

AVALIAÇÃO DE IMPACTOS DE NOVAS TRANSPOSIÇÕES DE ÁGUAS PROPOSTAS PARA O RIO PARAÍBA DO SUL

Rafael Kelman^{1}; Tarcísio Castro²; Catherine Hallot³; André Dias Pinto⁴; Otávio Galdino⁵*

Resumo – Um modelo computacional para simulação de bacias hidrográficas foi utilizado para investigar os impactos de eventuais transposições de água da bacia do Paraíba do Sul para o abastecimento da macrometrópole de São Paulo. O modelo representa peculiaridades da operação desta bacia e considera tanto os usos d'água atuais (2013) como aqueles esperados para os horizontes 2025 e 2035. Foi utilizado em projeto para a Associação Pró-Gestão das Águas da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul – AGEVAP.

Palavras-Chave – Gestão de recursos hídricos, transposição de vazão, modelos de simulação.

Abstract– A computational model for the simulation of hydrographic basins was utilized to investigate the impacts of eventual water diversions from the Paraíba do Sul basin to supply the large São Paulo metropolitan area. The model represents peculiarities of the operation of this basin and takes into account both present (2013) and future uses of water for the horizons 2025 and 2035. It was used in a project lead by AGEVAP – which is the managerial entity of the Rio Paraíba do Sul river basin.

EVALUATION OF IMPACTS OF NEW WATER DIVERSIONS BEING PROPOSED FOR THE PARAÍBA DO SUL RIVER

Keywords – Water resource management, water diversion, simulation models.

1 INTRODUÇÃO

Dentre as alternativas para aumentar nas próximas décadas a oferta hídrica da macro região metropolitana de São Paulo atualmente investigadas, existem algumas com arranjos de engenharia prevendo a retirada de água no Rio Paraíba do Sul. É o caso da transposição do reservatório de Jaguari (CESP) para o sistema Cantareira através do reservatório de Atibainha.

Neste trabalho quantificamos os impactos desta eventual retirada a jusante, por exemplo, a redução na confiabilidade do suprimento de água para o município do Rio de Janeiro, o aumento de violações de vazões mínimas ou a redução esperada na produção de energia do sistema Light e de outras empresas, como Furnas, com usinas hidroelétricas na bacia do Paraíba do Sul. Para esta avaliação são considerados os atuais e futuros (projetados) usos múltiplos de recursos hídricos na bacia. Uma representação topológica da bacia é feita. Os nós são utilizados para representar pontos de interesse, como a captação de água, reservatórios, usinas geradoras, estações de bombeamento pontos com indicação de restrições operativas específicas, por exemplo, para a manutenção de vazões mínimas. Estes nós são conectados por os arcos, sobre os quais também são possíveis restrições operativas ou regras específicas.

¹ PSR, rafael@psr-inc.com

² PSR, tarcisio@psr-inc.com

³ AMPLA10, catherine@chx.eco.br

⁴ PSR, dias@psr-inc.com

⁵ PRESERVE, otavio@galdinocampos.com.br

O modelo computacional é baseado na formulação de um problema de otimização com uma multi-estágio (uma decisão tomada num estágio influencia as decisões dos estágios subsequentes). A metodologia consistem essencialmente em (i) uma representação da topologia atual, seus usuários, regras operativas, restrições, etc. (ii) a construção de um cenário de uso dos recursos hídricos (consuntivos ou não) na bacia; (iii) a formulação de um modelo matemático para a simulação da bacia hidrográfica; (iv) estudos de caso com a quantificação dos impactos na bacia de transposições de vazões do Paraíba do Sul para o atendimento à macro metrópole paulista, sendo esta análise conduzida para diferentes momentos no tempo (ex. atual, 2025) e para diferentes alternativas de transposição. Cenários hidrológicos são utilizados para quantificar probabilisticamente os impactos.

2 METODOLOGIA

Balanco hídrico e armazenamento - Para cada nó do sistema escreve-se uma equação de equilíbrio de massa, que estabelece que a variação do volume estocado (positiva ou negativa) é dada pela diferença entre os volumes afluentes e os volumes defluentes, incluindo evaporação.

$$V_{i,t+1} + \sum_{k \in S^-(i)} Q_{k,t} - \sum_{k \in S^+(i)} Q_{k,t} + E(V_{i,t}) = V_{i,t} + I_{i,t} - U_{i,t} \quad i \in R, t \in T \quad (1)$$

Onde $V_{i,t+1}$ é o volume no reservatório i no estágio $t+1$. N é o conjunto de nós, $R \in N$ é o conjunto dos nós com reservatório, A é o conjunto de arcos, Q é o volume afluente nos arcos que chegam / partem para/de nó i e $I_{i,t}$ é o volume natural incremental ao nó i . O uso consuntivo no nó i é dado por $U_{i,t}$ e $E(V_i)$ é o volume evaporado no nó i , sendo uma função da área molhada (curva área x volume) e dos coeficientes mensais de evaporação no reservatório [mm/mês]. Balanco hídrico para nós sem reservatórios.

As restrições de volume armazenado máximo são auto-explicativas.

$$V_{i,t} \leq \bar{V}_i \quad i \in R \quad (2)$$

Existem ainda restrições sobre volumes mínimos operativos e volumes de espera para alguns reservatórios. São modeladas por:

$$V_{k,t} + \Delta Ale_{k,t}^- \geq \underline{VAle}_{k,t} \quad k \in N, t \in T \quad (3)$$

$$V_{k,t} - \Delta Esp_{k,t}^+ \leq \overline{VEsp}_{k,t} \quad k \in N, t \in T \quad (4)$$

Onde $VAle$ é o volume de mínimo operativo (hm^3) e $VEsp$ o volume para amortecimento de cheias do reservatório (hm^3).

Vazões mínimas - As regras de operação para o Rio Paraíba do Sul estabelecem prioridades para o enchimento/ esvaziamentos dos reservatórios de cabeceira (Paraibuna, Santa Branca, Jaguari e Funil). Existem curvas limites que definem frações do volume útil, sendo que necessariamente C . A prioridade de enchimento é em ordem crescente dos volumes armazenados: reservatórios mais vazios serão os primeiros a armazenar água. A prioridade de esvaziamento é em ordem decrescente: reservatórios mais cheios são os primeiros a esvaziar. No caso dos reservatórios estarem na mesma faixa operativa, uma tabela informada pelo usuário estabelece um critério de desempate. Variáveis de decisão binárias são incluídas na formulação de maneira a permitir a ocorrência de armazenamento / esvaziamento dos reservatórios. Por limitação de espaço, detalhes específicos da modelagem da bacia do Paraíba do Sul não serão apresentados neste artigo.

O fluxo volumétrico de cada arco pode ser limitado inferiormente ou superiormente, por exemplo, para atender restrições de segurança, defluências mínimas para controle de poluição, ou para atender restrições de consumo de água. Como, fisicamente, não se pode garantir o atendimento destas restrições, são definidas *variáveis de folga* ΔQ_k^+ e ΔQ_k^- , que medem quanto estas restrições estão sendo violadas. As variáveis de folga são penalizadas na função objetivo do problema. O custo unitário das penalizações é definido de maneira a respeitar a prioridade pelo uso da água, quando diferentes restrições são conflitantes, isto é, não podem ser respeitadas *conjuntamente*. De maneira equivalente as violações para vazão máxima e mínima, existem variáveis de folga ΔAle_k^- e ΔEsp_k^+ medem o quanto as restrições associadas aos volumes de espera e de mínimo operativo estão sendo violadas, e são penalizadas da mesma forma que as anteriores na função objetivo. Os fluxos volumétricos máximos e mínimos são definidos como:

$$Q_{k,t} - \Delta_{k,t}^+ \leq \overline{Q}_k \quad k \in A, t \in T \quad (5)$$

$$Q_{k,t} + \Delta_{k,t}^- \geq \underline{Q}_k \quad k \in A, t \in T \quad (6)$$

Para os arcos de produção, o valor do engolimento máximo será automaticamente calculado como a razão entre a potência instalada da usina e seu fator de produção.

No caso de Santa Cecília, existem dois valores para fluxos volumétricos mínimos: um associado ao bombeamento e outro à descarga mínima a jusante para o do Rio Paraíba do Sul. Estes valores, ao contrário dos valores dos demais arcos, não são constantes. A vazão objetivo em Santa Cecília é de 250 m³/s, sendo 160 m³/s bombeados para a vertente Atlântica da Serra do Mar, e 90 m³/s para garantia da defluência mínima a jusante. Em condições hidrológicas críticas (quando o reservatório equivalente encontra-se abaixo da curva limite) busca-se garantir uma vazão meta em Santa Cecília de 190 m³/s, sendo 71 m³/s para defluência mínima e 119 m³/s para bombeamento na UEL Santa Cecília. Este valor foi mantido na Resolução nº 211/2003 da Agência Nacional de Águas (ANA).

Produção de energia - A produção/consumo de energia, quando aplicável, é obtida multiplicando-se a produtibilidade ρ_i (MWh/hm³) pelo fluxo volumétrico de água no arco (hm³). O modelo trata a produção de energia como um benefício na função objetivo, descontando das “Penalidades totais” uma parcela devido à energia produzida. As equações que regem a produção de energia do modelo são as seguintes:

$$\rho_i \cdot Q_{i,t} \leq P_i \quad i \in G, t \in T \quad (7)$$

Para o caso de estações de bombeamento, o valor ρ_i é um valor negativo. Após o término da execução, o modelo recalcula a produção de energia para a mesma quantidade de água turbinada, somente refinando o fator de produção utilizado, que será calculado através do polinômio cota x volume e da curva chave do canal de fuga.

Função objetivo - A função objetivo minimiza a soma das penalizações decorrentes das violações dos fluxos volumétricos mínimos e máximos nos arcos da rede, e das penalizações decorrentes das violações dos volumes de mínimo operativo e de espera dos reservatórios.

$$Z = \text{Min} \sum_t \left(\sum_k (c_k^+ \Delta_{k,t}^{2+} + c_k^- \Delta_{k,t}^{2-}) + \sum_j (c_j^+ \Delta \text{Esp}_{j,t}^{2+} + c_j^- \Delta \text{Ale}_{j,t}^{2-}) - p_1 \sum_j (V_{j,t}) - p_2 \sum_i (\rho_i Q_{i,t}) \right) \quad (8)$$

Onde k é o índice de arcos, t é o índice dos estágios, c_k^+ , c_k^- , c_j^+ , c_j^- são penalizações associadas aos arcos (índice k) e nós (índice j) e i é o índice de nós de geração de energia. Por último p_1 é o benefício associado ao armazenamento de água nos reservatórios do sistema (unidades/hm³) e p_2 o benefício associado à produção de energia. Para as unidades de bombeamento, o benefício é um “custo” associado ao consumo de energia.

A formulação (1)-(8) caracteriza um problema de programação matemática quadrático-inteiro, que será utilizado no estudo dos impactos de eventuais transposições do rio Paraíba do Sul.

3. ESTUDO DE CASO

Dentre as doze alternativas constantes no Plano Diretor de Aproveitamento de Recursos Hídricos para a Macrometrópole Paulista elaborado pela empresa Cobrape (2010), seis contemplam retiradas do rio Paraíba do Sul entre 5,0 e 11,5 m³/s. Neste artigo concentraremos a análise neste último caso, com maior retirada d'água do Reservatório Jaguari (CESP) para o reservatório de Rio Atibainha do Sistema Canteira. A Figura 1 exibe topologia utilizada no estudo:

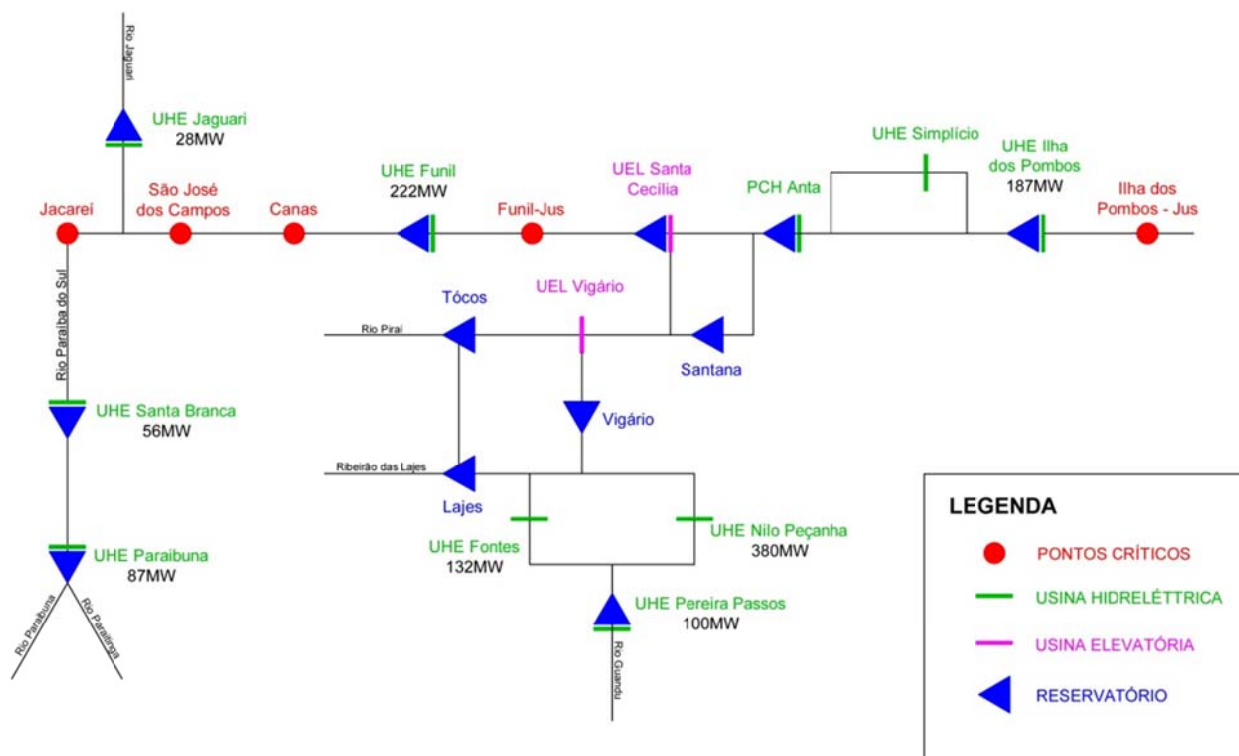


Figura 1: Topologia do Rio Paraíba do Sul

O modelo (1)-(8) foi utilizado para um horizonte de 12 meses com volume armazenado inicial de cada reservatório correspondente à realidade de Abril de 2013, de acordo a dados do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS). Condicionou-se em cada caso analisado que o armazenamento ao final do 12º mês correspondesse a pelo menos 30% da volume útil como condição limite para iniciar o próximo período seco.

Cada um dos quatro casos investigados (combinação de transposição (com/sem) e usos d'água (atuais e em 2035)) foram efetuadas 82 execuções do modelo (1)-(8), cada uma para um ano hidrológico diferente no intervalo 1931-2012. Esta abordagem permite o levantamento de curvas de permanência e a comparação probabilística dos impactos das transposições.

4. RESULTADOS

O uso múltiplo da água do rio Paraíba do Sul caracteriza-se fundamentalmente em atender a demanda de abastecimento humano e agropecuário, produção de energia elétrica e controle de cheias. Cabe ressaltar que o rio Paraíba do Sul possui duas transposições existentes, sendo a Região Metropolitana do Rio de Janeiro abastecida pelo sistema Light/Cedae, e a região do Baixo Paraíba do Sul com desvio em Campos dos Goytacazes para Lagoa Feia em canais. A primeira transposição é tratada como regra operativa em Santa Cecília, conforme resolução da ANA; e a segunda transposição inclui os municípios à área de drenagem.

No que consiste ao trecho junto à captação em Santa Cecília, percebe-se uma diferença importante entre a condição atual e após a transposição da ordem de 30 m³/s para uma permanência de 95%. A Figura 3 a seguir apresenta a cauda da curva de permanência das vazões afluentes à Santa Cecília em 2035. Este valor não se altera muito entre a condição atual e no futuro.

Ano dos usos d'água	Retirada d'água (m ³ /s)	Vazão (m ³ /s) do percentil 95%	Diferença (m ³ /s)
2010	0 (atual)	214,1	-30,3
	11,5 m ³ /s	183,8	
2035	0 (atual)	201,2	-29,9
	11,5 m ³ /s	171,3	

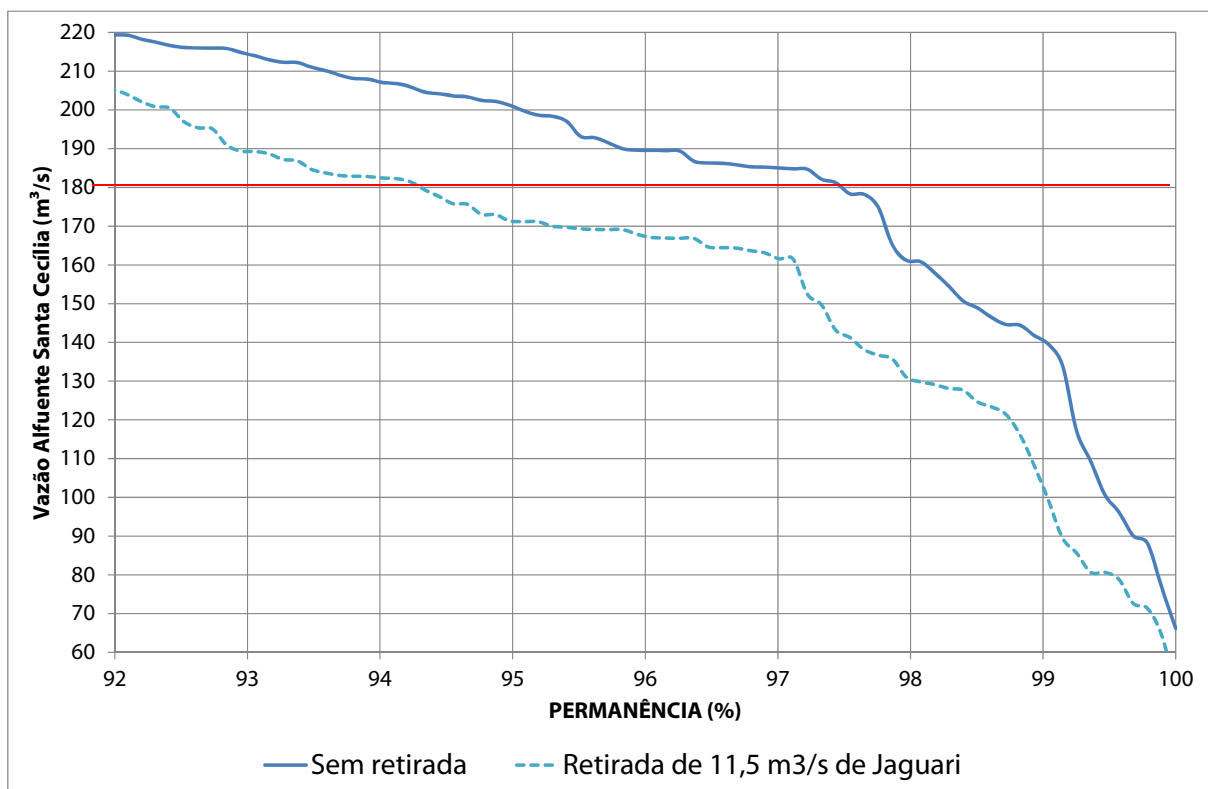


Figura 3: Curva de permanência das vazões afluentes a Santa Cecília em 2035

5. CONCLUSÕES

O artigo apresentou um modelo para a simulação desta bacia que foi utilizado para investigar os impactos sobre e uma eventual transposição de águas de até 11,5 m³/s. Foram investigadas diversas grandezas em diversos pontos da bacia. Por uma limitação de espaço, neste artigo concentramos os resultados nas vazões afluentes a Santa Cecília, que são críticas para o abastecimento de água do Rio de Janeiro e manutenção de condições ambientais mínimas no rio a jusante deste ponto. Observou-se uma redução da ordem de 30 m³/s da vazão afluente a este ponto para o percentil 95%. Outra forma de avaliar os impactos é comparar a violação da vazão mínima afluente a Santa Cecília (190 m³/s), que passa de 3,7% (hoje) para 7,2% (em 2035, considerando a

retirada d'água). As perdas energéticas, considerando apenas as usinas hidrelétricas acima de 30 MW, atingem 4% em 2035. Essas perdas energéticas representariam R\$ 20 milhões anuais de prejuízo para as geradoras.

A transposição de águas do Paraíba do Sul, como normalmente ocorre com casos envolvendo transposições no Brasil, é tema frequentemente tratado de forma ardorosa, com posições radicais pró/contra raramente calcadas em estudos técnicos com qualidade. Um exemplo recente foi a greve de fome do bispo da diocese de Barra, Dom Luiz Flávio Cappio, contrário à transposição do rio São Francisco.

Este artigo buscou contribuir através da formulação de um modelo computacional para a simulação da bacia do rio Paraíba do Sul, que foi utilizado para quantificar os impactos de uma transposição de águas sendo proposta. Os resultados foram apresentados e servem de diálogo entre os interessados no tema, sejam eles usuários, representantes de empresas de energia, municípios, governos de estado ou simples cidadãos.

6. REFERÊNCIAS

BANCO CENTRAL BRASILEIRO. *Pesquisa Focus semanal*. Brasília: BACEN, 2007.

CUMULATIVE EFFECTS ASSESSMENT. **Integrated Environmental Management Information Series**. South Africa: Department of Environmental Affairs and Tourism, 2005.

EPE-EMPRESA DE PLANEJAMENTO ENERGÉTICO/SONDOTÉCNICA – AVALIAÇÃO AMBIENTAL INTEGRADA DA BACIA DO RIO PARANAÍBA -2007/2008-

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA-NOS/AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS- Estimativa das Vazões para Atividades de Uso Consuntivo da Água nas Principais Bacias do

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Diretoria de Pesquisas, Coordenação de População e Indicadores Sociais. Gerência de Estudos e Análises da Dinâmica Demográfica. **Projeção da população do Brasil por sexo e idade para o período 1980-2050**. Revisão 2004. Brasília: IBGE, 2004.

"Caracterização Hidrogeológica da Bacia do Rio Paraíba do Sul no Estado de São Paulo", 2000, desenvolvido no âmbito do Projeto Qualidade das Águas e Controle da Poluição Hídrica na Bacia do Rio Paraíba do Sul (PQA);

BARRETO, A.B.C., MONSORES, A.L.M., LEAL, A.S., et al., 2000, *Caracterização Hidrogeológica do Estado do Rio de Janeiro*. In: Estudo Geoambiental do Estado do Rio de Janeiro, MME (Ministério de Minas e Energia), SMM (Secretaria de Minas e Metalurgia), CPRM (Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais), Brasília.

DAEE (Departamento de Águas e Energia Elétrica), 1979, *Estudos de Águas Subterrâneas – Região Administrativa 3 – São José dos Campos*, v. 1 – Resumo.