

SISTEMA DE APOIO A DECISÃO PARA O GERENCIAMENTO INTEGRADO DE QUANTIDADE E QUALIDADE DA ÁGUA: METODOLOGIA E ESTUDO DE CASO

Luiz Gabriel T. Azevedo¹

Banco Mundial - Brasília, DF

Rubem L. L. Porto, Monica Porto

Escola Politécnica da USP

RESUMO

Este artigo descreve o desenvolvimento de um sistema de apoio a decisão (SAD) para integração de objetivos de quantidade e qualidade da água no gerenciamento de sistemas de aproveitamento de recursos hídricos. A metodologia utilizada envolve a separação dos aspectos de quantidade e qualidade em sub-problemas distintos, que devem ser resolvidos simultaneamente através da interação entre ambos. O SAD combina um modelo de qualidade de águas superficiais (QUAL2E) e um modelo de simulação em rede de fluxo (MODSIM) em uma interface amigável. Através da simulação estocástica, o SAD permite a determinação da probabilidade de ocorrência dos resultados obtidos. Um terceiro módulo para avaliação de resultados é composto por uma série de indicadores de performance especialmente desenvolvidos para facilitar a análise conjunta de objetivos de quantidade e qualidade. Para ilustrar o potencial da metodologia, o modelo foi adaptado a bacia do Rio Piracicaba no estado de São Paulo, uma das mais complexas do país. Os resultados demonstram que a solução dos graves problemas da bacia exigirão um aumento nos níveis de tratamento de efluentes urbanos e industriais assim como um eventual aumento na oferta de água.

INTRODUÇÃO

Um dos maiores desafios para engenheiros e técnicos responsáveis pelo planejamento e operação de sistemas de aproveitamento de recursos hídricos, é fornecer quantidades adequadas de água com qualidade apropriada e no momento certo para atender os seus múltiplos usos. Embora do ponto de vista teórico não haja grande dificuldade em se integrar o gerenciamento de quantidade e qualidade, na prática esta integração é raramente alcançada, representando um grande obstáculo para a operação eficiente de sistemas e a utilização racional do recurso hídrico.

Sanders et al. (1983) analisaram a falta de integração entre o gerenciamento de quantidade e qualidade, uma vez que tal separação não deveria ocorrer. Segundo Sanders, "a separação histórica na análise dos aspectos de quantidade e qualidade da água é tão antiga quanto a própria hidrologia. Entretanto a variável aleatória de quantidade, seja esta observada como uma série contínua ou apresentada em intervalos discretizados, é a portadora das propriedades de qualidade e deve ser considerada como componente essencial dos processos físicos envolvidos na análise dos aspectos qualitativos".

Vários outros autores (Arnold e Orlob, 1989; Hayes, 1990; Camara et al, 1990; Azevedo et al., 1994; Azevedo, 1994) também enfatizaram que para um gerenciamento integrado e holístico de recursos hídricos, é essencial a consideração conjunta dos aspectos de quantidade e qualidade da água.

Este artigo descreve o desenvolvimento de uma metodologia para a integração dos objetivos de quantidade e qualidade em um contexto de planejamento a

¹ As opiniões apresentadas neste artigo são baseadas exclusivamente na experiência profissional do autor e não refletem, necessariamente, a opinião do Banco Mundial.

médio e longo prazo, com vistas ao desenvolvimento e a exploração eficiente dos recursos hídricos de uma bacia hidrográfica. A metodologia envolve a separação dos aspectos de quantidade e qualidade em sub-problemas distintos, que devem ser resolvidos simultaneamente por meio da interação de ambos.

Para ilustrar a metodologia, um sistema de apoio a decisão (SAD) foi desenvolvido. Este sistema combina um modelo de qualidade de águas superficiais (QUAL2E-UNCAS) com um modelo de simulação em rede de fluxo (MODSIM), e uma interface amigável. O SAD é capaz de simular a operação de um sistema de reservatórios, as descargas em rios situados a jusante dos reservatórios, e a qualidade da água na bacia hidrográfica.

O SAD também é capaz de realizar análise de risco através da simulação estocástica (método de Monte Carlo), o que permite a determinação da probabilidade de ocorrência de uma certa combinação de parâmetros ou indicadores de quantidade e qualidade. Além disto, o SAD incorpora um módulo de avaliação de resultados desenvolvido especificamente para a análise conjunta dos benefícios resultantes de cenários operativos estratégicos determinados pelos usuários. Este módulo inclui uma série de indicadores de performance capazes de representar a distribuição espacial e temporal dos resultados.

Para demonstrar o potencial do modelo como instrumento de apoio ao processo decisório, o SAD foi utilizado para a análise de cenários na Bacia do Rio Piracicaba no estado de São Paulo. Por suas características particulares, envolvendo o suprimento de água para a cidade de São Paulo, e os graves problemas de exploração dos recursos hídricos da própria bacia, o Piracicaba constitui um excelente exemplo dos difíceis desafios enfrentados por engenheiros e técnicos responsáveis pelo gerenciamento de recursos hídricos.

Antes de se descrever o desenvolvimento do modelo e de seus diversos sub-componentes é importante que se estabeleça um arcabouço geral para o

planejamento e gerenciamento integrado de sistemas de aproveitamento de recursos hídricos.

Arcabouço geral para o gerenciamento integrado de recursos hídricos

Como mencionado anteriormente, a metodologia proposta para a integração dos objetivos de quantidade e qualidade envolve a sua separação em sub-problemas distintos que devem ser resolvidos simultaneamente através da interação entre eles. Neste item, são discutidas as etapas anteriores e posteriores à integração de quantidade e qualidade em uma interface computadorizada (Figura 1) que, no seu conjunto, formam o arcabouço geral para o gerenciamento integrado de recursos hídricos. O processo tem início com a definição do problema e se encerra com a implantação e avaliação das alternativas selecionadas para a solução deste problema.

Inicialmente torna-se necessária a definição clara do problema a ser resolvido. Após esta etapa, devem ser identificadas as necessidades e expectativas dos usuários e devem ser estabelecidos os objetivos em termos de quantidade e qualidade da água. O processo de identificação de objetivos pode constituir-se em uma tarefa difícil, com considerações sobre aspectos institucionais, marco legal, aspectos sociais, econômicos, técnicos, políticos assim como a análise dos impactos ambientais associados a cada alternativa.

Na seqüência das etapas fundamentais do processo vem o inventário dos dados disponíveis e a análise destes dados de forma a produzir informações relevantes e necessárias à solução do problema considerado.

Uma vez completada a análise de dados, os instrumentos de previsão (modelos) podem ser desenvolvidos. Estes modelos devem ser capazes de representar os processos físicos com resolução adequada à solução do problema considerado. No presente estudo, o SAD é composto de uma interface de controle capaz de coordenar a

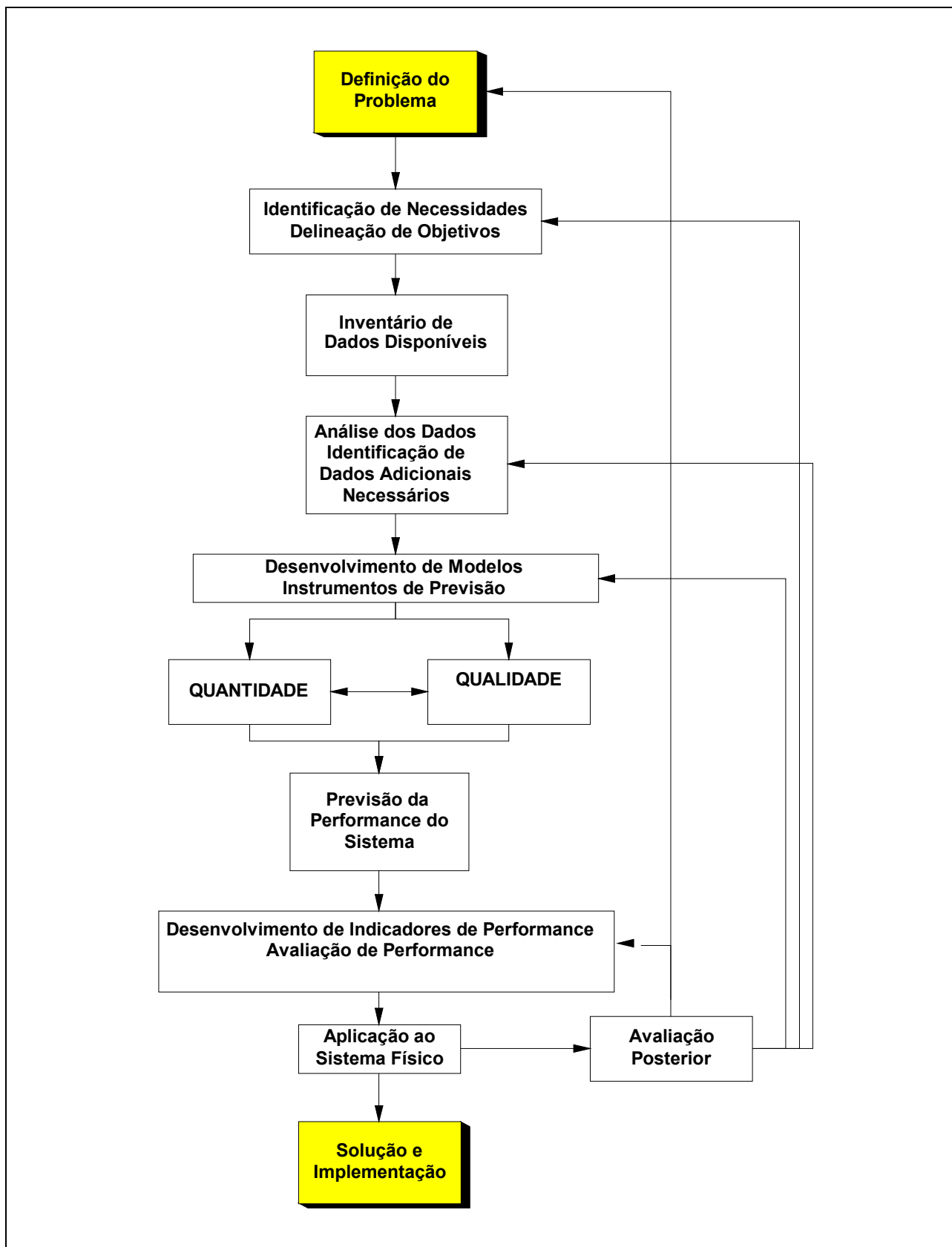


Figura 1. Metodologia para o desenvolvimento integrado de recursos hídricos.

integração de um modelo de rede de fluxo para operação de reservatórios (MODSIM) com um modelo de simulação de qualidade de águas superficiais (QUAL2E). O maior elo entre os dois modelos que garante a sua interação, são as vazões mínimas de jusante, utilizadas como “*pseudo-indicador*” de qualidade da água.

Uma vez construído, o modelo pode ser utilizado para prever a performance do sistema diante de diferentes alternativas de operação. Isto significa basicamente, que o sistema é capaz de gerar ou representar cenários estratégicos definidos pelos seus usuários. A análise dos resultados deve ser efetuada levando-se em conta os objetivos de quantidade e qualidade da água. Esta tarefa também não é simples, uma vez que se deve avaliar até que ponto uma determinada alternativa contribui para que se alcance um objetivo específico. Isto requer o desenvolvimento de indicadores de performance que reflitam as relações entre os objetivos do usuários do sistema e os processos físicos, tanto em termos de quantidade como qualidade da água.

Torna-se também necessário a delineação de uma estratégia para a utilização do SAD. Alternativas a serem consideradas para a geração de cenários devem ser definidas com clareza e os critérios para comparação dos resultados devem ser estabelecidos antes da aplicação do modelo.

Uma vez alcançada uma solução, ou seja, uma vez escolhida uma determinada alternativa, dá-se início a fase de implementação. Esta fase pode ser muito longa, já que pode envolver a construção de infraestrutura hidráulica como barragens, canais, adutoras, estações de tratamento de água e esgoto, etc. O processo geralmente requer revisões e reformulações da solução adotada. A implementação pode se dar em etapas. O escalonamento da fase de implementação apresenta a vantagem de permitir uma avaliação da alternativa escolhida, após a conclusão de cada fase ou estágio intermediário. Pode-se neste caso, utilizar o modelo para acompanhar e reavaliar os resultados em face dos dados observados como consequência da conclusão de uma ou

mais etapas. Discrepâncias entre os resultados previstos e os observados devem ser esperadas, uma vez que nenhum modelo de computador pode representar integralmente toda a complexidade dos processos relacionados com a qualidade e a quantidade de água em uma bacia. Além disto, eventos naturais ou interferências induzidas pelo homem podem alterar os resultados previstos inicialmente. Desta forma o processo de simulação deve ser contínuo e iterativo, acompanhando a dinâmica da bacia.

Desenvolvimento do modelo

O protótipo do modelo é composto por três módulos principais: (1) módulo de alocação (quantidade) de água; (2) módulo de simulação da qualidade de água; e (3) módulo dos indicadores de performance. Pode-se também considerar que a interface de coordenação entre estes módulos que contém telas de ajuda ao usuário, manual do modelo e entrada de dados constitui o quarto módulo. No entanto, os autores consideram que o SAD é composto pelos três primeiros módulos descritos, os quais são integrados pela interface de coordenação. Por questão de brevidade o sistema desenvolvido será chamado, ao longo do texto, de SIQQ (Sistema Integrado de Qualidade e Quantidade da Água).

Módulo de alocação de água. O módulo de quantidade de água foi desenvolvido em torno do modelo MODSIM (Labadie, 1988; Graham et al., 1986). MODSIM é um modelo de simulação/otimização que se inclui na classe dos chamados “*modelos de rede de fluxo*”. A sua escolha como instrumento básico para o desenvolvimento do SAD deve-se a sua grande flexibilidade e ao seu potencial para a análise de sistemas complexos de aproveitamento de recursos hídricos, já tendo sido utilizado em inúmeros estudos (Labadie 1988; Graham et al., 1986; Shafer et al., 1981). Trata-se de um modelo versátil, bem testado, documentado e de domínio público. O MODSIM é essencialmente um modelo de simulação capaz de efetuar uma otimização

estática a cada intervalo de tempo, minimizando o “custo” de alocação de água através da rede. Este custo não significa necessariamente um custo econômico, podendo o modelo ser utilizado para otimizar a alocação de água baseando-se em uma estrutura de prioridades definida pelo usuário para hierarquizar os diversos usos da água. No estudo da bacia do Piracicaba, a diluição de efluentes deve ser considerada, pelo menos em princípio, como um dos usos prioritários. Este objetivo é traduzido para o modelo de operação de reservatórios impondo prioridades altas para as vazões mínimas a jusante. Evidentemente tal imposição pode prejudicar os objetivos de reversão de água para São Paulo.

Nos modelos de rede de fluxo um sistema de aproveitamento de recursos hídricos é representado por uma rede formada de “nós” e “arcos” (Figura 2). Os nós representam os reservatórios, demandas, reversões, confluências, e outros pontos importantes de um sistema. Os arcos são os elos de ligação entre os nós e representam trechos de rios, adutoras, canais e outras estruturas semelhantes.

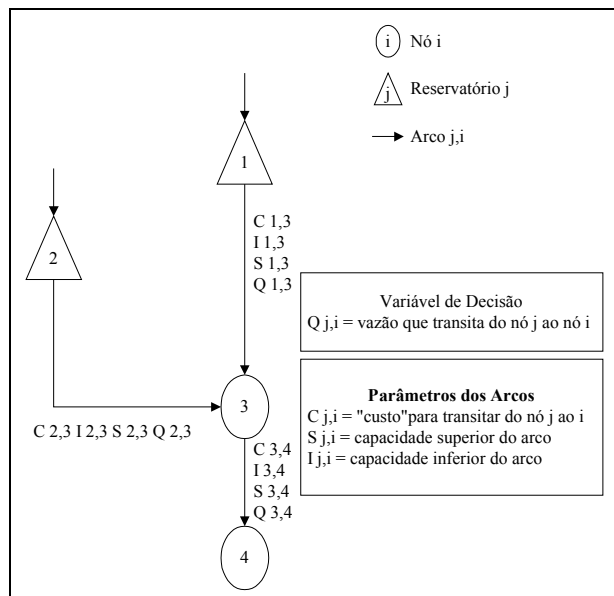


Figura 2. Representação de um sistema como uma rede de fluxo.

Cada arco é caracterizado por três parâmetros, ou seja, os limites superior e

inferior do fluxo que passa pelo arco (ex: capacidade máxima e mínima de um canal) e um “custo” por unidade de fluxo. Como já apontado este custo não significa obrigatoriamente um valor monetário, podendo representar prioridades ou preferências impostas pelo usuário. As capacidades máxima e mínima de cada arco podem ser fixas para todo o período de simulação ou podem variar no tempo. A cada arco (ex: um canal) pode ser associado um percentual de perda de água por unidade de comprimento. Esta perda poderá ou não retornar ao sistema através do aquífero subterrâneo, conforme a situação física.

Cada nó deve conter as características da estrutura que representa. Por exemplo se o nó i estiver representando um reservatório, o usuário deve fornecer a relação cota-área-volume, os volumes máximos e mínimos de armazenamento, os níveis que se deseja atingir, o percentual de perdas por infiltração, a taxa de evaporação, etc. Deve-se observar que qualquer nó incluído em uma rede pode ser um nó de entrada de água (receptor de vazão afluente).

Seguindo esta estrutura de nós e arcos, um sistema físico pode ser representado por uma rede de fluxo, e o “custo total” de alocação da água entre as diversas demandas pode ser minimizado por algoritmos lineares extremamente eficientes, o que faz com que esta classe de modelos seja aplicável a sistemas extremamente complexos (grande número de nós e arcos). É importante salientar que a minimização dos “custos” de alocação e distribuição de água significa a maximização dos benefícios associados ao seu uso.

O problema de otimização toma então a seguinte forma:

$$\min \sum \sum C_{ij} \times Q_{ij} \quad (1)$$

sujeito a:

$$\sum Q_{ij} - \sum Q_{ik} = 0 \quad (2)$$

e

$$I_{ij} \leq Q_{ij} \leq S_{ij} \quad (3)$$

onde Q_{ij} = vazão que transita do nó i ao nó j ; C_{ij} = custo (prioridade) da unidade de vazão que transita entre os nós i e j ; N = número total de nós da rede; I_{ij} = limite inferior da vazão no arco ij ; S_{ij} = limite superior da vazão no arco ij .

Desta forma o modelo determina as vazões que devem passar pelos diversos arcos, as regras de operação dos reservatórios, os déficits eventualmente ocorridos, a necessidade de importação de água de outras bacias, atendendo as condições de “mínimo custo” ou seja as preferências declaradas pelos usuários. A capacidade desta técnica é tão grande que pode-se modelar também, com relativa facilidade, as interações entre águas superficiais e subterrâneas como, por exemplo, a diminuição das vazões dos rios devido ao bombeamento de aquíferos e as vazões de retorno ao curso de água através do sub-solo.

A capacidade de combinar simulação e otimização é um dos pontos fortes do MODSIM, em relação a outros modelos freqüentemente utilizados para a simulação de sistemas complexos de recursos hídricos (ex: HEC-5, MITSIM e SSARR, entre outros), nos quais as soluções “ótimas” devem ser determinadas por tentativa e erro. Este processo de tentativa e erro, embora muito utilizado, depende da experiência e perfil profissional de cada usuário, e em sistemas mais complexos o processo de seleção de alternativas aceitáveis pode tornar-se lento e trabalhoso. Além disto, os resultados são sempre subjetivos.

O MODSIM pode ser utilizado para a análise de problemas a curto ou longo prazo, com intervalos de tempo semanal ou mensal. O modelo presta-se a simulação de longos períodos de tempo, através da utilização de dados históricos ou sintéticos. Esta característica permite que os resultados sejam analisados estatisticamente, proporcionando aos seus usuários uma idéia da variabilidade dos resultados através da incorporação, pela

análise estatística, das incertezas associadas aos dados existentes.

Módulo de qualidade de água. O módulo de qualidade da água é baseado no modelo QUAL2E-UNCAS da Agência Norte Americana de Meio Ambiente (EPA). O modelo que serviu de base para o seu desenvolvimento foi o QUAL-I criado na década de 1960 pelo Bureau de Desenvolvimento do Estado do Texas. Desde então, uma série de cientistas e engenheiros contribuíram para o desenvolvimento e aperfeiçoamento do que é hoje o modelo QUAL2E. O módulo UNCAS, incorporado para a análise de incertezas, teve o seu desenvolvimento iniciado por Brown em 1984.

O QUAL2E é um modelo bastante completo e versátil que permite a simulação de até quinze diferentes variáveis de qualidade da água, em qualquer combinação desejada pelo usuário. O modelo pode ser utilizado em regime permanente ou não permanente e foi desenvolvido como uma ferramenta para auxiliar o processo de planejamento e gerenciamento de qualidade da água em uma rede de rios.

O modelo pode ser utilizado para a simulação unidimensional de qualquer tipo de rio, sob a hipótese de mistura completa. O QUAL2E admite que os mecanismos de transporte mais importantes são advecção e dispersão, e que estes são significativos apenas na direção principal do fluxo (eixo longitudinal do rio ou canal). O modelo permite a incorporação de múltiplas descargas e efluentes, retiradas de água, entrada de tributários e de vazões incrementais, que podem ser positivas (contribuição do aquífero para o rio ou escoamento superficial que chega a calha principal em um determinado trecho) ou negativas (contribuição do rio para o aquífero e retiradas de água). O QUAL2E também é capaz de estimar a quantidade de água necessária à diluição de forma a alcançar níveis pré-determinados de oxigênio dissolvido.

Para utilização do QUAL2E o sistema (rio, canal, etc) deve ser subdividido em um conjunto de trechos e elementos computacionais (Figura 3). Um trecho é um

pedaço do rio que possui características mais ou menos uniformes. Cada trecho deve ser dividido em um número de elementos computacionais de comprimento uniforme.

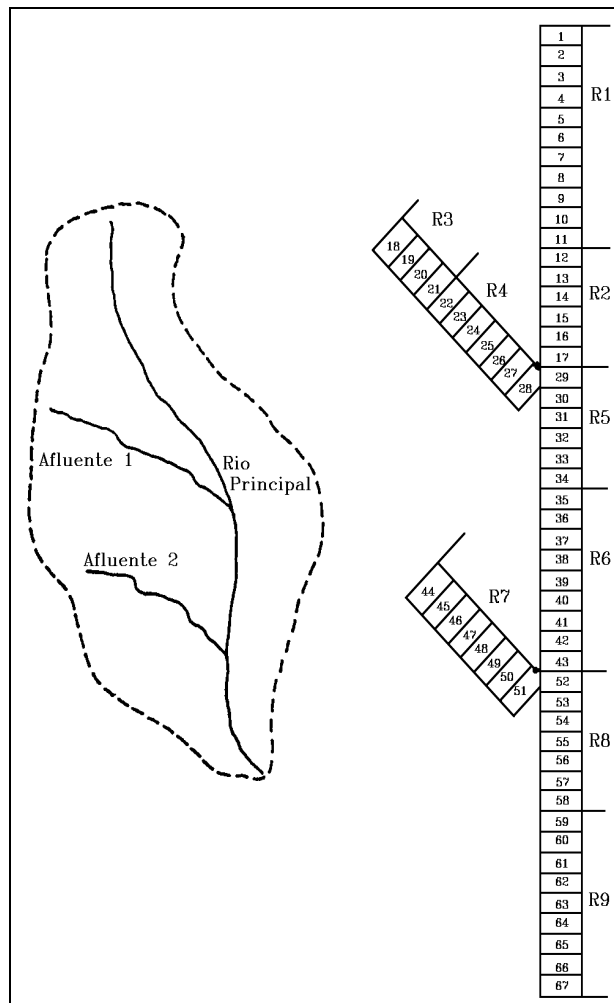


Figura 3. Representação de um rio como uma rede composta de trechos e elementos computacionais.

Existem sete classificações para elementos computacionais no QUAL2E: (1) elemento de cabeceira; (2) elemento padrão; (3) elemento imediatamente a montante de uma confluência; (4) elemento de confluência; (5) último elemento do sistema; (6) elemento de entrada de efluentes; e (7) elemento de tomada de água.

Para a sua utilização na bacia do Piracicaba QUAL2E foi modificado, uma vez que os seus limites em termos do número máximo de trechos e de elementos computacionais teve que ser aumentado com

o objetivo de permitir a simulação integrada dos principais rios da bacia. O processo de adaptação do QUAL2E à bacia do Piracicaba assim como a calibração do modelo é discutido posteriormente no item que trata do estudo de caso.

Módulo de indicadores de performance.

Este módulo incorpora uma variedade de indicadores de performance (critérios de performance), desenvolvidos com o objetivo de transformar dados de qualidade e quantidade da água (ex.: vazão do rio, concentração de OD, descarga dos reservatórios, etc) em informações relevantes para aqueles encarregados da tomada de decisão. Estes indicadores de performance contêm informações sobre a frequência e a magnitude das diferenças entre os valores obtidos e os padrões, além de estimar a confiabilidade ou a segurança da operação do sistema em termos dos objetivos de quantidade e qualidade. Parte dos critérios desenvolvidos para a avaliação de performance permitem aos "tomadores de decisão" avaliar a distribuição espacial e temporal dos resultados.

Alguns dos indicadores utilizados foram adaptados do trabalho de Hashimoto (1982), enquanto que outros foram desenvolvidos especificamente para este estudo. Os critérios para a avaliação de resultados podem ser subdivididos em três classes distintas: (i) performance do sistema de reservatórios; (ii) de vazões mínimas a jusante; e (iii) de qualidade da água.

Para a avaliação da performance do sistema de reservatórios três medidas principais foram desenvolvidas: (i) confiabilidade que mede a segurança de ocorrência de uma determinada combinação de resultados; (ii) vulnerabilidade que mostra a susceptibilidade do sistema a uma variação dos resultados; e (iii) elasticidade que indica com que rapidez o sistema se recupera após um período crítico. Além destas o usuário tem ao seu dispor uma série de tabelas e gráficos mostrando vazões afluentes, descargas, volumes armazenados ao final do período de operação, etc.

Para a avaliação da performance em termos de qualidade da água foram desenvolvidos, além das tabelas e dos gráficos, os seguintes indicadores: (i) confiabilidade na manutenção de padrões de qualidade que mostra com que segurança são mantidos os padrões de qualidade da água; (ii) índice de qualidade da água que faz a associação entre os valores estimados e uma escala subjetiva de qualidade da água que varia de excelente a péssima; (iii) função composta de violação de padrões que combina a frequência e a magnitude de desvios entre os valores estimados e os padrões de qualidade da água; (iv) indicador de uniformidade espacial e indicador de uniformidade temporal que procuram representar a distribuição espacial e temporal da qualidade da água na bacia. Para maiores informações sobre estes indicadores de performance, recomenda-se a leitura de Azevedo (1994) e Azevedo et. al. (1994).

Análise de risco

Em qualquer estudo destinado a simulação por computador dos processos físicos que ocorrem em sistemas naturais, os valores dos parâmetros utilizados pelos modelos são, em realidade, “valores esperados” com um grau de incerteza associado. O grau de incerteza de cada parâmetro pode ser inferido através da análise de dados históricos, e é também função da capacidade do modelo em representar os processos físicos. SIQQ permite que estas incertezas sejam contabilizadas, através da incorporação de técnicas destinadas à análise e interpretação estatística dos resultados, permitindo que se associe a cada previsão uma probabilidade de ocorrência e um intervalo de segurança em torno do valor estimado. Este tipo de análise é ilustrado ao final deste artigo durante a apresentação do estudo de caso.

A análise de risco é incorporada ao SAD através da utilização do método de Monte Carlo. O número de simulações necessárias foi determinado por meio de uma metodologia empírica. Foram realizadas 500

simulações simultâneas de todo o sistema e indicadores de performance foram calculados para grupos de 5, 10, 25, 50, 100, 150, 200, 250, 300, 350, 400, 450 e 500 simulações. O objetivo foi determinar o número necessário de simulações que garantiriam a convergência dos resultados em um intervalo de $\pm 5\%$. Como indicado na Figura 4, observou-se que para todos os indicadores analisados os resultados apresentavam a convergência desejada a partir de 175 simulações. Para efeito de segurança foi então determinado que 250 simulações seriam suficientes para permitir uma análise estatística das previsões do modelo com a resolução adequada.

Estrutura do Sistema de Apoio a Decisão

A estrutura de SIQQ é apresentada na Figura 5. O modelo foi construído em torno de uma interface de controle que coordena a sequência de passos necessários à sua utilização, desde a entrada de dados até a avaliação dos resultados.

Uma vez definido um determinado cenário operativo, o modelo é utilizado para simular a performance do sistema obedecendo as condições de contorno e restrições impostas pelo usuário. O programa lê uma série de arquivos de dados onde estão contidas informações sobre as características do cenário que se deseja analisar (ex: demandas, prioridades, níveis de tratamento de efluentes, condições hidrológicas, volumes nos reservatórios, etc) e cria os respectivos arquivos de dados para o módulo de simulação de quantidade. A partir deste ponto o modelo MODSIM é utilizado para simular a operação dos reservatórios determinando as descargas e volumes dos reservatórios que minimizam a função de “custo” do modelo (Equação 1).

Utilizando os arquivos de saída do MODSIM e as características do cenário a ser analisado, criam-se os arquivos de entrada para o módulo de qualidade. O SIQQ pode ser utilizado para a simulação trimestral ou anual com um intervalo de tempo mensal. A cada mês do período de simulação corresponde um

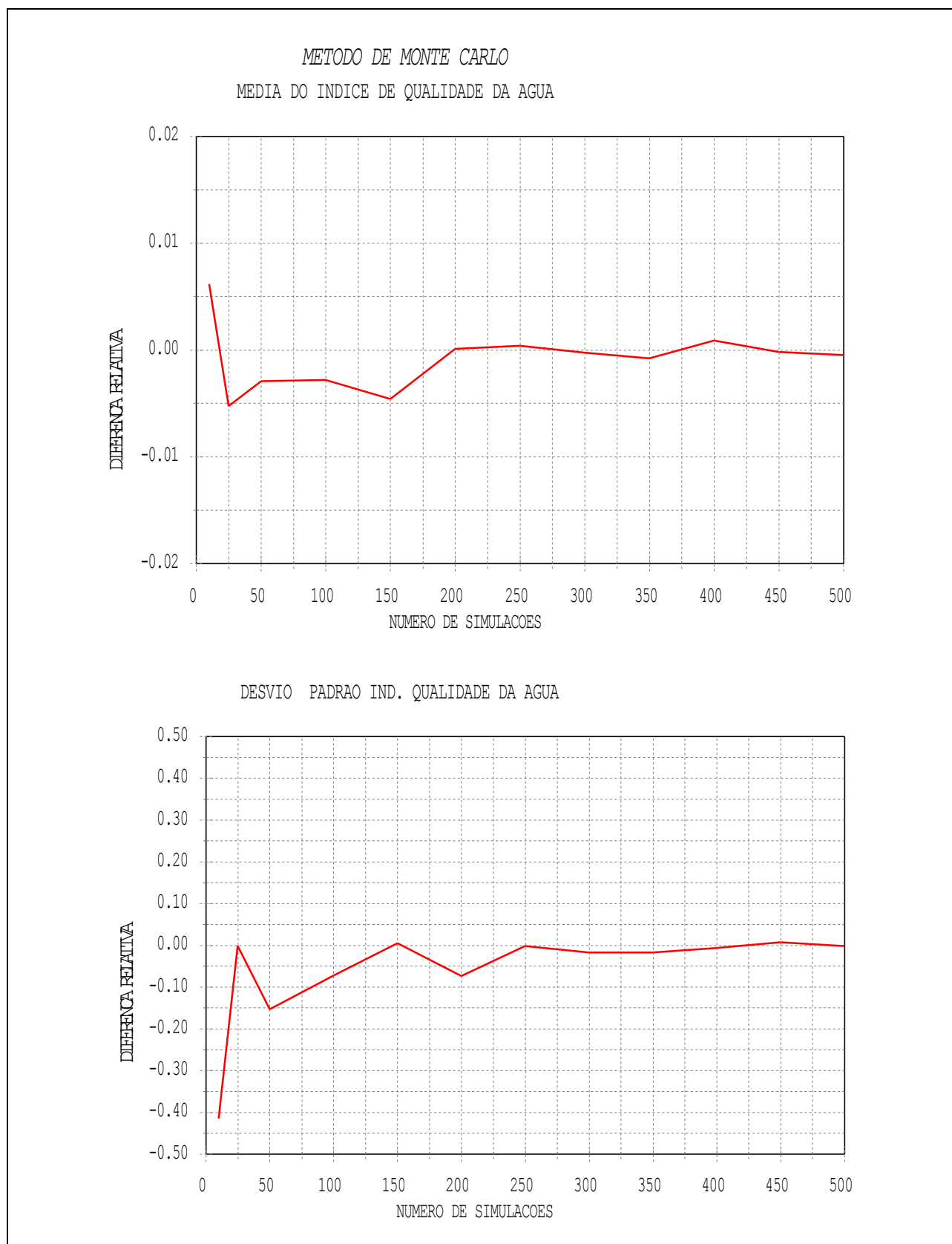


Figura 4. Análises empíricas para determinaro número de simulações pelo método de Monte Carlo.

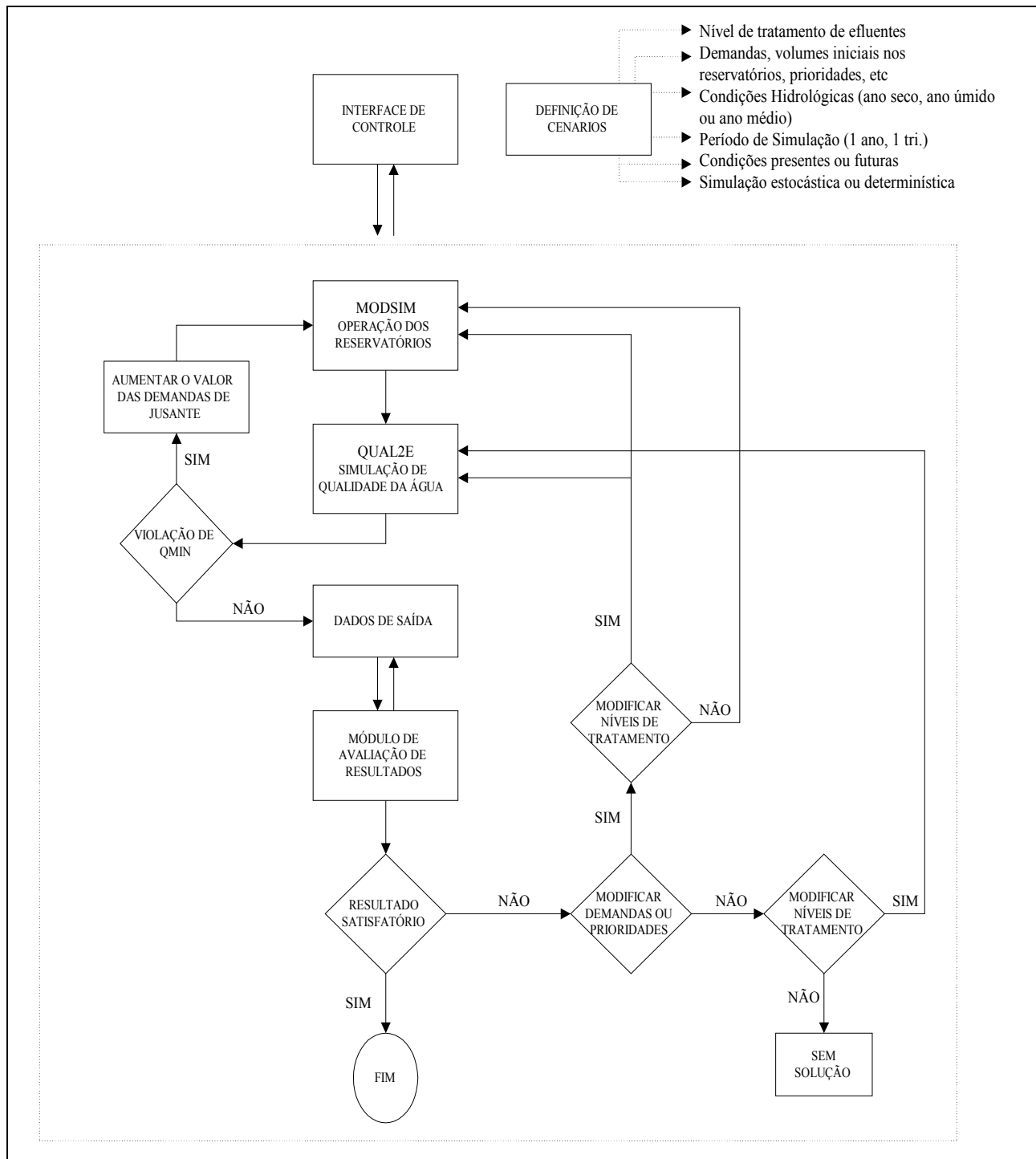


Figura 5. Estrutura do SIQQ.

arquivo de dados para o modelo QUAL2E no caso de simulação determinística ou para QUAL2E-UNCAS no caso de simulação estocástica.

O passo subsequente é a simulação de qualidade da água. A cada intervalo de tempo

(mês), o modelo verifica se a vazão mínima (Q_{min}) estabelecida em pontos de controle foi violada. Em caso positivo o programa automaticamente aumenta, em incrementos de 2%, o valor inicial das demandas mínimas de jusante, as quais recebem uma prioridade

máxima no algoritmo de operação dos reservatórios. A simulação é então repetida desde do início até que não haja violação dos valores de Q_{\min} . Uma vez concluída a simulação, são gerados os arquivos de saída para serem utilizados pelo módulo de avaliação de resultados.

A partir das variáveis de qualidade da água, descargas dos reservatórios e volumes armazenados no final do período, os indicadores de performance são calculados e o usuário pode verificar se os objetivos da alternativa proposta são devidamente alcançados. Se os objetivos não forem alcançados, é possível formular um cenário mais favorável aumentando as demandas a jusante (aumento de Q_{\min}), aumentando os níveis percentuais de tratamento de efluentes ou uma combinação das duas alternativas anteriores. Mesmo que os objetivos sejam alcançados em termos de manutenção de padrões mínimos de qualidade, o usuário pode considerar que indicadores mais subjetivos tais como elasticidade ou uniformidade espacial e temporal dos benefícios de qualidade da água são inaceitáveis do ponto

de vista político ou social, e optar pela construção de um cenário alternativo.

Estudo de caso: bacia do rio Piracicaba

Com o objetivo de ilustrar o potencial da metodologia apresentada anteriormente, foi necessário desenvolver o SAD para aplicação a um estudo de caso de reconhecida complexidade. Com este fim foi selecionada a bacia do Rio Piracicaba no estado de São Paulo que além de constituir um paradigma de complexos problemas de gerenciamento de recursos hídricos, dispõe de informações e dados que se prestam ao desenvolvimento de tal sistema.

A bacia do Piracicaba tem uma área de drenagem de cerca de 12700 Km² e 90% de sua superfície está situada no estado de São Paulo. A bacia é formada principalmente pelos rios Jaguari e Atibaia, que se encontram para formar o rio Piracicaba, cujo principal afluente é o rio Corumbataí (Figura 6).

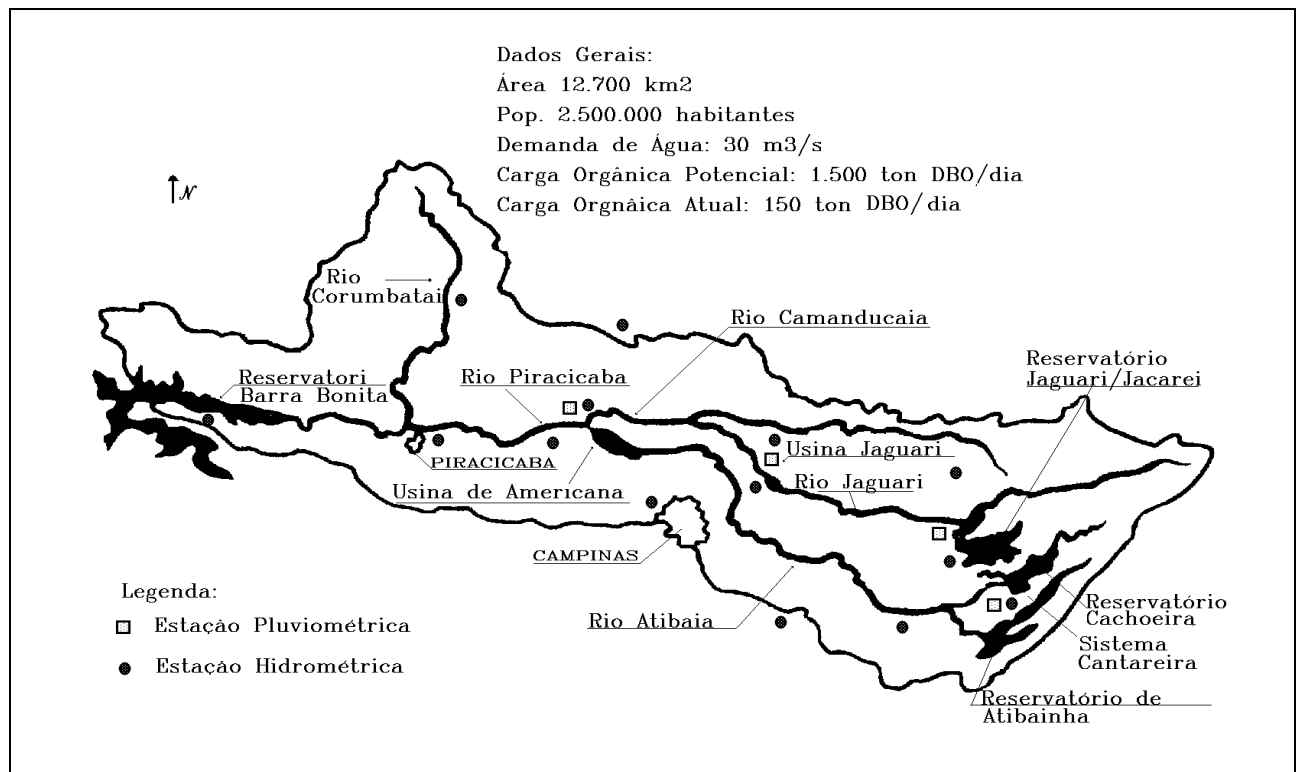


Figura 6. Bacia do rio Piracicaba.

Tabela 1. Demandas de água na bacia do Piracicaba (m^3/s).

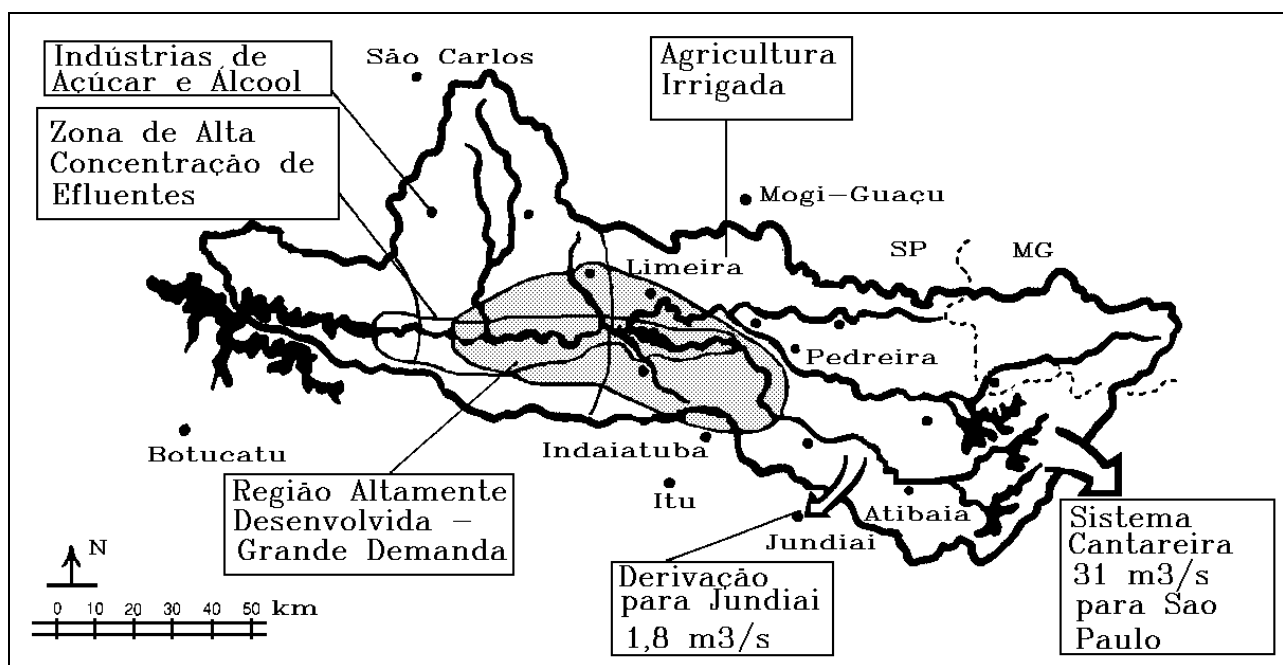
Ano	Pop. (1,000 hab.)	Urbana		Industrial		Irrigação C	Total	
		D	C	D	C		D	C
1990	2,960	9.1	3.6	20.4	2.5	3.2	32.7	9.3
2000	4,630	14.5	6.2	27.2	3.7	5.9	47.6	15.8
2010	6,550	21.4	9.2	30.3	4.3	10.9	62.6	24.4

Na cabeceira da bacia localiza-se o sistema Cantareira, um conjunto de reservatórios responsável pelo abastecimento de mais da metade do suprimento de água para a cidade de São Paulo, com uma derivação máxima da ordem de $31 \text{ m}^3/\text{s}$.

Praticamente todos os centros urbanos da bacia são servidos por sistemas de abastecimento de água potável, com um taxa de cobertura da ordem de 95% da população urbana. Por outro lado, 75% da população é servida por sistema de coleta de esgotos. Estima-se que a demanda de água para abastecimento urbano na bacia é da ordem de $4,5 \text{ m}^3/\text{s}$. Indústrias localizadas na bacia (mais de 230) consomem aproximadamente $20,5 \text{ m}^3/\text{s}$ dos quais $18 \text{ m}^3/\text{s}$ retornam aos corpos d'água como

efluentes. A demanda de água para a irrigação é da ordem de $6,1 \text{ m}^3/\text{s}$. Segundo estimativas atuais, estas demandas tendem a aumentar significativamente nos próximos anos.

A derivação de $31 \text{ m}^3/\text{s}$ para a cidade de São Paulo foi calculada de forma a manter uma vazão mínima de $15 \text{ m}^3/\text{s}$ em Paulínea e $40 \text{ m}^3/\text{s}$ na cidade de Piracicaba. A fixação destes valores no entanto, não levou em conta o aumento na taxa de uso consuntivo devido a expansão da agricultura irrigada e ao crescimento industrial. As tendências atuais indicam que será cada vez mais difícil manter as vazões mínimas em Paulínea e Piracicaba concomitantemente com as derivações para São Paulo e Jundiaí ($1,8 \text{ m}^3/\text{s}$).

**Figura 7. Caracterização da exploração dos recursos hídricos na bacia do Piracicaba.**

Adaptação do modelo MODSIM à Bacia do Piracicaba

Como parte da aplicação de SIQQ à bacia do rio Piracicaba, foi necessário desenvolver uma *rede de fluxo* para utilização do modelo MODSIM como instrumento de simulação da operação do sistema Cantareira. Inicialmente, desejou-se mostrar que o modelo seria capaz de representar a operação histórica do sistema. Neste processo de calibração utilizou-se uma rede (Figura 8) composta de quatro reservatórios (Jaguari/Jacareí representados como um só reservatório), cinco demandas representativas da demanda para a cidade de São Paulo, quatro demandas mínimas (demandas ecológicas) de jusante, e três demandas de passagem com o objetivo de representar as transferências históricas de água entre os reservatórios. Nestas condições utilizou-se o modelo para representar a operação do sistema para cinco anos distintos. Como demonstrado nas Figuras 9 e 10, os resultados simulados indicaram um excelente nível de ajuste aos dados observados.

Uma vez demonstrado que o modelo era capaz de representar a operação histórica do sistema, partiu-se para o desenvolvimento de uma rede que permitisse uma maior flexibilidade na construção de possíveis cenários futuros (Figura 11). A rede é composta de treze *nós* e treze *arcos*. Os nós

estão subdivididos da seguinte forma: 4 reservatórios, 9 demandas e um nó de importação de água. Os nós de números 5, 6, 7, 8 e 9 representam demandas existentes correspondendo a transferência para São Paulo e as descargas mínimas de jusante. Os nós de números 10, 11 e 12 representam *demandas artificiais ou virtuais* de jusante. Estas últimas demandas recebem uma prioridade bem menor do que as descargas mínimas, mas no caso de excedentes de água estes são destinados a jusante. Este artifício foi utilizado para *forçar* o modelo a soltar o máximo de água para jusante sem comprometer a derivação para São Paulo ou o nível de armazenando desejado nos reservatórios. Finalmente se colocou na rede a possibilidade de importar um certo volume de água de uma bacia vizinha. Para garantir que este tipo de transferência ocorreria apenas em anos críticos, criou-se uma outra demanda virtual (nó 14) na bacia vizinha que recebeu um valor igual ao da transferência e uma prioridade baixa. Além disto, o custo de transferência de água no arco de número 13 é alto o que garante que o modelo recorrerá a esta reserva estratégica apenas quando não consiga satisfazer a demandas prioritárias com água proveniente da própria bacia. No esquema para integração dos dois modelos, as descargas alocadas aos nós de jusante são utilizadas como dados de entrada para o modelo QUAL2E.

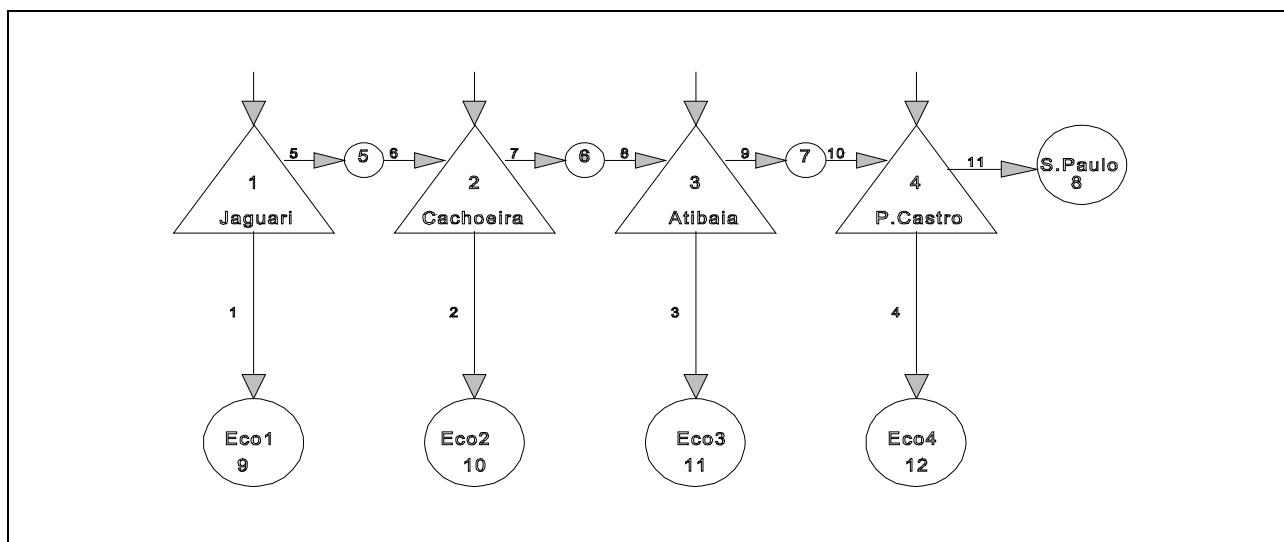


Figura 8. Rede de fluxo para calibração do MODSIM.

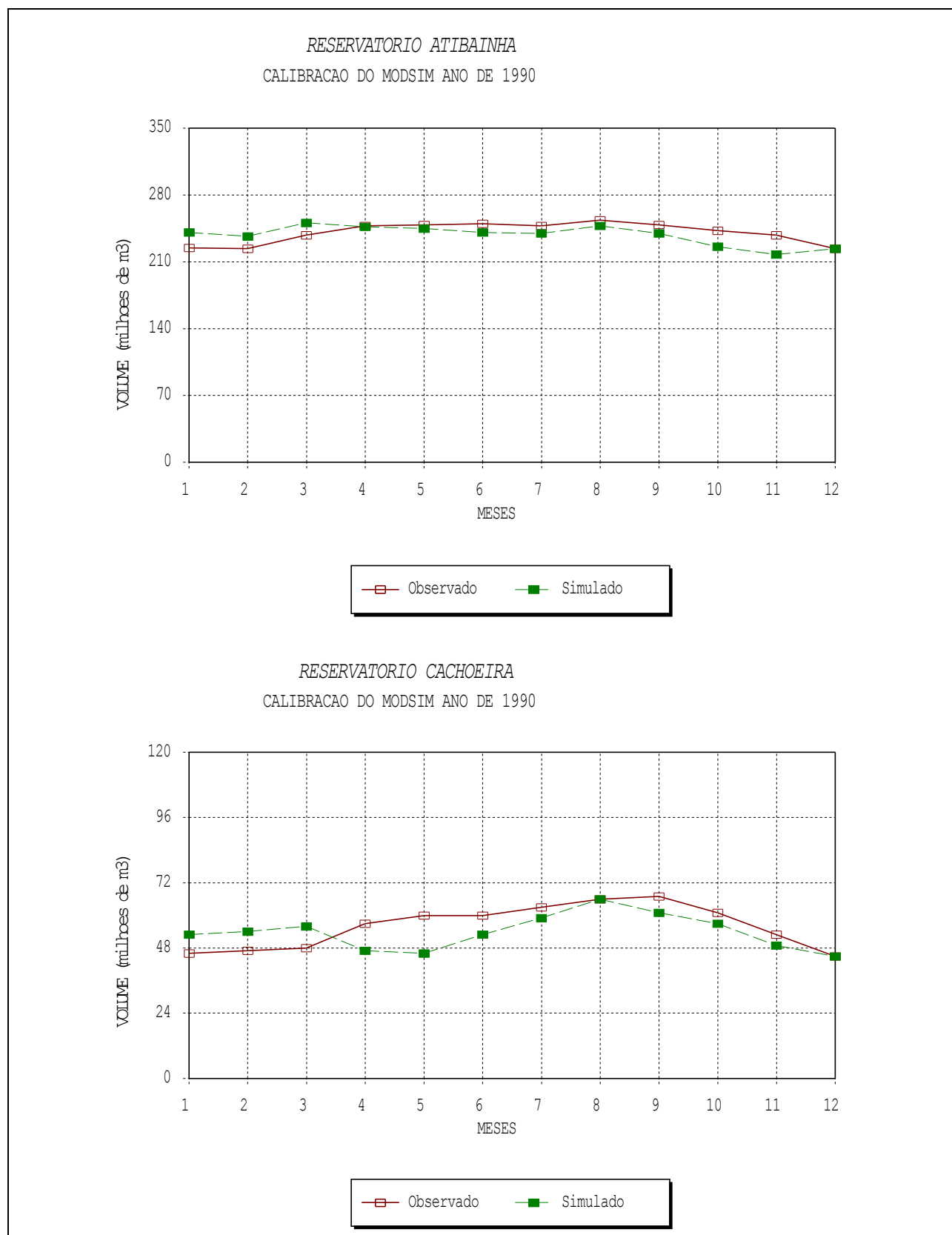


Figura 9. Calibração do MODSIM (volumes dos reservatórios).

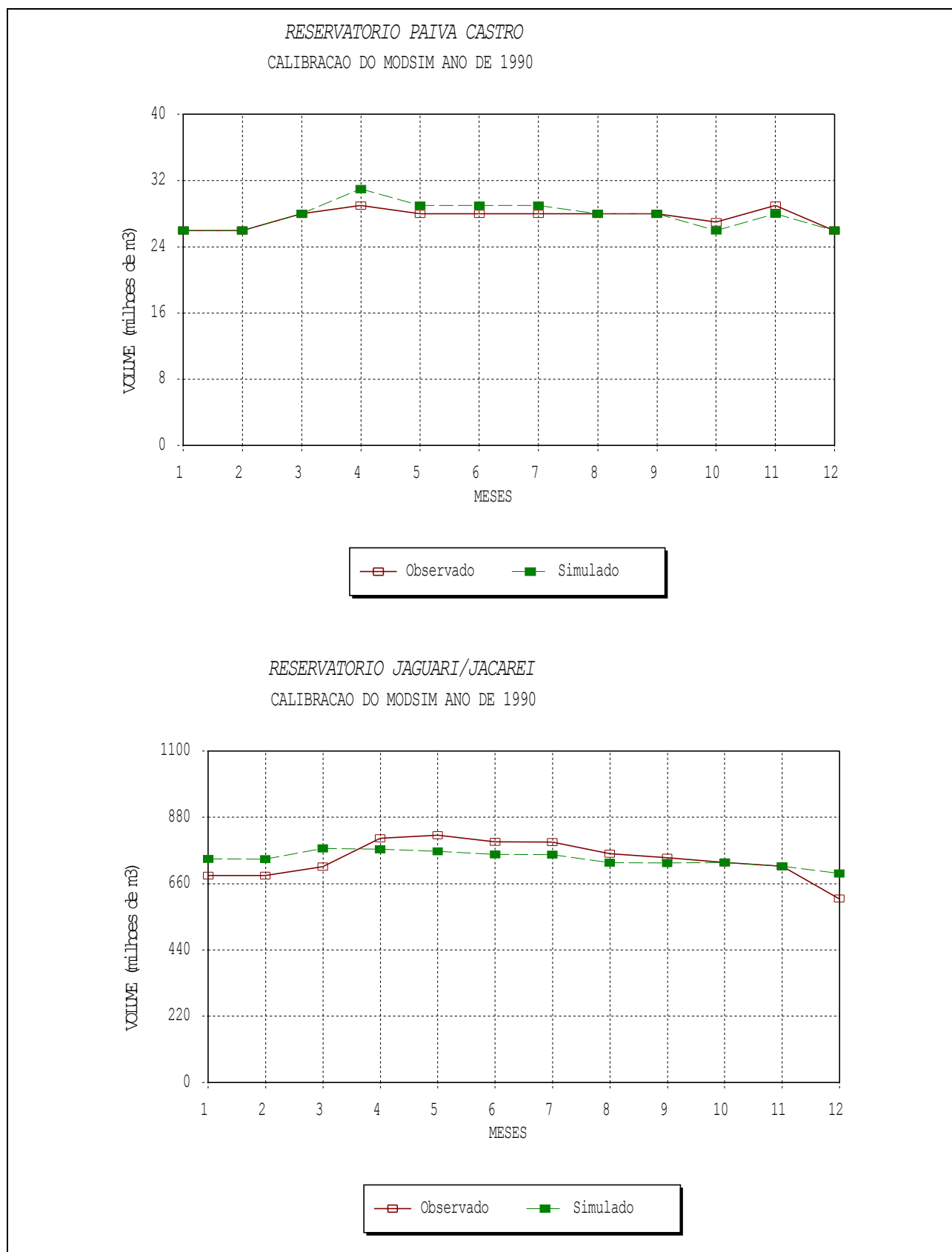


Figura 9. Calibração do MODSIM (volumes dos reservatórios) - continuação.

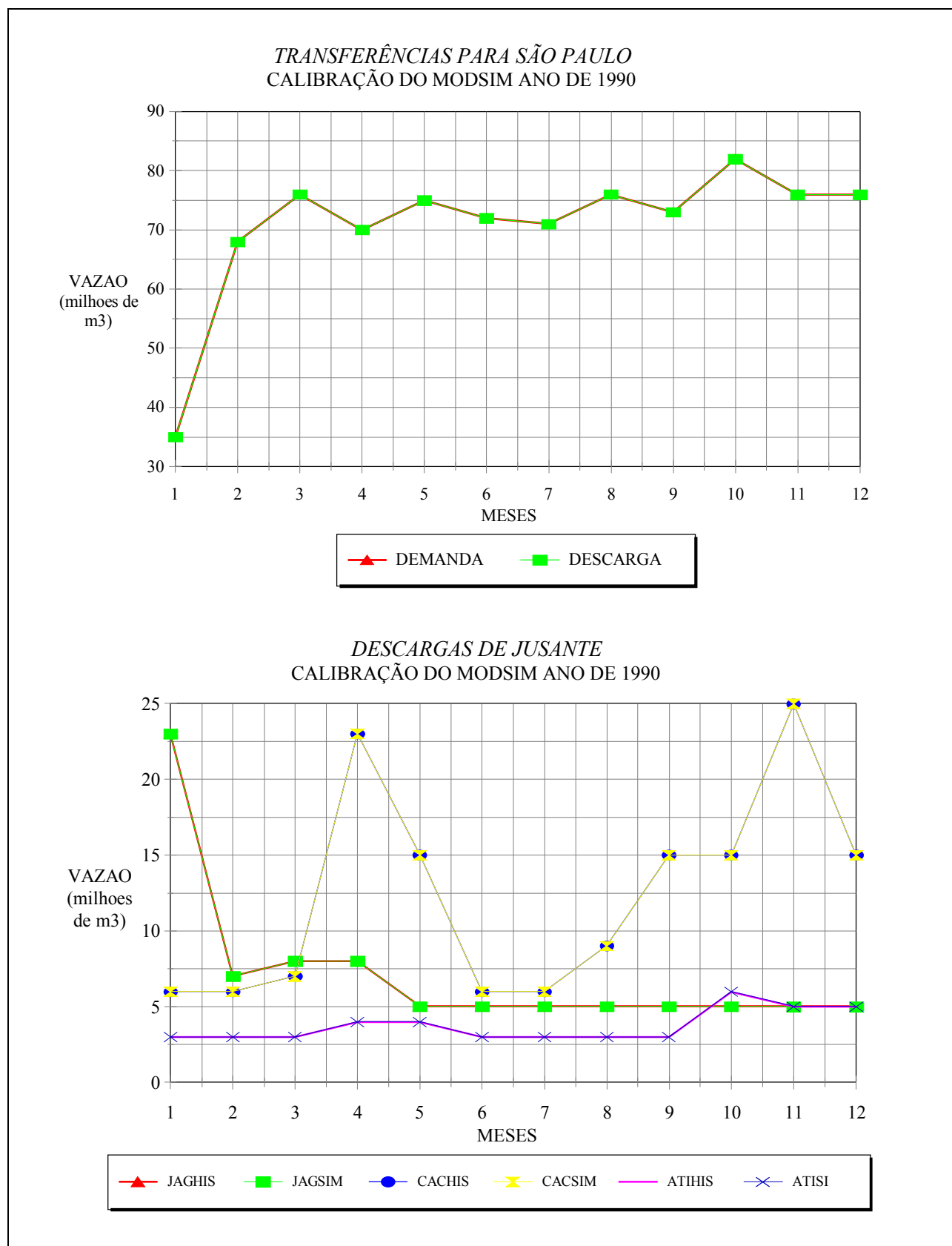


Figura 10. Calibração do MODSIM: transferência para São Paulo e para jusante.

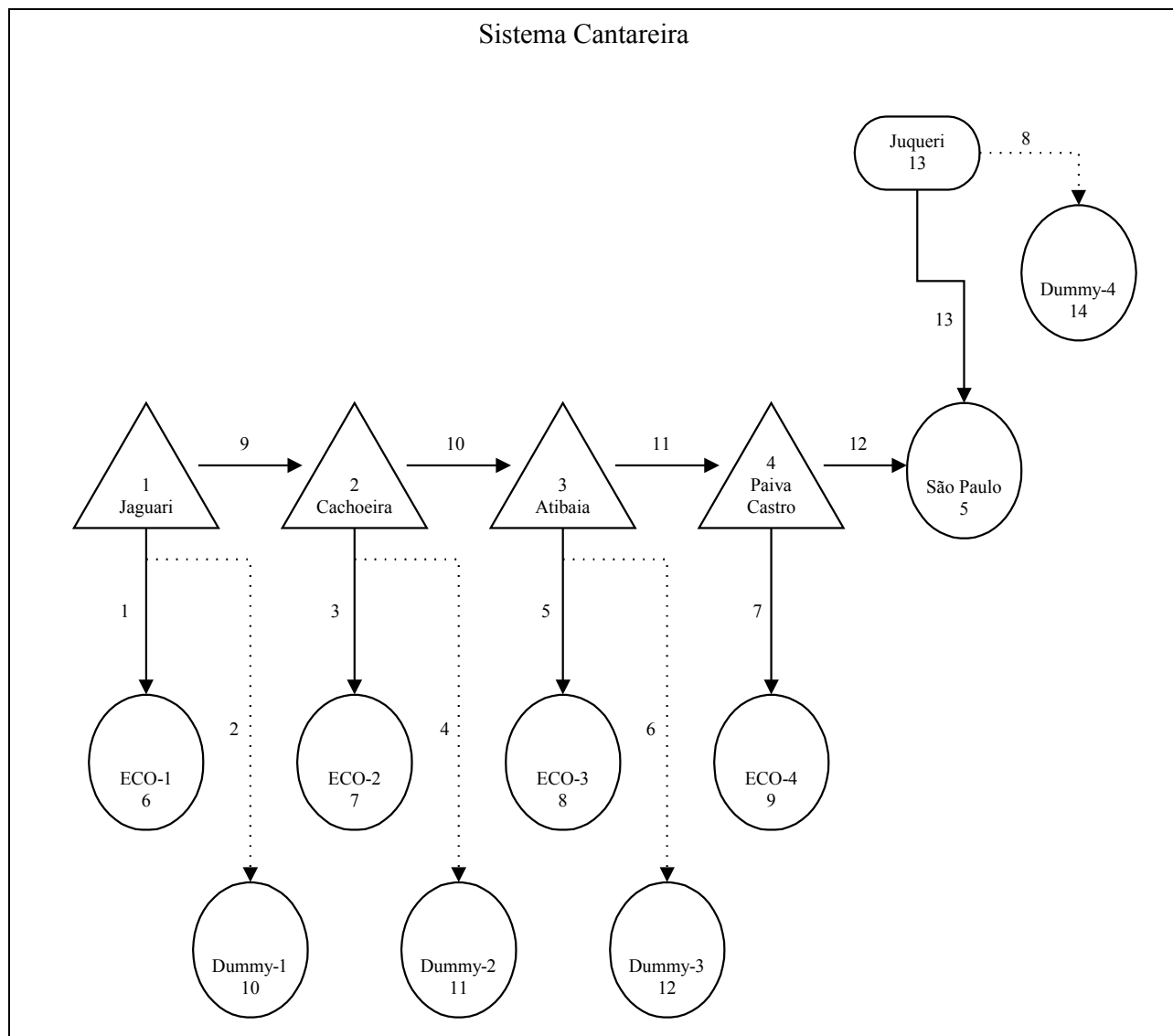


Figura 11. Rede final para o Sistema Cantareira.

Adaptação do modelo QUAL2E à bacia do rio Piracicaba

A adaptação do modelo QUAL2E à bacia do rio Piracicaba exigiu, inicialmente, modificações no programa que permitissem a incorporação, em uma única rede, de um número maior de trechos e elementos computacionais. A rede final para utilização do QUAL2E (Figura 12) compreende o trecho que vai desde os reservatórios de cabeceira do sistema Cantareira (Jaguari/Jacareí, Cachoeira e Atibainha) até o Salto de Piracicaba, na cidade de mesmo nome. Esta rede é composta de 29 trechos de rio com

comprimento variando entre 4 km e 40 km; 357 elementos computacionais de comprimento de 2 km; 5 elementos de cabeceira; 4 elementos de confluência; e 48 pontos de entrada de efluentes ou tomada de água. A rede representa os seis rios mais importantes da bacia. Os 48 pontos de entrada de efluente ou tomada de água correspondem na realidade a um número bem maior de entradas de efluentes ou retiradas pontuais uma vez que estas foram agregadas para efeito de simplificação.

O maior desafio para utilização do modelo foi a sua calibração e validação para a bacia como um todo, principalmente levando-

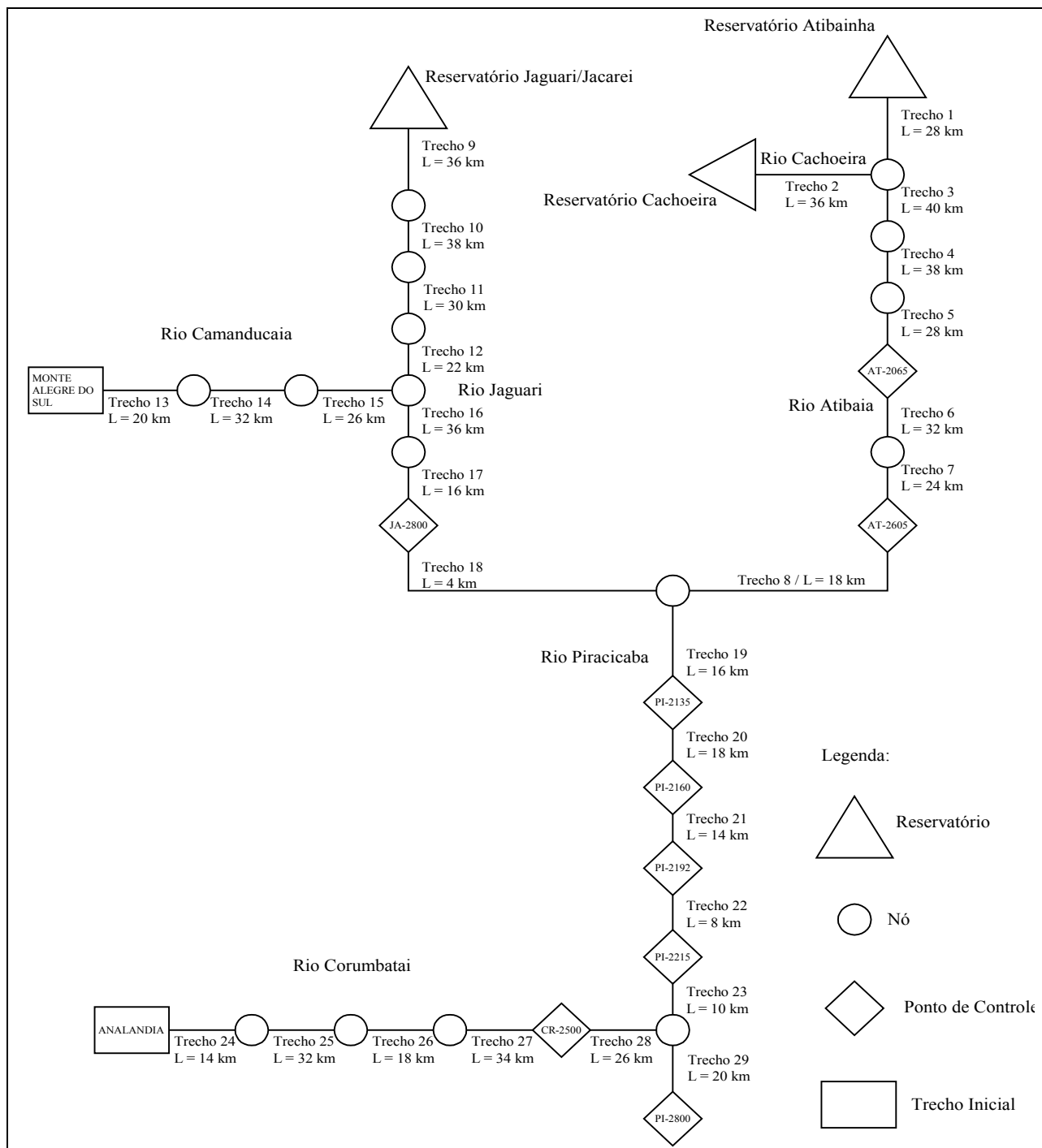


Figura 12. Rede representativa da bacia do Piracicaba.

se em conta que cinco variáveis de qualidade da água (OD, DBO, CF, N e P) são simuladas simultaneamente pelo sistema. O assunto torna-se bastante complexo e como o presente artigo tem por objetivo principal a apresentação do SAD como ferramenta de apoio a decisão em recursos hídricos,

recomenda-se, para maiores detalhes sobre o módulo de qualidade da água, a leitura de Azevedo, 1994. Diante do interesse deste assunto, um artigo dedicado exclusivamente a adaptação e calibração do modelo QUAL2E na bacia do Piracicaba será submetido aos editores da RBRH em futuro próximo.

A metodologia desenvolvida para calibração do modelo exigiu um estudo detalhado de sensibilidade para verificar a influência da variação dos valores de diferentes parâmetros. Uma vez completada a análise de sensibilidade, procedeu-se a calibração manual dos parâmetros do modelo que foi considerado calibrado apenas quando em todos os nove pontos de controle selecionados na bacia, os valores das cinco variáveis simuladas se apresentaram dentro do intervalo de um desvio padrão a mais ou a menos da média dos valores observados destas variáveis. Durante o estudo de sensibilidade ficaram evidentes algumas tendências das variáveis de qualidade da água em função do tipo de ano hidrológico e do mês em questão, uma vez que fatores climatológicos têm impacto direto no comportamento de parâmetros e, por consequência, das variáveis de qualidade da água. Desta forma, o modelo foi calibrado para

três tipos de anos hidrológicos (médio, seco e úmido) e, em cada ano hidrológico, a calibração foi efetuada para cada trimestre do ano. Criaram-se assim doze conjuntos de parâmetros capazes de proporcionar uma representação adequada a situações hidrológicas e climatológicas distintas, o que é necessário em simulações de séries longas efetuadas para fins de planejamento. Os principais parâmetros utilizados na calibração do modelo assim como o intervalo típico de variação dos seus valores são apresentados na Tabela 2. Alguns dos resultados da calibração são apresentados na Figura 13.

Para validação do modelo, o conjunto de parâmetros obtidos na calibração foi utilizado para simulação de anos diferentes daqueles utilizados na calibração. O objetivo foi mostrar que os resultados estariam situados dentro do mesmo intervalo estipulado como padrão para aceitação do modelo.

Tabela 2. Principais parâmetros utilizados na calibração do QUAL2E.

Variável	Descrição	Unidade	Faixa de Valores	Varia em cada Trecho	Depende da Temperatura
a ₅	Consumo de O ₂ para oxidação de amônia	$\frac{\text{mg} - \text{O}}{\text{mg} - \text{N}}$	3.0-4.0	Não	Não
a ₆	Consumo de O ₂ para oxidação de nitrito	$\frac{\text{mg} - \text{O}}{\text{mg} - \text{N}}$	1.0-1.14	Não	Não
s ₄	Taxa de deposição de nitrogênio orgânico	dia ⁻¹	0.001-0.1	Sim	Sim
s ₅	Taxa de deposição de fósforo	dia ⁻¹	0.001-0.1	Sim	Sim
K ₁	Coeficiente de desoxigenação	dia ⁻¹	0.02-3.4	Sim	Sim
K ₂	Coeficiente de reaeração	dia ⁻¹	0.0-100	Sim	Sim
K ₃	Coeficiente de deposição de DBO	dia ⁻¹	-0.36-0.36	Sim	Sim
K ₄	Demanda bentônica	$\frac{\text{mg} - \text{O}}{\text{ft}^2 - \text{dia}}$	Variável	Sim	Sim
K ₅	Taxa de mortalidade de coliformes	dia ⁻¹	0.05-4.0	Sim	Sim
b ₁	Taxa para oxigenação biológica de NH ₃ para NO ₂	dia ⁻¹	0.10-1.00	Sim	Sim
b ₂	Taxa para oxigenação biológica de NO ₂ para NO ₃	dia ⁻¹	0.20-2.0	Sim	Sim
b ₃	Coeficiente de hidrólise de N-orgânico para amônia	dia ⁻¹	0.02-0.4	Sim	Sim
b ₄	Coeficiente de decaimento de P-orgânico para P-dissolvido	dia ⁻¹	0.01-0.7	Sim	Sim

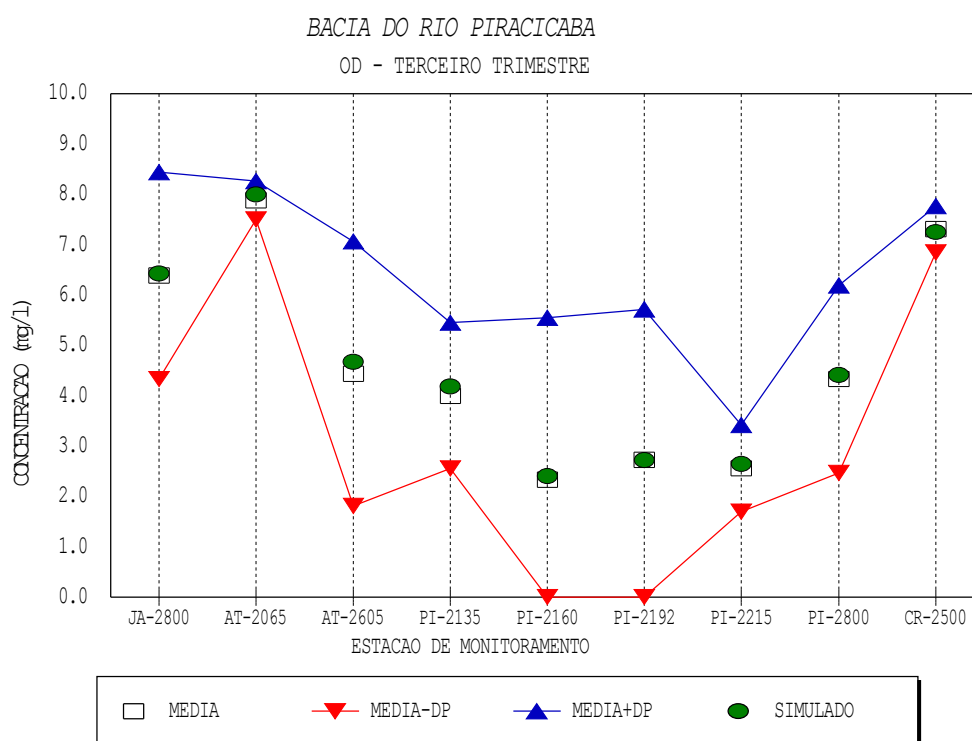
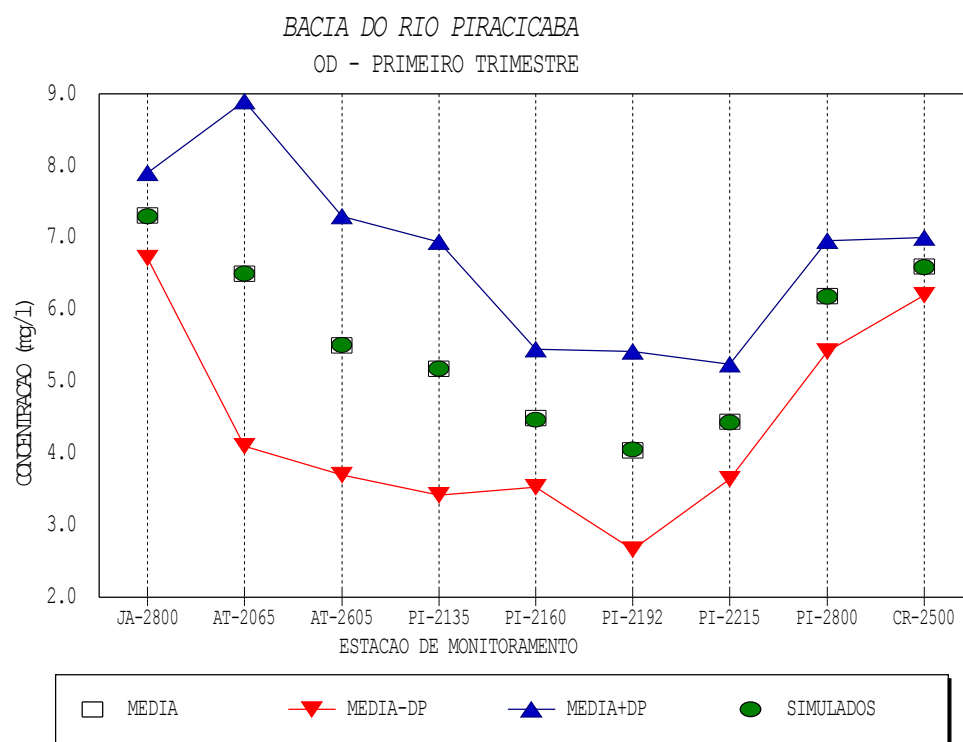


Figura 13. Gráficos de controle da calibração do QUAL2Z.

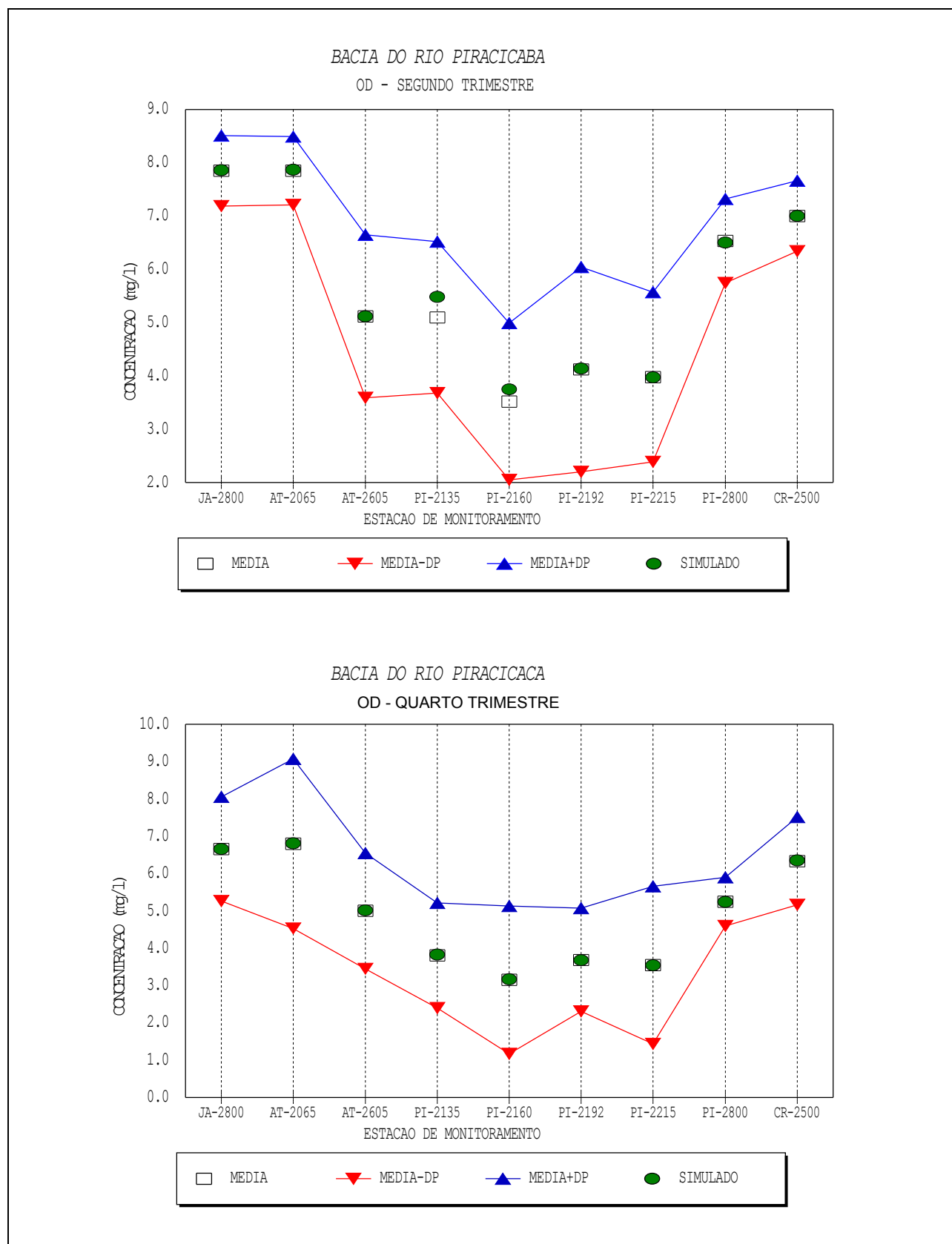


Figura 13. Gráficos de controle da calibração do QUAL2Z (continuação).

Aplicação do SAD e análise de resultados

A sequência de passos para utilização do SIQQ foi subdividida em quatro fases distintas. Inicialmente, seis cenários foram construídos representando diferentes combinações de operação do sistema Cantareira, aumentando-se as descargas de jusante e o nível de tratamento de efluentes na bacia. Depois da análise dos resultados provenientes deste primeiro conjunto de simulações, foram selecionadas duas alternativas que se revelaram superiores às demais. A segunda etapa envolveu a análise das alternativas selecionadas para condições projetadas para o ano 2010. A terceira fase foi direcionada à análise, em separado, da

operação dos reservatórios. Finalmente, a melhor alternativa de operação dos reservatórios foi combinada com a melhor alternativa de aumento de descargas de jusante e aumento de nível de tratamento para compor o cenário final de simulação.

Todas as alternativas foram desenvolvidas com base em planos já formulados ou considerados factíveis por diferentes grupos e agências no Estado de São Paulo. Para efeito de simplicidade, serão apresentadas aqui apenas o primeiro e o último grupo de alternativas consideradas. Para maiores detalhes recomenda-se o trabalho de Azevedo, 1994. As alternativas consideradas na primeira fase de simulação são apresentadas na Figura 14 e podem ser descritas, de maneira resumida, como segue:

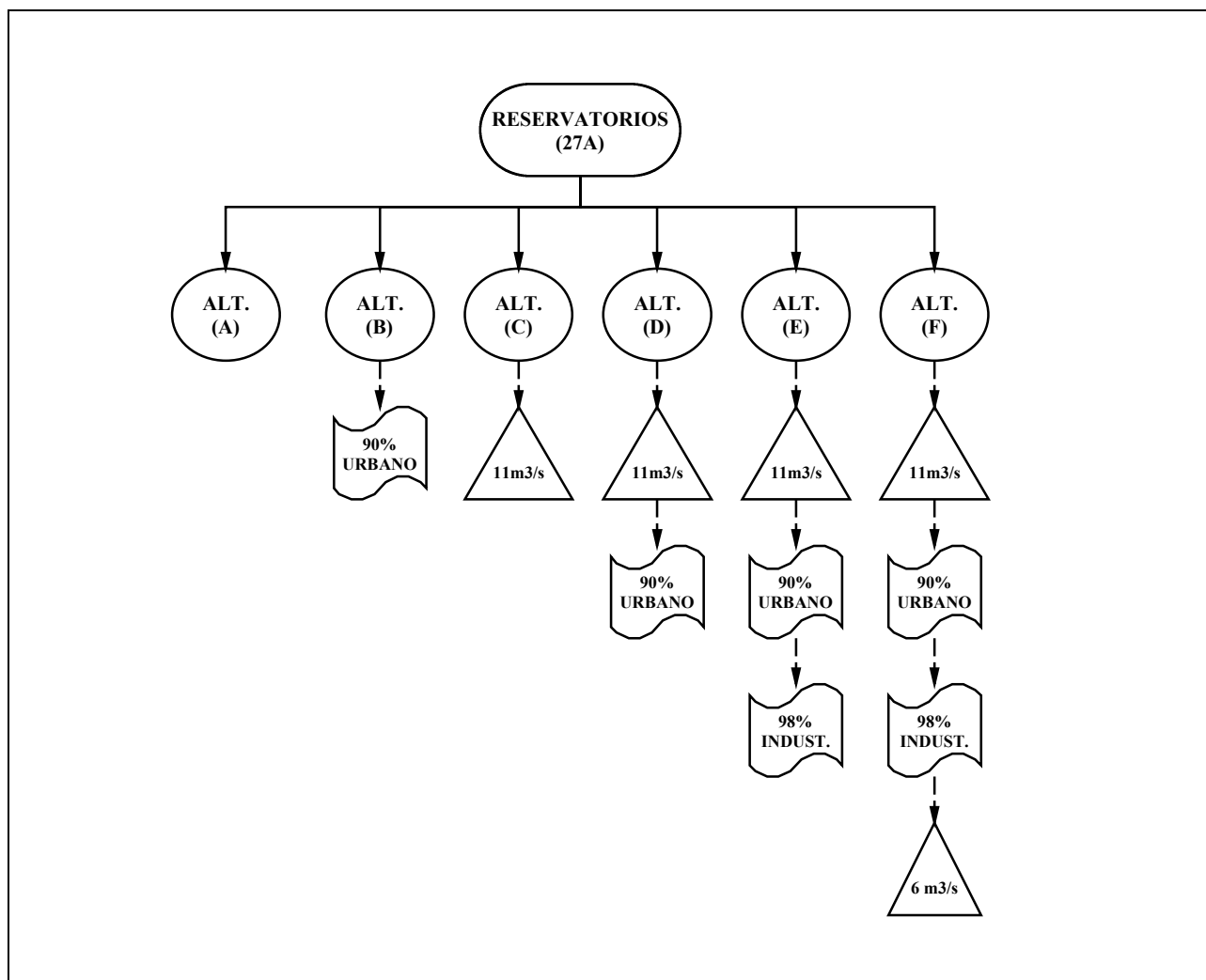


Figura 14. Conjunto inicial de cenários para utilização do SIQQ.

Alternativa (A). Esta alternativa é simplesmente a representação da situação atual sem nenhum aumento nos níveis de tratamento e com a derivação para São Paulo de 27 m³/s.

Alternativa (B). A segunda alternativa é semelhante a alternativa (A) porém inclui uma redução de 90% dos efluentes urbanos na bacia.

Alternativa (C). Esta alternativa não envolve aumento nos níveis de tratamento de efluentes mas considera a construção de um reservatório próximo a Monte Alegre que resultaria em um aumento de 11 m³/s na vazão de jusante.

Alternativa (D). É a combinação das alternativas (B) e (C).

Alternativa (E). É a alternativa (D) com o acréscimo no nível de tratamento de efluentes industriais do patamar atual de 95% para 98%.

Alternativa (F). É a alternativa (E) acrescida da construção de um segundo reservatório em um afluente de cabeceira do Rio Cachoeira, o que geraria 6 m³/s adicionais de vazão regularizada para jusante.

É importante salientar que o modelo leva em conta apenas a viabilidade técnica de cada alternativa e que considerações econômicas não fazem parte deste estudo. Os resultados foram comparados estatisticamente utilizando-se a média, desvio padrão, máximo, mínimo, amplitude e coeficiente de variação de cada um dos indicadores de performance. Parte dos resultados obtidos são apresentados nas figuras que seguem, que são o resumo de 250 simulações realizadas para cada alternativa. Os resultados dos indicadores de qualidade da água são expressos em gráficos que mostram os valores médio, máximo e mínimo estimados para cada caso. Os resultados da operação dos reservatórios foram também analisados seguindo o mesmo padrão. O trabalho de Azevedo (1994) é indicado para uma apresentação mais detalhada do conjunto completo de simulações.

Comparando-se as alternativas acima apresentadas, nota-se que as opções E e F são superiores às demais apresentando resultados considerados satisfatórios. Como ilustrado na Figura 15 as alternativas E e F apresentam um índice total de qualidade da água ($IQA(t)$) superior às demais, com uma média em torno de 0.81. O gráfico da Figura 16 mostra que estas alternativas também apresentam um menor valor da função composta de violação de standards (Ω) que combina a frequência e a magnitude dos desvios entre os valores simulados e os padrões estabelecidos pelo usuário. A uniformidade temporal (U_t) mostra que as alternativas E e F apresentam uma variação inferior a das outras o que significa que os benefícios associados com a melhoria na qualidade da água são distribuídos de maneira mais uniforme durante todos os meses do ano. A mesma tendência está evidenciada na análise dos valores do indicador de uniformidade espacial (U_e) o que indica que os benefícios associados a melhoria da qualidade da água são uniformemente distribuídos por toda a bacia. Finalmente as alternativas E e F apresentam um índice de confiabilidade superior ao das outras alternativas, com uma média em torno de 61% e 70% respectivamente. Estes valores indicam que para alternativa F os valores das cinco variáveis de qualidade da água são iguais ou superiores aos padrões pré-estabelecidos, em todos os nove pontos de controle da bacia, durante 70% do tempo.

Na análise do desempenho dos reservatórios do sistema Cantareira foram analisadas diversas políticas de operação variando as prioridades de transferência entre reservatórios, descargas para jusante e reversão para São Paulo. Em todas procurou-se manter vazões mínimas legais em Paulínea e Piracicaba, além de reverter no mínimo 27 m³/s para São Paulo. A alternativa 27A apresentou maior proximidade do volume desejável nos reservatórios e maiores descargas a jusante, uma vez que se ateu a manter a reversão mínima de 27 m³/s. Esta alternativa foi melhorada através de um refinamento na operação do sistema para o desenvolvimento da alternativa 27NR que apresentou resultados bastante satisfatórios em termos de confiabilidade, vulnerabilidade e elasticidade.

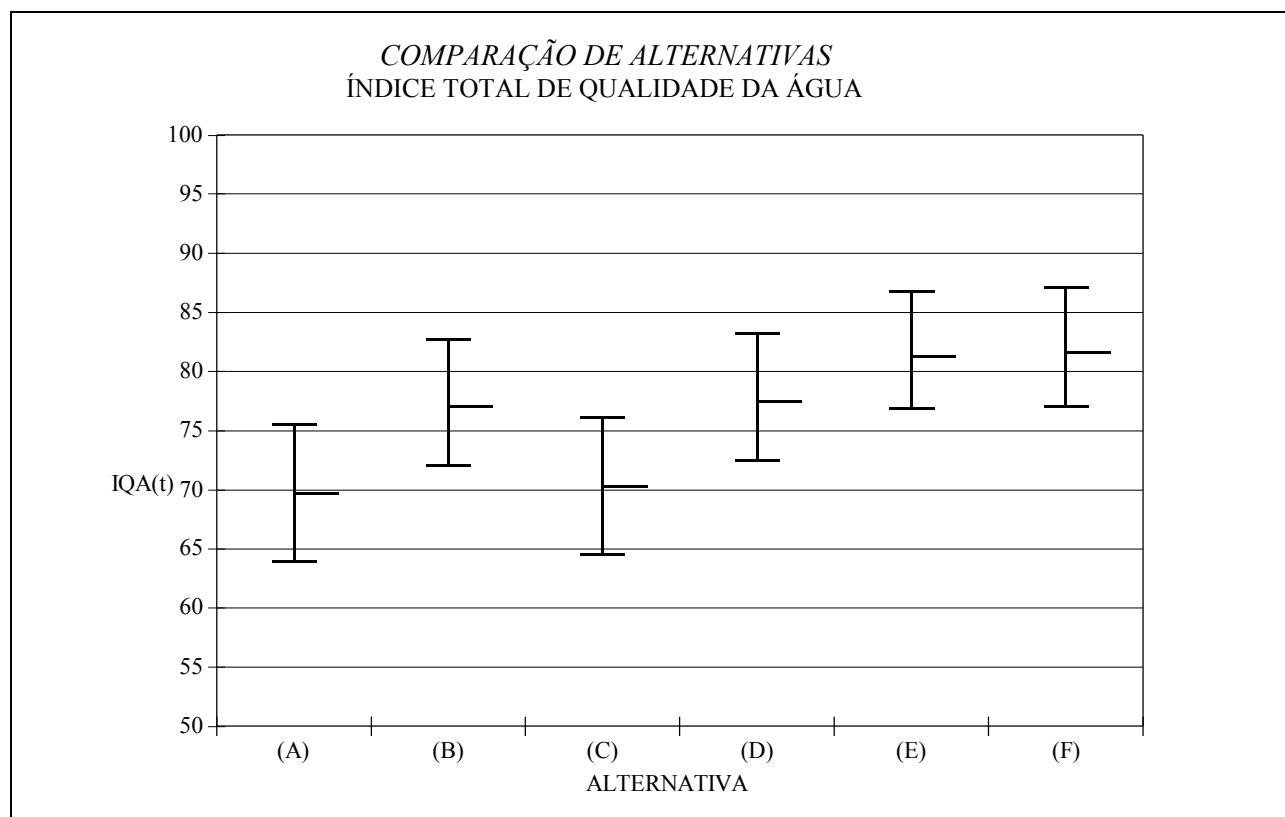


Figura 15. Índice de qualidade total da água para diferentes alternativas.

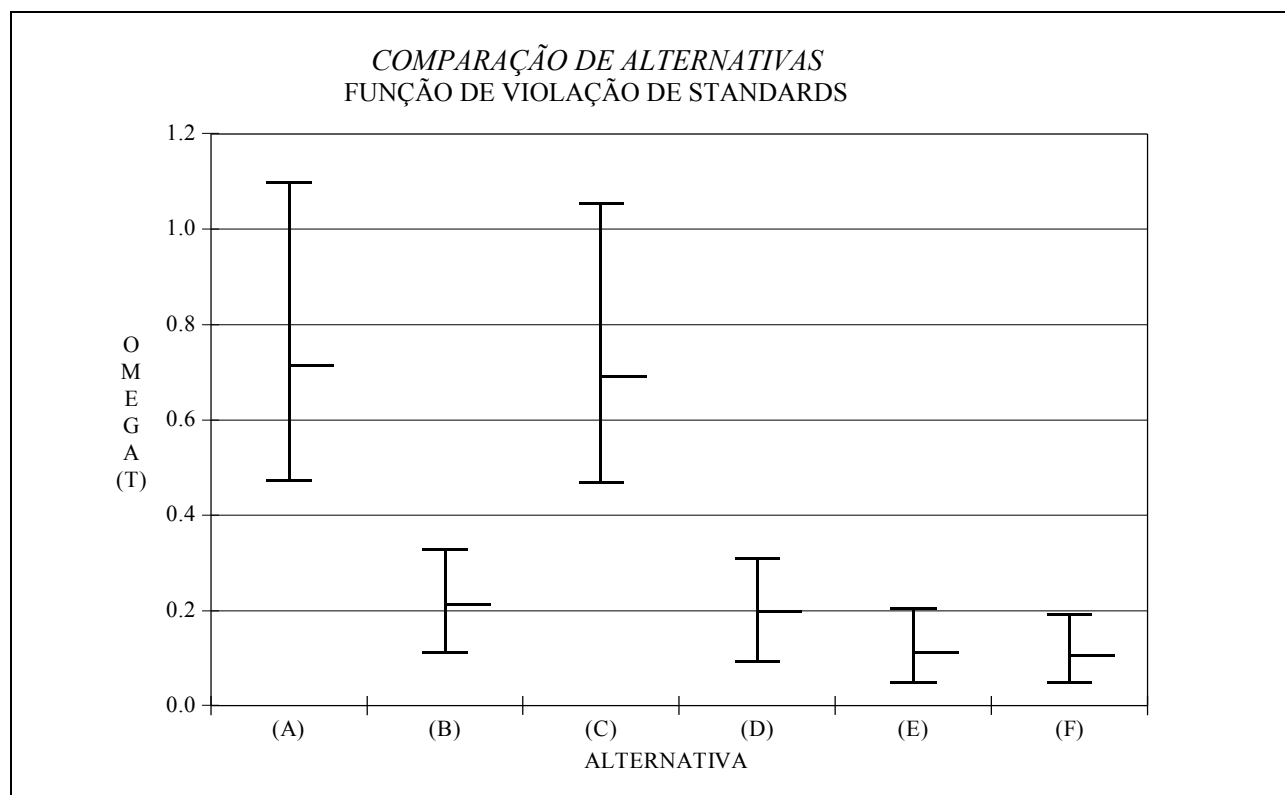


Figura 16. Violação composta de standards para diferentes alternativas.

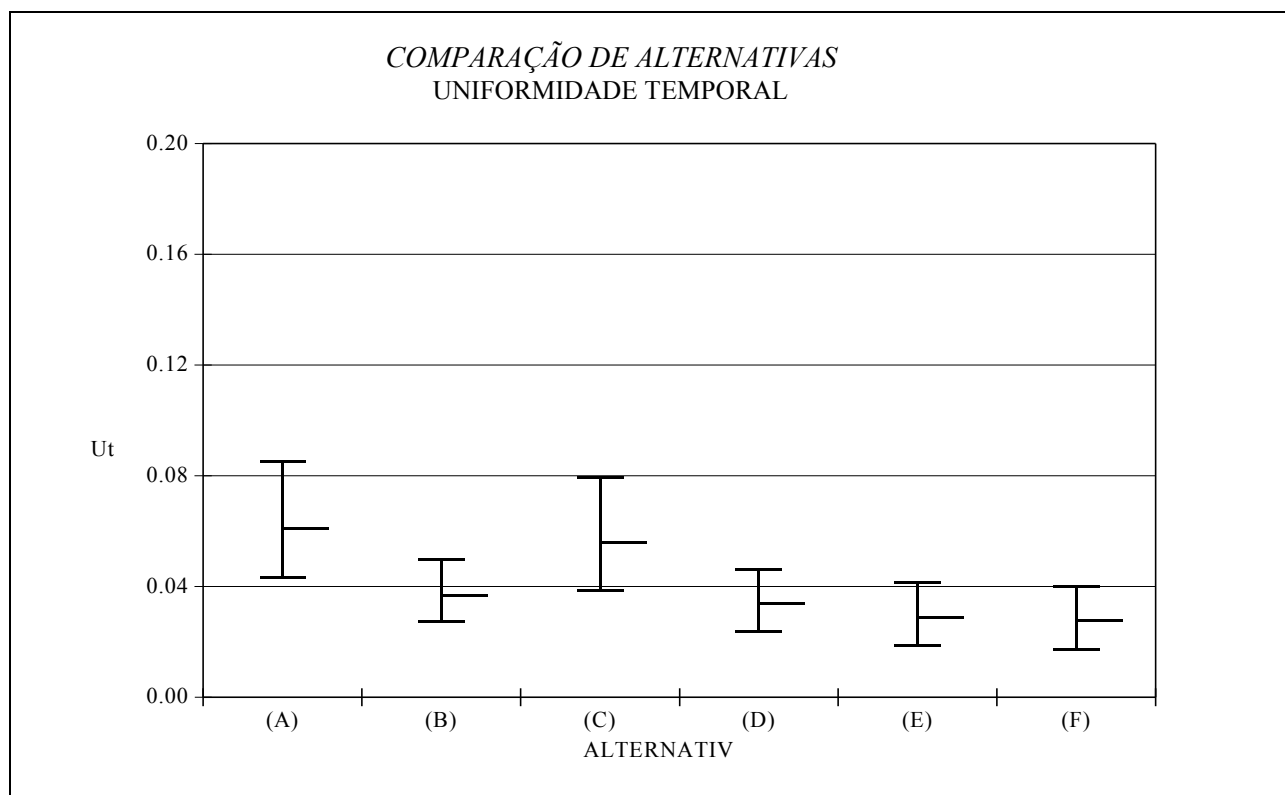


Figura 17. Uniformidade temporal (U_t) para diferentes alternativas.

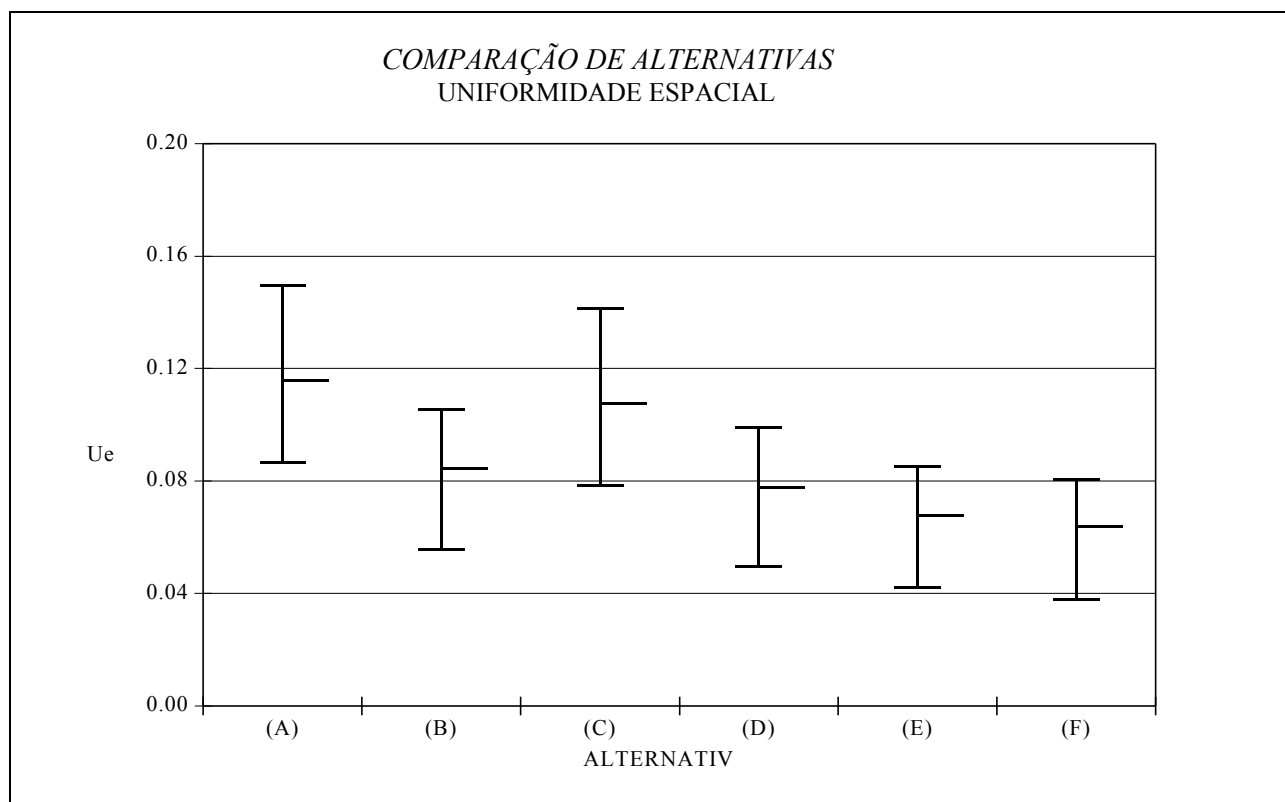


Figura 18. Uniformidade espacial (U_e) para diferentes alternativas.

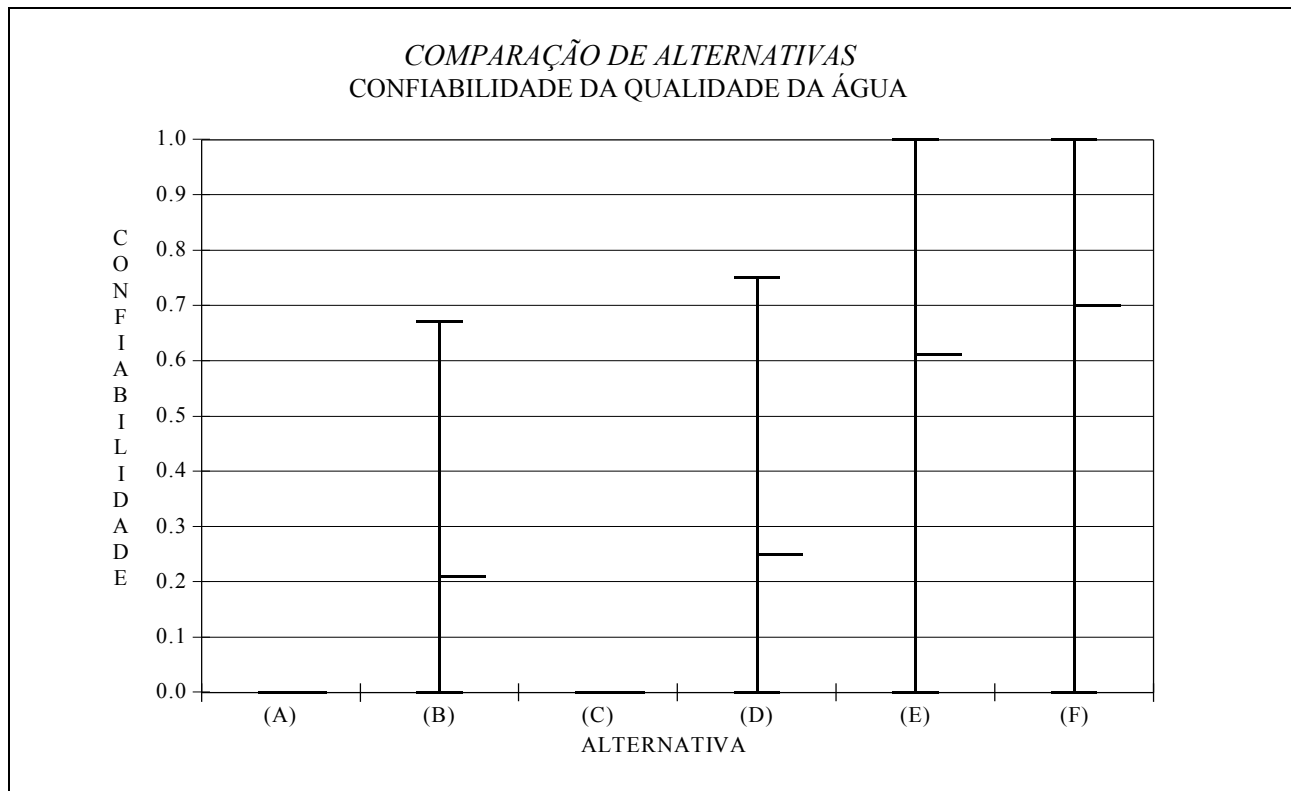


Figura 19. Confiabilidade para diferentes alternativas.

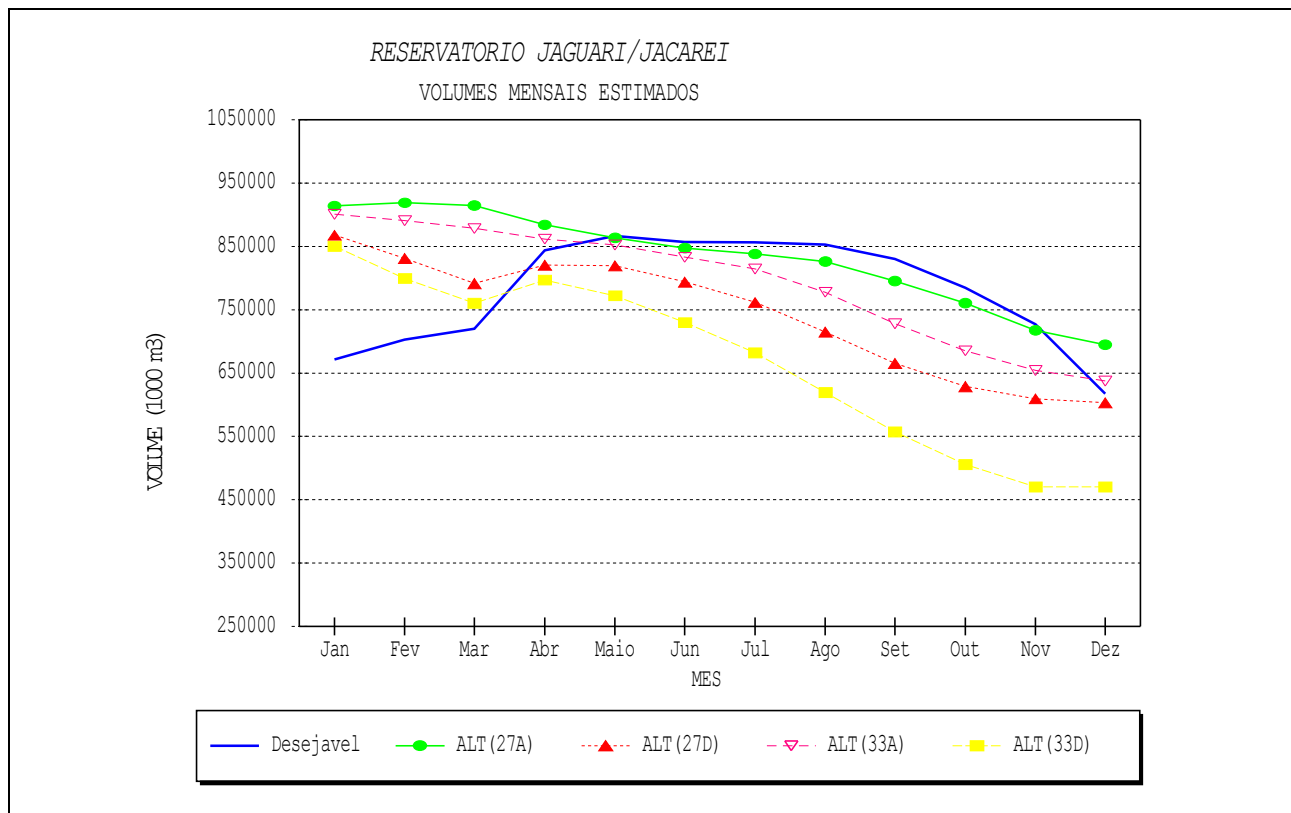


Figura 20. Volumes armazenados para diferentes alternativas.

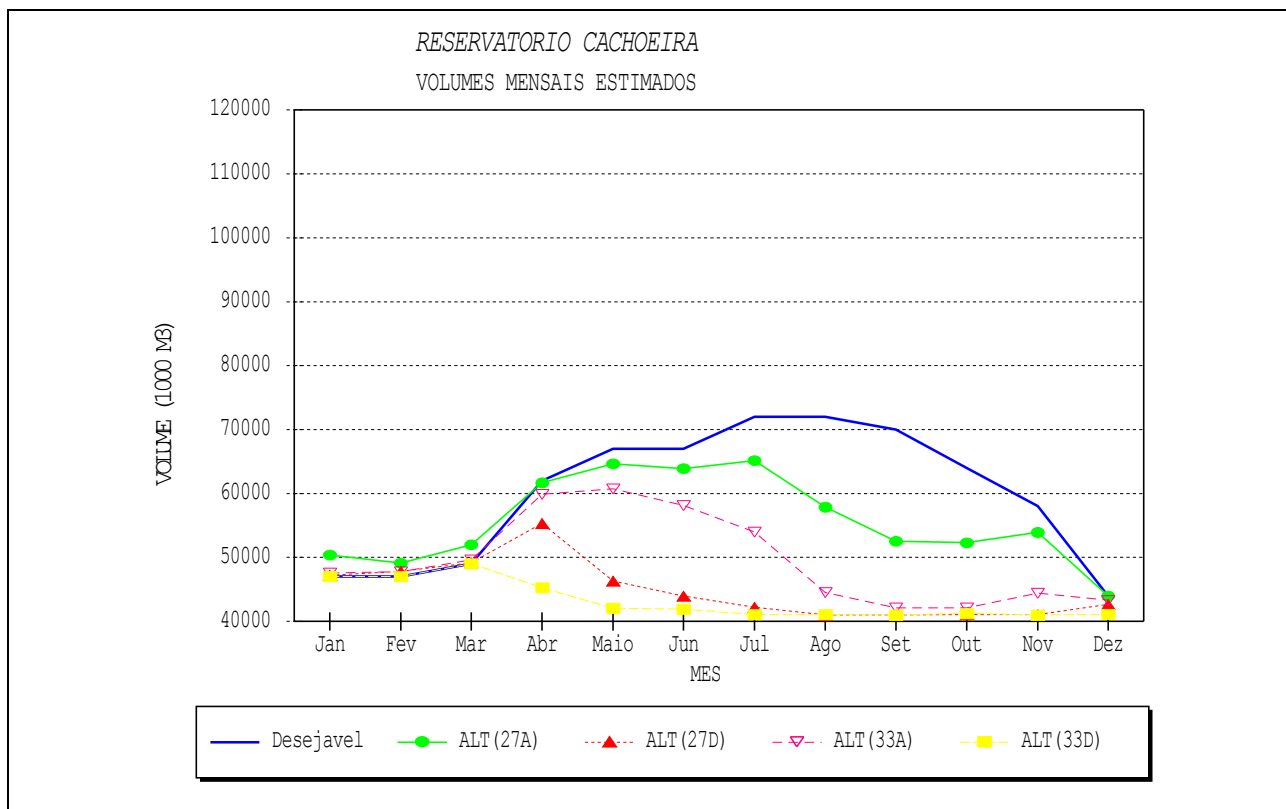


Figura 21. Volumes armazenados para diferentes alternativas.

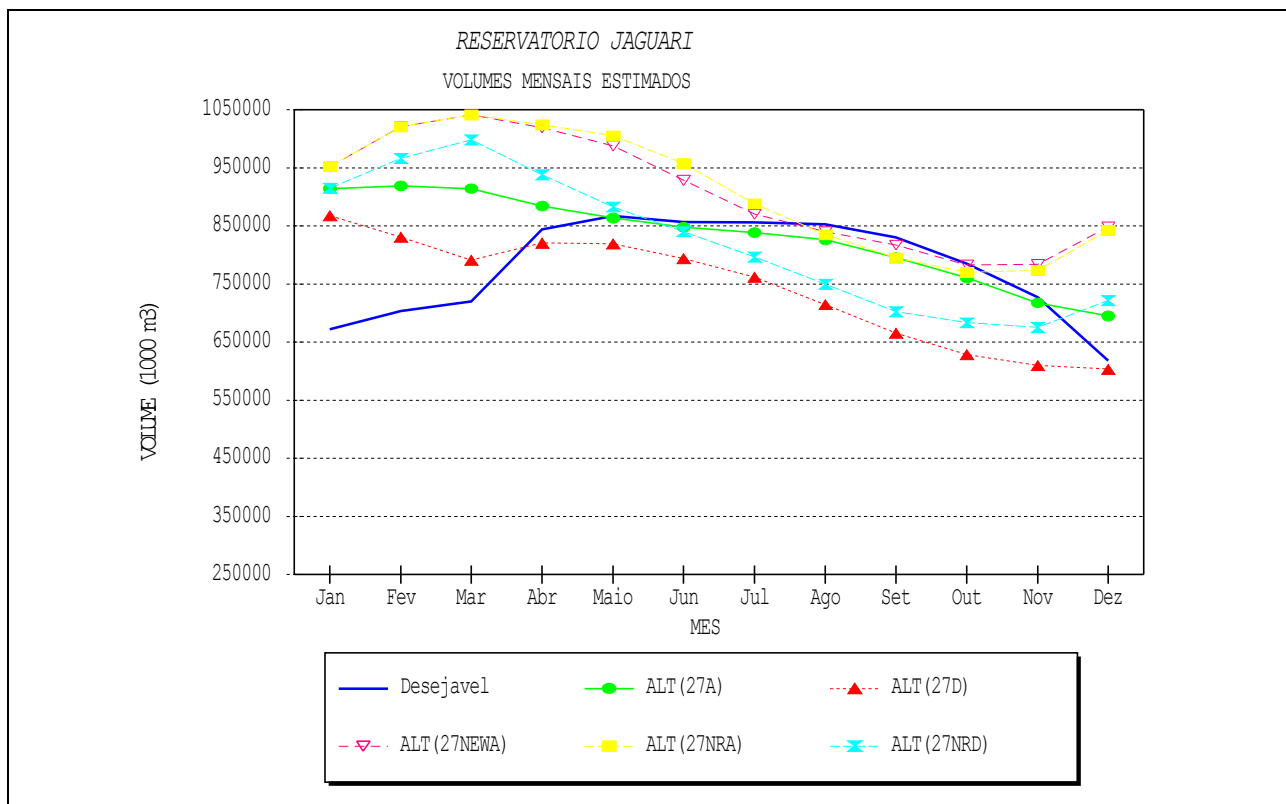


Figura 22. Volumes armazenados para diferentes alternativas.

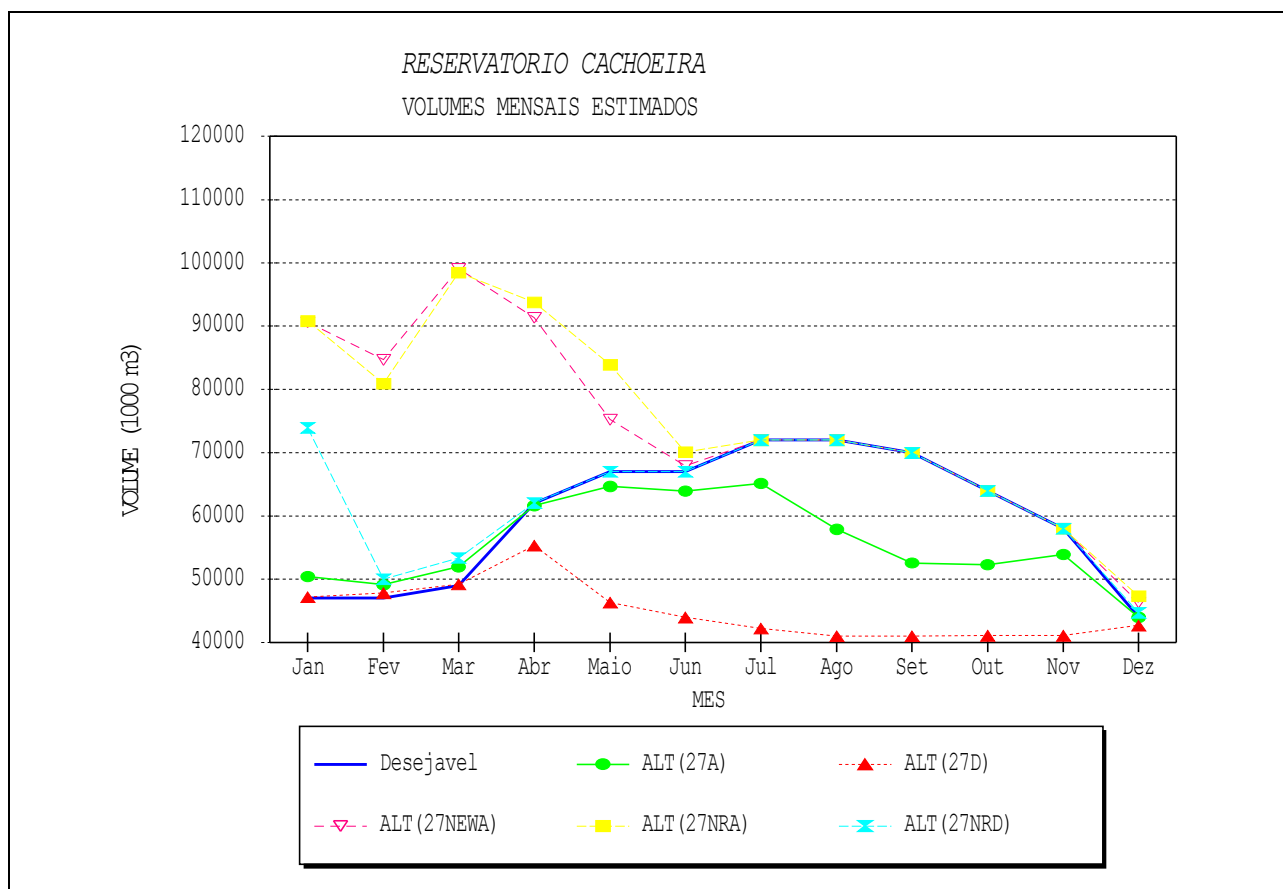


Figura 23. Volumes armazenados para diferentes alternativas.

A escolha da melhor alternativa deve obedecer um processo bem planejado no qual a comparação entre os indicadores de performance representa papel importante. Neste caso, era de se esperar que as alternativas E e F apresentassem resultados superiores às demais o que ficou evidenciado na comparação de praticamente todos os indicadores de performance. Porém em situações em que as alternativas analisadas envolvem uma relação de troca mais significativa entre aumento de nível de tratamento e aumento da oferta de água, podem ocorrer casos em que os valores de alguns indicadores para uma das alternativas sejam claramente superiores enquanto outros sejam nitidamente inferiores às demais opções consideradas. Em casos muito complexos, pode-se até utilizar um modelo complementar de avaliação de critérios múltiplos ou um sistema especialista para auxiliar os usuários na escolha da melhor alternativa.

No estudo de caso do Piracicaba, após uma análise detalhada dos resultados intermediários de cada fase, uma alternativa final foi estabelecida que combina a alternativa (F) anteriormente descrita com uma operação do sistema Cantareira impondo-se uma derivação de $27 \text{ m}^3/\text{s}$ para São Paulo e tratamento secundário de efluentes em 6 trechos da Bacia. Esta alternativa chamada de alternativa (G) é representada na Figura 24. Na Figura 25 é apresentado um resumo da melhoria alcançada nos resultados de qualidade da água entre algumas das melhores alternativas e a alternativa A (situação atual). Nota-se que através da utilização do SAD foi possível a formulação de cenários considerados aceitáveis em um espaço de tempo bastante curto e a um custo baixo. Isto ilustra o benefício oferecido por estes sistemas para os responsáveis pelo gerenciamento de sistemas complexos de aproveitamento de recursos hídricos.

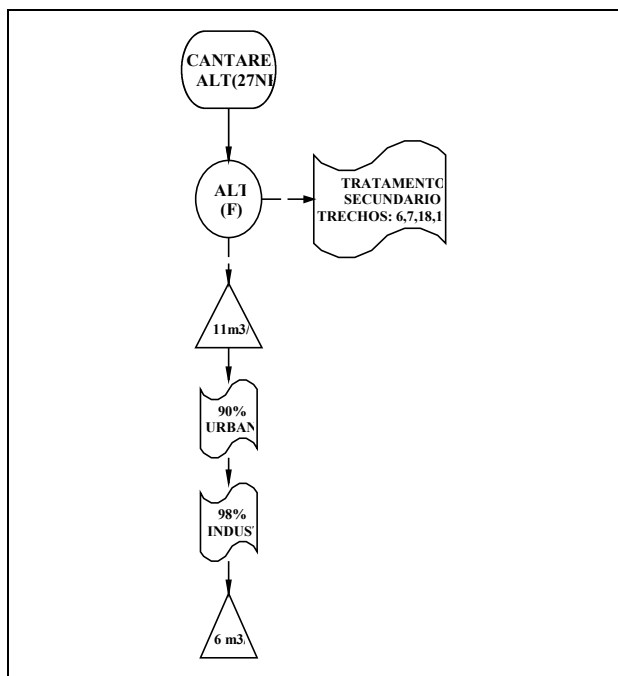


Figura 24. Representação esquemática alternativa G.

Na Figura 26 são apresentados a média e o coeficiente de variação dos valores de confiabilidade de qualidade da água para toda a bacia. É importante chamar a atenção do leitor para a redução significativa que ocorre no coeficiente de variação, ao mesmo tempo em que se observa um aumento expressivo na média deste parâmetro. Esta combinação de fatores facilita a interpretação e a escolha da melhor alternativa uma vez que a média mais alta é acompanhada pelo coeficiente de variação mais baixo. Em casos nos quais um aumento na média é acompanhado por uma elevação no valor do coeficiente de variação do parâmetro considerado, torna-se mais difícil determinar se houve uma melhoria efetiva nos resultados.

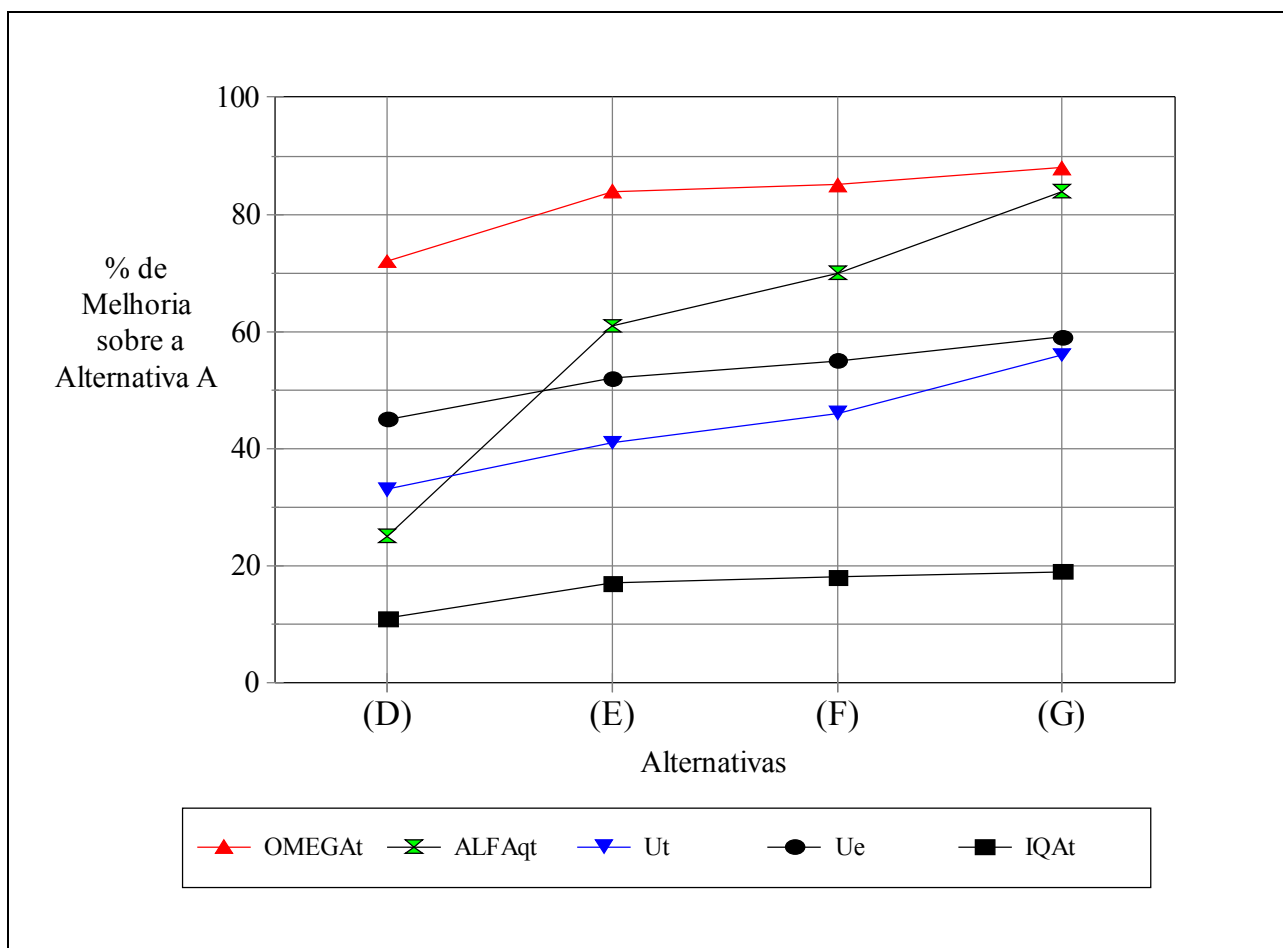


Figura 25. Melhoria dos indicadores de performance para as diversas alternativas.

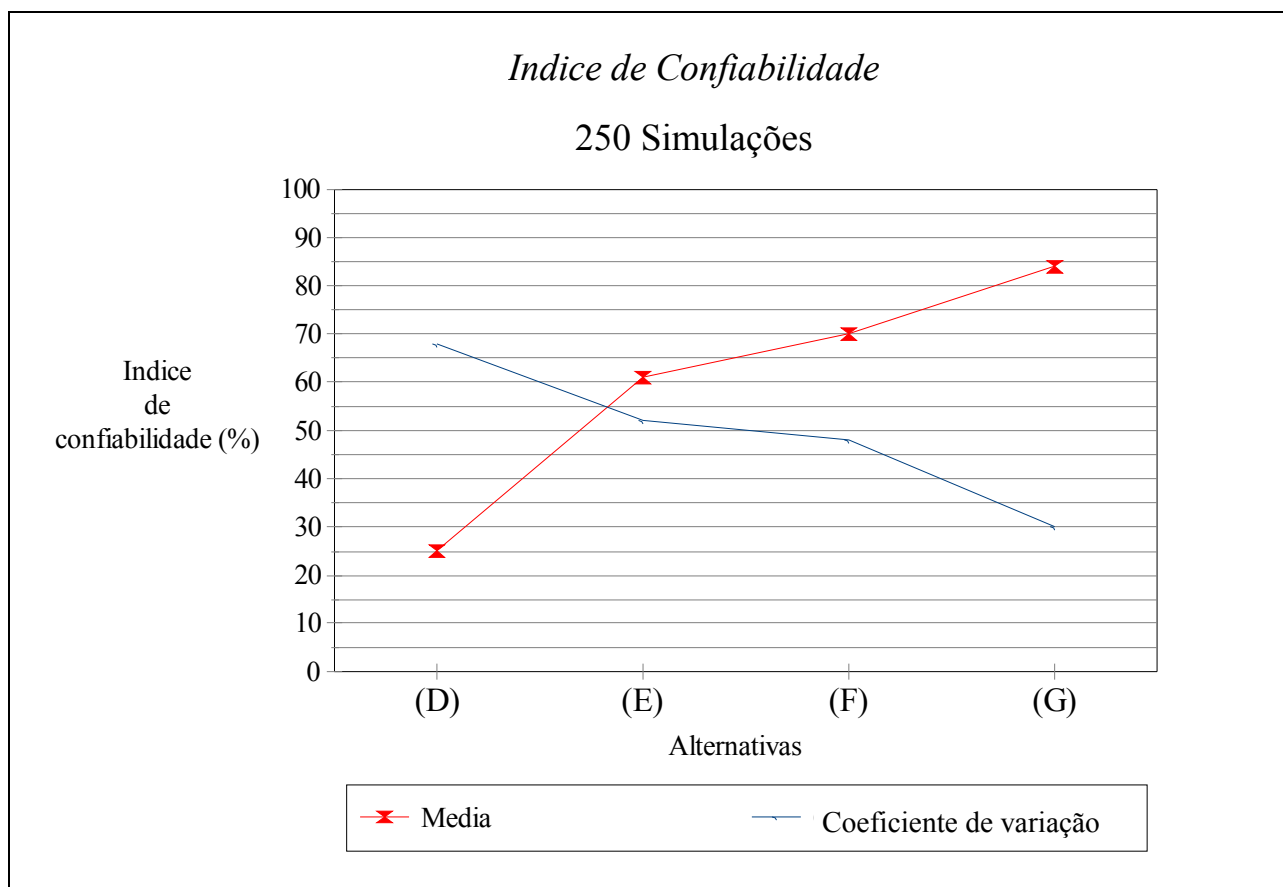


Figura 26. Média e coeficiente de variação.

CONCLUSÕES

Os resultados alcançados no presente estudo demonstraram a versatilidade e o potencial de sistemas de apoio a decisão como instrumento de suporte para o gerenciamento integrado de recursos hídricos em situação complexa como a da bacia do Piracicaba. A utilização de um SAD como SIQQ permite a consideração e análise de um vasto número de alternativas e cenários estratégicos em um tempo reduzido e a um custo bastante baixo. A metodologia oferece aos encarregados da tomada de decisão a possibilidade de escolher, para estudos mais detalhados de viabilidade técnica e econômica, aquelas alternativas que apresentam um maior potencial em produzir os resultados que se deseja alcançar.

No caso particular da Bacia do Piracicaba foi demonstrado pelo estudo que “*diluição não é solução*” ou seja, que o

aumento de descargas a jusante do sistema Cantareira através da construção de barragens (alternativa C) não será suficiente para resolver o problema da deterioração da qualidade da água na bacia, e que será necessário um aumento substancial no nível de tratamento de efluentes urbanos assim como manter elevados níveis de tratamento de efluentes industriais.

REFERÊNCIAS

- AZEVEDO, L. G. T., “Integration of Water Quantity and Quality in MultiSector River Basin Planning”, Tese de Doutorado, Colorado State University, Fort Collins, Co, 1994.
- AZEVEDO, L. G. T., GATES, T. K. e FONTAE, D. G., “Integration of Water Quantity and Quality in Multi-Sector River Basin Planning”, ASCE Water Resources Planning and Management Division, 21st Annual Conference, Denver, Co, May 23-26, 1994.

- ARNOLD, U. and ORLOB, G. T., "Decision Support System for Estuarine Water Quality Management", *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 115, No. 6, November 1989.
- BROWN, L. C., "Uncertainty Analysis in Water Quality Modeling Using QUAL2E", *Systems Analysis in Water Quality Management*, Proceedings of IAWPRC Symposium held in London, U. K., June 1987.
- CAMARA, A. S., SILVA, M. C., RODRIGUES, A. C., REMEDIO, J. M., CASTRO, P. P., and OLIVEIRA, M. J., "Decision Support System for Estuarine Water Quality Management", *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 116, No. 3, May/June 1990.
- GRAHAM, L., LABADIE, J., HUTCHINSON, I., and FERGUSON, K., "Allocation of Augmented Water Supply Under a Priority Water Rights System", *Water Resources Research*, Vol. 22(7), pp. 1083-1094, 1986.
- HASHIMOTO, T., STEDINGER, J. R., and LOUCKS, D. P., "Reliability, Resiliency, and Vulnerability Criteria for Water Resource System Performance Evaluation", *Water Resources Research*, Vol. 18, No. 1, pp. 14-20, February 1982.
- HAYES, D. F., "Operating Multireservoir Hydropower Systems for Downstream Water Quality", *Ph. D. Dissertation*, Department of Civil Engineering, Colorado State University, Fort Collins, CO, 1990.
- LABADIE, J. W., *Program MODSIM, River Basin Network Flow Model for the Microcomputer*, Department of Civil Engineering, Colorado State University, Fort Collins, Co., 1988.
- SANDERS, T. G., WARD, R. C., LOFTIS, J. C., STEELE, T. D., ADRIAN, D. D., YEVJEVICH, V., "Design of Networks for Monitoring Water Quality", *Water Resources Publication*, Littleton, CO, 1983.
- SHAFFER, J. M., LABADIE, J. W., and JONE, E. B., "Analysis of Firm Water Supply under Complex Institutional Constraints", *Water Resources Bulletin*, AWRA, Vol. 17, No. 3, June 1981.

Decision Support for Integrated Management of Water Quantity and Quality: Methodology and Case Study

ABSTRACT

This paper describes the development of a decision support system (DSS) for the integration of water quantity and quality objectives in the management of water resources systems. The methodology involves the separation of quantity and quality aspects into distinct sub-problems which must be solved simultaneously through iteration between them. The DSS combines a surface water quality model (QUAL2E) and a network flow model (MODSIM) within a user friendly interface. Through stochastic simulation, the DSS allows for the estimation of probability of occurrence of forecasted outputs. A third module for the evaluation of results is composed of performance indicators specifically developed to facilitate the conjunctive analysis of quantity and quality objectives. To illustrate the potential of the approach, the model was adapted to the Piracicaba watershed in the state of São Paulo, one of the most complex in the country. The results indicate that the serious challenges facing the basin will require an increase in the level of treatment of both municipal and industrial effluents and a possible augmentation of water supply.