a partir da Bacia do Alto Tietê, um sistema hidroenergético e termoeletrico conhecido como "Sistema Light". Tal sistema faz parte de um conjunto mais amplo construído por esta empresa nos rios Tietê, Sorocaba e Paraíba e que forneceu inicialmente a energia necessária à sustentação das elevadas taxas de desenvolvimento de um mercado em rápida expansão. Em tais condições, extremamente favoráveis, o retorno dos investimentos estava garantido pelo sistema tarifário e ainda por favorecimentos do setor público, originados nas condições monopolistas de desenvolvimento.

Foram construídas, progressivamente, obras cuja escala até hoje causam admiração: procedeu-se à reversão

mediante barramentos, elevatórias e canais, de todas as águas drenadas na bacia (média de longo período de 87 m³/s) pelo canal do Pinheiros para o grande reservatório de acumulação situado ao Sul da cidade, o reservatório Billings. Daí as águas são encaminhadas às usinas geradoras situadas na Baixada Santista. Hoje, a potência instalada das usinas ali existentes é de 874 mil kW e a capacidade de engolimento das turbinas é de 155,8 m³/s. Alternativamente, as águas podem ser descarregadas para o Médio Tietê pelas comportas de Pirapora. A Light construiu ainda a usina termoeletrica de Piratininga, hoje desativada e com uma capacidade de geração de 470 mil kW.

As estruturas hidráulicas implantadas, todas capacitadas a controlar vazões iguais ou superiores a 100 m³/s, condicionaram de forma definitiva e dramática o aproveitamento múltiplo dos recursos hídricos, tornando-os limitados, dada a prioridade sempre outorgada ao setor energético. A expansão da metrópole viria importunar a exclusividade do uso energético das águas. Desenvolve-se, a seguir, um período no qual novas obras hidráulicas tornam-se necessárias, para atender a outros usos para as águas, procurando-se, no entanto, preservar intocável o sistema hidroenergético.

Assim, a ocupação das várzeas quaternárias e a impermeabilização do solo, decorrentes da expansão do tecido urbano, conduziram ao agravamento do problema das inundações e a soluções como a canalização e retificação dos rios principais, a supermotorização das elevatórias de Traição e Pedreira, o estabelecimento de regras operacionais para minimizar os efeitos das inundações e a construção dos reservatórios do Alto Tietê, inclusive com finalidade de contenção de cheias.

A necessidade crescente de água para abastecimento levou ao aproveitamento das águas do Guarapiranga e do braço do rio Grande, no próprio reservatório Billings. Num esforço supremo para preservar a geração de energia, importou-se água da Bacia do Alto Piracicaba através do sistema Cantareira, incrementando o potencial energético da bacia; para manter essas águas, no interior da bacia, pro-

pôs-se um complexo sistema de tratamento e disposição dos esgotos conhecido como plano "Hazen and Sawyer", conduzindo-os diretamente ao reservatório Billings, permanecendo as águas em circuito fechado no interior da metrópole.

O Estado e a iniciativa privada nacionais priorizaram de forma absoluta a montagem do parque industrial paulista, para cujo sucesso contribuiu, de modo decisivo, a utilização dos recursos hídricos com finalidade exclusivamente energética. Os esforços paralelos para proteger o meio ambiente e garantir a qualidade de vida das grandes massas humanas que ergueram esse colosso que é a Grande São Paulo podem ser qualificados de ridículos. Pondo de lado os problemas de altas taxas de mortalidade, subnutrição, desemprego, criminalidade, congestionamento etc., detenhamo-nos sobre o da poluição das águas, resultante, na prática, da prioridade nula que foi atribuída à implantação de um sistema de esgotos à altura de uma metrópole moderna.

Os esgotos da região são lançados "in natura" nos corpos d'água da bacia e daí conduzidos, pelo sistema hidroenergético já citado, para geração em Henry Borden ou para o Médio Tietê.

Externamente a esse quadro, o desenvolvimento econômico geral do país caminhava no sentido de propiciar soluções que possibilitassem a compatibilização dos usos múltiplos das águas da bacia.

Assim, a formação de um sistema energético integrado na Região Sudeste passou a permitir transferências de energia excedentes dos reservatórios distantes da Cesp e Furnas para a metrópole; a formulação da Solução Integrada de Disposição dos Esgotos mostrou ser possível implantar um sistema flexível de tratamento de resíduos que permitisse o encaminhamento dos esgotos, tanto para o Billings quanto para o médio Tietê, seguindo o curso natural das águas.

Foi neste contexto que em 1975 o Ministério das Minas e Energia celebrou convênio operativo com o governo do Estado de São Paulo, objetivando a despoluição das águas do Alto

(*) Os trabalhos que deram origem a este artigo foram desenvolvidos na Sabesp, por força das decisões adotadas no Comitê Executivo dos Recursos Hídricos do Alto Tietê. Os autores agradecem a colaboração dos funcionários desta empresa que tiveram alguma participação nos referidos trabalhos.

(1) Diretor de Operação da Região Metropolitana de São Paulo — Sabesp.

(2) Engenheiro de Sistemas — Prodesp.

(3) Tecnólogo e Matemático da Diretoria de Operação da Região Metropolitana de São Paulo — Sabesp.

Tietê e particularmente do reservatório Billings.

Desta forma, surgiu um problema prático, carente de tratamento teórico: como operar o sistema hidráulico do Alto Tietê de forma a minimizar os impactos ambientais provocados pelo lançamento dos esgotos em suas águas, sem conflitar com o uso energético.

A necessidade de análise sistêmica do problema prevê necessariamente a conjunção de um grupo de modelos matemáticos que possibilitem a simulação e previsão dos seguintes fenômenos:

a) balanço de massa diário das águas do Alto Tietê, considerando-se substancialmente como variáveis de controle as vazões turbinadas em Henry Borden e as descarregadas em Pirapora, permitindo a análise estatística das consequências da adoção de regras operacionais alternativas;

b) consequências sanitárias do lançamento dos esgotos da metrópole sobre o reservatório Billings e sobre o Médio Tietê nas diversas condições descritas no item "a";

c) previsões dos aportes de vazões futuras a serem verificadas no Alto Tietê, para fins operacionais práticos.

O modelo de simulação referido no item "a" foi desenvolvido por técnicos da Sabesp (N. Nucci, Rodolfo Costa e Silva, Walter Del Picchia et alii, em 1974) recebendo a denominação de Simop e, posteriormente, abandonado, sem maiores explicações.

Os modelos previsionais mencionados em "c" são os utilizados pelo GCOI-Grupo Coordenador da Operação Interligada da Eletrobrás.

O modelo referido em "b" foi desenvolvido inicialmente com base em uma tentativa de descrição determinística do comportamento sanitário do reservatório Billings; não foi apresentado nenhum modelo similar para o Médio Tietê.

O presente trabalho, essencialmente, apresenta um modelo matemático que substitui o modelo anterior de qualidade das águas da Billings, baseado na experiência que o uso deste propiciou.

Deve-se ressaltar que, na discussão sobre as regras operacionais do sistema hidráulico sob um ponto de vista técnico, o "setor sanitário" participa de forma inferiorizada junto ao "setor energético".

As soluções propostas pelo setor energético atingiram um grau de elaboração muito mais avançado que os do setor sanitário, que hoje só dispõe efetivamente dos modelos matemáticos descritos por este trabalho e ainda teima em proceder de forma

circular e não cumulativa para apresentação de suas propostas.

O "setor sanitário" ainda necessita dar os seguintes passos:

- aperfeiçoar o modelo de qualidade da Billings aqui apresentado;

- montar o modelo de qualidade das águas do Médio Tietê;

- explorar, por simulação, as consequências energético-sanitárias para diversas configurações de regras operacionais propostas a nível probabilístico, inclusive com a utilização de modelos previsionais próprios;

- estabelecer regras operacionais singulares de cada estrutura hidráulica, bem como do sistema de monitoramento e acompanhamento da qualidade das águas e suas variáveis de controle.

Este trabalho constitui-se num esforço para reorientar, no problema em tela, a ação do setor sanitário no sentido de uma racionalidade progressiva.

O partido estatístico adotado não é inocente. Insere a compreensão profunda de que a tais modelos é inerente a incorporação da experiência operacional já obtida, desviando-se da política até aqui seguida de recomeçar tudo da estaca zero.

Estamos convencidos de que o sistema hidroenergético, se submetido a restrições operacionais de ordem sanitária, possui uma capacidade ociosa de diminuição dos impactos ambientais que apenas foi timidamente explorada, quaisquer que sejam as condições de tratamento dos esgotos na Região Metropolitana de São Paulo.

O presente estudo **comprova que o bombeamento controlado das águas de Pedreira** propicia a melhoria da qualidade das águas da Billings, com independência notável das condições hidrológicas. Mas, mais do que isto: comprova a possibilidade de que se preveja, com antecedência de cerca de um mês, quais as condições sanitárias que poderão ser atingidas no reservatório.

Abrigamos a veleidade de que este trabalho mostre as enormes potencialidades da disseminação da metodologia do uso de modelos estatísticos para a solução de outros problemas na área. Estão cada vez mais longínquos os tempos em que não dispúnhamos de dados nossos para solução de nossos problemas, sendo obrigados a copiar as informações da literatura técnica internacional.

Afiança-se a situação em que a técnica nacional torna-se um momento necessário da própria evolução geral da técnica internacional, esta sem dúvida patrimônio comum de toda a humanidade.

Neste problema singular, estamos certos de que as condições de monopólio de que o Estado de São Paulo goza hoje no manejo das águas do Al-

to Tietê, conduzirão necessariamente a uma política de uso múltiplo que objetive a maximização do benefício social, em contraposição às otimizações setoriais até aqui seguidas, que persistem entre reais cruéis heranças do regime autoritário.

2. DESCRIÇÃO DO SISTEMA LIGHT

Para melhor compreensão dos problemas do Alto Tietê é conveniente apresentar mais detalhadamente o processo de produção de energia elétrica da concessionária Eletropaulo que opera na região. Com finalidade de aproveitar o desnível de cerca de 700 m entre o planalto interior e a orla marítima para produção de energia elétrica foi projetada, em 1926, a reversão das águas da bacia do Alto Tietê para a vertente marítima, através de uma série de represamentos, canais e estações elevatórias.

Uma barragem no rio Tietê, em Pirapora do Bom Jesus, a jusante de São Paulo, permite o aproveitamento das águas do rio Juqueri, e daquelas provenientes das extravazões das cheias da bacia a montante de Edgard de Souza, que podem ser recalçadas a partir do reservatório de Pirapora, mediante a elevatória de Edgard de Souza, para o reservatório de mesmo nome situado logo a montante.

O remanso, ao longo do canal do rio Tietê, provocado nestas condições pelo reservatório de Edgard de Souza, permite que as águas do rio Tietê sejam revertidas através de um de seus afluentes, o rio Pinheiros, utilizando-se para tal duas estações elevatórias, Traição e Pedreira, nele executadas. Tais estações elevatórias permitem que as águas do rio Tietê cheguem ao reservatório Billings, que tem uma capacidade de armazenamento de aproximadamente 1,2 bilhão de m³. Daí, são conduzidas, serra abaixo, aproveitando um desnível de cerca de 700 m até a Usina de Henry Borden, que tem uma capacidade de geração de 874 mil kW.

A partir de 1954, tendo em vista atender ao fornecimento de energia firme para a metrópole, a Light construiu a termoeletrica de Piratininga, com capacidade de geração de 470 mil kW. Com a alta dos preços relativos dos derivados de petróleo, esta usina, comprada pelo Estado de São Paulo, deixou de fazer parte do sistema energético em condições normais de operação.

Informações de interesse sobre o sistema Light são apresentadas nos desenhos de 1 a 3. A figura 1 mostra a situação do sistema no conjunto dos aproveitamentos hídricos existentes e projetados no interior e em torno da Grande São Paulo. O esquema da fi-

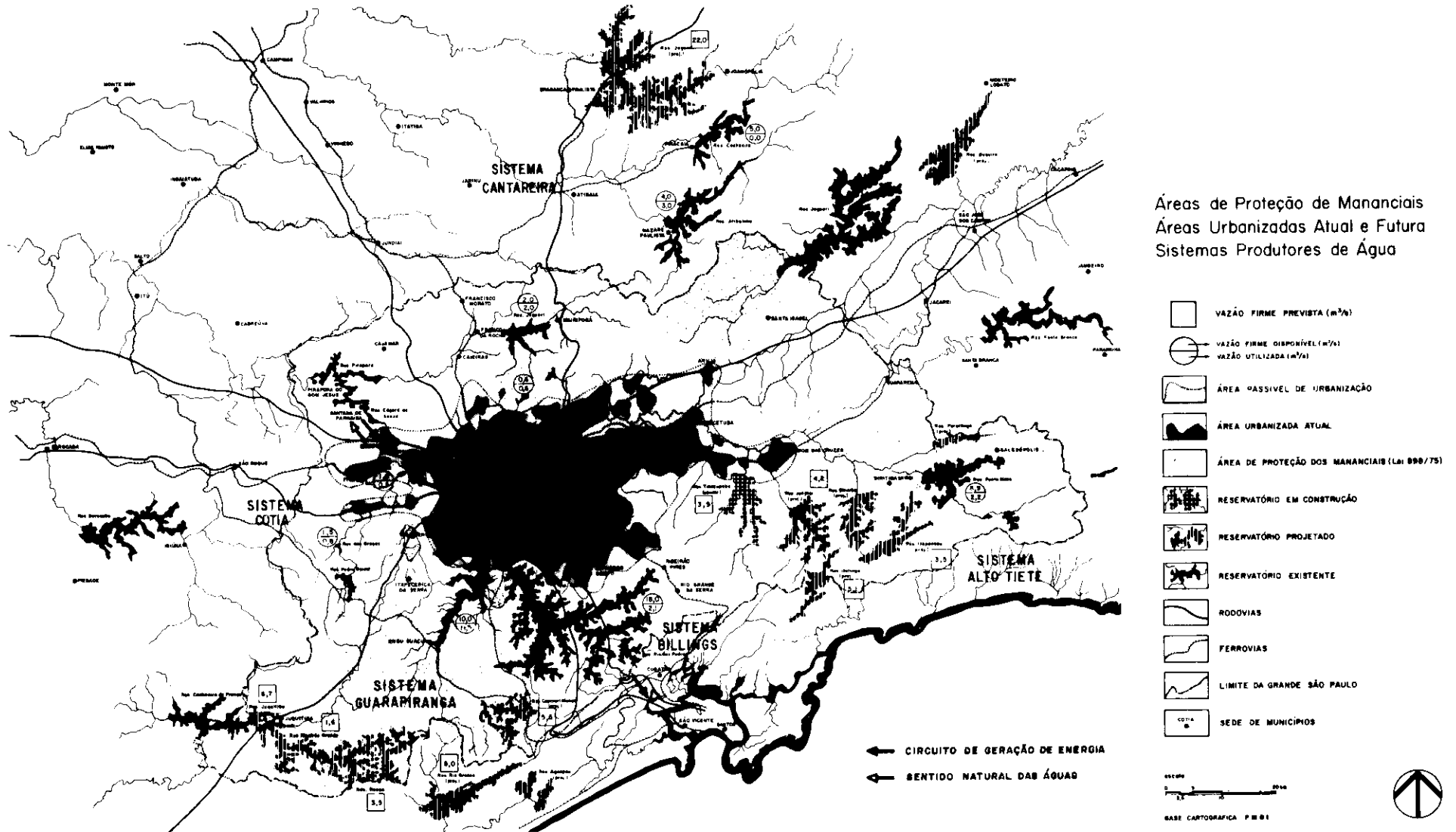


Figura 1 — Configuração hidrográfica do Alto Tietê

gura 2 esclarece o mecanismo da reversão das águas. Finalmente, a figura 3 mostra a ocupação do solo nas proximidades do reservatório Billings.

3. CONTROLE DA POLUIÇÃO NO RESERVATÓRIO

3.1 HISTÓRICO

O processo de deterioração do Reservatório Billings acelerou-se, a partir da década de 50, consequência de sua transformação em corpo receptor de todas as águas da bacia do Alto Tietê. A água do reservatório, que até então era límpida e intensivamente usada em atividades recreativas, tornou-se verde-opaca, pela proliferação de algas. Com o prosseguimento da reversão dos esgotos diluídos para o reservatório Billings, grande parte deste tornou-se permanentemente anaeróbico, com a perda progressiva de sua utilização para lazer, ao mesmo tempo em que efeitos indesejáveis foram sendo sentidos na Estação de Tratamento de Águas do rio Grande.

A utilização mais intensiva do reservatório para os nobres fins de abastecimento de água e lazer, preconizada por toda uma escola de profissionais ligados ao meio ambiente, parecia cada vez mais longínqua, sobretudo diante da afirmativa sempre repetida de que a deterioração já chegara a tais níveis que seria impossível recuperar as águas já degradadas.

O desenvolvimento do sistema hidroenergético na região Sudeste, especialmente as obras de Furnas e Cesp, fazendo diminuir progressivamente a importância relativa da geração em Henry Borden, viria criar condições para o início de um processo de modificações no manejo das águas da bacia do Alto Tietê.

Em 6 de fevereiro de 1975, celebrou-se um convênio operativo entre Eletropaulo, Furnas-Centrals Elétricas S. A. e Cesp-Centrals Energéticas do Estado de São Paulo, com intervenção do DNAEE-Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica, Eletrobrás-Centrals Energéticas Brasileiras S. A. e Soma-Secretaria de Obras e do Meio Ambiente de São Paulo, objetivando a diminuição dos índices de poluição da água do reservatório Billings. Proceder-se-ia a essa diminuição por meio da redução do bombeamento de águas da bacia do Alto Tietê para o reservatório. Tal redução tornou-se possível pela transferência de energia excedente turbinável de outras usinas do sistema energético da região Sudeste, e substituindo a energia que deixaria de ser gerada em Cubatão.

Para tanto, Nucci et alii estabeleceram regras de operação para a elevatória de Pedreira compatíveis com o

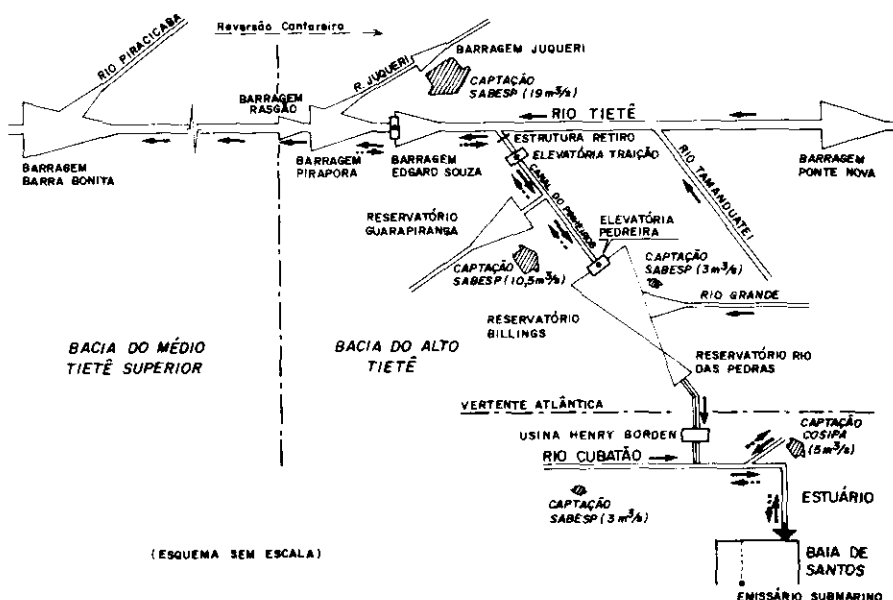


Figura 2 — Esquema do Sistema do Alto Tietê

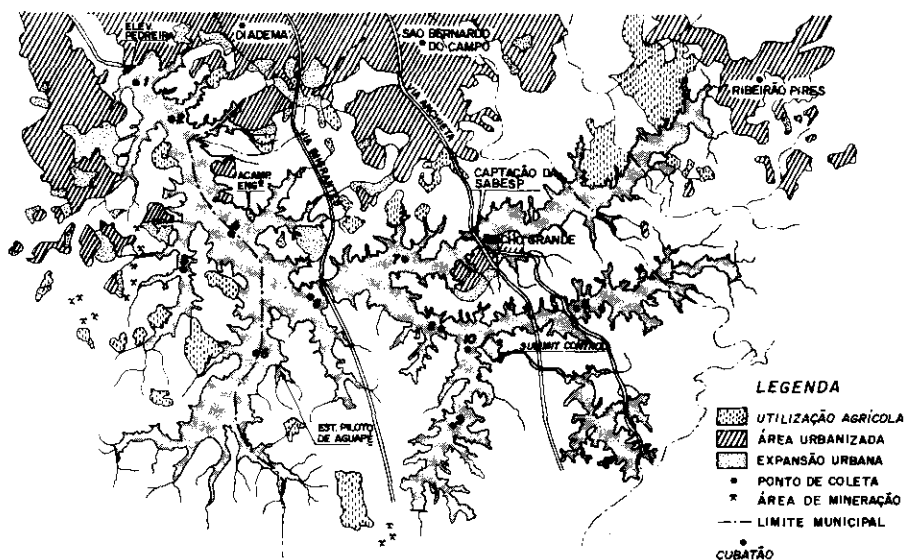


Figura 3 — Mapa de Ocupação do Solo na Região do Reservatório Billings

uso energético do reservatório, com base em um "modelo de qualidade" que é descrito no item 3.2.1.

Em setembro de 1975, após o início da operação energética-sanitária, processou-se uma sensível melhoria da qualidade das águas, registrando-se em algumas ocasiões, condições aeróbias em toda extensão do reservatório. Esta operação perdurou até o ano de 1976.

Posteriormente, em 15-6-76, foi criado o Comitê Executivo para operação dos recursos hídricos do Alto Tietê, mediante um convênio firmado entre o governo do Estado de São Paulo e o Ministério das Minas e Energia.

A operação sanitária tal como fora inicialmente concebida foi então abandonada, indicando-se a necessidade do estabelecimento de novos modelos de qualidade das águas.

Recentemente, em maio de 1983, por iniciativa da Cetesb/Soma foram estabelecidas novas regras de operação para o sistema, adotando-se bombeamento mínimo e mesmo suspensão do bombeamento na Elevatória de Pedreira, de acordo com as condições hidrometeorológicas do sistema. A suspensão do bombeamento em Pedreira, a partir de 16-6-83, provocou repercussões bastante favoráveis na qualidade da água do reservatório. Sobre tudo, a experiência obtida com a suspensão do bombeamento em Pedreira revelou que a pretendida impossibilidade de recuperação das águas do reservatório pertence à mitologia.

Em setembro de 1983, com a estiagem prolongada e decorrente depleção dos reservatórios da região Sudeste, a Eletrobrás, com base em estudos que mostrariam a elevação dos

riscos ao fornecimento hidroenergético da região Sudeste, indicou a necessidade de serem aumentados os bombeamentos em Pedreira, alternativa considerada imprescindível para evitar o início da entrada em operação das usinas térmicas, de elevadíssimos custos operacionais.

Os primeiros reflexos destas medidas foram as alterações na qualidade da água do reservatório Billings, principalmente no que concerne à redução do oxigênio dissolvido.

Diante desse novo cenário no qual se pretende tratar com equidade os interesses conflitantes de uso múltiplo de água, torna-se necessário o uso de metodologia específica para abordar o problema.

Para tanto, nesta nova fase, desenvolveu-se o modelo estatístico de qualidade das águas do reservatório Billings, que se constitui no objeto principal do presente estudo e que é detalhadamente descrito no item 4.

3.2.1 Modelo de qualidade das águas do Billings — 1975

O objetivo do modelo de qualidade utilizado em 1975 era o de determinar, a partir de um certo estado do reservatório Billings e de um conjunto de insumos hidrometeorológicos, o aporte diário de oxigênio às águas do Billings, admitido como proveniente fundamentalmente da reaeração atmosférica e da produção fotossintética.

Obtinha-se em consequência, diretamente, a máxima carga poluidora orgânica, medida em DBO, que poderia afluir ao reservatório. Supondo mistura completa das cargas poluidoras afluentes às águas do Alto Tietê, determinava-se linearmente a máxima vazão bombeável em Pedreira.

Para distinguir, nas equações de balanço de oxigênio formuladas, o comportamento da parte anaeróbia do reservatório do restante do mesmo, introduziram-se dois indicadores sanitários originais, adaptados ao caso em estudo:

— parâmetro \emptyset , relação entre as áreas anaeróbia e total do espelho d'água;

— parâmetro ψ , relação entre os volumes anaeróbio e total do reservatório.

A possibilidade de "traduzir" matematicamente ψ em termos de \emptyset , mediante algumas simplificações e a extrema significância para fins práticos deste último, acabou por tornar o parâmetro \emptyset o principal indicador de qualidade de águas do Billings. Sua aceitação foi de tal ordem que, mesmo após a paralisação da operação sanitária ordenada pelas autoridades a

partir de 1976, continuou-se a medir mensalmente o valor de \emptyset ; isto possibilitaria a acumulação de dados para a formulação do modelo alternativo aqui apresentado.

Na utilização prática do modelo, uma vez estabelecido ao início de cada mês um valor do \emptyset que não se pretendia ultrapassar, efetuava-se uma análise de simulação do balanço de massa das águas do Alto Tietê, empregando-se o modelo Simop já mencionado, ao qual eram agregadas as restrições operacionais ditadas pelo modelo de qualidade.

Obtinham-se para cada mês considerado, duas famílias de curvas dos volumes do Billings, construídas a partir do volume inicial realmente verificado no reservatório:

- a primeira fixando um valor médio turbinado em Henry Borden, parametrizando-se diversos valores para \emptyset ;

- a segunda fixando-se o valor limite de \emptyset e parametrizando-se os valores turbináveis em Henry Borden.

A análise do conjunto de informações assim obtido permitia determinar a cada mês a regra operacional a ser seguida, de modo a garantir-se, com um dado nível de risco, um volume final preestabelecido para uma dada vazão turbinada em Henry Borden,

compatibilizando-se assim os usos energéticos e sanitários do reservatório.

Uma verificação feita através dos dados hoje disponíveis revela as principais deficiências deste modelo:

- em virtude da inexistência de dados prévios trata-se de um modelo teórico, no qual foram adotados dados para os parâmetros que não se referiam ao reservatório Billings;

- estes dados foram considerados como constantes ao longo do ano, sem considerar a existência de tendências e/ou variações sazonais;

- as simplificações teóricas feitas deixaram de lado importantes variáveis, que posteriormente se mostraram significativas;

- as mudanças nas regras operacionais eram pouco sensíveis às modificações apresentadas pelas variáveis intervenientes (volume do Billings, vazão de diluição etc.);

- principalmente, por sua natureza, o modelo não permitia prever o valor de \emptyset que seria alcançado sempre que houvesse afastamento das condições de equilíbrio.

Conforme descrito por Nucci et alii a tabela 1 mostra os valores do pa-

Tabela 1 — Valores do parâmetro sanitário recomendados como insumo do modelo de qualidade e valores do parâmetro sanitário observados

| DATA | \emptyset RECOMENDADO | \emptyset MEDIDO |
|----------|-------------------------|--------------------|
| 19/01/76 | 0,20 | 0,11 |
| 27/01/76 | 0,20 | 0,12 |
| 20/02/76 | 0,20 | 0,12 |
| 22/03/76 | 0,20 | 0,08 |
| 01/04/76 | 0,20 | 0,30 |
| 10/05/76 | 0,30 | 0,34 |
| 02/06/76 | 0,40 | 0,57 |
| 27/07/76 | 0,60 | 0,51 |
| 23/08/76 | 1,00 | 0,33 |
| 29/09/76 | 1,00 | 0,15 |
| 29/10/76 | 1,00 | 0,03 |
| 29/11/76 | 1,00 | 0,02 |
| 22/12/76 | 1,00 | 0,02 |

râmetro sanitário recomendado para determinação da vazão na estação elevatória de Pedreira (utilizando o modelo de qualidade) e os correspondentes valores do parâmetro sanitário efetivamente medido.

A interpretação deste quadro não é fácil nem imediata. Um valor de \emptyset recomendado indica tão somente que os volumes bombeados seriam de tal ordem que não permitiriam uma degradação do reservatório além do valor especificado. Um \emptyset recomendado igual a 1,0 representa o máximo de restrição possível no bombeamento e um \emptyset recomendado igual a 0,0 o máximo de liberação desse bombeamento. Os resultados foram, desse modo, satisfatórios de um ponto de vista prático.

Cumpre ressaltar que os autores indicaram a necessidade de aperfeiçoar o modelo introduzindo dados específicos do reservatório e informações que permitissem levar em conta a sazonalidade, a demanda bentônica etc. Em qualquer caso, no entanto, persistiria o problema da impossibilidade de serem feitas previsões quantitativas para \emptyset .

Ressalte-se, por fim, que as características essenciais da operação propostas foram mantidas na formulação atual:

- limitação do bombeamento em Pedreira para atender a uma determinada condição especificada para o parâmetro \emptyset e previsibilidade da variação dos volumes do Billings.

3.2.2 Modelo estatístico proposto

Por ocasião do desenvolvimento do modelo de qualidade, em 1974, Max Hermann sugeriu que fosse verificada a possibilidade de utilização da técnica de regressão linear múltipla para previsão do parâmetro \emptyset . A insuficiência dos dados disponíveis, na época, revelou a impossibilidade de seguir tal caminho.

Em 1984, face a existência de 97 observações do parâmetro \emptyset , os quais são mostrados na figura 4, e de outras variáveis intervenientes, retomou-se a idéia, julgando-se de toda conveniência assumir que a bacia hidrográfica do Alto Tietê poderia ser modelada como um "sistema linear de primeira ordem", relacionando os bombeamentos na Estação Elevatória de Pedreira e outros dados de operação hidrometeorológicos com o parâmetro sanitário.

Foram testadas as três formas funcionais:

$$\hat{\emptyset} = e^{\beta_1 x_1} \cdot e^{\beta_2 x_2} \dots e^{\beta_k x_k} + \epsilon \quad (1)$$

$$\hat{\emptyset} = x_1^{\beta_1} \cdot x_2^{\beta_2} \cdot x_3^{\beta_3} \dots x_k^{\beta_k} \cdot C + \epsilon \quad (2)$$

$$\hat{\emptyset} = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k + \epsilon \quad (3)$$

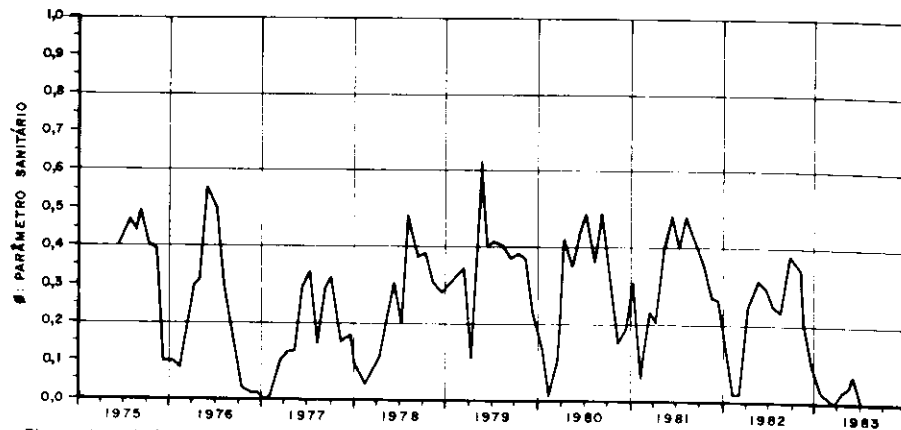


Figura 4 — Valores observados do parâmetro sanitário \emptyset , na represa Billings — Período: junho/75-julho/83

onde: $\hat{\emptyset}$ representa uma estimativa do parâmetro sanitário para um determinado mês; $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_k$ são parâmetros da função; ϵ é uma componente aleatória e sempre presente em modelos lineares de regressão e engloba erros de medição, de leitura e de outros fatores físicos. É assumida a hipótese de normalidade de sua distribuição do erro (com média zero e variância aproximadamente constante).

Verificou-se que as formas funcionais descritas pelas equações (1) e (2) apresentaram índices de determinação, na maioria dos casos, inferiores à forma hiperplana (3). Devido a este fato, todos os modelos descritos neste trabalho têm a forma funcional hiperplana genérica da equação (3).

O ajuste dos coeficientes $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_k$ dos modelos foi feito utilizando-se a técnica de regressão linear múltipla pelos mínimos quadrados, com inclusão das variáveis "par e passo" (stepwise), através do software "Statistics Package for Social Sciences — SPSS".

Na exploração matemática desse modelo, exercem papel fundamental dois testes, de significado preciso: o coeficiente de correlação múltipla, que mede a relação entre a variação explicada pelo modelo e a variação total; e o teste F, que permite verificar se a diferença entre a variação explicada e a variação total é aceitável para um determinado nível de significância.

Considerando a existência de "multicolinearidade quase extrema" entre algumas variáveis, após cada ajuste (determinação dos coeficientes) de um modelo, verificava-se o nível de significância da variável com o menor valor do teste "F". Caso este nível de significância não atingisse o valor desejado de 5%, tal variável era eliminada do modelo, procedendo-se a nova determinação dos coeficientes. Tal procedimento era repetido até que todas as variáveis independentes ajustadas fossem estatisticamente significativas. Esta metodologia possibilitou a obtenção de modelos parcimoniosos que,

apesar do risco da eliminação de variáveis, mostram-se totalmente explicativos do fenômeno estudado.

4. DADOS DISPONÍVEIS PARA MODELAGEM

4.1 INTRODUÇÃO

Os modelos foram desenvolvidos a partir dos dados de operação do sistema do Alto Tietê, durante o período que se estende de maio/75 a junho/83, totalizando 97 meses de observações ininterruptas.

A variável dependente, denominada parâmetro sanitário, é um indicador do grau de poluição do reservatório Billings a cada instante. Fisicamente, tal variável representa o cociente entre a área da mancha anaeróbia e a área da superfície total do reservatório Billings. No período considerado, as medidas do parâmetro sanitário só eram feitas com uma frequência média de 30 dias e desvio padrão de sete dias.

A figura 5 mostra exemplo do parâmetro sanitário, como variável representativa da mancha anaeróbia no reservatório.

Algumas das variáveis utilizadas foram introduzidas em diferentes fases da modelagem, conforme descrito no capítulo 5.

As variáveis independentes, consideradas inicialmente, incluem um rol de observações de operação do sistema do Alto Tietê, além de dados hidrometeorológicos.

Numa segunda fase do processo de modelagem foram introduzidas 12 variáveis binárias (com valor 0 ou 1) no conjunto das variáveis independentes. Cada uma dessas variáveis corresponde a um mês do ano [com características próprias de chuva, temperatura, umidade etc.].

Numa terceira fase do processo de modelagem foi introduzida mais uma variável independente adicional que é a variável dependente (parâmetro sanitário) do mês anterior.

Na quarta fase de modelagem foi

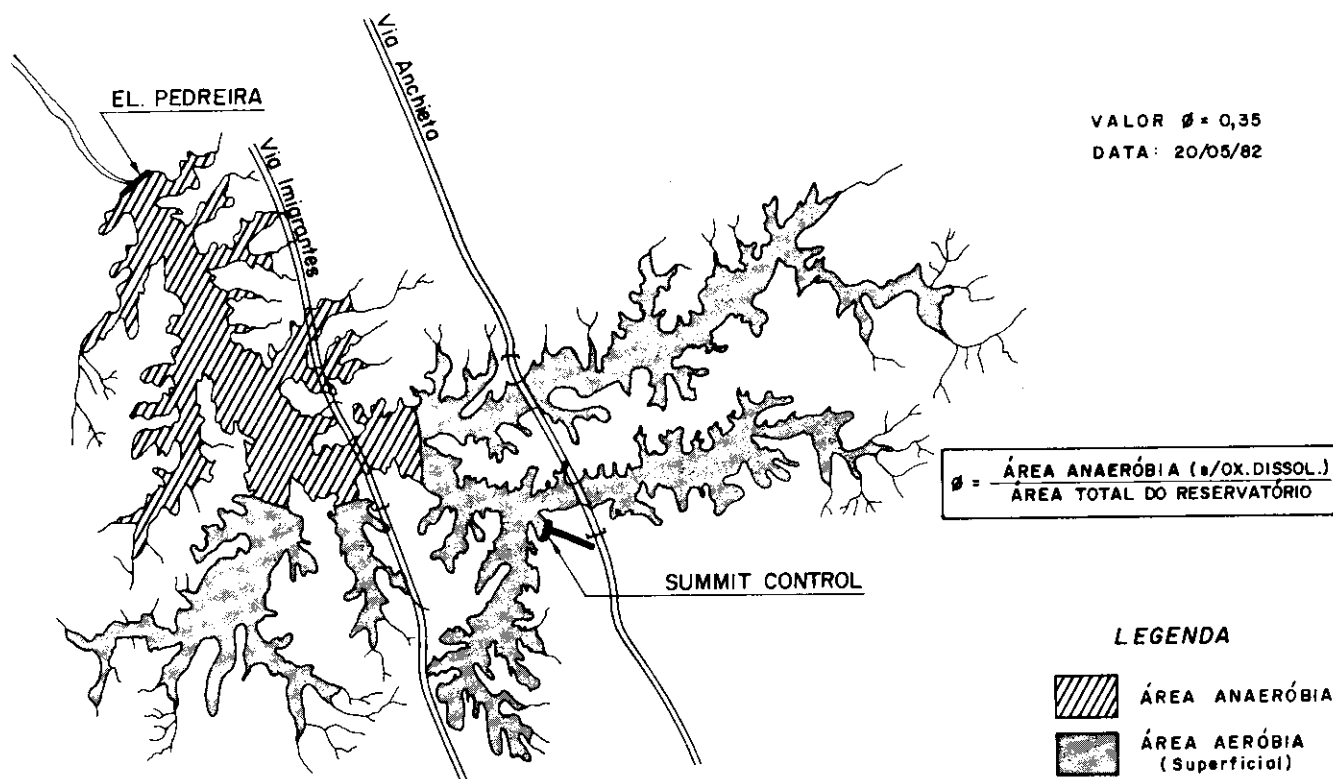


Figura 5 — Representação da mancha anaeróbia no reservatório Billings

introduzida mais uma variável defasada de um mês. Tal variável é denominada razão de estar no reservatório e é o quociente entre o volume armazenado num instante e o volume total do reservatório.

As medidas da variável dependente (parâmetro sanitário) têm periodicidade mensal e algumas das variáveis independentes têm periodicidade diária ou semanal (temperatura, por exemplo). Desta forma, as observações diárias ou semanais foram convertidas para informações mensais, através do cálculo das correspondentes médias aritméticas das observações disponíveis no período dos últimos 30 dias imediatamente anteriores à observação do parâmetro sanitário.

4.2 NOMENCLATURA E LISTA DAS VARIÁVEIS

As variáveis utilizadas nos modelos propostos e ajustados nas quatro fases são:

- FI: variável dependente denominada parâmetro sanitário; mede o quociente entre a área anaeróbia do reservatório Billings e a área total do mesmo num dado instante;
- FIA: parâmetro sanitário no mês anterior ao considerado;
- QDIL: vazão de diluição correspondente ao volume total de água recebida a cada segundo em Edgard de Souza (m^3/s);

- QBPED: descarga bombeada na Estação Elevatória de Pedreira (m^3/s);

- QBTR: descarga bombeada na Estação Elevatória de Traição (m^3/s);

- QDGUA: descarga pelo canal do reservatório do Guarapiranga (m^3/s);

- QNBIL: vazão natural da bacia hidrográfica da Billings (m^3/s);

- QSUM: descarga pela comporta do Summit Control (m^3/s); tal descarga é utilizada para geração de energia elétrica na usina de Henry Borden, no município de Cubatão;

- QABC: descarga do reservatório Billings para abastecimento de água na região do ABC (m^3/s);

- V: capacidade de armazenamento ou "condição de estar" do reservatório Billings, medindo o quociente entre o volume existente no reservatório e o volume total de armazenamento, no instante da observação de "FI";

- VA: capacidade de armazenamento ou "condição de estar do reservatório Billings" no mês anterior ao instante da medida de "FI";

- TEMPA: temperatura do ar ($^{\circ}C$);

- TEMPT: temperatura da água a 2 cm da superfície observada na Estação Meteorológica de Pedreira ($^{\circ}C$);

- XJAN, XFEV... XDEZ: meses do ano civil considerados como variáveis

binárias, atribuindo-se para cada observação, o valor de 0 (zero) para 11 variáveis e 1(um) para a variável que corresponde ao mês da respectiva observação.

Deve-se, ainda, lembrar que a medição do parâmetro sanitário nas observações utilizadas careceu de um rigoroso sistema de controle (na época da sua coleta) e apresenta uma grande componente aleatória. Tal consideração tem implicações na modelagem, conforme será descrito no capítulo 5.

A lista das variáveis apresentadas pode ser classificada de acordo com a sua natureza:

- variáveis que representam **vazões médias mensais medidas em m^3/s** :

QDIL, QBPED, QNBIL, QSUM, QABC, QDGUA, QBTR;

- variáveis que representam **relações entre volumes (frações)**: (V, VA);

- variáveis **meteorológicas** (TEMPA, TEMPT. UR);

- variáveis que representam **épocas do ano**: (XJAN, XFEV... XDEZ);

- variáveis que são medidas do **grau de poluição** do reservatório:

(FI, FIA).

O esquema dos fluxos hidráulicos do sistema do Alto Tietê consta da figura 2.

A tabela 2 permite que se tenha idéia de ordem de magnitude das medidas das variáveis, além da comparação daquelas que são do mesmo tipo.

Intuitivamente, sente-se que muitas das variáveis apresentadas estão correlacionadas ou podem ser formuladas como funções ou combinações lineares de outras. Tal fato fez prever que se poderia ter problemas de multicolinearidade "quase extrema", que resultaria em baixa significância de duas variáveis correlacionadas que entram no mesmo modelo.

A tabela 3 mostra a matriz de correlações das variáveis utilizadas; inicialmente essa matriz foi utilizada para tentar evitar que modelos com variáveis redundantes fossem propostos (evitando a multicolinearidade). Para exemplificar, dada a altíssima correlação entre as diversas variáveis que medem temperaturas, utilizou-se somente a variável TEMPT nos modelos propostos.

5. MODELOS ESTATÍSTICOS

Conforme referido no item 3.2.2, o modelo estatístico proposto obedece à forma hiperplana genérica:

$$\hat{y} = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k + \epsilon \quad (3)$$

Tabela 2 — Médias e desvios-padrões das variáveis utilizadas nas observações consideradas

| VARIÁVEL | MÉDIA | DESVIO PADRÃO | N. CASOS |
|----------|----------|---------------|----------|
| FI | 0.2571 | 0.1580 | 97 |
| QDIL | 100.3639 | 42.7508 | 97 |
| QBPED | 62.7701 | 23.2968 | 97 |
| QNBIL | 20.0546 | 11.4078 | 97 |
| QSUM | 80.4340 | 19.8753 | 97 |
| QABO | 3.0567 | 0.3285 | 97 |
| V | 0.7837 | 0.1118 | 97 |
| TEMPT | 20.8588 | 2.9478 | 97 |
| TEMPBS | 19.6361 | 2.4861 | 97 |
| UR | 78.7474 | 3.5249 | 97 |
| JAN | 0.0825 | 0.2765 | 97 |
| FEV | 0.0825 | 0.2765 | 97 |
| MAR | 0.0825 | 0.2765 | 97 |
| ABR | 0.0825 | 0.2765 | 97 |
| MAI | 0.0825 | 0.2765 | 97 |
| JUN | 0.0928 | 0.2916 | 97 |
| JUL | 0.0825 | 0.2765 | 97 |
| AGO | 0.0825 | 0.2765 | 97 |
| SET | 0.0825 | 0.2765 | 97 |
| OUT | 0.0825 | 0.2765 | 97 |
| NOV | 0.0825 | 0.2765 | 97 |
| DEZ | 0.0825 | 0.2765 | 97 |
| FIA | 0.2612 | 0.1564 | 97 |
| VA | 0.7840 | 0.1121 | 97 |

Tabela 3 — Matriz de correlações entre as variáveis consideradas

| | FI | QDIL | QBPED | QNBIL | QSUM | QABC | V | TEMPT | TEMPBS | UR | JAN | FEV |
|--------|-------|-------|-------|-------|------|-------|-------|-------|--------|-------|-------|-------|
| FI | 1.00 | -0.57 | 0.07 | -0.37 | 0.13 | -0.06 | -0.04 | -0.64 | -0.64 | -0.20 | -0.22 | -0.35 |
| QDIL | -0.57 | 1.00 | 0.41 | 0.63 | 0.27 | 0.51 | 0.27 | 0.56 | 0.56 | 0.38 | 0.44 | 0.38 |
| QBPED | 0.07 | 0.41 | 1.00 | 0.33 | 0.64 | 0.38 | 0.02 | 0.25 | 0.25 | 0.12 | 0.14 | 0.11 |
| QNBIL | -0.37 | 0.63 | 0.33 | 1.00 | 0.27 | 0.16 | -0.05 | 0.38 | 0.38 | 0.40 | 0.22 | 0.16 |
| QSUM | 0.13 | 0.27 | 0.64 | 0.27 | 1.00 | 0.27 | 0.06 | 0.18 | 0.18 | 0.11 | 0.22 | 0.14 |
| QABC | -0.06 | 0.16 | 0.38 | 0.16 | 0.27 | 1.00 | 0.02 | 0.09 | 0.09 | 0.11 | 0.09 | 0.09 |
| V | -0.04 | 0.27 | 0.02 | 0.02 | 0.06 | 0.02 | 1.00 | 0.15 | 0.15 | 0.10 | 0.08 | 0.08 |
| TEMPT | -0.64 | 0.56 | 0.25 | 0.38 | 0.18 | 0.09 | 0.15 | 1.00 | 1.00 | 0.16 | 0.09 | 0.09 |
| TEMPBS | -0.64 | 0.56 | 0.25 | 0.38 | 0.18 | 0.09 | 0.15 | 1.00 | 1.00 | 0.16 | 0.09 | 0.09 |
| UR | -0.20 | 0.38 | 0.40 | 0.22 | 0.11 | 0.11 | 0.10 | 0.10 | 0.10 | 1.00 | 0.99 | 0.99 |
| JAN | -0.22 | 0.44 | 0.14 | 0.22 | 0.14 | 0.09 | 0.08 | 0.08 | 0.08 | 0.99 | 1.00 | 0.99 |
| FEV | -0.35 | 0.38 | 0.11 | 0.16 | 0.14 | 0.09 | 0.08 | 0.08 | 0.08 | 0.99 | 0.99 | 1.00 |
| MAR | -0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| ABR | -0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| MAI | -0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| JUN | -0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| JUL | -0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| AGO | -0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| SET | -0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| OUT | -0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| NOV | -0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| DEZ | -0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| FIA | -0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| VA | -0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |

Num processo de aproximações sucessivas em busca de uma descrição mais realista da previsão, podem ser distinguidas quatro fases na modelagem, que diferem, principalmente, pelo rol das diferentes variáveis independentes propostas nos modelos.

Estas fases são apresentadas, detalhadamente, a seguir.

5.1 MODELOS DA FASE I

Na fase I, os modelos propostos assumiam como variáveis independentes apenas as variáveis hidrometeorológicas (temperatura, umidade relativa, vazão natural) e de operação do reservatório (vazões de entradas bombeadas, vazões dos fluxos retirados e condição de estar — volume — do reservatório).

A fase I caracterizou-se principalmente pelo fato dos modelos serem "não dinâmicos". Desta forma é pressuposto que só as variáveis de um mesmo período de observação estejam relacionadas e expliquem o fenômeno.

Pressupôs-se, inicialmente, que o parâmetro sanitário (variável dependente) pudesse ser explicitado basicamente por duas variáveis a saber:

- "QBPED" ou vazão média mensal de água do rio Pinheiros bombeada para o interior do reservatório através da estação elevatória de Pedreira;

- "QNBIL" ou vazão média mensal natural de água do reservatório Billings.

As determinações dos coeficientes destas variáveis, neste modelo, resultaram num valor do coeficiente de determinação extremamente baixo ou seja $R^2 = 0,18$.

Diante deste fato outras variáveis foram introduzidas na modelagem fazendo com que o valor de R^2 passasse a 0,64 conforme a tabela 4.

5.2 Modelos da fase II

A partir da fase I surgiu a idéia de que os modelos poderiam ser melhorados caso fossem consideradas variáveis com as suas características próprias, a cada mês do ano (tais como vazões naturais, temperatura, consumo de água, concentração de poluidores no rio Tietê).

Desta forma, os componentes de sazonalidade das variáveis seriam considerados pelos modelos.

Na modelagem do efeito de sazonalidade foram introduzidas 12 variáveis binárias (exclusivamente com valores zero ou um), denominadas "XJAN, XFEV,... XDEZ". Para cada observação de um determinado mês, o valor da respectiva variável binária é igual a um e os valores das demais variáveis binárias são iguais a zero.

Tabela 4 — Variáveis, coeficientes e valor do teste F de cada um dos modelos da fase I — 97 observações

| VARIÁVEL | MODELOS DA FASE I | | | | | | |
|-------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| | $R^2 = 0,18$ F=10,406 | $R^2 = 0,47$ F=20,296 | $R^2 = 0,50$ F=18,012 | $R^2 = 0,50$ F=18,151 | $R^2 = 0,52$ F=16,604 | $R^2 = 0,64$ F=23,292 | $R^2 = 0,64$ F=32,430 |
| COEFICIENTES | | | | | | | |
| QBPED | 0,00152 F= 5,095 | 0,00194 F= 7,630 | 0,00251 F=11,772 | 0,00208 F= 9,111 | 0,00243 F=11,461 | 0,00230 F=13,603 | 0,00218 F= 12,552 |
| QNBIL | -0,00600 F=20,157 | -0,00120 F= 0,824 | -0,00248 F= 3,101 | -0,00029 F= 0,045 | -0,00144 F= 0,929 | -0,00146 F= 1,275 | |
| QDIL | | -0,00254 F=46,762 | -0,00237 F=40,816 | -0,00293 F=54,000 | -0,00274 F=45,223 | -0,00156 F=14,383 | -0,00173 F=32,832 |
| QSUM | | 0,00125 F= 2,572 | 0,00131 F= 2,984 | 0,00134 F= 3,103 | 0,00161 F= 4,464 | 0,00161 F= 5,897 | 0,00151 F= 5,306 |
| QABC | | | -0,09624 F= 5,184 | | -0,08531 F= 4,260 | -0,08055 F= 5,045 | -0,06412 F= 3,823 |
| V | | | | 0,27104 F= 5,554 | 0,24574 F= 4,619 | 0,02306 F= 0,046 | |
| TEMPT | | | | | | -0,02486 F=30,627 | -0,02585 F=39,326 |
| CONST. REGRES. | 0,28268 | 0,31442 | 0,57618 | 0,10719 | 0,34676 | 0,91646 | 0,90779 |

Notou-se que além da componente sazonal das variáveis explicitadas no modelo, tal procedimento permite de forma indireta, considerar a influência de outras variáveis não explícitas como vento, insolação etc.

Com tal artifício conseguiu-se que o valor do coeficiente de determinação (R^2) passasse a 0,67. A tabela 5 mostra os coeficientes ajustados nesta fase de modelagem.

A interpretação da magnitude e do valor dos coeficientes das variáveis binárias mostradas na tabela 5 é extremamente importante, pois mostra sua alta influência no valor do parâmetro sanitário nos meses considerados estiadados.

5.3 Modelos da fase III

Os modelos foram definidos como "sistemas dinâmicos" de maneira que os valores das variáveis observadas no período "t", pelo menos pudessem influenciar as variáveis observadas no período "[t + 1]". Particularmente a variável dependente de um determinado período influencia a variável dependente no período subsequente.

5.3.1 Modelos da fase III-A

Nesta fase, considerou-se que o valor do parâmetro sanitário \emptyset em um determinado mês, deveria estar

Tabela 5 — Variáveis, coeficientes e valor do teste F na fase II de modelagem — 97 casos

| FASE II $R^2 = 0,67$ 97 OBSERVACOES F= 16,07202 GRAUS DE LIBERDADE DA REGRESSAO = 11 GRAUS DE LIBERDADE DO RESIDUO = 85 | | | |
|--|----------------------|-----------|---------------------|
| VARIÁVEL | COEFICIENTE | VARIÁVEL | COEFICIENTE |
| QDIL | -0,00175 F=34,775 | OUT | 0,11560 F= 8,378 |
| QBPED | 0,00265 F=17,272 | QABC | 0,08438 F= 6,777 |
| JUL | 0,20537 F=25,844 | ABR | 0,05457 F= 1,962 |
| JUN | 0,19178 F=25,405 | CONSTANTE | 0,30999 |
| QSUM | 0,00154 F= 4,729 | | |
| SET | 0,17568 F=17,809 | | |
| MAI | 0,15496 F=15,971 | | |
| AGO | 0,16763 F=15,656 | | |

Tabela 6 — Variáveis, coeficientes e valor do teste F na fase III-A, 97 casos

| FASE III-A $R^2 = 0,69$ 97 OBSERVACOES F= 15,595 GRAUS DE LIBERDADE DA REGRESSAO = 12 GRAUS DE LIBERDADE DO RESIDUO = 84 | | | |
|---|----------------------|-----------|----------------------|
| VARIÁVEL | COEFICIENTE | VARIÁVEL | COEFICIENTE |
| FIA | 0,19966 F= 4,077 | AGO | 0,13390 F= 8,896 |
| QDIL | -0,00143 F=19,055 | QABC | -0,06226 F= 3,453 |
| QBPED | 0,00204 F= 8,505 | OUT | 0,08593 F= 4,199 |
| MAI | 0,15465 F=16,474 | ABR | 0,06546 F= 2,868 |
| JUN | 0,16748 F=18,176 | CONSTANTE | 0,21840 |
| QSUM | 0,00143 F= 4,181 | | |
| JUL | 0,16748 F=14,521 | | |
| SET | 0,14735 F=11,591 | | |

condicionado pelos valores antecedentes, isto é, o sistema físico que se procura descrever é, de algum modo, dotado de "memória". Por essa razão, mais uma variável independente foi introduzida em cada observação e é a variável dependente na observação imediatamente anterior. Os resultados de tal procedimento, conhecido na literatura como uso de "distributed legs", consideradas as 97 observações, são apresentados na tabela 6.

A figura 6 mostra a correlação entre os valores do parâmetro sanitário observados e calculados pelo modelo com as variáveis independentes das 97 observações.

Cabe aqui fazer comentários sobre o processo de medida do parâmetro

sanitário cujo erro tende, pelo próprio método, a aumentar com o valor de \emptyset .

O método consiste no mapeamento visual objetivando a localização de transição entre as áreas aeróbias e anaeróbias (cuja característica é a proliferação intensa de algas cianofíceas) formando pequenos gumos verdes, que em parte mantêm-se em suspensão nas águas. A água, nesta zona de transição, apresenta um aspecto menos viscoso, permitindo a formação de ondas sob a ação dos ventos. Feita esta localização, efetua-se a medida de oxigênio dissolvido (OD) cujo valor deve ser igual ou maior a 0,6 mg/l; em seguida, o observador mira para as margens do

reservatório, pressupondo que a mancha se estenda linearmente na seção transversal, demarcando num mapa uma posição notável. A existência de outros braços no reservatório e a aplicação do método em questão a todos os braços, torna-o bastante exaustivo e impreciso para valores altos de \emptyset .

A figura 7 permite verificar o comportamento do resíduo do modelo da fase III-A (\emptyset observado — \emptyset previsto) para os valores crescentes de \emptyset observado.

Conforme era esperado, devido às características do processo de medida do parâmetro sanitário, verifica-se que a variância do erro aumenta com o valor do parâmetro sanitário,

caracterizando um problema de heterocedasticidade. Tal constatação nos mostra que se deve limitar o uso do modelo dentro de uma faixa de valores de ϕ onde o resíduo possa ser considerado normalmente distribuído e com variância constante. Por esta razão recomenda-se o uso dos modelos para valores de ϕ entre 0,10 e 0,45.

A figura 8 mostra três curvas que correspondem a:

- série histórica dos valores do parâmetro sanitário observados;
- série histórica dos valores do parâmetro sanitário calculados pelo modelo;
- resíduos definidos como as diferenças entre os valores observados e os respectivos valores calculados pelo modelo.

Nesta série histórica podemos notar que alguns pontos com altos valores do parâmetro sanitário observados não podem ser explicados pelo modelo. Tais pontos, marcados com o símbolo "●", são incompatíveis com os insumos fornecidos pelo sistema do Alto Tietê ao reservatório Billings. Além disso, tais medidas do parâmetro sanitário não respeitam a característica de sazonalidade existente nos dados da referida variável no período considerado.

Por estas razões os valores indicados por ("●") na figura 8 foram considerados prováveis valores espúrios e retirados dos dados utilizados na modelagem descrita no item 5.3.2 (Modelos da Fase III-B).

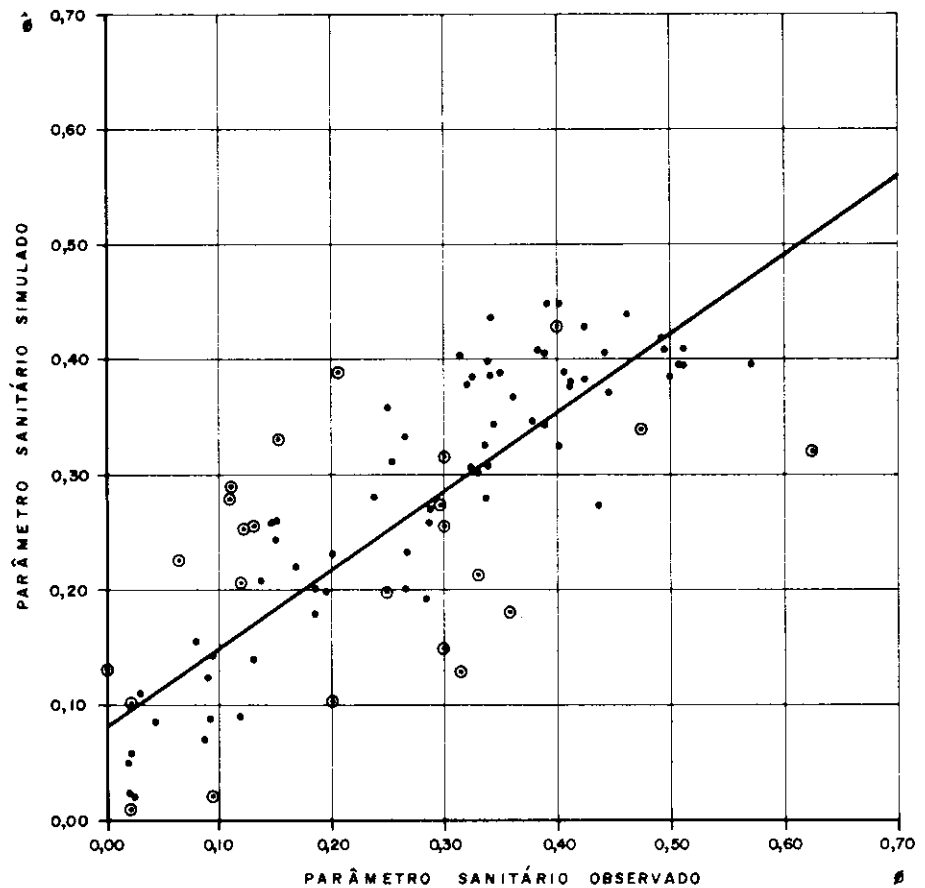
Como a modelagem utiliza sempre valores do parâmetro sanitário de dois meses em cada observação, a retirada dos 14 valores espúrios implicou a retirada de 24 observações pois muitos dos valores considerados prováveis valores espúrios não eram subsequentes e o modelo necessita dos dados do mês anterior.

A tabela 7 mostra prováveis valores espúrios, bem como aqueles que foram retirados por serem subsequentes a prováveis valores espúrios. Deve-se notar que o ano de 1979 foi o que apresentou o maior número de valores suprimidos e curiosamente o máximo valor da série ($\phi = 0,622$, em 24-5-79).

5.3.2 Modelos da fase III-B

Utilizando a nova massa de dados com os 73 valores considerados significativos (segundo descrito no tópico 5.3.1) um novo modelo foi ajustado e os coeficientes são mostrados na tabela 8.

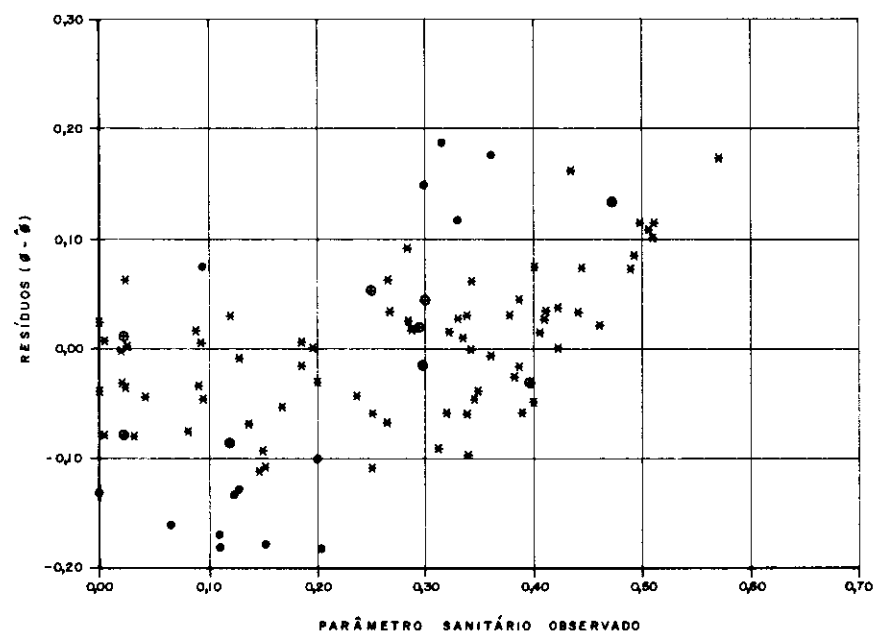
O novo modelo obtido é conceitualmente simples, revestido de significância física e com alto grau de determinação.



LEGENDA:

- VALORES CONFIÁVEIS
- VALORES QUE SERÃO RETIRADOS DA MASSA DE DADOS NA FASE III - B DE MODELAGEM

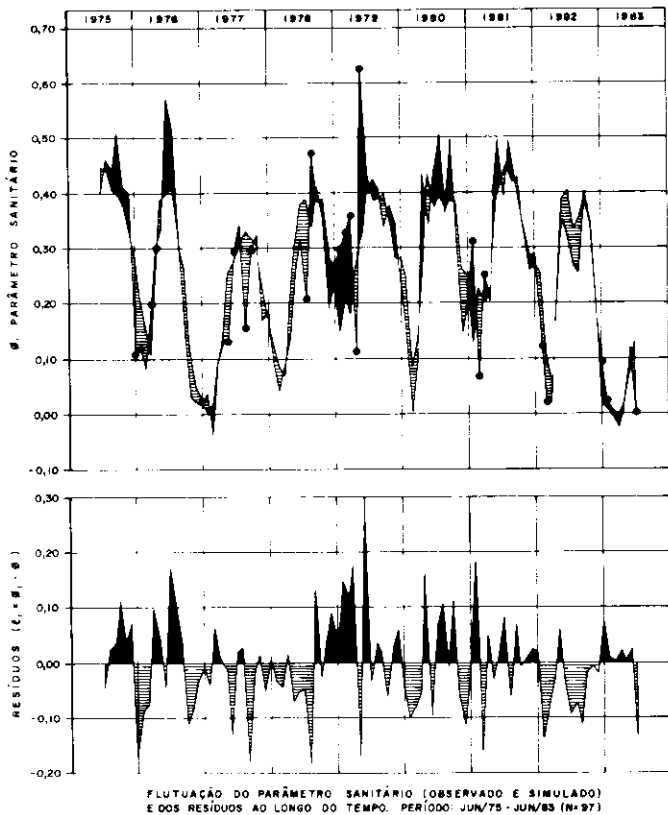
Figura 6 — Correlação entre os valores observados e calculados pelo modelo mostrado na tabela 5



LEGENDA:

- * VALORES CONFIÁVEIS
- VALORES QUE SERÃO RETIRADOS DA MASSA DE DADOS EM DECORRÊNCIA DE SEREM SUBSEQUENTES AOS PROVÁVEIS VALORES ESPÚRIOS
- PROVÁVEIS VALORES ESPÚRIOS

Figura 7 — Resíduos do modelo da fase III-A em função de valores crescentes do parâmetro sanitário



FLUTUAÇÃO DO PARÂMETRO SANITÁRIO (OBSERVADO E SIMULADO) E DOS RESÍDUOS AO LONGO DO TEMPO. PERÍODO: JUN/75 - JUN/83 (N=97)

Figura 8 — Curvas do parâmetro sanitário observado e previsto pelo modelo da Fase III-A com o correspondente erro

- LEGENDA:**
- θ OBSERVADO $< \hat{\theta}$
 - θ OBSERVADO $> \hat{\theta}$
 - PROVÁVEIS VALORES ESPÚRIOS, EXCLUÍDOS DA REGRESSÃO
 - VALORES QUE NÃO PARTICIPARAM DA REGRESSÃO EM DECORRÊNCIA DE SE UTILIZAR O VALOR IMEDIATAMENTE ANTERIOR

Tabela 7 — Observações retiradas da massa de dados

| ANO | MES | θ OBSERVAÇÃO | $\hat{\theta}$ | RESÍDUO | MOTIVO DA EXCLUSÃO |
|------|-----|---------------------|----------------|---------|--------------------|
| 1975 | DEZ | 0,11 | 0,29 | -0,18 | > |
| 1976 | JAN | 0,12 | 0,21 | -0,09 | = |
| | MAR | 0,20 | 0,10 | 0,10 | > |
| | ABR | 0,30 | 0,26 | 0,04 | = |
| 1977 | MAI | 0,13 | 0,26 | -0,13 | > |
| | JUN | 0,30 | 0,27 | 0,03 | = |
| | AGO | 0,15 | 0,33 | -0,18 | > |
| | SET | 0,30 | 0,32 | -0,02 | = |
| 1978 | JUL | 0,21 | 0,39 | -0,18 | > |
| | AGO | 0,47 | 0,34 | 0,13 | = |
| 1979 | JAN | 0,30 | 0,15 | 0,15 | > |
| | FEV | 0,33 | 0,21 | 0,12 | > |
| | MAR | 0,36 | 0,18 | 0,18 | > |
| | ABR | 0,11 | 0,28 | -0,17 | > |
| | MAI | 0,62 | 0,32 | 0,30 | > |
| | JUN | 0,40 | 0,43 | -0,03 | = |
| 1981 | JAN | 0,31 | 0,13 | 0,18 | > |
| | FEV | 0,07 | 0,23 | -0,16 | > |
| | MAR | 0,25 | 0,20 | 0,05 | = |
| 1982 | JAN | 0,12 | 0,25 | -0,13 | > |
| | FEV | 0,02 | 0,10 | -0,08 | = |
| | DEZ | 0,10 | 0,02 | 0,08 | > |
| 1983 | JAN | 0,02 | 0,01 | 0,01 | = |
| | JUN | 0,00 | 0,13 | -0,13 | > |

Obs:

> - provável valor espúrio.

= - retirado pelo fato do valor anterior ser considerado espúrio.

Tabela 8 — Variáveis, coeficientes e o valor do teste F na fase III-B, 73 casos

| FASE III-B $R^2 = 0,87$ 73 OBSERVAÇÕES $F = 26,48778$ GRAUS DE LIBERDADE DA REGRESSÃO = 15 GRAUS DE LIBERDADE DO RESÍDUO = 57 | | | |
|--|-------------------------|-----------|--------------------------|
| VARIÁVEL | COEFICIENTE | VARIÁVEL | COEFICIENTE |
| FIA | 0,31317 $F = 10,824$ | AGO | 0,24106 $F = 17,822$ |
| QDIL | -0,00082 $F = 5,354$ | QABC | -0,11973 $F = 14,148$ |
| QBPED | 0,00201 $F = 10,801$ | OUT | 0,14375 $F = 12,534$ |
| MAI | 0,19986 $F = 23,859$ | ABR | 0,15555 $F = 19,535$ |
| JUN | 0,29550 $F = 30,549$ | V | -0,17351 $F = 3,769$ |
| QSUM | 0,00187 $F = 10,190$ | QNBIL | -0,00168 $F = 2,954$ |
| JUL | 0,31657 $F = 25,149$ | TEMPT | 0,01596 $F = 4,296$ |
| SET | 0,23263 $F = 22,145$ | CONSTANTE | 0,05475 |

A figura 9 mostra a correlação entre os valores observados do parâmetro sanitário e os correspondentes valores calculados pelo modelo da fase III-B.

A figura 10 exibe a série dos valores observados, simulados e correspondentes resíduos da fase III-B de modelagem e a figura 11 apresenta a distribuição do resíduo do mesmo modelo ao longo dos valores crescentes do parâmetro sanitário.

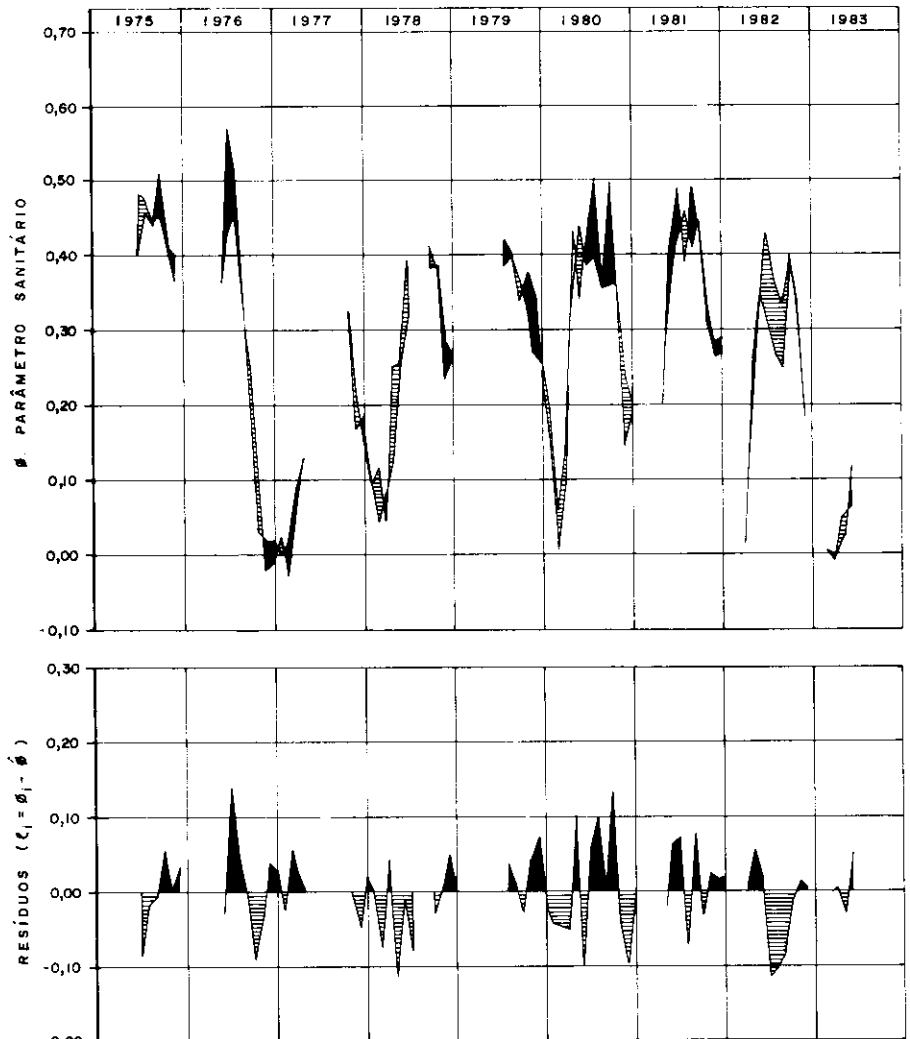
5.4 Modelos da fase IV

Para determinação da regra de operação adequada dos parâmetros controláveis do reservatório Billings, constatou-se que a variável "V" (denominada razão de estar do reservatório) ao final de cada mês poderia ser encarada também como uma meta a ser atingida, dependendo do seu próprio valor no mês anterior.

Disto decorre a possível existência de determinado valor — desejado ou requerido pelas normas da Eletrobrás, por exemplo — da variável "V", que seja praticamente impossível, considerando o valor da mesma variável no período anterior. A razão de estar do reservatório deve ser encarada como uma variável dinâmica a cada mês, com o objetivo de regularizar o seu valor segundo normas da Eletrobrás.

Em função dessas considerações de ordem prática, uma nova variável independente foi introduzida e um novo modelo foi ajustado.

A nova variável independente introduzida (denominada "VA") é a razão



FLUTUAÇÃO DO PARÂMETRO SANITÁRIO (OBSERVADO E SIMULADO) E DOS RESÍDUOS AO LONGO DO TEMPO. PERÍODO: JUN/75 - JUN/83 (N=73)

LEGENDA:

- ϕ OBSERVADO < $\hat{\phi}$
- ϕ OBSERVADO > $\hat{\phi}$

Figura 10 — Valores observados, simulados e resíduos — fase III-B

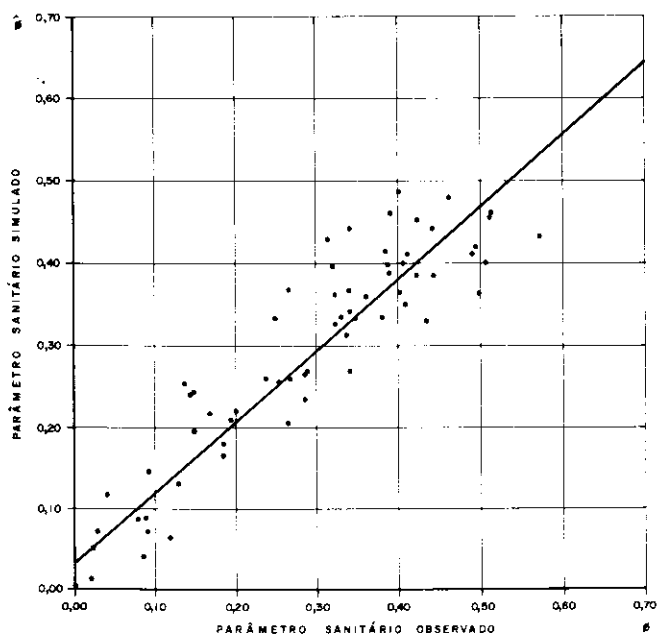


Figura 9 — Correlação entre valores do parâmetro sanitário observados e calculados pelo modelo da fase III-B

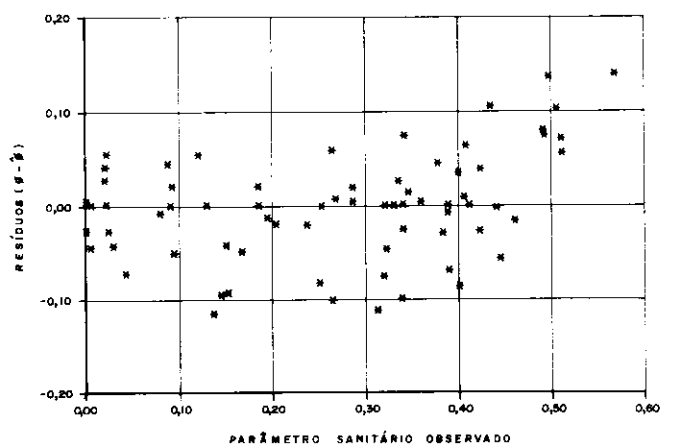


Figura 11 — Resíduos do modelo da fase III-B em função de valores crescentes do parâmetro sanitário

Tabela 9 — Variáveis, coeficientes e o valor do teste F na fase IV, 73 casos

| FASE IV $R^2 = 0,88$ 73 OBSERVACOES $F = 28,0450$ GRAUS DE LIBERDADE DA REGRESSAO = 15 GRAUS DE LIBERDADE DO RESIDUO = 57 | | | |
|--|----------------------|-----------|----------------------|
| VARIAVEL | COEFICIENTE | VARIAVEL | COEFICIENTE |
| FIA | 0,32137 F=11,999 | AGO | 0,23848 F=18,340 |
| QDIL | -0,00107 F=13,463 | QABC | -0,11130 F=14,486 |
| QBPED | 0,00258 F=15,045 | OUT | 0,13649 F=11,853 |
| MAI | 0,21453 F=28,671 | ABR | 0,15996 F=21,616 |
| JUN | 0,29897 F=32,863 | V | -0,70596 F= 7,910 |
| QSUM | 0,00119 F= 3,838 | VA | 0,60046 F= 5,788 |
| JUL | 0,32217 F=27,296 | TEMPT | 0,01817 F= 5,753 |
| SET | 0,22150 F=21,055 | CONSTANTE | -0,06447 |

de estar do reservatório no mês imediatamente anterior a cada observação.

Utilizando os mesmos dados usados no ajuste do modelo da fase III-B, um novo modelo foi ajustado e os resultados são mostrados na tabela 9.

Observando os valores da tabela 9, nota-se que o modelo apresenta um ajuste ligeiramente melhor do que o modelo da fase III-B, apresentando o valor 0,88 para R^2 e 28,04 para "F". No modelo da fase III-B, tais valores eram respectivamente 0,87 e 26,48.

Outra consideração interessante é que o coeficiente da variável "VA" é 0,60 e o coeficiente da variável "V" é -0,70. A soma algébrica desses dois valores é -0,10. Tal valor tem o mesmo sinal e magnitude do coeficiente da variável "V" no modelo da fase III-B, cujo valor é 0,17, demonstrando a coerência da introdução da variável "VA" na modelagem.

Um ponto importante a ser considerado é que no modelo da fase IV a significância de todas as variáveis (medida pelos valores dos correspondentes "F") é maior do que em todos os modelos anteriores.

A figura 12 mostra a série dos valores de \emptyset considerados, \emptyset calculados pelo modelo da fase IV, e o correspondente resíduo.

6. INTERPRETAÇÃO FÍSICA DOS COEFICIENTES DOS MODELOS ESTATÍSTICOS

Os modelos descritos nos tópicos 5.1 a 5.4 deste trabalho têm significação física e a interpretação do sinal e magnitude relativa dos coeficientes ajustados permite um maior entendimento dos fatores que influenciam no fenômeno estudado.

A simples magnitude dos coeficientes ajustados para cada variável não tem qualquer significação considerando as diferentes escalas utilizadas na medida dos dados. É necessário considerar a magnitude dos valores de cada variável nos dados para que se possa comparar relativamente os coeficientes de cada variável.

A comparação qualitativa do "peso" de cada uma das variáveis pode ser feita através da comparação dos produtos dos coeficientes de cada variável com a respectiva média da série histórica (tabela 2).

As principais conclusões dessa análise são resumidas abaixo:

1) Cerca de 30% do valor da medida de poluição (expressado através do parâmetro sanitário) permanece no mês subsequente. Isto significa um acréscimo no período 1975-1983 da ordem de + 0,075 para o parâmetro sanitário.

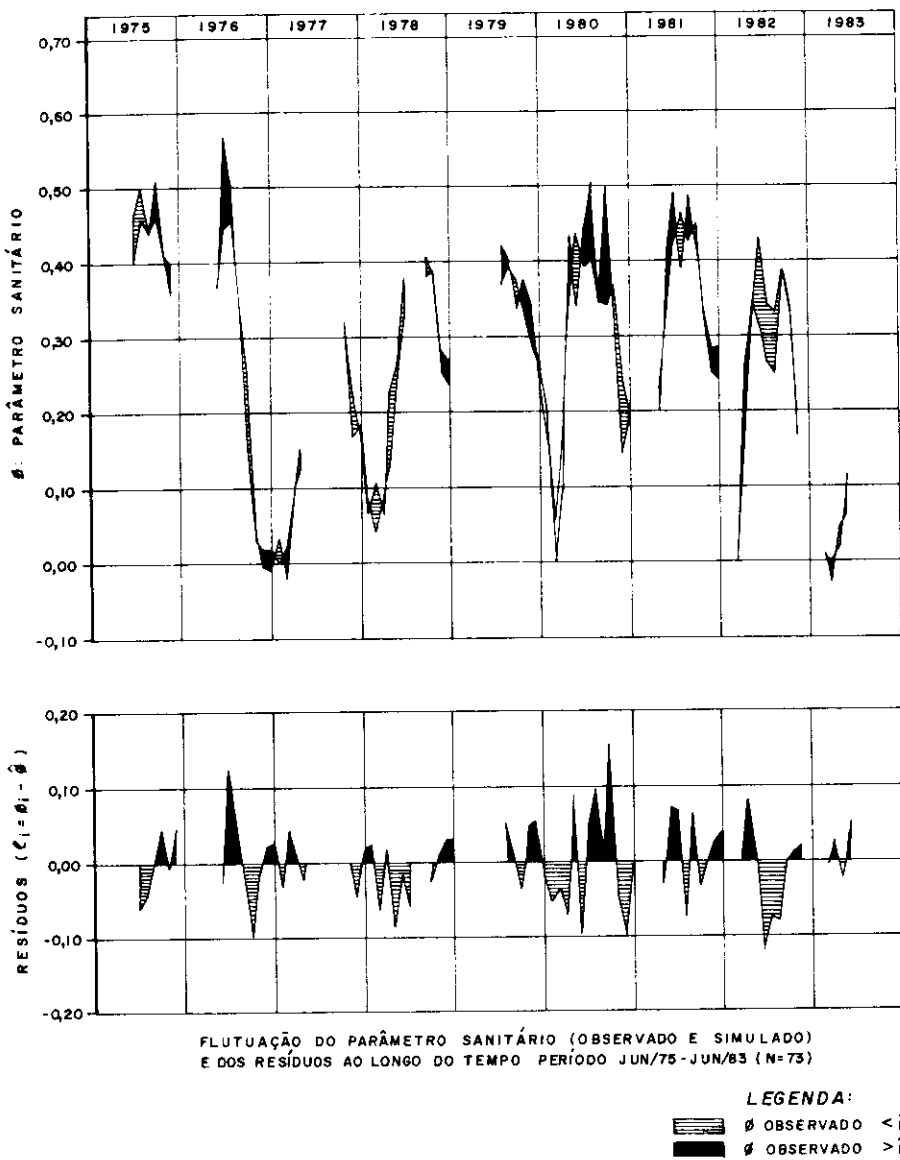


Figura 12 — Valores observados, simulados e resíduos — fase IV

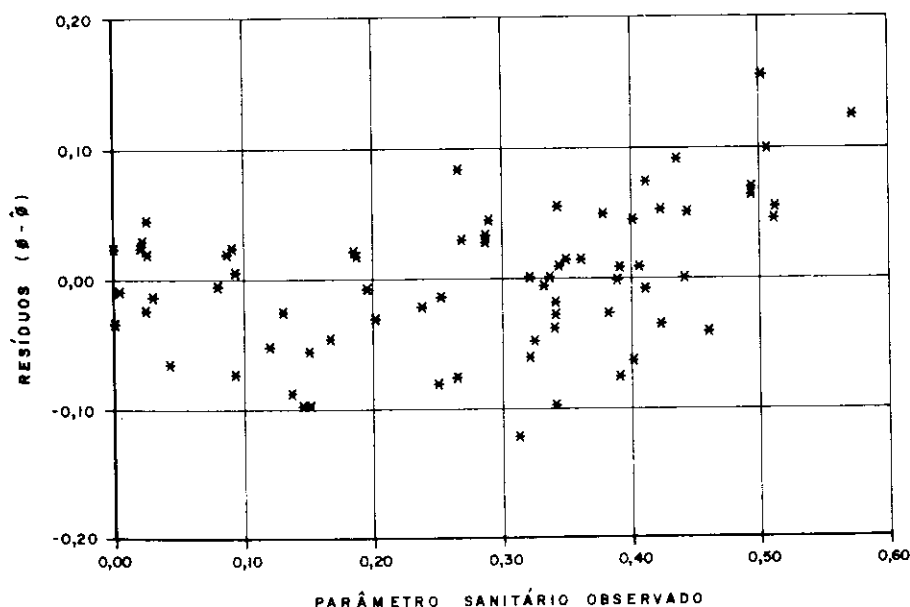


Figura 13 — Resíduos do modelo da fase IV em função de valores crescentes do parâmetro sanitário

2) A poluição no reservatório **umenta no período estiado com pico no mês de junho**, conforme tabela 10.

O aumento do nível de poluição no reservatório Billings nos meses estidados pode ser interpretado como consequência do aumento da concentração dos poluentes nas águas do rio Tietê.

O fato do mês de outubro ter sido identificado pelos modelos como mês que contribui para aumento da poluição no reservatório pode parecer incongruente com o fato do período hidrológico estiado terminar em setembro. A explicação para tal fato poderia ser que as chuvas do mês de outubro prestam-se principalmente para limpar os córregos e vias pluviais estando portanto altamente carregados de elementos poluidores.

3) O bombeamento das águas do rio Tietê para o reservatório Billings **provoca o aumento da medida de poluição do mesmo**.

Cada 1 m³/s de água do rio Tietê bombeado durante um mês para o interior do reservatório gera, ao final do período, um **acréscimo** no valor de Ø de 0,00283 a 0,00364. Estes valores são a soma do coeficiente da variável "QBPED" com o coeficiente da variável "ODIL" multiplicado por - 1. Tal afirmação é válida, considerando que a somatória das variáveis QDIL e QBPED corresponde à vazão total do rio Tietê antes da foz do rio Pinheiros. Desse modo a diminuição do valor QBPED ocasiona um aumento igual no valor de QDIL (e vice-versa).

Considerando os valores médios das variáveis QDIL e QBPED no período considerado, o bombeamento médio de água do rio Tietê para o reservatório Billings provocou a cada mês um aumento de 0,20 a 0,25 no valor de Ø.

4) A vazão natural do Billings contribui para a **diminuição** da medida de poluição no reservatório; cada 1 m³/s (média mensal) de vazão natural provoca ao final do mês uma diminuição de 0,00168 no valor de Ø. Considerando os valores médios da vazão natural, tal fenômeno foi responsável a cada mês por um **decréscimo de 0,032 no valor de Ø**.

5) O escoamento de água para geração de energia elétrica na usina de Henry Borden (em Cubatão) **provoca um aumento** no nível de medida de poluição do reservatório.

Cada 1 m³/s bombeado para geração de energia elétrica ocasiona um aumento de 0,00151, no valor de Ø.

Tal fato tem significância física uma vez que a retirada de água para geração de energia elétrica é feita no extremo do reservatório, oposto à es-

Tabela 10 — Aumento de \emptyset nos meses estuados

| MÊS | AUMENTO DE \emptyset |
|----------|------------------------|
| ABRIL | 0,15 |
| MAIO | 0,20 |
| JUNHO | 0,29 |
| JULHO | 0,32 |
| AGOSTO | 0,24 |
| SETEMBRO | 0,23 |
| OUTUBRO | 0,14 |

tação elevatória de Pedreira, onde se localiza a mancha anaeróbica. Isto não significa que a qualidade da água utilizada para geração de energia elétrica em Henry Borden seja boa, mas sim que a sua qualidade é melhor do que aquela situada na região da mancha anaeróbica.

Considerando o valor médio da variável QSUM no período analisado, conclui-se que a sua contribuição para o valor de \emptyset é 0,03.

6) O consumo de água nas cidades da região do ABC (Santo André, São Bernardo do Campo e São Caetano do Sul), contribuiu, no período estudado, para a diminuição do nível de poluição do reservatório Billings.

O consumo durante um mês de 1m³/s de água pelas cidades da região do ABC resultou em uma diminuição no valor de \emptyset no final do mês equivalente a 0,11.

Considerando que no período deste estudo o consumo médio mensal de água para as cidades do ABC foi de 3 m³/s então a sua contribuição a cada mês para o valor de \emptyset foi de -0,33.

Cabe aqui a observação de que no período considerado neste estudo ainda não existia a barragem dentro do próprio reservatório Billings denominada "Rio Grande" e que foi construída recentemente para diminuir o nível de poluição na água consumida nas cidades do ABC.

7) Um maior valor da "razão de estar" do reservatório implica diminuição do nível de poluição do reservatório.

Isto é facilmente explicável, uma vez que a "razão de estar do reservatório" mede o volume ocupado do reservatório; intuitivamente percebe-se que quando o reservatório está cheio, mantidas as outras condições, uma mesma carga poluidora provoca uma mancha anaeróbica menor.

Cada 1% de ocupação do volume do

Tabela 11 — Valores observados, simulados pelos modelos das fases III-A, III-B, IV para abr-dez/1984

| DATA | VALOR OBSERVADO DO PARÂMETRO SANITÁRIO | VALOR PREVISTO PELO MODELO DA FASE III-A | VALOR PREVISTO PELO MODELO DA FASE III-B | VALOR PREVISTO PELO MODELO DA FASE IV |
|----------|--|--|--|---------------------------------------|
| 04/04/84 | 0.15 | 0.099 | 0.130 | 0.150 |
| 09/04/84 | 0.129 | 0.089 | 0.129 | 0.121 |
| 14/04/84 | 0.12 | 0.136 | 0.155 | 0.183 |
| 17/04/84 | 0.125 | 0.078 | 0.073 | 0.094 |
| 24/04/84 | 0.15 | 0.104 | 0.113 | 0.127 |
| 27/04/84 | 0.12 | 0.113 | 0.120 | 0.136 |
| 02/05/84 | 0.11 | 0.210 | 0.178 | 0.188 |
| 08/05/84 | 0.13 | 0.218 | 0.194 | 0.198 |
| 11/05/84 | 0.14 | 0.244 | 0.194 | 0.199 |
| 15/05/84 | 0.20 | 0.200 | 0.174 | 0.187 |
| 22/05/84 | 0.21 | 0.217 | 0.169 | 0.185 |
| 29/05/84 | 0.05 | 0.205 | 0.177 | 0.185 |
| 31/05/84 | 0.03 | 0.205 | 0.177 | 0.185 |
| 25/05/84 | 0.11 | 0.192 | 0.154 | 0.161 |
| 29/05/84 | 0.16 | 0.193 | 0.154 | 0.163 |
| 01/06/84 | 0.28 | 0.202 | 0.245 | 0.238 |
| 05/06/84 | 0.14 | 0.206 | 0.242 | 0.233 |
| 08/06/84 | 0.19 | 0.205 | 0.242 | 0.233 |
| 12/06/84 | 0.19 | 0.235 | 0.248 | 0.235 |
| 15/06/84 | 0.17 | 0.236 | 0.264 | 0.259 |
| 18/06/84 | 0.17 | 0.246 | 0.272 | 0.259 |
| 20/06/84 | 0.17 | 0.245 | 0.272 | 0.259 |
| 22/06/84 | 0.18 | 0.246 | 0.272 | 0.259 |
| 26/06/84 | 0.21 | 0.249 | 0.272 | 0.259 |
| 29/06/84 | 0.20 | 0.250 | 0.272 | 0.259 |
| 03/07/84 | 0.19 | 0.250 | 0.272 | 0.259 |
| 06/07/84 | 0.19 | 0.250 | 0.272 | 0.259 |
| 13/07/84 | 0.24 | 0.250 | 0.272 | 0.259 |
| 17/07/84 | 0.16 | 0.255 | 0.278 | 0.260 |
| 20/07/84 | 0.10 | 0.257 | 0.282 | 0.270 |
| 24/07/84 | 0.16 | 0.262 | 0.282 | 0.268 |
| 27/07/84 | 0.18 | 0.268 | 0.285 | 0.272 |
| 31/07/84 | 0.19 | 0.268 | 0.285 | 0.272 |
| 07/08/84 | 0.09 | 0.270 | 0.284 | 0.284 |
| 10/08/84 | 0.09 | 0.273 | 0.284 | 0.285 |
| 14/08/84 | 0.17 | 0.273 | 0.284 | 0.285 |
| 17/08/84 | 0.30 | 0.278 | 0.284 | 0.285 |
| 21/08/84 | 0.21 | 0.268 | 0.284 | 0.285 |
| 24/08/84 | 0.24 | 0.272 | 0.284 | 0.285 |
| 28/08/84 | 0.31 | 0.272 | 0.284 | 0.285 |
| 31/08/84 | 0.14 | 0.272 | 0.284 | 0.285 |
| 04/09/84 | 0.06 | 0.272 | 0.284 | 0.285 |
| 08/09/84 | 0.06 | 0.272 | 0.284 | 0.285 |
| 11/09/84 | 0.13 | 0.272 | 0.284 | 0.285 |
| 14/09/84 | 0.12 | 0.272 | 0.284 | 0.285 |
| 18/09/84 | 0.11 | 0.244 | 0.193 | 0.182 |
| 21/09/84 | 0.14 | 0.209 | 0.167 | 0.148 |
| 25/09/84 | 0.20 | 0.210 | 0.175 | 0.151 |
| 28/09/84 | 0.25 | 0.213 | 0.196 | 0.178 |
| 02/10/84 | 0.14 | 0.146 | 0.104 | 0.092 |
| 05/10/84 | 0.11 | 0.142 | 0.112 | 0.101 |
| 09/10/84 | 0.11 | 0.142 | 0.121 | 0.108 |
| 11/10/84 | 0.14 | 0.142 | 0.121 | 0.108 |
| 16/10/84 | 0.14 | 0.142 | 0.121 | 0.108 |
| 19/10/84 | 0.25 | 0.152 | 0.129 | 0.118 |
| 23/10/84 | 0.12 | 0.153 | 0.137 | 0.126 |
| 26/10/84 | 0.13 | 0.153 | 0.137 | 0.126 |
| 30/10/84 | 0.15 | 0.153 | 0.137 | 0.126 |
| 01/11/84 | 0.17 | 0.153 | 0.137 | 0.126 |
| 06/11/84 | 0.17 | 0.153 | 0.137 | 0.126 |
| 10/11/84 | 0.13 | 0.153 | 0.137 | 0.126 |
| 14/11/84 | 0.14 | 0.082 | 0.024 | 0.022 |
| 20/11/84 | 0.14 | 0.070 | 0.011 | 0.010 |
| 23/11/84 | 0.12 | 0.068 | 0.007 | 0.006 |
| 27/11/84 | 0.11 | 0.064 | 0.011 | 0.014 |
| 30/11/84 | 0.09 | 0.054 | 0.009 | 0.009 |
| 03/12/84 | 0.14 | 0.052 | 0.013 | 0.014 |
| 05/12/84 | 0.11 | 0.054 | 0.013 | 0.014 |
| 07/12/84 | 0.10 | 0.054 | 0.013 | 0.014 |
| 10/12/84 | 0.13 | 0.048 | -0.016 | -0.014 |
| 14/12/84 | 0.09 | 0.061 | -0.001 | -0.003 |
| 21/12/84 | 0.09 | 0.054 | -0.008 | -0.011 |
| 26/12/84 | 0.09 | 0.057 | -0.009 | -0.014 |

reservatório resulta numa diminuição de aproximadamente 0,0017 a 0,0010 no valor de \emptyset .

Como a "razão de estar" média no período considerado é de 0,79, a contribuição da "razão de estar" para o valor de \emptyset a cada mês é de ordem de -0,13 a -0,08.

No modelo da fase III-B o coeficiente da variável "V" é -0,17555. No modelo da fase IV o coeficiente de "V" é -0,70 e o coeficiente da variável "VA" é 0,60 e, portanto, a soma desses dois valores é -0,10. Tal soma algébrica pode ser feita considerando que os valores de V e VA são sempre muito próximos. Na interpretação dos coeficientes de V e VA podemos verificar que se V for maior do que VA (considerando mantidas todas as outras condições), então o valor do nível de poluição diminui e caso contrário (V < VA) o nível de poluição aumenta.

8) Cada aumento de um grau centígrado na temperatura média no mês

considerado, resulta num aumento de 0,015 a 0,018 no valor do parâmetro sanitário ao final do período. Considerando a temperatura média, o acréscimo no valor de \emptyset devido a temperatura é de 0,31.

Uma consideração importante a ser feita refere-se aos termos constantes de cada um dos modelos estatísticos descritos.

Fisicamente, esperava-se que as constantes obtidas nos ajustes dos modelos fossem próximas de zero, pois a medida de poluição no reservatório deve tender a zero, caso cessem os bombeamentos dos elementos poluentes. Em todos os modelos das fases I a III-B os termos constantes têm valor positivo entre 0,28 e 0,91. No modelo da fase III-B o valor do termo constante é 0,055 que já é bem mais próximo de zero do que os valores dos modelos das fases anteriores.

No modelo da fase IV o valor do termo constante é -0,064 que além de próximo de zero é negativo, permitindo que o modelo consiga se aproximar

mais das condições limites verificadas.

Cabe enfatizar que a aplicabilidade do modelo proposto está condicionada à existência do bombeamento de Pedreira, insumo básico que alimentou todo tratamento estatístico realizado.

7. USO EFETIVO DOS MODELOS ESTADÍSTICOS

Os modelos estatísticos eliminam os inconvenientes do primeiro modelo de qualidade e os resultados obtidos justificam plenamente sua adoção para o acompanhamento das condições sanitárias no reservatório Billings, visto que representam mais realisticamente os fenômenos hidrodinâmicos e biológicos no reservatório.

Os modelos estatísticos descritos na fase III-A e III-B, neste trabalho, foram apresentados e aceitos pelo Comitê Executivo, do acordo MME-GESP, tendo sido utilizados com sucesso desde abril/84, para determinação dos parâmetros de operação que compatibilizem, de forma racional, os objetivos conflitantes já descritos.

A tabela 11 mostra os valores previstos através da utilização do modelo da fase III-B e os valores observados. Para efeito de comparação do desempenho do modelo são apresentados também os valores previstos pelo modelo da fase III-A. Finalmente, incluí-se os valores previstos pelo modelo da fase IV (apresentados pela primeira vez neste trabalho). Tal modelo constitui uma evolução dos modelos anteriores, não tendo sido efetivamente utilizado para avaliação das regras operacionais.

São apresentados, na figura 14, os valores observados do parâmetro sanitário, decorrentes da operação saneamento implantada e os previstos pelos modelos das fases III-B e IV. Além disso, a figura 14 mostra vários patamares que representam a série histórica dos valores médios mensais do parâmetro sanitário no período junho/75-maio/83. Deve-se notar que os valores de ϕ , em 1984, estão significativamente abaixo das médias históricas nos correspondentes meses. Tal constatação é deveras importante, principalmente levando-se em consideração que o ano de 1984 evidenciou um severo período crítico em termos de estiagem. Com efeito, os dois valores representados dentro de cada círculo permitem comparar, a cada mês, o valor da vazão natural afluyente a Edgard de Souza, significativamente inferior em 1984, às médias históricas correspondentes ao período de 1932-1981.

Observa-se que o modelo da fase IV apresenta um ajuste ligeiramente melhor do que os demais. O erro médio

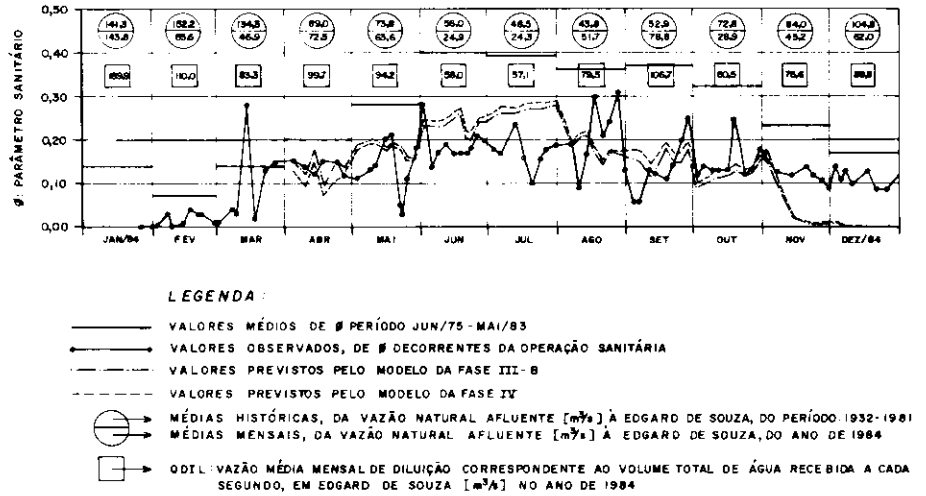
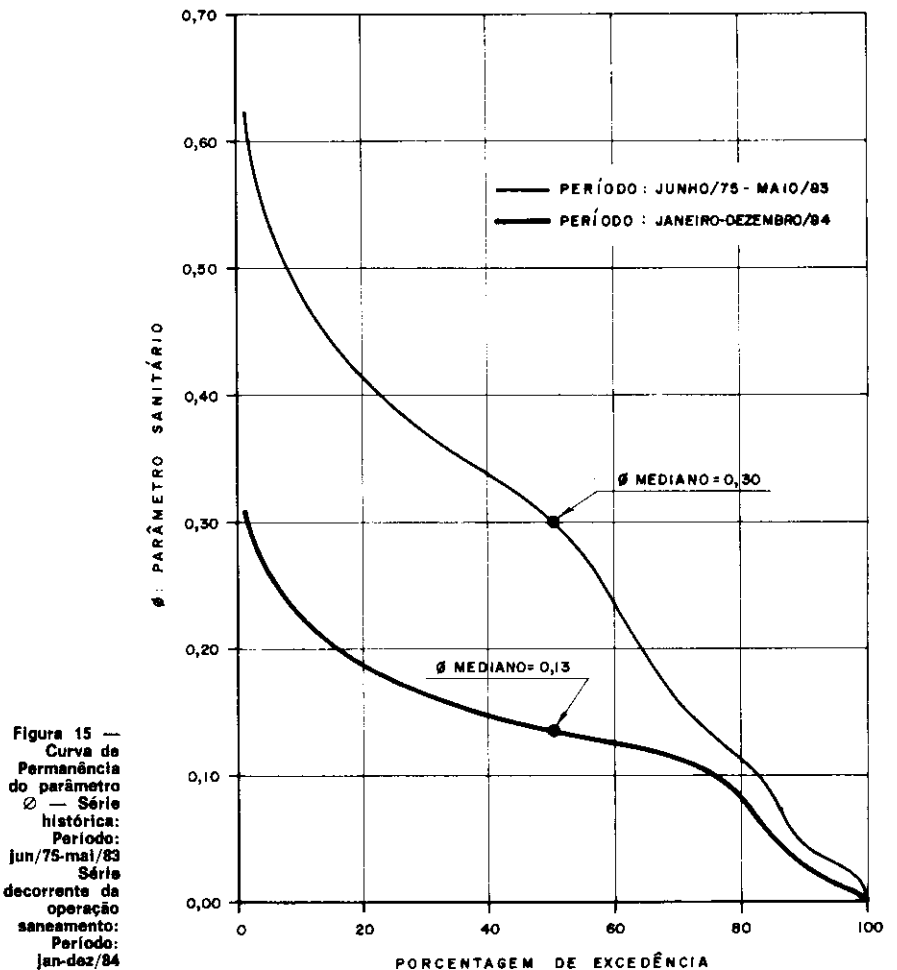


Figura 14 — Comportamento do parâmetro sanitário histórico; observado e previsto com a implantação da operação saneamento



na série histórica da tabela 11 é de 0,00026 para o modelo da fase IV e respectivamente 0,02556 e 0,00444 para os modelos das fases III-A e III-B. Tais erros correspondem em média a valores de no máximo 25% dos valores observados, evidenciando a adequação desses modelos estatísticos, principalmente os modelos das fases III e IV.

As curvas de permanência dos va-

lores de ϕ , referentes ao período junho/75-maio/83 e jan/dez/84, são apresentadas na figura 15. Constatase, facilmente, que a curva correspondente ao período jan-dez/84 está muito abaixo da curva referente ao período jun/75-mai/83. Além disso, o valor mediano (50% do tempo) do parâmetro sanitário no período jun/75-mai/83 é igual a 0,30, enquanto que no período jan/dez/84 é 0,13.

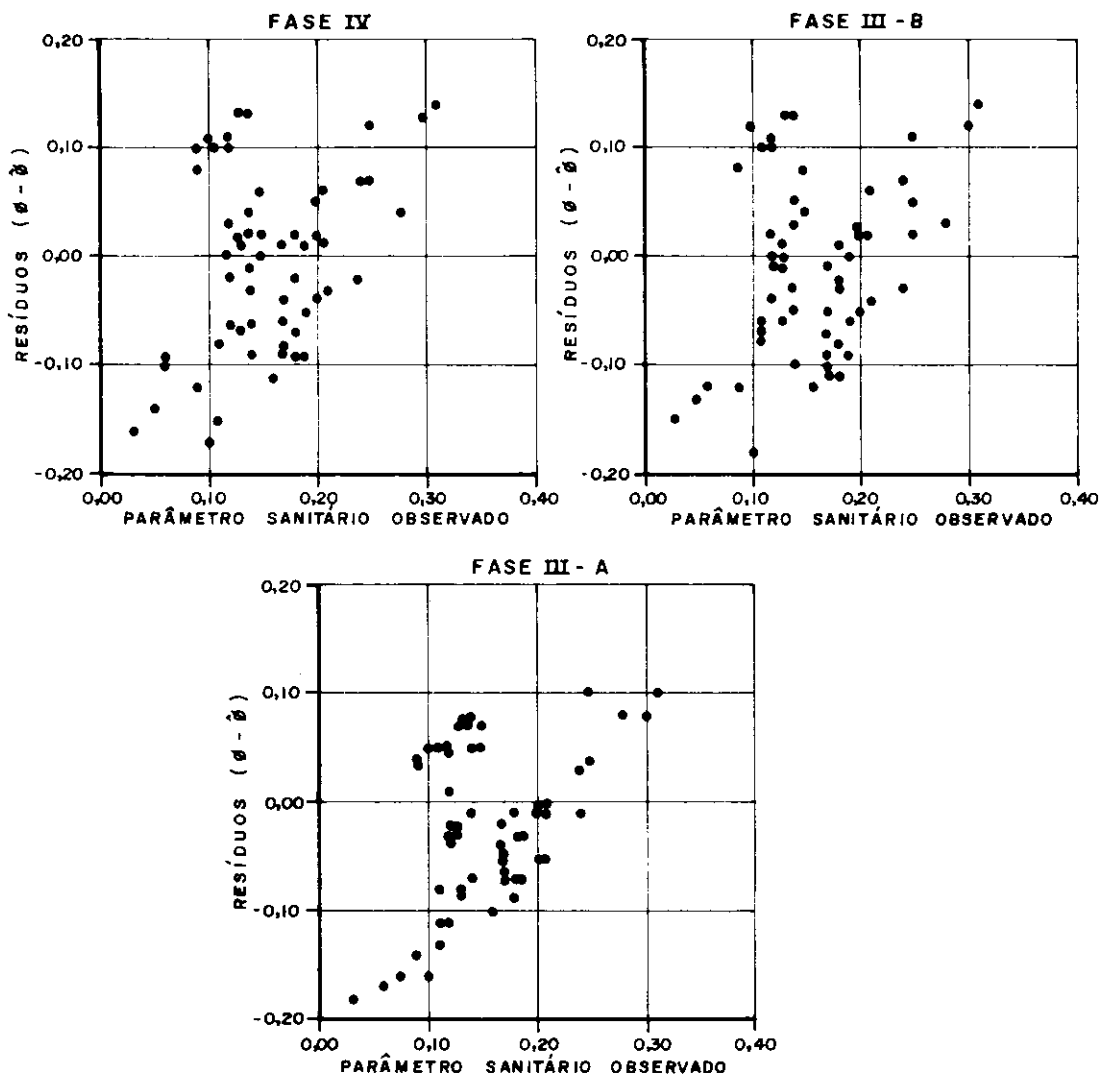


Figura 16 — Resíduos dos modelos das fases III-A, III-B e IV em função de valores crescentes do parâmetro sanitário. Período: abr-dez/84

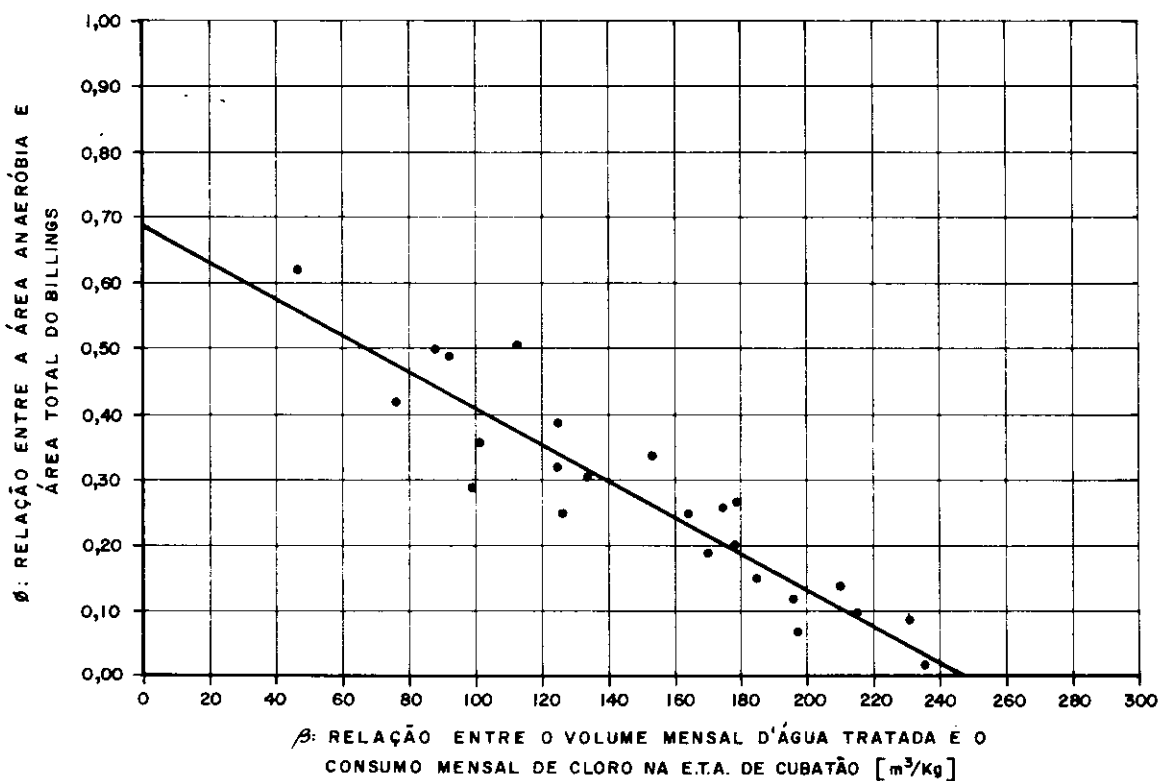


Figura 17 — Correlação entre o quociente do volume mensal d'água tratada e o consumo mensal de cloro, na Estação de Tratamento de Cubatão, com o parâmetro sanitário ϕ no reservatório Billings — Período: 1979-1982

A distribuição dos resíduos dos modelos das fases IV, III-B e III-A (no período abr/dez/1984) em função dos valores de \bar{O} é mostrada na figura 16.

Analisando a figura 16, nota-se, ainda, a existência de heterocedasticidade, acompanhada da não perfeita adequação dos modelos ao sistema físico atual, em decorrência das mudanças introduzidas no meio ambiente quando da ocorrência de compartimentação do reservatório Billings, em fevereiro/82, em dois compartimentos a saber:

- compartimento Pedreira;
- compartimento Rio Grande.

O compartimento Rio Grande destina-se exclusivamente ao abastecimento público de água.

É importante ressaltar que a alteração do nível de poluição do reservatório Billings reflete em aspectos sanitários na Baixada Santista.

Uma variável para a qual existe série histórica, para tratamento estatístico, é a relação entre o volume mensal de água tratada na Estação de Tratamento de Água de Cubatão e a quantidade de cloro utilizada. Existe uma alta correlação entre o parâmetro sanitário no reservatório Billings e o cociente entre o volume mensal de água tratada e cloro consumido, apresentando coeficiente de determinação da ordem de 0,80.

Como se sabe, o abastecimento de água para a Baixada Santista, principalmente em severos períodos estiadados, provém do rio Cubatão, o qual recebe as descargas turbinadas da Usina de Henry Borden, provenientes do reservatório Billings.

A figura 17 mostra a curva de regressão do parâmetro sanitário em função do volume de água tratada do rio Cubatão com cada 1 kg de cloro. A declividade negativa da reta de regressão demonstra que qualquer redução do nível de poluição do reservatório Billings corresponde a uma redução quase que equivalente no custo de tratamento de água, em Cubatão.

8. CONCLUSÕES

Este estudo mostra a viabilidade da criação de modelos estatísticos para o tipo de problema abordado.

Os modelos estatísticos desenvolvidos permitiram a ampliação do conhecimento dos fatores que influenciam no fenômeno da poluição no reservatório Billings.

Analisando a série histórica dos valores do parâmetro sanitário durante o ano de 1984 (ver tópico 7) notamos algumas consequências imediatas da operação sanitária, feita com utilização dos modelos estatísticos:

- Efetivo controle do nível de poluição no reservatório e estabilização

da frente da mancha anaeróbia, com o correspondente parâmetro sanitário variando muito pouco em torno do valor 0,13 ($\bar{O} = 0,13$, valor médio obtido de 79 observações, abrangendo o período de 26/1 a 26/12/84), que era o principal objetivo por ocasião do início do uso dos modelos estatísticos para determinação das regras de operação do reservatório.

- Demonstração de que é possível a compatibilização entre a diminuição da poluição no reservatório, a geração de energia elétrica e a manutenção dos requisitos de armazenamento de água requerida como medida de segurança para eventuais períodos hidrológicos críticos. Tais aspectos mostram que o enfoque ecológico/energético pode ser aplicado na prática para a adequação de interesses conflitantes através de metodologia de modelagem cientificamente testada.

9. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Devido ao fato de somente estarem disponíveis observações mensais do parâmetro sanitário, as variáveis independentes defasadas que entraram nos modelos dinâmicos referiam-se sempre a valores do mês anterior a cada observação.

Durante a evolução do processo de construção dos modelos estatísticos notou-se a necessidade de considerar algumas variáveis independentes com defasagens da observação do parâmetro sanitário menores do que um mês.

Particularmente considerou-se necessário proceder a um novo processo de modelagem introduzindo como variáveis independentes os valores do próprio parâmetro sanitário defasados de um a quatro semanas.

Para que o ajuste dos coeficientes desse novo modelo dinâmico possa ser efetuado é necessário que uma quantidade suficiente de dados seja coletada com periodicidade semanal. Os dados devem ser coletados no mínimo durante o período de dois anos para que se considere com igual importância os períodos estiadados ou chuvosos e eventuais anos hidrológicos atípicos.

A partir do momento que os dados estiverem coletados poder-se-á ajustar um novo modelo dinâmico (fase V) sobre o qual tem-se de antemão grandes expectativas quanto à sua capacidade de predição e explicação física do fenômeno.

Outra sugestão importante é de que os modelos que já estão sendo utilizados na determinação da regra de operação do reservatório Billings venham a ser "calibrados" novamente com dados mais recentes. Tal sugestão decorre da necessidade da adequação dos coeficientes ajustados a mudanças nas características intrínsecas

de cada variável independente. Como exemplo, poderíamos imaginar que mudassem as características de concentração de poluentes da água do rio Tietê. Indiretamente tal fato refletir-se-ia em mudanças no fenômeno de degradação biológica dos poluentes no interior do reservatório, e provavelmente influiria nas medidas do parâmetro sanitário.

10. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 — Araújo, J.L.B., Nucci, N.L.R., Domingos, S. Branco, S.M. "Efeitos da Operação energético-sanitária do reservatório Billings na qualidade das águas" — 8.º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária — Rio de Janeiro, 1975.
- 2 — Araújo, J.L.B., Matlon, H. Silva, L.G. — "Modelo Estatístico para acompanhamento das condições sanitárias do reservatório Billings" — Prodesp — Cia. de Processamento de Dados do Estado de São Paulo — São Paulo, 1985.
- 3 — Branco, S.M., — "Estudos das condições sanitárias da represa Billings — Faculdade de Higiene e Saúde Pública — São Paulo, 1966.
- 4 — Comissão de Estudos de regras de operação do reservatório Billings — Grupo Coordenador para Operação Interligada — Região Sudeste — Subcomissão de Estudos Energéticos, "Relatório final SCEN — SE — 04/75" Rio de Janeiro, maio 1975.
- 5 — Del Picchia, W., Nucci, N.L.R., Boaventura, M.A., Costa e Silva, R. "Um Modelo para a Simulação da Operação do Alto Tietê" — SIMOP § 8.º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária, Rio de Janeiro, 1975.
- 6 — Hoffman, R. & Vieira, S., "Análise de Regressão", uma introdução à Econometria - São Paulo, Huciter, 1977.
- 7 — Nucci, N.L.R., Costa e Silva, R. Branco, S.M., Araújo, J.L.B., Del Picchia, W., Domingos, S. "Estudo para melhoria da qualidade das águas do reservatório Billings — Operação energético-sanitária" — 8.º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária — Rio de Janeiro, 1977.
- 8 — Nucci, N.L.R., Branco, S.M., Araújo, J.L.B., Domingos, S. "Dois anos de experiência operacional — Operação energético-sanitária" — SNM/Emplasa — 9.º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária — Rio de Janeiro, 1977.
- 9 — SNM/Emplasa /Superintendência de Saneamento e Recursos Hídricos. — "Operação energético-sanitária do reservatório Billings durante o ano de 1975" — São Paulo, fevereiro — 1976.
- 10 — SNM/Emplasa. "Operação energético-sanitária do reservatório Billings - Calibração e aperfeiçoamento do modelo de qualidade — Relatório n.º 1" — São Paulo, junho — 1976.
- 11 — Wonnacott, R & Wonnacott, T.H., — "Econometrics" — New York, John Wiley, 1970.