



Universidade Federal
do Rio de Janeiro

Escola Politécnica

AVALIAÇÃO DE OPERAÇÕES ALTERNATIVAS PARA A GESTÃO DE RECURSOS HÍDRICOS DA BACIA DO RIO PARAÍBA DO SUL

Monique de Barros Melo

Projeto de Graduação apresentado ao Curso de Engenharia Civil da Escola Politécnica, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Engenheiro.

Orientador: Tarcisio Luiz Coelho de Castro

Co-orientador: Jorge Henrique Alves Prodanoff

Rio de Janeiro
Setembro de 2017

AVALIAÇÃO DE OPERAÇÕES ALTERNATIVAS PARA A GESTÃO DE RECURSOS HÍDRICOS DA BACIA DO RIO PARAÍBA DO SUL

Monique de Barros Melo

PROJETO DE GRADUAÇÃO SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE DO CURSO DE ENGENHARIA CIVIL DA ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE ENGENHEIRO CIVIL

Examinado por:

Prof. Tarcisio Luiz Coelho de Castro

Prof. Jorge Henrique Alves Prodanoff

Prof. Heloisa Teixeira Firmo

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL
SETEMBRO de 2017

Rio de Janeiro, RJ - Brasil

Setembro de 2017

Melo, Monique de Barros

Avaliação de operações alternativas para a gestão de recursos hídricos da bacia do rio Paraíba do Sul/ Monique de Barros Melo – Rio de Janeiro: UFRJ/ ESCOLA POLITÉCNICA, 2017.

VI, 38 p.: il.; 29,7 cm.

Orientadores: Tarcisio Luiz Coelho de Castro e Jorge Henrique Alves Prodanoff

Projeto de Graduação – UFRJ/ POLI/ Curso de Engenharia Civil, 2017.

Referências Bibliográficas: p. 39-40.

1. Regras de operação de reservatórios 2. Bacia do rio Paraíba do Sul 3. Modelo WEAP 4. Gestão de recursos hídricos I. Luiz Coelho de Castro, Tarcisio *et al.* II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica, Curso de Engenharia Civil. III. Avaliação de operações alternativas para a gestão de recursos hídricos da bacia do rio Paraíba do Sul

“A tarefa não é tanto ver aquilo que ninguém viu, mas pensar o que ninguém ainda pensou sobre aquilo que todo mundo vê.”

Arthur Schopenhauer

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por ter vencido mais uma etapa e ter chegado até aqui. Aos meus pais, Marivalda e Raimundo Leonardo, por toda dedicação, incentivo aos meus estudos e pelo apoio nos momentos difíceis.

Ao meu namorado, Lucas Maia, que esteve comigo por toda essa caminhada universitária, sempre me ajudando.

Ao professor e amigo Jorge Prodanoff, por ter me dado a oportunidade de ser sua estagiária em projetos do IVIG, por ter me apresentado a área de recursos hídricos pela qual me apaixonei e por todo conhecimento que compartilhou comigo durante esse tempo, sendo de grande importância no início da minha vida profissional.

Ao professor e amigo Tarcísio Castro, por ter acreditado em mim e na minha capacidade, por todos os conselhos profissionais e pessoais, pelos ensinamentos que me fizeram aprofundar meus conhecimentos e por ser minha inspiração profissional.

Ao Engenheiro Rafael Kelman, à Economista Rebeca Doctors e à PSR Consultoria e Soluções em Energia, que junto aos meus orientadores, foram de extrema importância para o desenvolvimento deste trabalho durante meu período de estágio no qual aprendi muito.

Aos meus professores Heloisa Firmo, Paulo Renato Barbosa e Kátia Chiari, por suas aulas excelentes, pelas conversas e por terem acompanhado o desenvolvimento dos meus projetos enquanto aluna da universidade.

Aos meus amigos e futuros engenheiros Ignez Merly, Felipe Costa, Luciana Azevedo, Enzo Cosenza, Luiz Bouch e Daniel Bland pelas risadas, pelos grupos de estudos e por tornarem esta caminhada árdua mais agradável.

Resumo do Projeto de Graduação apresentado à Escola Politécnica/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Engenheiro Civil.

AVALIAÇÃO DE OPERAÇÕES ALTERNATIVAS PARA A GESTÃO DE RECURSOS
HÍDRICOS DA BACIA DO RIO PARAÍBA DO SUL

Monique de Barros Melo

Agosto/2017

Orientadores: Tarcisio Luiz Coelho de Castro

Jorge Henrique Alves Prodanoff

Curso: Engenharia Civil

A bacia do rio Paraíba do Sul (BRPS) desempenha um papel central na região sudeste do Brasil. Mais de 180 municípios dos estados de São Paulo, Rio de Janeiro e Minas Gerais dependem das suas águas, exigindo, portanto, uma operação complexa de reservatórios presentes no curso principal e afluentes. Em 2014, a BRPS enfrentou uma seca intensa, o que motivou discussões em favor de alternativas para as regras operativas dos reservatórios. As novas regras (decretadas pela Resolução Conjunta n. 1382/2015) visam priorizar a confiabilidade do abastecimento de água acima da geração de energia hidrelétrica, neutralizando o conceito predominante de que a geração de energia foi responsável pelo uso excessivo dos reservatórios, arriscando o abastecimento de água de cidades como o Rio de Janeiro. O objetivo é comparar alternativas de esquemas operacionais da BRPS através de uma abordagem de simulação numérica. Foram simulados três cenários, baseados em diferentes operações: (i) operação anterior à crise hídrica de 2014-2015, (ii) operação posterior à crise hídrica e (iii) operação alternativa com base em curvas-guia para os principais reservatórios. Ademais, foi estudada a transposição do rio Jaguari para o reservatório de Atibainha (São Paulo) para o cenário posterior à crise. A avaliação integrada e de toda BRPS foi feita com o modelo de Avaliação e Planejamento de Água (WEAP) desenvolvido pelo Instituto de Meio Ambiente de Estocolmo (SEI), um modelo acessível e aberto para pesquisas acadêmicas e governamentais futuras.

Palavras chave: regras de operação de reservatórios, bacia do rio Paraíba do Sul, modelo WEAP, gestão de recursos hídricos.

Abstract of Undergraduate Project presented to POLI/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Civil Engineer.

ASSESSMENT OF WATER RESOURCE MANAGEMENT ALTERNATIVES FOR THE
PARAIBA DO SUL RIVER BASIN

Monique de Barros Melo

August/2017

Advisor: Tarcisio Luiz Coelho de Castro

Jorge Henrique Alves Prodanoff

Course: Civil Engineering

The Paraíba do Sul river basin (PSRB) plays a central role in Brazil. Over 180 municipalities in the states of São Paulo, Rio de Janeiro and Minas Gerais depend on its waters, through the operation of multipurpose reservoirs in the main stem and tributaries. In 2014, the PSRB faced an intense drought. This event motivated discussions in favor of alternative operating rules for the main reservoirs. The new rules (after Resolution n. 1382/2015) aim to prioritize the reliability of water supply above the production of hydropower. It counteracted the concept that hydropower was responsible for reservoir overdraft, risking water supply of cities such as Rio de Janeiro. The main objective of this study is to compare alternatives of PSRB operating schemes through a simulation approach. Three scenarios with different operations were investigated: (i) operation prior to the water shortage crisis of 2014-2015, (ii) post-crisis operation and (iii) an alternative operation based on guide-curves for the main reservoirs of the PSRB. In addition, it was studied the Jaguari river transposition to the Atibainha reservoir (São Paulo) for the post-crisis scenario. The integrated evaluation of all PSRB was done with the Water Evaluation And Planning model(WEAP) developed by the Stockholm Environment Institute (SEI), a friendly and open structure for future academic and governmental research.

Keywords: reservoir operating rules, Paraíba do Sul river basin, WEAP model, water resources management.

CONTEÚDO

1	Introdução.....	1
2	WEAP.....	4
2.1	Visão geral	4
2.2	Aplicação.....	9
3	Aplicação do WEAP para a bacia do rio Paraíba do Sul	10
3.1	Área de estudo: A BRPS e a crise hídrica de 2014.....	10
3.2	Dados de entrada no modelo.....	11
3.3	Regras operativas dos reservatórios e processo de modelagem	15
3.4	Calibração do modelo.....	20
3.5	Cenários simulados	24
3.5.1	Cenário de Referência, regras anteriores à crise hídrica de 2014.....	24
3.5.2	Cenário de Operação pós-crise, após a crise hídrica de 2014.....	25
3.5.3	Cenário alternativo.....	25
3.5.4	Interligação Jaguari – Atibainha.....	26
4	Resultados e discussões	29
4.1	Comparação: cenário de referência, operação pós-crise e operação alternativa.....	29
4.2	Comparação: retiradas para Atibainha na operação pós-crise.....	33
5	Conclusões.....	37
6	Referências	39

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Elementos do WEAP para a criação de um desenho esquemático do modelo. ..	5
Figura 2. Programa incorporado na simulação de séries temporais (pseudo código).....	6
Figura 3. Exemplos de esquemas de funcionamento do WEAP	7
Figura 4. Ilustração da BRPS. Fonte: Campos (2001), apud Labhid-Coppe.	10
Figura 5. Reservatório equivalente da BRPS (ANA, 2017)	11
Figura 6. Topologia das usinas no Google Earth.	12
Figura 7. Desenho esquemático da Bacia do Rio Paraíba do Sul no WEAP.....	12
Figura 8. Inserção de demandas de água por município no modelo.	13
Figura 9. Inserção de dados relativos aos reservatórios no modelo.....	14
Figura 10. Subsistema Lajes marcado em vermelho. Fonte: Site Light e Energia.....	15
Figura 11. Sistema Light modelado no WEAP demarcado em vermelho	16
Figura 12. Esquema dos reservatórios situados na Bacia do Paraíba do Sul.	16
Figura 13. Regressões feitas no Eureqa para cada reservatório principal.....	21
Figura 14. Curvas de defluência definidas por Gomide (GOMIDE, 1975).	23
Figura 15. Curva-guia para o reservatório de Jaguari	26
Figura 16. Esquema da interligação Jaguari – Atibainha. Fonte: Estadão.....	27
Figura 17. Sistema de bombeamento e túnel para condução da água até Atibainha. Fonte: site SABESP.....	27
Figura 18. Criação de um ponte de demanda para simular a retirada de água para Atibainha no WEAP	28
Figura 19. Volume armazenado para os três cenários	29
Figura 20. Volume armazenado para os três cenários durante a crise hídrica	30
Figura 21. Detalhe funcionamento da ordem de deplecionamento dos reservatórios no modelo.....	30
Figura 22. Geração de energia anual para os 3 cenários.....	31

Figura 23. Comparação da geração de energia entre os 3 cenários	32
Figura 24. Curva de permanência em Santa Cecília para os 3 cenários	33
Figura 25. Volume armazenado para os 3 cenários simulando a retirada de água para Atibainha.....	34
Figura 26. Volume armazenado no período de crise simulando a retirada de água para o Atibainha.....	34
Figura 27. Geração de energia anual para as simulações com retirada de água para Atibainha.....	35
Figura 28. Comparação de geração de energia para os cenários de retirada	35
Figura 29. Curva de permanência em Santa Cecília para os cenários de retirada	36

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Mudanças regulatórias nas restrições de vazões mínimas.....	19
Tabela 2. Ordem de deplecionamento dos reservatórios.	19

1 INTRODUÇÃO

A variabilidade natural dos recursos hídricos disponíveis pode ser compensada por uma combinação de estruturas de controle como reservatórios ou esquemas de distribuição de água, associadas a um conjunto de regras para a alocação de água e operação dos reservatórios de modo a aumentar a confiabilidade do atendimento às demandas. A variabilidade natural e a disponibilidade hídrica podem ser afetadas por mudanças climáticas (SETHI et al., 2015), o que aumenta a preocupação tanto em relação à água para a manutenção da vida, quanto como suporte a atividades econômicas, especialmente em áreas com crescimento da população e da economia, tanto nos eventos de estiagem como de cheias.

Mesmo países com disponibilidade de água abundante podem enfrentar problemas se este recurso for distribuído de forma desigual. O Brasil é um exemplo: o país detém 12% da disponibilidade mundial de água doce devido principalmente à bacia amazônica. No entanto, a disponibilidade relativa de água para uma área densamente povoada, tal como é o caso de bacias menores, como na região metropolitana de São Paulo, é mais escassa.

Dentre as regiões críticas no Brasil podemos citar três exemplos, com características distintas:

(1) o semiárido nordestino, onde a variabilidade das chuvas traz muita insegurança hídrica, sendo este um obstáculo para atividades econômicas, e contribui diretamente para o baixo grau de desenvolvimento humano, por afetar usos mais básicos, como abastecimento humano e dessedentação de animais. A variabilidade natural precisa ser mitigada por uma combinação de infraestrutura, como reservatórios (bem planejados para não se converterem em tanques de evaporação), sistemas de distribuição de água mais efetivos, com menos perdas, gestão envolvendo alocação e eventual complementação com sistemas descentralizados, como o programa de cisternas para acumular água de chuvas para uso nos períodos de estiagem mais prolongada;

(2) a metrópole paulista, que no caso do sistema Cantareira (um importante sistema produtor) registrou em 2014 vazão média anual equivalente a 50% do pior ano do histórico até então (ou somente 25% da vazão afluyente média). Esta variabilidade da disponibilidade hídrica (oferta) quando comparada à demanda para abastecer um universo de 20 milhões

de habitantes, fora atividades industriais e usos mais intensivos em água, como agricultura, sinalizaram a necessidade de ações que atuem tanto pelo lado do aumento da oferta, através da captação em novos mananciais e aumento da capacidade de produção de água por tratamentos diversos, como pela demanda, através da gestão do consumo, combate às perdas na distribuição, e priorização de uso da água;

(3) a bacia do rio Paraíba do Sul, cuja complexa operação envolve diversos reservatórios, a transposição de bacias, operação para controle de cheias, manutenção de vazões mínimas por questões de qualidade de água para ecossistemas aquáticos e para a captação para o abastecimento urbano, manutenção de níveis mínimos nos reservatórios, usos consuntivos diversos, operação de estações de bombeamento e geração de energia elétrica.

A seca de 2014 que atingiu as áreas mais populosas do Brasil trouxe um alerta sobre a gestão da água (OTTO et al., 2015) e a escassez relacionada com o clima é uma preocupação urgente, desencadeando discussões sobre a gestão eficaz dos recursos hídricos (OECD, 2015).

A administração de recursos hídricos no Brasil é descentralizada e possui vários níveis. A Lei da Água de 1997 (PRESIDÊNCIA DA REPÚBLICA, 1997) estabelece que os recursos hídricos devem ser geridos por comitês de bacias hidrográficas, compostos por membros da comunidade e representantes do setor público. A Agência Nacional de Água (ANA) é a agência reguladora responsável pela gestão dos recursos hídricos no Brasil. Em termos mais gerais, a ANA é responsável pelo monitoramento dos recursos hídricos e pelo planejamento da alocação da água, realizada localmente pelos comitês de bacias hidrográficas.

Embora os comitês de bacias hidrográficas promovam discussões sobre a gestão da água entre as partes interessadas, os conflitos de interesse são comuns entre os participantes, levando a poucos ou nenhum acordo, como é encontrado na teoria econômica (AXELROD, 1967). Assim, a resolução de conflitos deve basear-se em razões técnicas (ANA, 2011), apoiadas por um instrumento multidisciplinar que relaciona as características biofísicas e socioeconômicas de uma bacia hidrográfica (YATES et al., 2005). O planejamento bem-sucedido depende de uma avaliação integrada de múltiplos usos da água, enquanto que sua implementação depende de uma estrutura técnica que apoie as decisões tomadas pelos comitês.

A investigação por melhores regras operativas para a alocação dos recursos hídricos no tempo e espaço nestas regiões, por exemplo, através de modelos de simulação ou otimização dos sistemas hídricos, com foco na operação de reservatórios e da infraestrutura hídrica em geral, deve ser realizada com uma visão de planejamento global (a bacia hidrográfica) e com uma priorização clara dos usos, a qual deve ser definida como parâmetro de entrada.

Neste contexto, a simulação matemática da operação de sistemas de aproveitamentos hidráulicos permite avaliar o desempenho de políticas de operação, de modo a identificar as melhores alternativas à serem tomadas por *policy-makers*, em respeito ao cumprimento dos objetivos do sistema. Nos modelos, são calculados os volumes de água que podem ser armazenados, deslocados por cursos de água, ou atribuídos aos múltiplos usos de uma bacia hidrográfica (como irrigação ou consumo).

O objetivo principal deste estudo é realizar uma avaliação integrada da Bacia do Rio Paraíba do Sul (BRPS) com o Modelo de Avaliação e Planejamento de Águas (WEAP) desenvolvido pelo Instituto de Meio Ambiente de Estocolmo (SEI). O WEAP foi escolhido por sua interface amigável e opções de estudo que devem promover discussões mais técnicas entre os membros do comitê de bacia hidrográfica, que em sua maioria não estão familiarizados com as ferramentas de apoio à decisão.

A bacia do rio Paraíba do Sul foi escolhida como caso de estudo por sua complexidade e papel central na região mais populosa e economicamente desenvolvida do país. Como objetivo final, este trabalho tem como finalidade contribuir para uma melhor avaliação dos recursos hídricos e para a gestão de riscos através da formulação de uma regra operativa alternativa à atual.

O trabalho está estruturado da seguinte forma: O capítulo 2 apresenta uma visão geral do WEAP, seu funcionamento e como se dá sua aplicação. O capítulo 3 mostra a aplicação do WEAP na bacia do rio Paraíba do Sul, os dados de entrada que foram levantados, como foram implementadas as regras de operação dos reservatórios, a calibração do modelo e as simulações. O capítulo 4 discute os principais resultados das simulações realizadas. Por fim, o Capítulo 5 apresenta as principais conclusões do estudo e sugere tópicos para pesquisas futuras .

2 WEAP

2.1 Visão geral

O WEAP é um modelo de gestão de recursos hídricos que opera com uma visão de planejamento integrada. Distingue-se por sua abordagem de simular os sistemas e pelo equilíbrio na representação entre opções de oferta (padrões de uso da água, eficiência de equipamentos, reutilização, preços, demanda de energia hidrelétrica) e demanda/alocação dos recursos hídricos (vazões liberadas a jusante, águas subterrâneas, reservatórios e transferências de água). Isto permite ao planejador uma visão mais abrangente dos fatores e alternativas a serem considerados no curto, médio e longo prazo. O resultado é uma ferramenta efetiva para avaliar opções alternativas de gerenciamento e desenvolvimento hídrico.

O WEAP é uma ferramenta amigável e usada por diferentes órgãos (acadêmicos os governamentais) ao redor do mundo, tendo, portanto, uma comunidade ativa de pesquisadores e *policy-makers*. Após passar pela curva de aprendizado, pode ser uma ferramenta útil para auxiliar o planejador na tomada de decisões, a qual deve ser implementada após a análise de diferentes políticas relativas ao desenvolvimento e gestão da água considerando os usos múltiplos e concorrentes desse recurso. O WEAP funciona como um banco de dados através de um sistema de informações específico sobre demanda e oferta e possui uma ferramenta de previsão, ao simular a demanda de água, oferta, fluxos e armazenamento, geração, tratamento e descarga de poluição.

Esse software tem ainda a vantagem de ser acessível devido a sua interface gráfica, que o torna mais simples que outros modelos similares. Entretanto, é necessário conhecimento técnico para usá-lo. Dependendo da complexidade do problema a ser investigado pode requerer maior ou menor volume de dados. Usando o desenho esquemático do WEAP é possível construir uma descrição física da zona de interesse e, uma vez o sistema pronto, inserir demanda e fornecimento de água, observando o balanço do recurso na região.

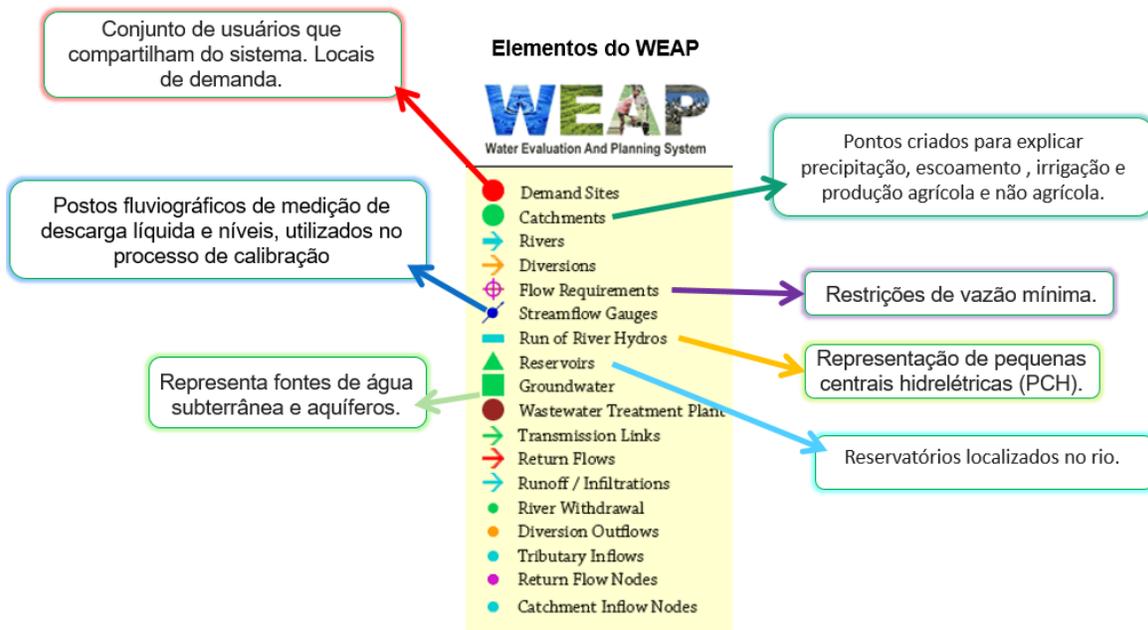


Figura 1. Elementos do WEAP para a criação de um desenho esquemático do modelo.

O WEAP é um modelo de gestão de recursos hídricos que opera sobre o princípio básico da confiabilidade da água. As simulações no WEAP são construídas em um conjunto de cenários, onde o tempo de simulação pode variar de um período diário a mensal (YATES et al., 2005). Para um dado intervalo de tempo, determina-se a alocação ótima de água para cada nó definido de acordo com um problema de programação linear, cujo objetivo é maximizar a satisfação da demanda, sujeita a um conjunto de restrições, como prioridades de abastecimento e balanços de massa (YATES et al., 2005).

Para cada $p = 1$ a P (para cada prioridade de demanda)

Para cada $f = 1$ a $F \in (D_k^{p,t-n})$ (para cpreferência de atendimento à demanda, k)

Maximizar (Atendimento à todos os locais de demanda $k \in N$ com prioridade p)

$$Z = C_p$$

Sujeito a:

$$\sum_{j=1}^n x_{j,i}^p - \sum_{r=1}^m x_{i,r}^p + S_i^{t-1} = S_i^t \quad (\text{restrição do balanço de massa do nó } i \text{ para o nó } r)$$

$$\sum_{j=1}^F x_{j,k}^p = D_k^{p,t-n} \quad (\text{restrição de demanda para demanda } k \text{ de } j \text{ fontes})$$

$$\sum_{j=1}^F x_{j,k}^p = D_k^{p,t-n} * c_k^p \quad (\text{cobertura de atendimento para demanda } k \text{ de } j \text{ fontes})$$

$$\sum_{j=1}^F x_{j,k}^p \geq D_k^{p,t-n} * c_k^p \quad (\text{cobertura de atendimento para reservatórios } k \text{ de } j \text{ fontes})$$

$$c_k^p = C \quad (\text{restrição de equidade para local de demanda } k \text{ e prioridade } p)$$

$$c_k^p \geq C \quad (\text{restrição de equidade para reservatórios com prioridade } p)$$

$$0 \leq c_k^p \leq 1 \quad (\text{para variáveis de cobertura de atendimento de locais de demanda})$$

$$x_{i,l}^{>p} = 0 \quad (\text{para locais de demanda } l \text{ com prioridade } > p)$$

$$x_{i,k}^p \geq 0 \quad (\text{para locais de demanda } k \text{ com prioridade } = p)$$

$$x_{i,k}^f \geq 0 \quad (\text{para locais de demanda } k \text{ com preferência } = f)$$

$$x_{i,k}^{>f} \geq 0 \quad (\text{para locais de demanda } k \text{ com preferência } = f)$$

Resolver Programação Linear, depois:

1. Avaliar preço estimado (h_k^p) para cada restrição de equidade. $h_k^p > 0$?

2. Se sim, atualizar $x_{j,k}^p$ e c_k para valores ótimos da solução

3. Remover restrições de equidade com $h_k^p > 0$

Próxima iteração para a prioridade atual, p

4. Atualizar $x_{i,k}^f$ para valores ótimos

Próximo f

Próximo p

Figura 2. Programa incorporado na simulação de séries temporais

Onde p são as prioridades de demanda, f são as preferências de oferta para cada demanda k , de N locais de demanda. As constantes $D_k^{p,t-n}$ são determinadas para cada local de demanda k com prioridade p . Os termos $x_{j,i}^p$ definem os fluxos dos nós j para i com prioridade p , S_i^t são os armazenamentos de reservatórios no local i para o tempo t , C_p é a cobertura de atendimento total para prioridade p e c_k^p é a cobertura de atendimento para cada local de demanda individualmente. Para a prioridade dada, os atendimentos à cada local de demanda, k são estabelecidos de forma incremental com base em seu grau de preferência, com $x_{j,k}^{>f}$, igual a zero e valores de $x_{j,k}^f$, fixados em sua solução otimizada após a melhoria da cobertura total de atendimento, C_p em cada iteração para a atual prioridade, p (YATES et al., 2005).

O modelo pode simular componentes naturais ou antrópicos, como por exemplo: sistemas de escoamento de água de chuva, fluxo superficial e recarga subterrânea; análise da demanda setorial; conservação de água; direitos de água e prioridades de alocação, operações de reservatórios; geração de energia hidroelétrica; avaliação da poluição e qualidade da água; avaliação das vulnerabilidades; e características dos ecossistemas. Um módulo para análise financeira também permite comparações de custo/benefício para alternativas de projetos estudados.

O sistema pode ser representado em termos de suas várias fontes de fornecimento (ex.: rios, riachos, água subterrânea, reservatórios); instalações de retirada, transmissão e de tratamento de efluentes; demanda de água; geração de poluição; e requisitos do ecossistema. A estrutura de dados e o nível de detalhe podem ser customizados para atender aos requisitos de uma determinada análise e refletir os limites impostos pela insuficiência de dados.

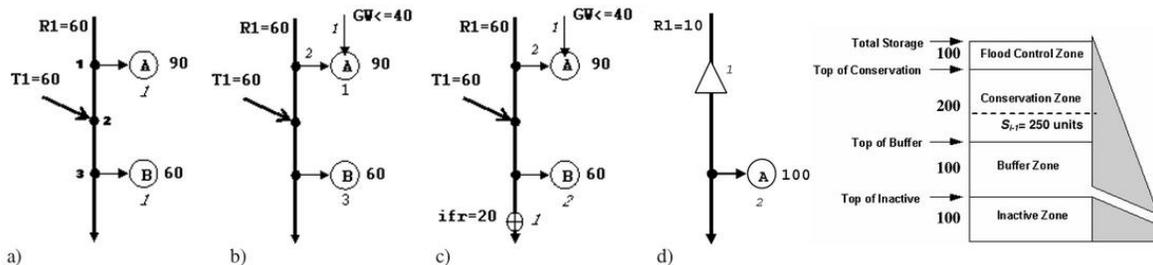


Figura 3. a) Dois locais de demanda, A e B são membros do mesmo Grupo de Equidade (prioridade) indicado pelo "1" abaixo de cada símbolo. Os números próximos a cada objeto representam 1) o abastecimento de água disponível do rio, R1 e o tributário T1; e 2) as demandas de A e B; b) O mesmo que (a), mas o local de demanda A agora tem uma fonte secundária, rotulada como GW, que é a fonte preferida indicada pelo 1 ao longo de seu link de transmissão, com sua fonte secundária de R1; c) Igual a (b), mas com a adição de um requisito de vazão mínima com prioridade 1; d) Um exemplo de reservatório, com prioridade 2 alvo de armazenamento de água e um site de demanda (A) com uma demanda de prioridade 1. O reservatório estilizado à direita ilustra os volumes de armazenamento do reservatório (Volume máximo (top of conservation) = 400 unidades; volume mínimo (top of buffer) = 200 unidades e volume de espera (flood control zone) = 100 unidades) (YATES et al., 2005).

No WEAP os locais de demanda, o armazenamento nos reservatórios, a geração de energia hidrelétrica e os requisitos de vazão mínima são alocados de acordo com suas prioridades. As prioridades podem variar de 1 a 99, sendo 1 a prioridade mais alta e 99 a mais baixa. As prioridades de enchimento do reservatório são por padrão 99, o que significa que a água será utilizada para reenchimento do reservatório somente se houver água depois de satisfazer todas as outras exigências de maior prioridade.

Essas prioridades são úteis para representar um sistema e também são importantes durante uma crise hídrica, caso em que as prioridades mais altas são satisfeitas ao máximo antes que prioridades menores sejam consideradas. Se as prioridades forem iguais, a escassez será igualmente compartilhada. Normalmente, se atribui as prioridades mais altas às demandas críticas que devem ser satisfeitas durante uma situação adversa, como um abastecimento municipal de água. As prioridades podem ser alteradas ao longo do tempo ou de um cenário para outro. Se um local de demanda estiver conectado a mais de uma fonte de abastecimento, é possível classificar as opções estipulando preferências de atendimento.

Usando as prioridades de demanda e as preferências de oferta, o WEAP determina a ordem de alocação a ser seguida. A ordem de alocação representa a ordem de cálculo real usada pelo WEAP para alocar água. Todos os *links* para atendimento das demandas e requisitos de vazão mínima com a mesma ordem de alocação são tratados ao mesmo tempo.

Em geral, se uma fonte estiver conectada a muitos locais de demanda com a mesma prioridade, o WEAP tentará alocar esses fluxos simultaneamente, independentemente das preferências de atendimento nos *links*. Por exemplo, o local de demanda DS1 está conectado a um rio e a uma fonte de água subterrânea, com preferência para as águas subterrâneas, enquanto o local de demanda DS2 está conectado apenas ao rio. Ambos os locais de demanda têm a mesma prioridade. As ordens de alocação seriam 1 para o *link* do DS1 para as águas subterrâneas e 2 para os links dos sites da demanda para o rio. Nos cálculos, primeiro DS1 é alocado com águas subterrâneas e, em seguida, DS1 e DS2 são alocados com água do rio. Desta forma, ambos os locais de demanda têm a mesma chance de receber água do rio no caso de uma crise hídrica (YATES et al., 2005).

Embora existam diferentes modelos que avaliam de forma integrada os múltiplos usos da água, o modelo WEAP foi escolhido por sua interface amigável e fácil operação. Além disso, o WEAP é amplamente utilizado por planejadores hidrológicos em todo o mundo, o que facilita o intercâmbio de conhecimento como mencionado anteriormente. O uso da ferramenta pode tornar mais fácil o entendimento não técnico facilitando as discussões nos comitês de bacias com ambientalistas e comunidade em geral.

2.2 Aplicação

Em termos gerais, o desenvolvimento de um modelo no WEAP inclui as seguintes etapas:

- Definição do estudo: estabelece o marco temporal, os limites espaciais, os componentes do sistema e a configuração do problema.
- Busca de informações: obtenção dos dados de acordo com o tipo de estudo definido. Geralmente se realiza em duas partes: uma etapa de obtenção de dados gerais e uma etapa de obtenção de dados específicos uma vez que o sistema esteja modelado e que sejam identificadas as necessidades de informações adicionais.
- Desenvolvimento do modelo: construção do esquema, no qual se realiza a inserção de dados e as rodadas iniciais do modelo para observar seu comportamento preliminar e para eliminar possíveis inconsistências e erros.
- Calibração: desenvolvimento de uma caracterização da oferta e demanda atual de água, os recursos e as fontes para o sistema.
- Resultados: análise do funcionamento do sistema: atendimento à demanda de água, armazenamento nos reservatórios, geração de energia, atendimento à demanda de energia, sendo possível analisar a operação atual do sistema e verificar o comportamento do sistema a partir de regras operacionais alternativas, levando em consideração a gestão dos usos múltiplos da água.
- Uso do modelo, geração de cenários: avaliação dos impactos que teria uma série de pressupostos alternativos sobre as políticas futuras, custos e clima, por exemplo, na demanda de água, oferta de água, hidrologia e contaminação. Cenários são construídos a partir de conjuntos alternativos de suposições ou políticas. Finalmente, os cenários são avaliados em termos de suficiência, custos e benefícios da água, em compatibilidade com os objetivos ambientais.

3 APLICAÇÃO DO WEAP PARA A BACIA DO RIO PARAÍBA DO SUL

3.1 Área de estudo: A BRPS e a crise hídrica de 2014

A BRPS atravessa três estados do sudeste do Brasil (Rio de Janeiro, São Paulo e Minas Gerais) e é de importância estratégica para São Paulo e Rio de Janeiro. Abrange uma área de 57 mil km² (KUMLER; LEMOS, 2008) com mais de 9 milhões de pessoas (CEIVAP, 2017). Além disso, suporta múltiplos usos hídricos, tais como abastecimento de água, indústrias, aproveitamento hidrelétrico e agricultura para 186 municípios. Na bacia está presente uma operação complexa de reservatórios, estações de bombeamento e centrais hidrelétricas. Em média, dois terços do fluxo de água é desviado do curso principal na localidade de Barra do Pirai para o Rio Guandu. Após passar por uma estação de tratamento com mais de 45 m³/s de capacidade, a água desviada abastece a cidade do Rio de Janeiro.

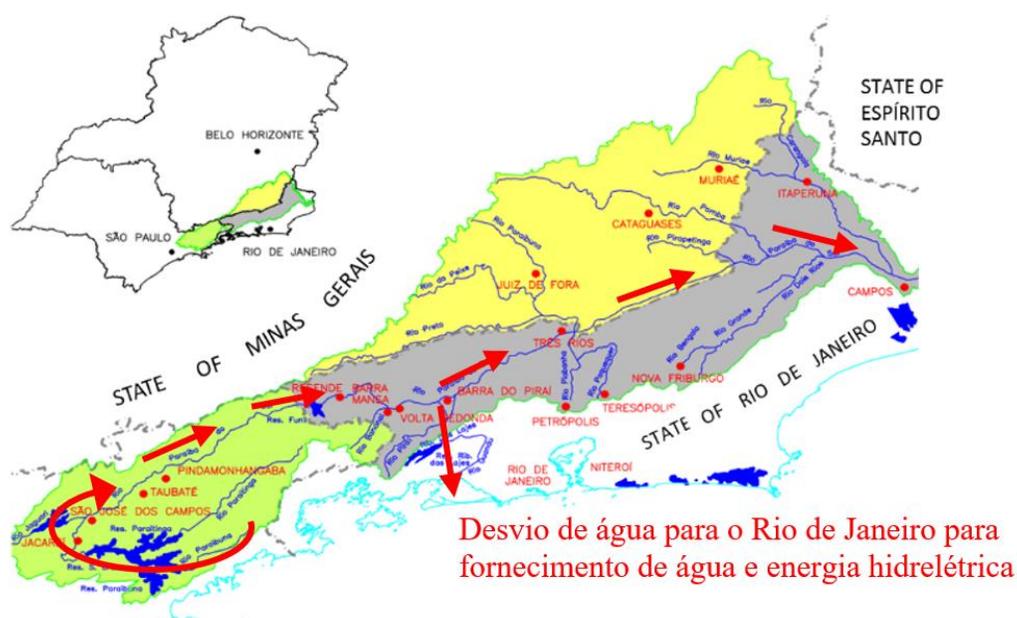


Figura 4. Ilustração da BRPS. Fonte: Campos (2001), apud Labhid-Coppe.

A crise hídrica de 2014 teve grande impacto no sistema Cantareira, principal responsável pelo abastecimento de água da região metropolitana de São Paulo. Durante o período de 2014-2015, o fluxo médio no sistema Cantareira foi 50% menor do que o pior registro até então (1953), a partir de 85 anos de dados, e foi apenas 25% do fluxo anual médio (ANA,

2016). Como consequência, São Paulo tomou medidas especiais, como a redução da pressão da rede de distribuição para reduzir as perdas e promover a eficiência do lado da demanda. Do lado da oferta, a instalação de bombas no sistema Cantareira permitiu retirar a água abaixo do nível mínimo de elevação (AGÊNCIA DAS BACIAS PCJ, 2016). O Estado também trabalhou no avanço de novas alternativas de abastecimento, como o desvio das águas do reservatório de Jaguari (dentro da BRPS) para o reservatório de Atibainha, parte do sistema de abastecimento de água do Cantareira (o mais importante sistema de água para abastecimento da cidade de São Paulo).

A BRPS também foi afetada pela seca. Seu principal reservatório, Paraibuna, quase atingiu o nível mínimo de operação no final de 2014, após um esgotamento acumulado de quase 2,6 bilhões de m³. O fluxo mínimo foi repetidamente reduzido por várias resoluções promulgadas pela ANA numa tentativa de armazenar água.

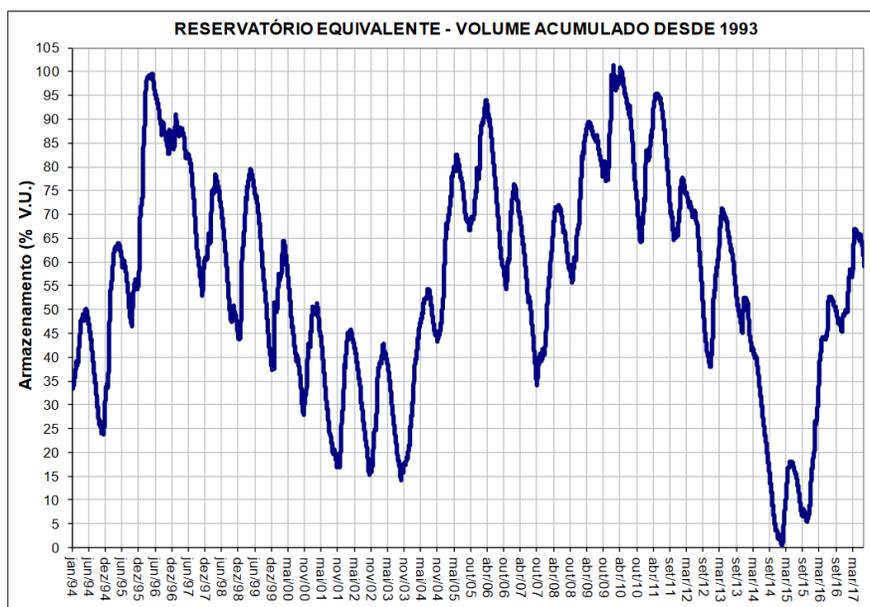


Figura 5. Reservatório equivalente da BRPS (ANA, 2017)

3.2 Dados de entrada no modelo

A rede hidrográfica da bacia do Rio Paraíba do Sul foi desenvolvida esquematicamente no modelo WEAP, tendo como base arquivos do tipo shp. da Hydroweb da ANA (para os rios e limitações geográficas da bacia e dos municípios) e com dados geográficos para a localização dos reservatórios do SIGEL, Sistema de Informações Geográficas do Setor Elétrico da ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica). Informações adicionais sobre a topologia foram adicionadas com a ajuda do Google Earth.

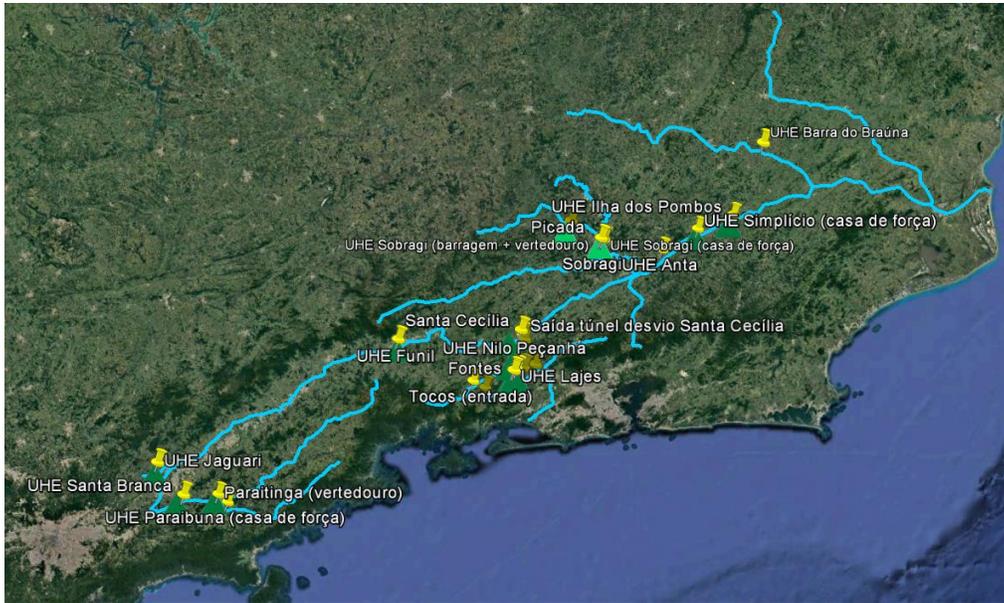


Figura 6. Topologia das usinas no Google Earth.

No desenho esquemático foram incluídas as sub-bacias associadas, a localização dos reservatórios e usinas hidrelétricas, além das retiradas de água para o abastecimento de cada um dos mais de 180 municípios, como apresentado na Figura 7.

O estudo tem como horizonte o período que vai de 1931 a 2016, que está associado à disponibilidade das vazões naturais (médias mensais) para alguns pontos do sistema, onde normalmente há produção de energia.



Figura 7. Desenho esquemático da Bacia do Rio Paraíba do Sul no WEAP.

Os outros dados de entrada são divididos em demandas de água, séries históricas das vazões afluentes e parâmetros dos reservatórios. A seguir, são listados os dados de

entrada do estudo de caso na bacia do Paraíba do Sul com relação a oferta e demanda de recursos hídricos:

- Vazões naturais afluentes (série histórica de médias mensais de 1931 a 2016), obtidos no ONS e em alguns casos, a partir do Hidroweb da ANA;
- Vazões incrementais, calculadas diretamente da diferença entre as vazões naturais entre dois postos fluviométricos;
- Vazões mínimas e máximas a jusante dos reservatórios, estabelecidas por determinadas resoluções normativas da ANA, dependendo da simulação estabelecida;
- Demandas mensais agregadas por municípios, do relatório preparado pela PSR para CEIVAP em 2013 (PSR, 2013). As demandas de água foram agregadas por municípios e pelos usos da água (uso industrial, irrigação, dessedentação animal, e abastecimento de água aos municípios). As demandas são referentes ao ano de 2010, utilizadas para todo o horizonte de análise, pois não há um controle eficiente sobre a demanda de água atual em todos os municípios. Optou-se por trabalhar com demanda agregada, uma vez que a desagregação triplicaria a complexidade do modelo sem trazer benefícios, em função do objetivo do estudo que é uma análise global da bacia. Embora não tenha sido avaliado o impacto do crescimento populacional ou os diferentes usos da água, esse pode ser tema de um estudo futuro.

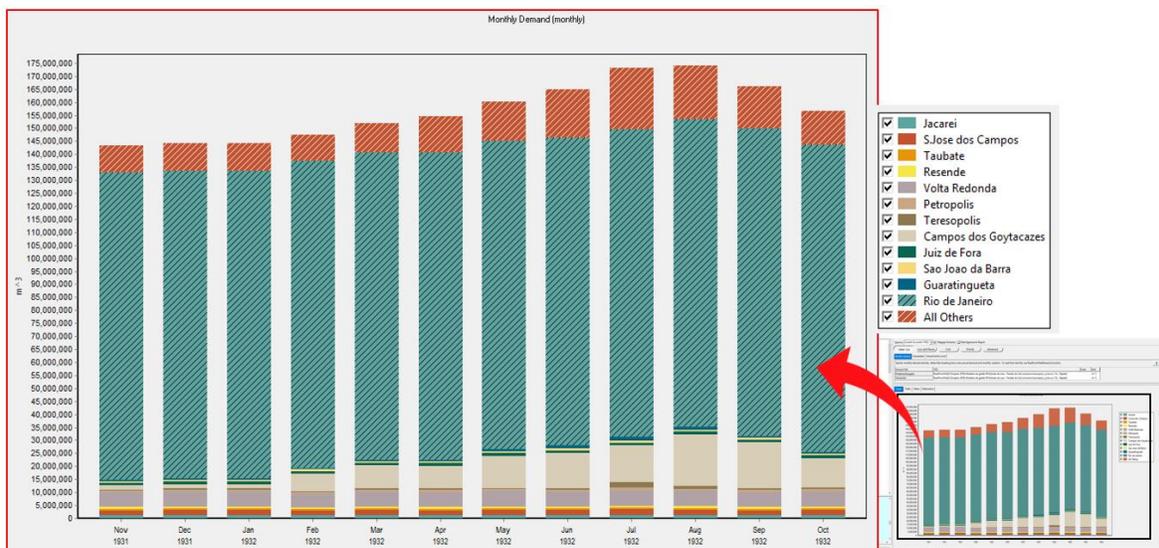


Figura 8. Inserção de demandas de água por município no modelo.

Em relação aos reservatórios, os seguintes dados foram inseridos:

- Volumes máximos armazenados;
- Vazões máximas de engolimento das turbinas das usinas hidrelétricas ou conjunto de bombas;
- Curvas cota-área-volume;
- Curva de evapotranspiração;
- Demanda por energia elétrica;
- Volumes mínimos operativos;
- Volumes de espera;
- Eficiências dos conjuntos turbinas-geradores;
- Níveis de jusante.

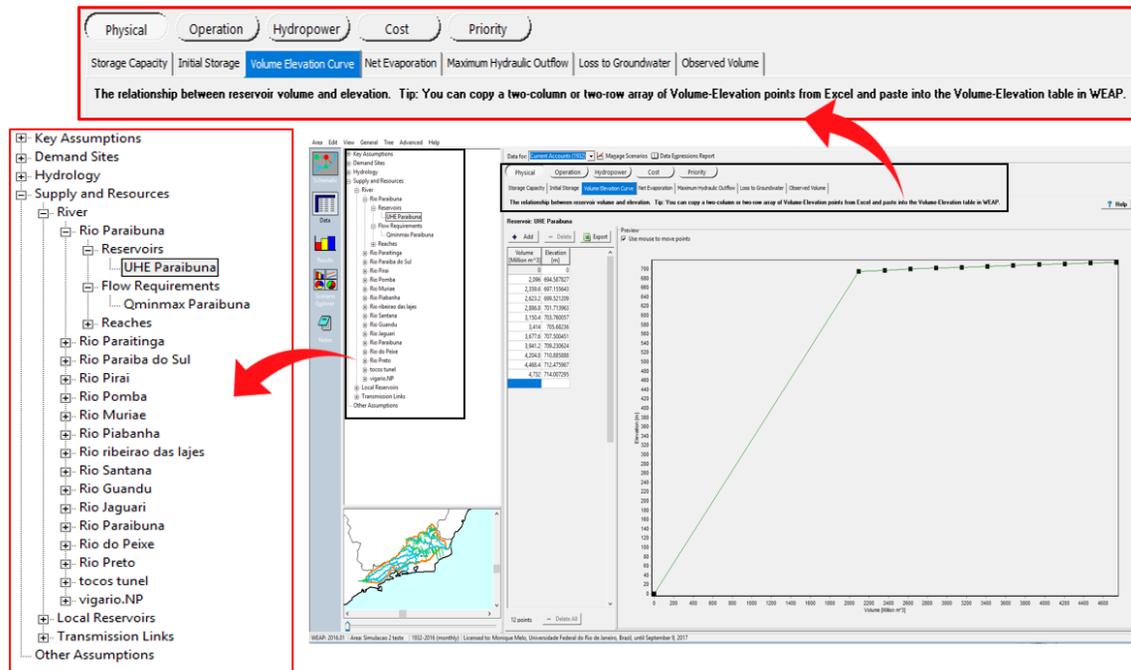


Figura 9. Inserção de dados relativos aos reservatórios no modelo.

Finalmente, foram definidas prioridades para os diferentes usos da água. No WEAP, as prioridades são definidas entre 1 e 99, sendo 1 a prioridade mais alta e 99 a mais baixa. Em particular, a prioridade alocada para a demanda por abastecimento de água é 1. As vazões mínimas à jusante dos reservatórios foram definidas com prioridade 2 e a geração de energia com prioridade 3. Deste modo, atribui-se uma ordem de prioridade clara para o

abastecimento de água, o que difere da atual operação, a qual prioriza o uso da água para a geração hidrelétrica.

3.3 Regras operativas dos reservatórios e processo de modelagem

Com relação à operação dos reservatórios do sistema Light (Figura 11) a regra operativa segue o esquema de bombeamento em Santa Cecília (para Santana), representando a transposição do Rio Paraíba do Sul para o Sistema Lajes, em direção ao Rio Guandu. A água segue esta transposição até chegar a ETA (Estação de Tratamento de Água) Guandu, onde pouco menos de 50 m³/s são tratados de forma a abastecer a cidade do Rio de Janeiro.

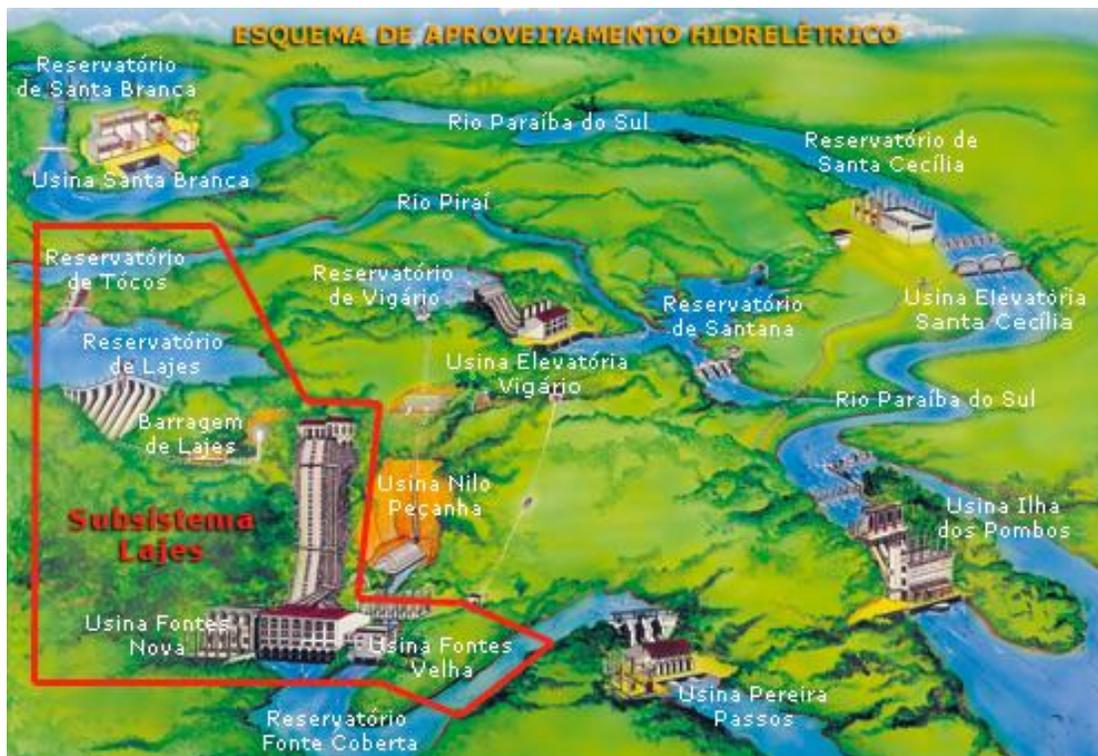


Figura 10. Subsistema Lajes marcado em vermelho. Fonte: Site Light e Energia.

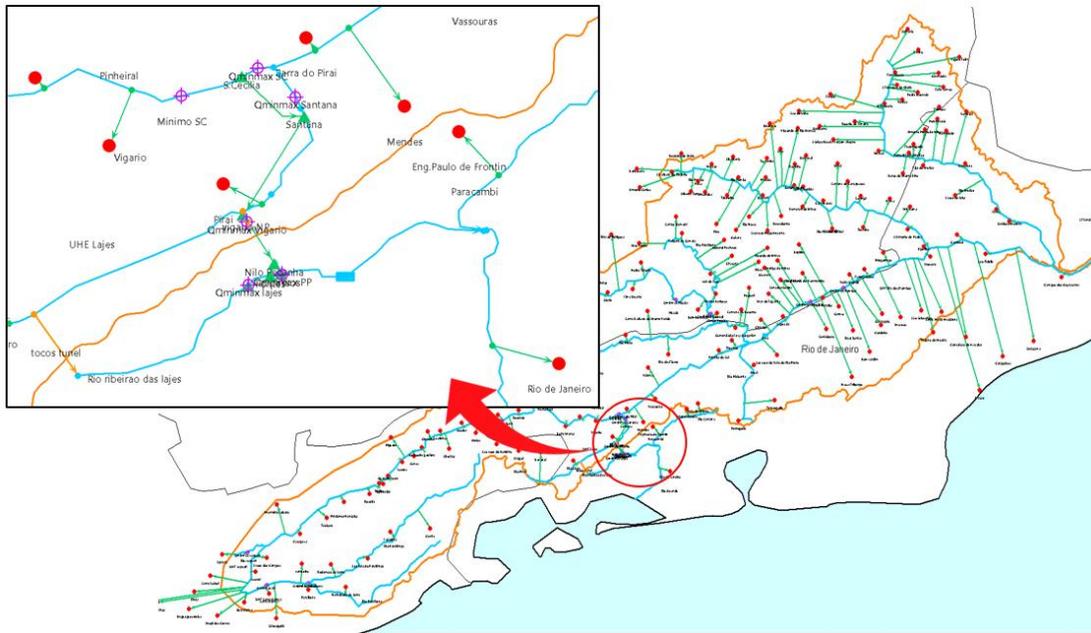


Figura 11. Sistema Light modelado no WEAP demarcado em vermelho

Este bombeamento foi definido através de expressões condicionais que dependem da vazão natural em Santa Cecília, de forma que tanto o sistema Light quanto os trechos a jusante sejam atendidos, de acordo com o relatório ONS.

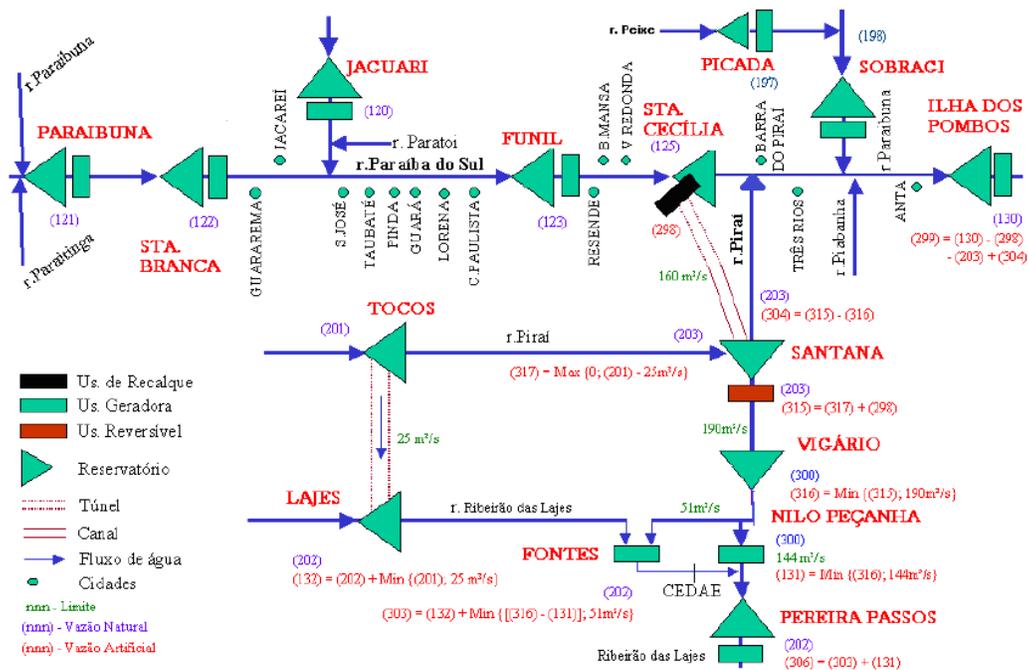


Figura 12. Esquema dos reservatórios situados na Bacia do Paraíba do Sul (ONS, 2007). A usina apontada como reversível na verdade é de recalque.

A principal interferência do Sistema Gerador da LIGHT com os usos múltiplos ocorre no atendimento aos requisitos de abastecimento público de água para a Região Metropolitana do Rio de Janeiro (RMRJ). Como na área do entorno desta região não existem mananciais de água significativos, foram construídas, no início da década de 40, duas adutoras para fins de abastecimento público com capacidade total de 5,5 m³/s, utilizando-se as águas provenientes do Reservatório de Lajes após serem turbinadas pela Usina Hidrelétrica Fontes Nova. Devido às excelentes condições de preservação ambiental do Reservatório de Lajes até hoje essa água é distribuída pela CEDAE sem tratamento, apenas sendo clorada diretamente na tubulação. A operação e manutenção das estruturas hidráulicas para suprimento da "Calha" são suportadas pela LIGHT, bem como a conservação do Reservatório de Lajes em adequadas condições ambientais.

As usinas elevatórias permitem a transposição das águas da bacia do Rio Paraíba do Sul para a bacia do Ribeirão das Lajes através do Desvio Paraíba-Piraí, para serem utilizadas na geração das usinas Nilo Peçanha, Fontes Nova e Pereira Passos. Esta transposição é realizada pelas Usinas Elevatórias de Santa Cecília (recalque de 15 m) e de Vigário (recalque de 35 m). O Desvio Paraíba-Piraí veio a constituir-se no mais importante reforço para o suprimento de água potável para a RMRJ. O Rio Guandu, que em condições naturais teria uma vazão de cerca de 25 m³/s, recebe uma contribuição média de 146 m³/s do Desvio Paraíba-Piraí e de 10 m³/s do Desvio Tócos-Lajes. Essa contribuição adicional permitiu a construção pela CEDAE da Estação de Tratamento de Água do Rio Guandu, que entrou em operação em 1955, e hoje processa 47 m³/s de água para atendimento da população da RMRJ.

O Sistema Gerador da LIGHT, por força da necessidade de regularização das vazões para permitir a transposição das águas do Rio Paraíba do Sul para o Rio Guandu, tem sido operado sob regras definidas pelo Governo Federal. Assim sendo, por meio do Decreto nº 68.324, de 1971, foi aprovado o Plano de Regularização do Rio Paraíba do Sul, considerando os reservatórios de Santa Branca, Jaguari e Funil, e autorizando a construção do Reservatório de Paraibuna-Paraitinga. Este Decreto manteve a autorização concedida anteriormente à LIGHT para desvio das águas do Rio Paraíba do Sul na Usina Elevatória Santa Cecília até o máximo de 160 m³/s. Condição, ainda, a operação dos reservatórios à manutenção da descarga mínima a jusante da Usina Elevatória Santa Cecília em 90 m³/s, a partir da conclusão do Reservatório de Paraibuna-Paraitinga, e concedeu prazo de 180 dias para que o então Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica - DNAEE

propusesse as regras operativas a serem adotadas pelos reservatórios do Rio Paraíba do Sul.

Através da Portaria nº 22, de 1977, o DNAEE publicou as regras para a operação dos reservatórios do Rio Paraíba do Sul na sua configuração final, a qual passou efetivamente a vigorar a partir de 28 de fevereiro de 1980. O Decreto nº 81.436, de 1978, incluiu nas regras operativas a redução, em condições hidrológicas adversas, da descarga mínima a jusante da Usina Elevatória Santa Cecília para 71 m³/s, a critério do DNAEE. Com fundamento nas regras estabelecidas na legislação citada acima, o conjunto de reservatórios do Rio Paraíba do Sul vem sendo operado, desde fevereiro de 1980, com o objetivo de regularizar a vazão afluyente à Usina Elevatória Santa Cecília em 250 m³/s em condições hidrológicas normais (160 m³/s para bombeamento e 90 m³/s para jusante), ou em 190 m³/s em condições desfavoráveis (119 m³/s para bombeamento e 71 m³/s para a jusante) (LIGHT, 2005).

Abaixo encontram-se as restrições operativas que devem ser obedecidas no sistema light. Estas equações (ONS, 2007) são representadas no sistema modelado no WEAP .

$$\begin{aligned} Q_{bomb\ S.\ Cecília} &= Q_{nat\ S.\ Cecília} \times (119/190); \text{ se } Q_{nat\ S.\ Cecília} < 190\text{m}^3/\text{s} \\ &= 119\ \text{m}^3/\text{s}; \text{ se } 190 < Q_{nat\ S.\ Cecília} < 209\ \text{m}^3/\text{s} \\ &= Q_{nat\ S.\ Cecília} - 90; \text{ se } 209 < Q_{nat\ S.\ Cecília} < 250\ \text{m}^3/\text{s} \\ &= 160\ \text{m}^3/\text{s}; \text{ se } Q_{nat\ S.\ Cecília} > 250\ \text{m}^3/\text{s} \end{aligned}$$

$$QT\ Santana = Q_{nat\ Santana} - Q_{nat\ Tocos} + Q_{bomb\ S.\ Cecília} + \max(0; Q_{nat\ Tocos} - 25)$$

$$QT\ Vigário = \min(190; QT\ Santana)$$

$$Q_{vert\ Santana} = QT\ Santana - QT\ Vigário$$

$$QT\ Lajes = Q_{nat\ Lajes} + \min(Q_{nat\ Tocos}; 25)$$

$$QT\ N.\ Peçanha = \min(QT\ Vigário, 144)$$

$$QT\ Fontes = QT\ Lajes + QT\ Vigário - QT\ N.\ Peçanha$$

$$QT\ P.\ Passos = QT\ N.\ Peçanha + QT\ Fontes$$

$$QT\ I.\ Pombos = Q_{nat\ I.\ Pombos} - Q_{bomb\ S.\ Cecília} - Q_{nat\ Santana} + Q_{vert\ Santana}$$

$$Q_{nat\ P.\ Passos} = Q_{nat\ Fontes} = Q_{nat\ Lajes}$$

A fim de mitigar os impactos da escassez de água e prevenir futuras crises, a ANA e outras instituições deliberaram diversas medidas, em particular a Resolução Conjunta n. 1382/2015 estabelecida pela ANA (nível federal) e representantes dos estados de São Paulo (DAEE), Minas Gerais (IGAM) e Rio de Janeiro (INEA). Modificou-se a Resolução n. 211/2003 estabelecendo requisitos mínimos de fluxo mais baixos ao longo da BRPS,

conforme mostrado na tabela a seguir. Isto foi implementado para aumentar a quantidade de água armazenada nos reservatórios mitigando novas secas.

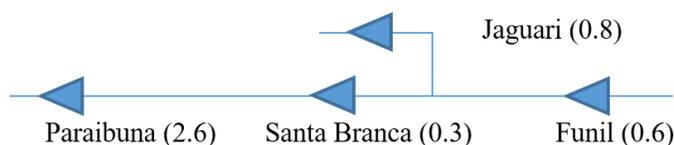
Tabela 1. Mudanças regulatórias nas restrições de vazões mínimas

Nome do Reservatório	Resolução ANA 211/2013	Resolução ANA 1382/2015
Paraibuna	30 m ³ /s	10 m ³ /s
Santa Branca	40 m ³ /s	30 m ³ /s
Jaguari	10 m ³ /s	4 m ³ /s
Funil	80 m ³ /s	70 m ³ /s

Ademais, procurou-se representar a operação atual dos reservatórios, tal como ela ficou definida após a crise hídrica de 2014-2015. Deste modo, foram adicionadas as operações presentes na Resolução conjunta da ANA n° 1382 de 2015, destacando-se a ordem de deplecionamento dos principais reservatórios e suas vazões mínimas. O WEAP não possui uma interface para a definição desta operação de forma direta, haja visto a complexidade da regra (o deplecionamento de um reservatório depende não somente de seu nível como dos demais, como indicado na Tabela 1 abaixo). Por outro lado, foi possível introduzir estas regras através de programação (linguagem VBS) no ambiente do WEAP.

Tabela 2. Ordem de deplecionamento dos reservatórios.

Ordem de deplecionamento		Estágios de deplecionamento (volume útil %)		
		1°	2°	3°
1ª	Funil	30	30	30
2ª	Santa Branca	70	40	10
3ª	Paraibuna	80	40	5
4ª	Jaguari	80	50	20



O diagrama acima ilustra a cascata. O número entre parênteses indica o armazenamento útil, em bilhões de m³. Há 12 estágios que podem ser implementados, que foram estabelecidos para economizar mais água na parte a montante do rio Paraíba do Sul, localizado no estado de São Paulo. Os volumes do reservatório são implementados um de cada vez, começando com o primeiro reservatório (Funil) na primeira fase (estágio de depleção de 30% do seu volume útil). Uma vez observada essa primeira etapa, a ordem de

depleção segue para o segundo reservatório (Santa Branca) na primeira etapa, e continua até atingir o esgotamento do quarto reservatório (Jaguari) no terceiro estágio de depleção (20% de seu volume útil). É importante mencionar que a mudança no estágio de deplecionamento, de cada reservatório para a próxima etapa, só pode ocorrer quando todos eles atingirem seus valores mínimos para uma determinada etapa, permitindo uma variação de 5% do valor de referência.

Embora a ANA afirme que esta resolução é uma resposta à crise e conduz a uma alocação mais preventiva dos recursos hídricos, não foi apresentada uma nota técnica em que fosse possível verificar como esses valores foram estabelecidos. No entanto, foi um passo importante para mudar a forma como o sistema do Paraíba do Sul era gerenciado. Antes da crise hídrica de 2014, os usos de água da BRPS eram focados principalmente na produção de energia hidrelétrica, controlada pela ONS.

3.4 Calibração do modelo

Após a definição do desenho esquemático, inserção de dados de entrada e execução do sistema, podem ser verificados alguns resultados importantes como: armazenamento nos reservatórios, produção de energia, curva de permanência em Santa Cecília e confiabilidade no atendimento à demanda de água.

Para a calibração do modelo, foram comparados os resultados de produção de energia e armazenamento nos reservatórios da simulação para o cenário de referência (regras anteriores à crise hídrica de 2014) com as séries históricas registradas pelo ONS de 2000 a 2016. Como o objetivo desta simulação era reproduzir a operação do sistema anterior à crise, os resultados deveriam estar próximos à realidade. Porém verificou-se uma diferença no comportamento da produção de energia e em relação às curvas de defluência que se mostraram abaixo do esperado em Paraibuna e acima do esperado em Santa Branca, sendo esta uma consequência da definição previa das prioridades. Logo, em uma tentativa de simular a operação do ONS, foi necessário modelar a geração de energia hidrelétrica.

No WEAP é necessário informar uma demanda de energia para que esta seja computada no balanço hídrico feito pelo modelo, de acordo com a prioridade estabelecida para esse uso. Entretanto, o sistema elétrico no Brasil funciona de forma interligada (através do Sistema Interligado Nacional - SIN), não existindo uma demanda local por usina. Dessa forma a estratégia foi analisar o histórico de geração de cada usina considerando as vazões

afuentes e o armazenamento nos reservatórios em meses anteriores. Para tal, utilizou-se os dados históricos para a produção de energia hidrelétrica, armazenamento de reservatórios e vazão para as seguintes usinas hidrelétricas: Paraibuna, Santa Branca, Funil e Jaguari. A partir desses dados estimaram-se regressões para a produção de energia em função das variáveis elegidas como explicativas.

O software escolhido para esse tipo de análise foi o Eureka, um modelo com inteligência artificial desenvolvido pela Nutonian (SCHMIDT; LIPSON, 2009) para encontrar equações que melhor explicariam a geração de energia hidrelétrica através da vazão e armazenamento de cada reservatório. Funciona fazendo equações aleatórias com os dados através de um processo conhecido como "pesquisa evolutiva". Algumas das equações terão mais sentido do que as demais e essas serão usadas como base de uma nova rodada de vários bilhões de equações até que se alcance um resultado. Constrói modelos numéricos, de séries temporais e de classificação desde o início, gerando e atualizando modelos automaticamente. A Eureka é um motor de modelagem proprietário da Inteligência artificial que automatiza grande parte do trabalho pesado inerente à análise e à ciência dos dados.

A ferramenta divide automaticamente os dados em treinamento e validação. Os dados de treinamento são usados com o algoritmo principal e a validação é usada para a seleção do modelo (identificando modelos para a frente final de soluções de pareto). Nesse estudo foram utilizados 50% dos dados na etapa de treinamento e 50% na etapa de validação.

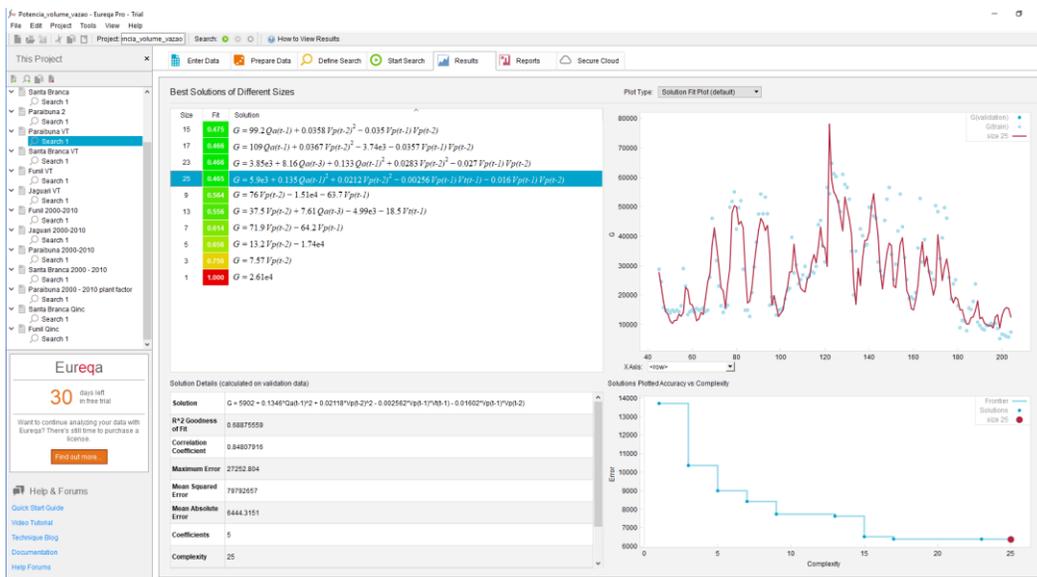


Figura 13. Regressões feitas no Eureka para cada reservatório principal.

As regressões encontradas foram utilizadas como a demanda de energia, que foi modelado no WEAP em cálculos de meses anteriores através de um script VBS. Como variáveis para a regressão foram fornecidos dados históricos de volume afluente (VA), volume do reservatório (V) e soma do volume dos 4 reservatórios (VT). A escolha das equações foi restringida pelo qualidade do ajuste à nuvem de pontos (R^2) e o grau de complexidade da equação, avaliando sempre a precisão versus a complexidade. As equações que melhor explicavam a geração em cada reservatório estão destacadas a seguir:

Paraibuna

$$E_{pa,t} = 5902 + 0.1 * VA_{pa,t-1}^2 + 0.02 * V_{pa,t-2}^2 - 0.02 * V_{pa,t-1}^2 * VT_{t-1} - 0.002 * V_{pa,t-1} * V_{pa,t-2}$$

Santa Branca

$$E_{sb,t} = 0.01 * VT_{t-4} * V_{sb,t-7}$$

Funil

$$E_{fu,t} = 47 * VA_{fu,t} + 13 * VT_{t-5} - 2e4$$

Jaguari

$$E_{ja,t} = 92 * V_{ja,t-2} + 64 * VA_{ja,t-1} + 0.1 * VA_{ja,t-3} * V_{ja,t-2} - 92 * V_{ja,t-1} - 0.0006 * V_{ja,t-1} * VA_{pa,t-3}^2$$

Somente a criação de “demandas de energia” por reservatório, não foi suficiente para adequar os resultados de geração de energia e armazenamento. Nesse aspecto, verificou-se que havia a necessidade de informar ao modelo que ele poderia gerar mais energia em meses de afluência favorável e armazenamento maior. Para introduzir esse princípio no WEAP, uma curva de restrição de vazões mínimas foi construída com base em “*Range and Deficit Analysis Using Markov Chains*” (GOMIDE, 1975).

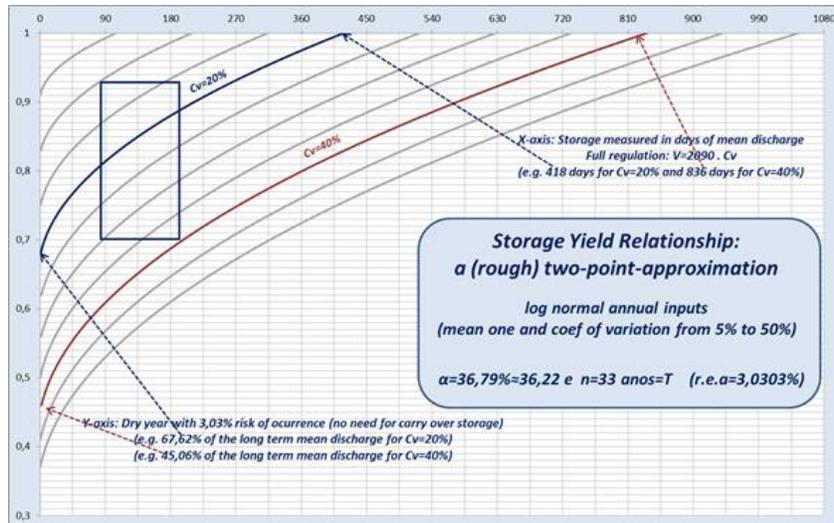


Figura 14. Curvas de defluência definidas por Gomide (GOMIDE, 1975).

O estudo do Professor Gomide resultou em curvas que relacionam a defluência para reservatórios, porcentagem do volume útil e coeficiente de variação do rio. Seguindo essa lógica, foram avaliados os coeficientes de variação dos rios onde se encontram os 4 principais reservatórios da bacia da seguinte forma:

$$CV = \frac{\text{Desvio padrão das vazões médias anuais}}{\text{Média das vazões médias anuais}}$$

Como simplificação, foi adotado um único coeficiente de variação que fosse representativo para a bacia inteira, tendo como objetivo reproduzir a curva correspondente estudada por (GOMIDE, 1975). Utilizou-se uma aproximação quadrática entre vazão e porcentagem de armazenamento, com coeficiente de variação fixo de 30% para o escoamento do curso principal da bacia do Paraíba do Sul. A curva utilizada para as quatro principais usinas hidrelétricas da BRPS é a seguinte:

$$Q_{min,t}^i = Q_{nat,t}^i * \left[-0.21 * \left(\frac{VU_t^i}{VUM_t^i} \right)^2 + 0.59 * \left(\frac{VU_t^i}{VUM_t^i} \right) + 0.62 \right]$$

Onde $Q_{min,t}^i$ é a vazão mínima a jusante em t para o reservatório i , $Q_{nat,t}^i$ é a vazão natural afluente que chega no reservatório i em t e $\frac{VU_t^i}{VUM_t^i}$ é a relação em t entre o volume útil do reservatório i e seu volume útil máximo.

Após esses ajustes, os resultados produzidos pelo modelo se mostraram satisfatórios (R^2 entre 0,48 e 0,75) quando comparado a simulação de referência com o histórico do ONS, como apresentado na Figura 15.

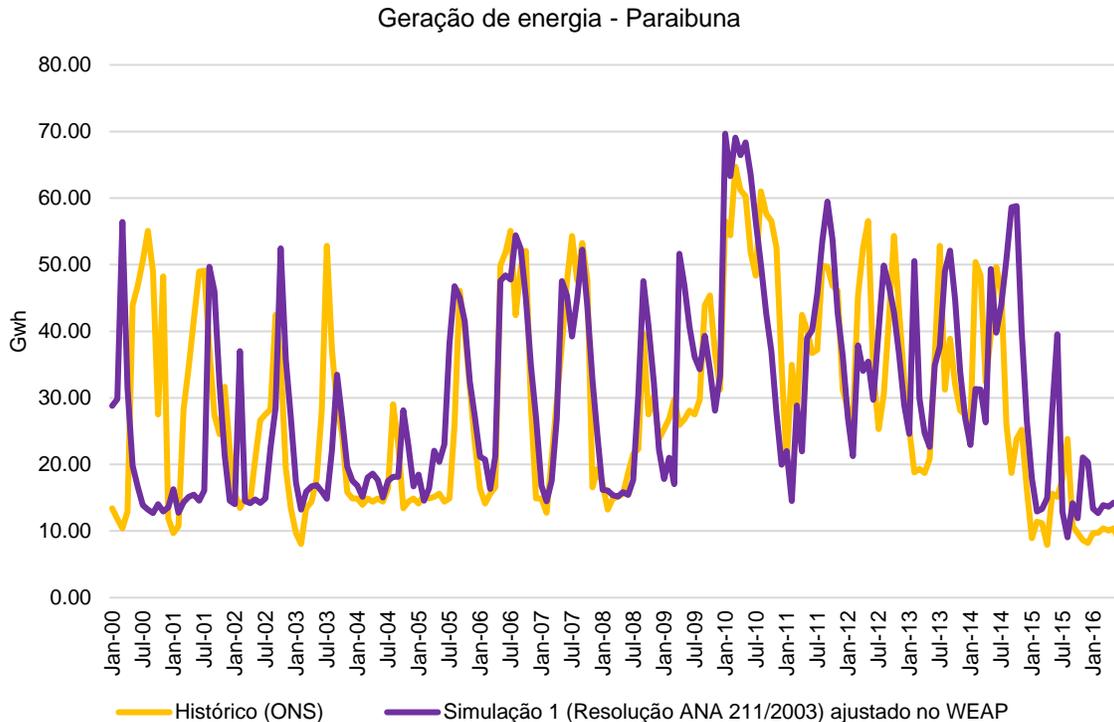


Figura 15. Comportamento da geração de energia em Paraibuna após os ajustes feitos no modelo.

3.5 Cenários simulados

O estudo utilizou etapas mensais de tempo com dados de vazões afluentes de 1931 a novembro de 2016. Três simulações foram avaliadas no WEAP para distintas regras operacionais na BRPS.

3.5.1 Cenário de Referência, regras anteriores à crise hídrica de 2014

A Resolução n. 211/2003 é aplicada neste caso (o que equivale à operação antes da crise hídrica de 2014). Esta estabelece os requisitos mínimos de vazão para os quatro principais reservatórios da BRPS, para Santa Cecília (estação de bombeamento que desvia água do

leito principal para a cidade do Rio de Janeiro) e Pereira Passos, pequena usina hidrelétrica (PCH) que está a montante do rio Guandu.

Além dos estabelecimentos de requisitos de vazão mínima, a operação da Light do Rio segue as regras da ONS (ONS, 2007). Essas regras são mantidas para os dois outros cenários simulados, uma vez que não sofrem modificação no período após a crise hídrica de 2014. Além disso, todos os cenários têm as mesmas equações para demanda de energia e exigência de vazão mínima à jusante dos reservatórios (vide capítulo 3.4). Este cenário é usado como uma linha de base para comparação com as outras duas simulações. Trata-se de um cenário no qual não havia preocupação em priorizar o atendimento às demandas em detrimento da geração de energia.

3.5.2 Cenário de Operação pós-crise, após a crise hídrica de 2014

A Resolução n. 1382/2015 é aplicada neste caso (operação após 2015). Trata-se do cenário onde foram implementadas medidas com o objetivo de conter a crise, priorizando o armazenamento de água nos reservatórios e o atendimento às demandas de abastecimento público, a fim de recuperar os volumes que se encontravam em estado crítico. Tais regras operativas, como a ordem de deplecionamento dos reservatórios e diminuição da restrição de vazões mínimas à jusante foram inseridas no WEAP (vide capítulo 3.3), permitindo guardar mais água à montante do curso do rio. Isso pode ser alcançado através de um roteiro que é executado no início de cada mês, pouco antes da avaliação das demandas de água pelo WEAP.

3.5.3 Cenário alternativo

A terceira simulação propõe uma alternativa à operação atual. Nesta simulação propõe-se utilizar curvas-guia para as operações dos reservatórios. O objetivo é assegurar que uma quantidade mínima de armazenamento (5% de armazenamento útil) seja alcançada no final da estação seca (novembro), considerando a pior condição hidrológica. Essa ideia é mais simples do que a proposta na Resolução 1382/2015, uma vez que é menos dependente do funcionamento dos outros reservatórios. É também bastante próximo a um conceito usado pela ONS ao estipular “curvas de aversão ao risco” para o SIN.

Para o desenvolvimento das curvas-guia, foram avaliados os históricos de vazões afluentes e admitido que para a pior condição, a defluência dos reservatórios seria igual à vazão

ecológica, em uma tentativa de favorecer o armazenamento e cumprir com o objetivo da curva-guia ao final do período seco. As vazões mínimas foram mantidas iguais às do cenário de referência. No WEAP as curvas-guia foram inseridas antes do volume morto (*top of inactive*), restringindo o volume mínimo operacional. Dessa forma, em novembro de cada mês os reservatórios foram forçados a respeitar a seguinte restrição:

$$V_t = 0.05 * (V_{max} - V_{min}) + V_{min}$$

Sendo $V_t = \text{Volume no mês de novembro}$. Para meses anteriores, a restrição segue a seguinte lógica:

$$V_{t-1} = V_t + (Q_{min} - Q_{a,t-1})$$

$$V_{t-2} = V_{t-1} + (Q_{min} - Q_{a,t-2})$$

E assim por diante, sendo $Q_{min} = \text{Vazão ecológica}$ e $Q_{a,t} = \text{vazão afluyente no instante } t$. O processo foi executado para todo o histórico, mas foi selecionada a curva de 2016, cujos volumes da curva-guia foram os mais críticos do histórico.

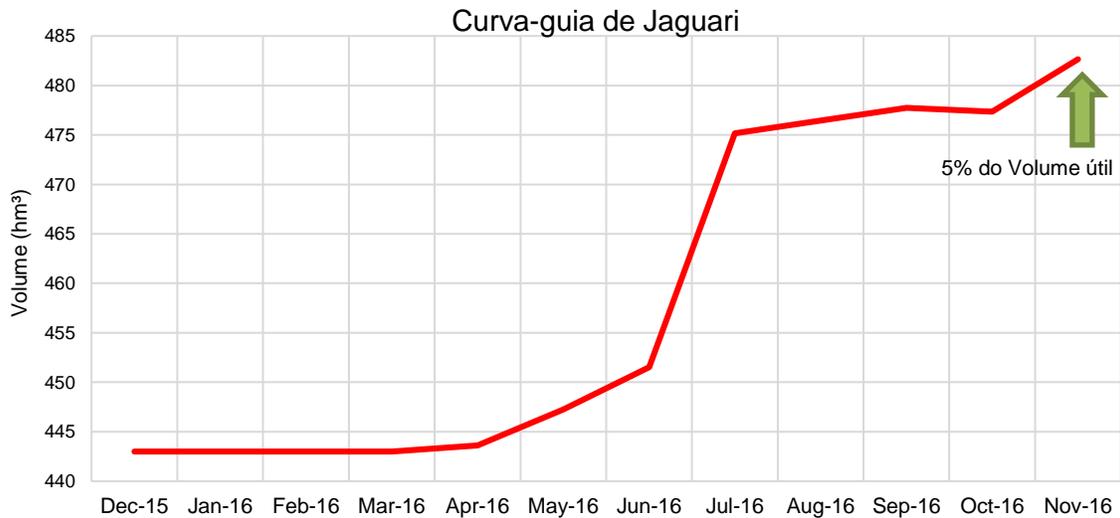


Figura 16. Curva-guia para o reservatório de Jaguari

3.5.4 Interligação Jaguari – Atibainha

A transposição do Paraíba do Sul é uma obra para levar as águas do rio Paraíba do Sul, que atravessa os Estados de São Paulo, Minas Gerais e Rio de Janeiro, para o sistema

Cantareira através de uma ligação entre os reservatórios de Jaguari, na BRPS, e Atibainha, parte do Cantareira.

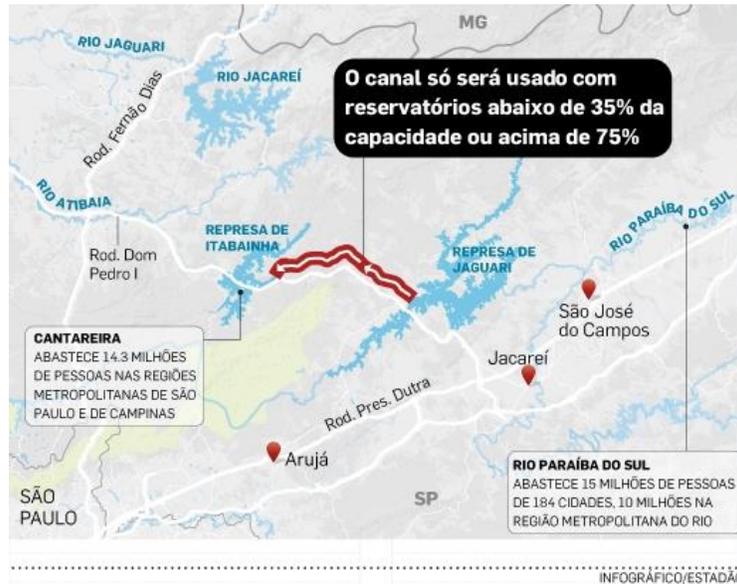


Figura 17. Esquema da interligação Jaguari – Atibainha. Fonte: Estadão

Através de um sistema de bombeamento serão transferidos, em média, $5,13\text{m}^3/\text{s}$, podendo chegar ao máximo a $8,5\text{m}^3/\text{s}$. Conforme a minuta de resolução, a Sabesp poderá usar essa água, a qual será acrescida às vazões máximas de retirada quando o sistema Cantareira estiver operando nas faixas de atenção, alerta e restrição desde que respeitado o limite outorgado (que será de $33\text{m}^3/\text{s}$). São Paulo espera que as águas do Paraíba consigam socorrer o Cantareira e ajudem a recuperar o sistema, esgotado pela seca prolongada.

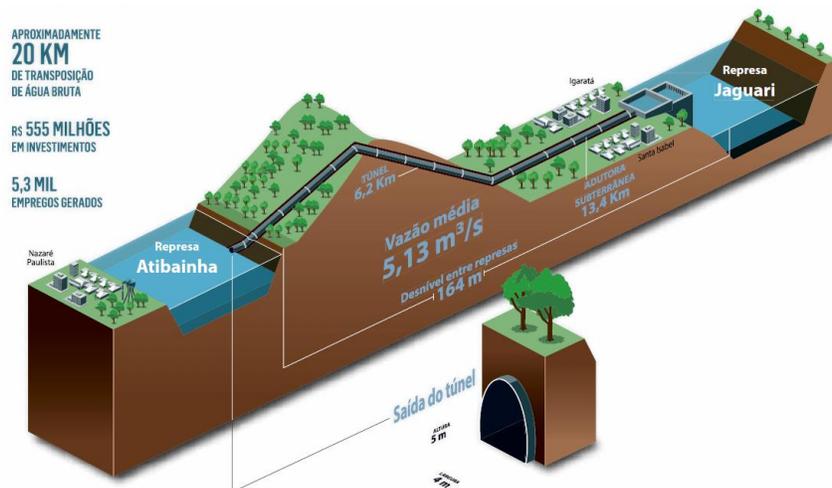


Figura 18. Sistema de bombeamento e túnel para condução da água até Atibainha. Fonte: site SABESP.

O projeto prevê uma via de mão dupla, com a construção de um canal levando água no sentido inverso, do Cantareira para o Paraíba do Sul, o que segundo argumenta o governo de São Paulo, funcionaria como uma segurança para o Rio de Janeiro em um possível período de estiagem no futuro.

A fim de verificar o impacto da interligação dos reservatórios, principalmente para a segurança hídrica do Rio de Janeiro, foi abordado neste trabalho a retirada de água em Jaguari. A simulação foi realizada tendo como base o cenário pós-crise pautado na Resolução e regras operativas atuais, testando duas condições: retirada de 5,13 m³/s e retirada de 8,5 m³/s (limite do sistema).

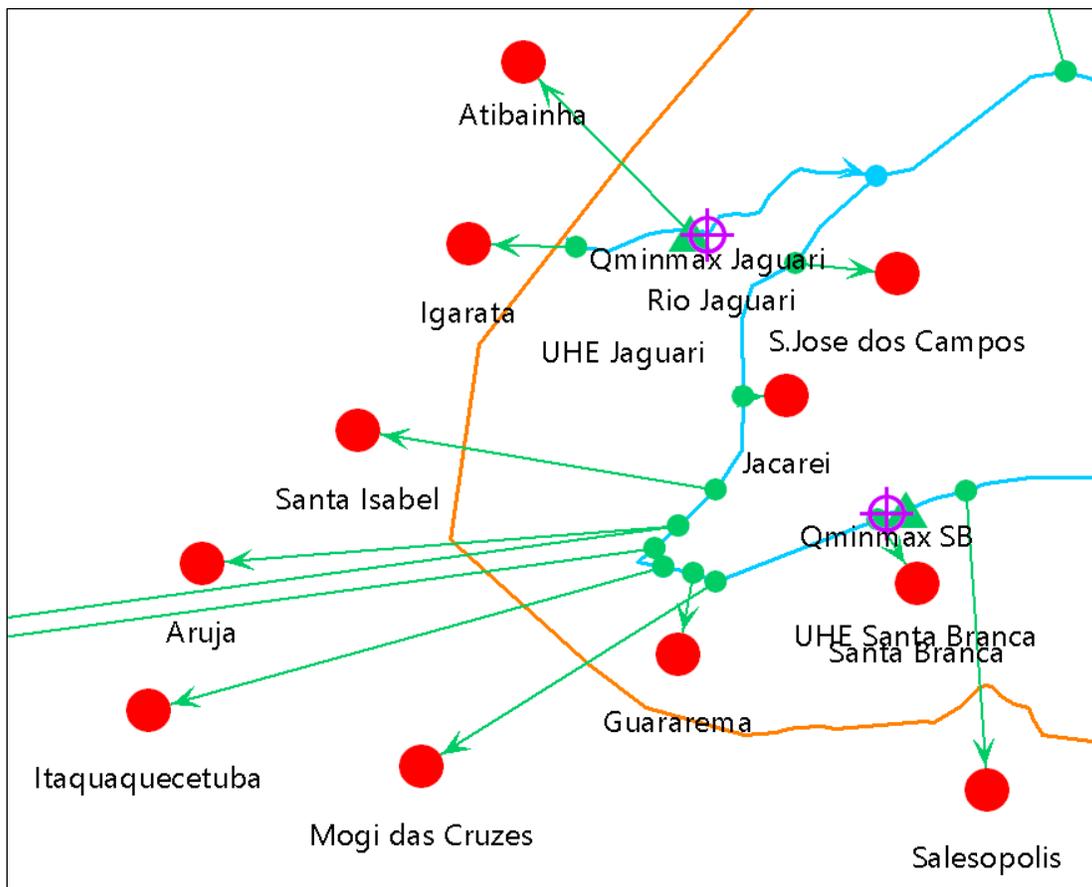


Figura 19. Criação de um ponto de demanda para simular a retirada de água para Atibainha no WEAP

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Como resultados principais foram avaliadas três variáveis: o volume de armazenamento do reservatório e sua produção hidrelétrica, que permitem analisar o *trade-off* existente entre a confiabilidade do abastecimento de água e a produção de energia hidrelétrica e a curva de permanência acima da estação de bombeamento de Santa Cecília, parte crítica para o abastecimento do Rio de Janeiro.

4.1 Comparação: cenário de referência, operação pós- crise e operação alternativa

A figura a seguir compara o volume armazenado para os três cenários durante o período simulado.

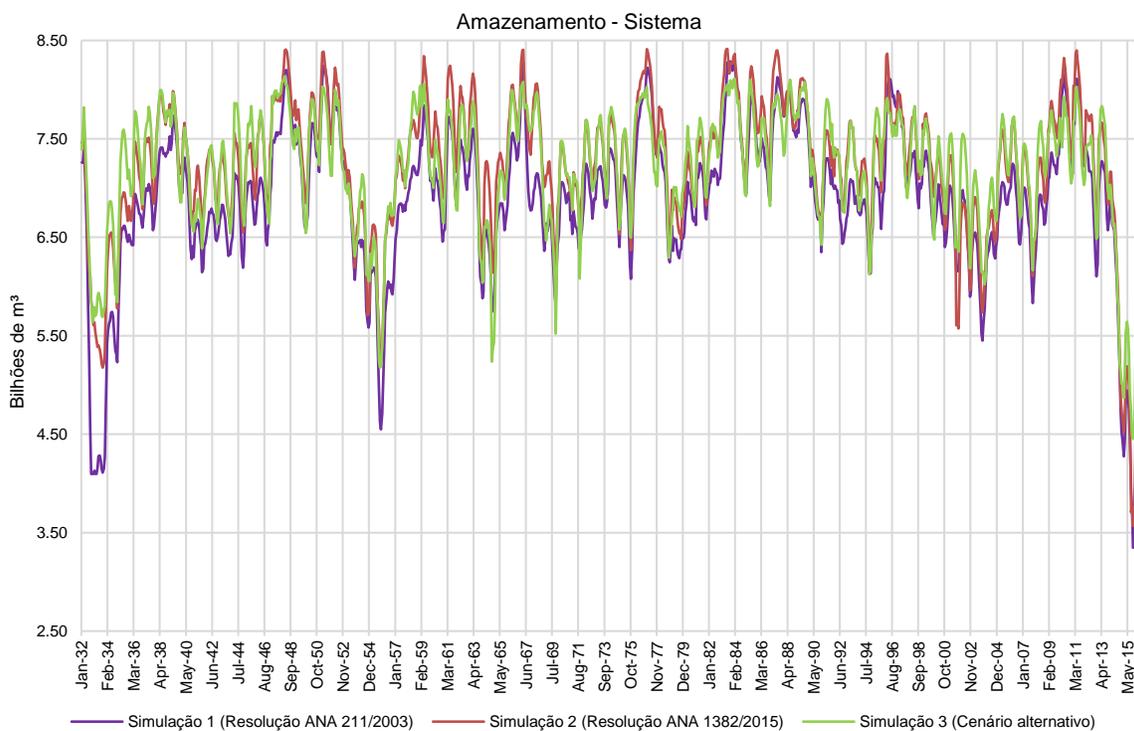


Figura 20. Volume armazenado para os três cenários

É possível ver que o Cenário de Referência tem um volume de armazenamento consistentemente menor. O Cenário de Operação pós- crise e o Cenário Alternativo, por outro lado, variam entre os maiores volumes de armazenamento. No entanto, no final do

período observado, quando a crise hídrica foi mais acentuada, o cenário alternativo permanece em um nível mais elevado, como mostrado no detalhe da Figura 21.

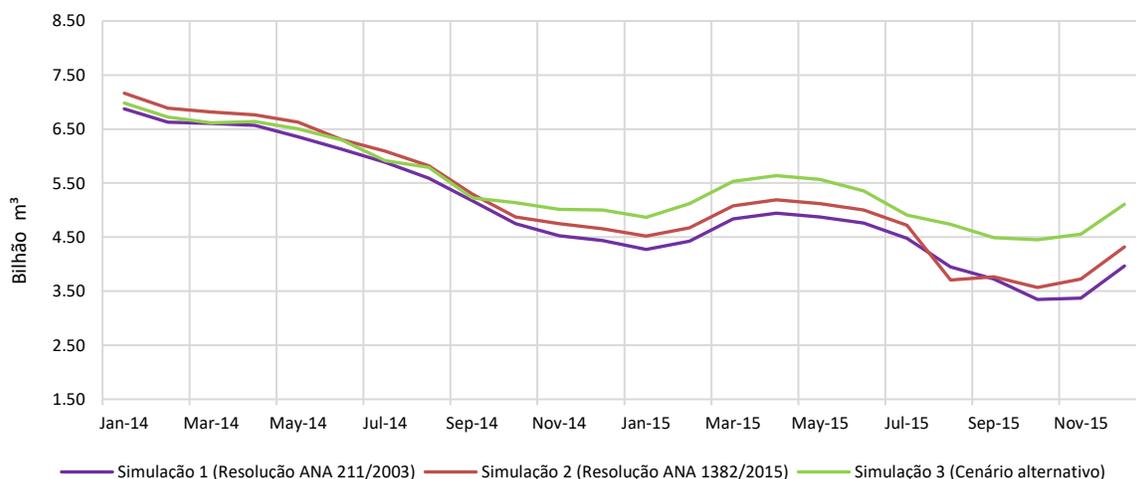


Figura 21. Volume armazenado para os três cenários durante a crise hídrica

Analisando os resultados de armazenamento para a simulação 2, pode-se perceber claramente a operação comandada pela ordem de deplecionamento dos reservatórios. O detalhe do resultado (Figura 22) mostra que o script inserido no modelo funcionou e que os estágios foram respeitados.

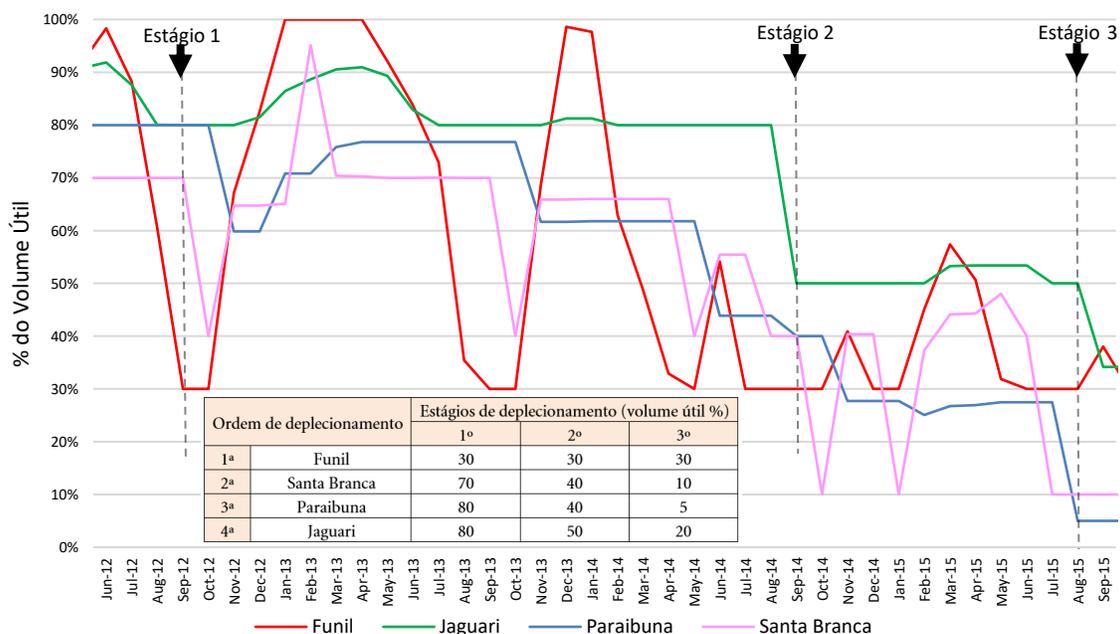


Figura 22. Detalhe funcionamento da ordem de deplecionamento dos reservatórios no modelo

Para o perfil hidrelétrico, os resultados foram semelhantes em todos os cenários, conforme observado para o perfil de volume de armazenamento. No entanto, o Cenário de Operação pós-crise tem uma geração consistentemente inferior. Através das simulações no WEAP ficaram bem evidentes os períodos de crise do setor elétrico de 1951 a 1956 e de 2013 a 2016, sendo este último mais grave do que o anterior, com geração total de energia bem inferior devido aos baixos armazenamentos causados pelo período hidrológico não favorável e má gestão dos reservatórios.

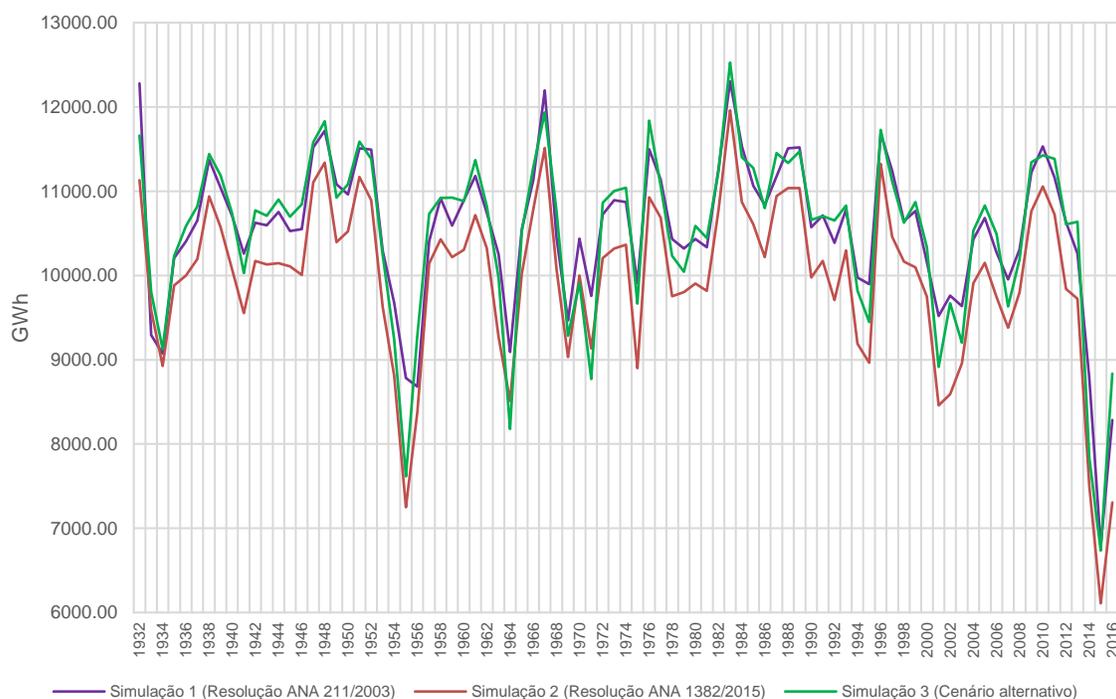


Figura 23. Geração de energia anual para os 3 cenários

Esse resultado também pode ser observado no gráfico a seguir, que mostra os pontos de médio, máximo e mínimo da geração hidrelétrica para os três cenários. Tanto o Cenário de Referência como o Cenário Alternativo têm uma geração hidrelétrica média próxima (com o Cenário de Referência sendo apenas marginalmente maior do que o Cenário Alternativo), embora o último tenha um menor valor mínimo e maior valor máximo observado. Além disso, o Cenário de Operação pós-crise tem valores mais baixos para geração de energia hidrelétrica para todos os valores observados (máximo, médio e mínimo).

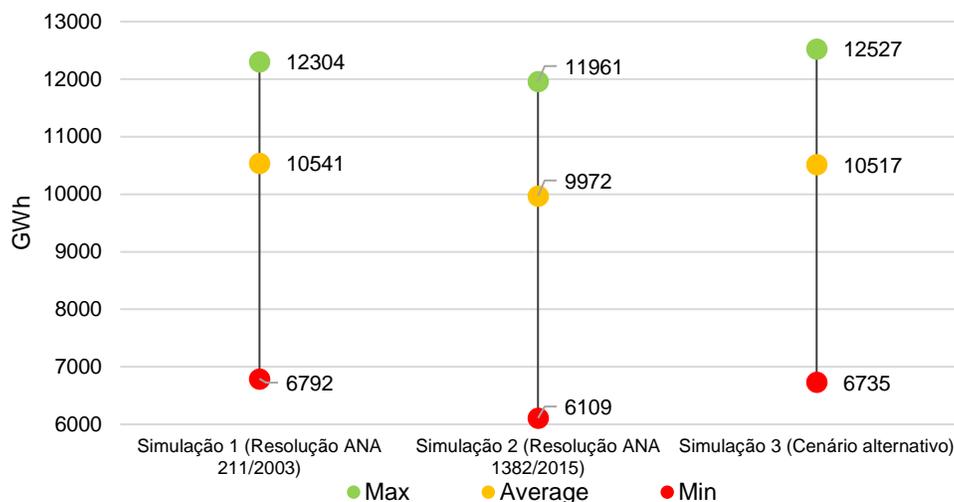


Figura 24. Comparação da geração de energia entre os 3 cenários

Esses resultados mostram uma evidência clara do *trade-off* entre a confiabilidade do sistema e a geração de energia hidrelétrica, especialmente no caso do cenário de referência. No entanto, como o Cenário Alternativo manteve as exigências de vazão mínima estabelecidas antes da crise hídrica, tendo assim uma restrição que força os reservatórios a liberarem mais água (em comparação com a operação atual que foi aplicada após a crise), gera mais energia hidrelétrica mesmo que seu volume de armazenamento seja maior que o Cenário de Referência. Além disso, é importante notar que o Cenário Alternativo tem um nível de armazenamento mais elevado para a crise hídrica de 2014-2015 quando comparado aos outros cenários, o que é um ponto importante a ser considerado, pois manteve mais água armazenada durante um período crítico.

É importante mencionar que em nenhum dos cenários simulados houve demanda de água não atendida. Assim, ainda havia água suficiente na BRPS para atender ao uso da água da população local. No entanto, uma demanda adicional de água poderia estressar o sistema.

Abaixo está a curva de permanência de Santa Cecília, que é um ponto crítico da BRPS para o Rio de Janeiro. De fato, 119 m³/s devem ser bombeados de Santa Cecília para Santana, a fim de suprir a demanda de água do Rio de Janeiro. Os restantes 71 m³/s são liberados à jusante de Santa Cecília para o curso principal. Assim, uma vazão total de 190 m³/s deve ser encontrada acima da estação de bombeamento Santa Cecília.

Apesar dos Cenários de Nova Resolução e Alternativa atenderem a meta de 190 m³/s em mais de 80% do tempo, o que é maior do que o observado para o Cenário de Referência, o Cenário Alternativo oferece mais segurança de abastecimento de água para o Rio de Janeiro e cidades a jusante do que o Cenário de Operação pós- crise.

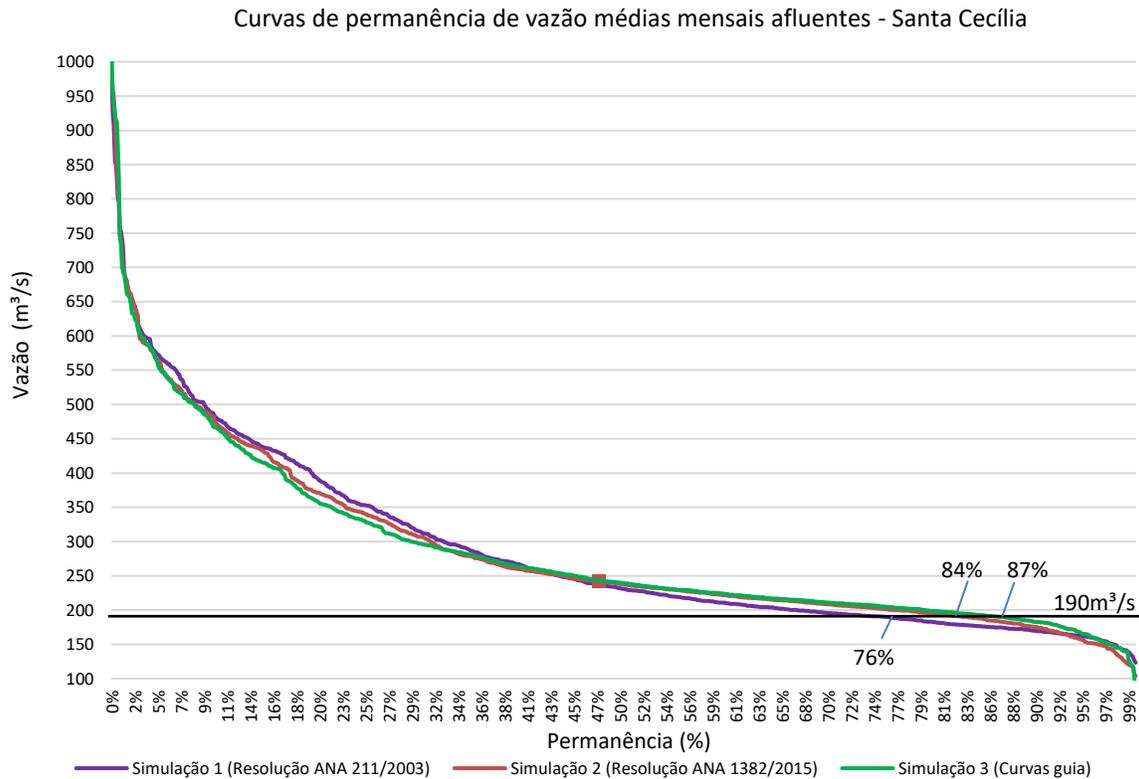


Figura 25. Curva de permanência em Santa Cecília para os 3 cenários

A partir dos resultados acima, pode-se dizer que o Cenário Alternativo é uma operação ótima de Pareto, uma vez que os recursos hídricos estão melhor alocados (geração de energia hidrelétrica, volume de armazenamento e porcentagem de permanência das vazões afluentes à montante de Santa Cecília).

4.2 Comparação: retiradas para Atibainha na operação pós- crise

A simulação utilizada como base foi o cenário pós- crise pautado na Resolução e regras operativas atuais, testando três condições: sem retirada, retirada de 5,13 m³/s e retirada de 8,5 m³/s (limite do sistema).

Com relação à interligação entre os reservatórios de Jaguari e Atibainha, os resultados para armazenamento no sistema mostram que as simulações com retirada de água para o Atibainha armazenaram menos água durante praticamente todo o período, porém conseguiu conter um pouco de água a mais no período mais crítico. Como era de se esperar o armazenamento para a simulação com retirada de $5\text{m}^3/\text{s}$ se manteve majoritariamente maior que o de $8\text{ m}^3/\text{s}$.

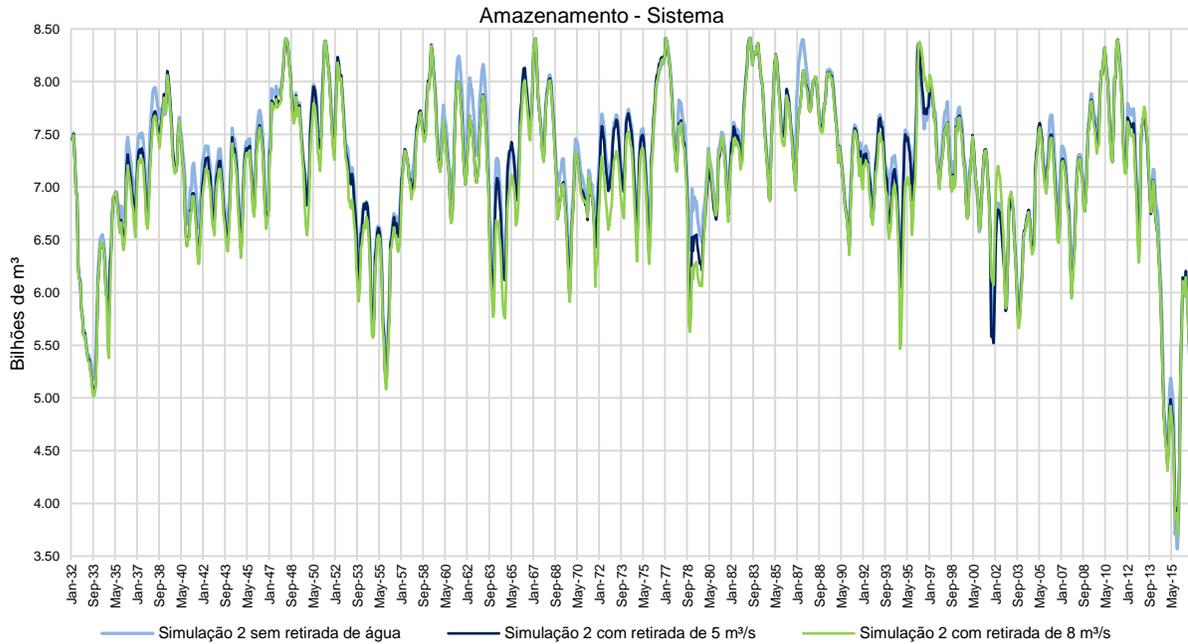


Figura 26. Volume armazenado para os 3 cenários simulando a retirada de água para Atibainha

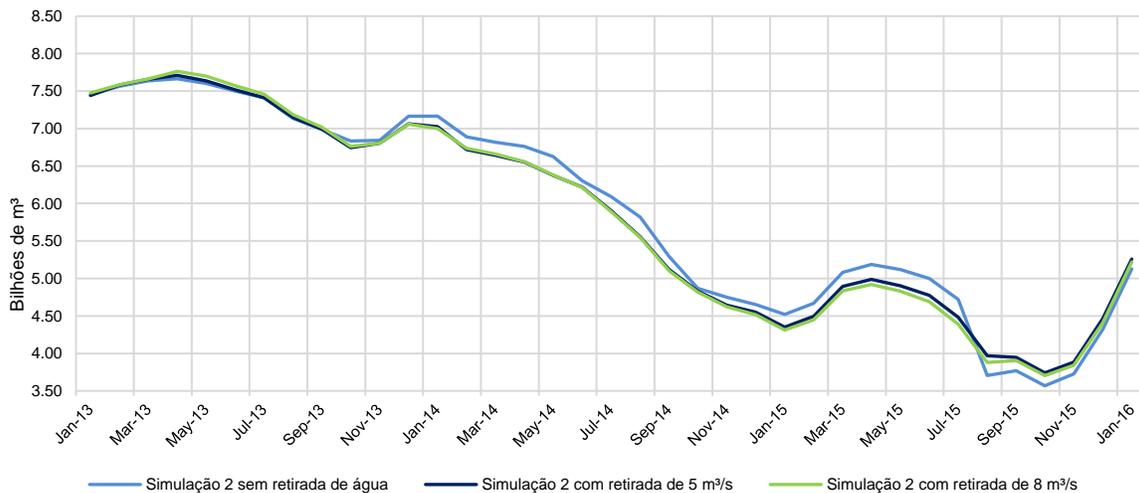


Figura 27. Volume armazenado no período de crise simulando a retirada de água para o Atibainha

A Figura 28 mostra resultados da geração anual de energia para os casos analisados, não havendo uma discrepância significativa entre essas 3 simulações, logo a retirada de água da BRPS não causará prejuízos à produção de energia na bacia.

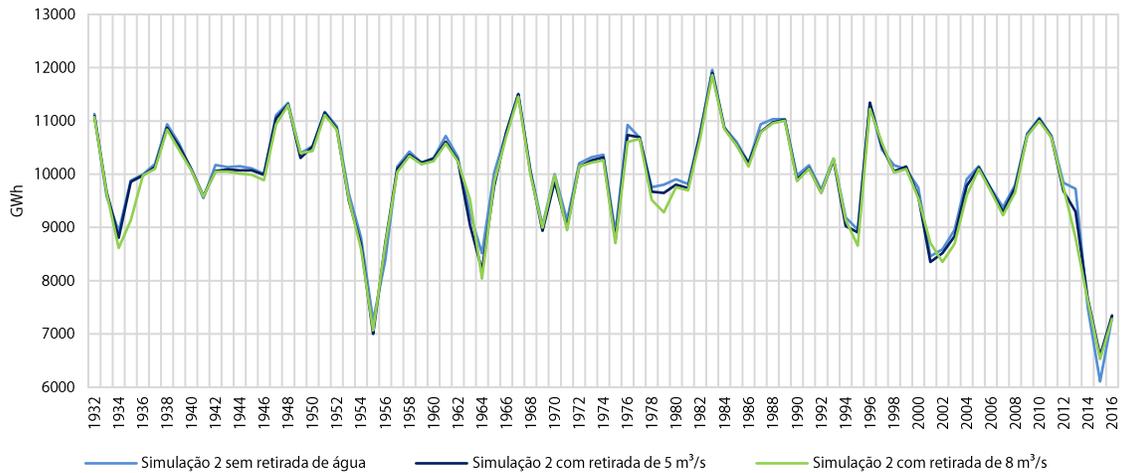


Figura 28. Geração de energia anual para as simulações com retirada de água para Atibainha

Tal conclusão pode ser verificada no gráfico a seguir. Tanto os pontos de geração hidrelétrica máxima e média se encontram bem próximos para as três simulações, sendo o valor de geração mínima ligeiramente menor para o cenário de operação pós-crise sem a interligação Jaguari-Atibainha

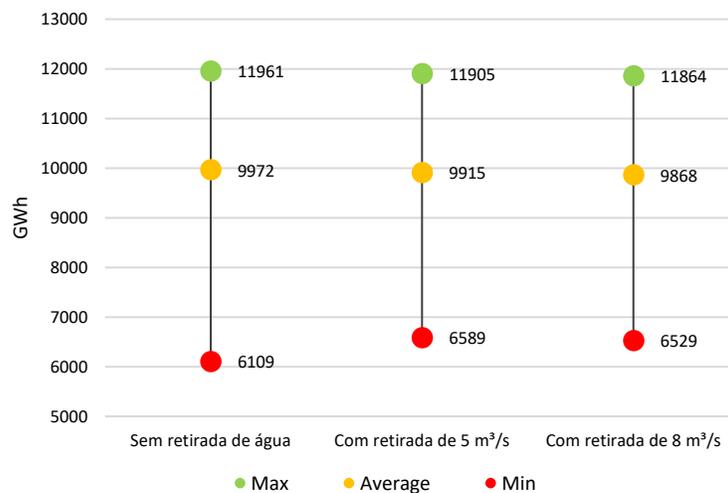


Figura 29. Comparação de geração de energia para os cenários de retirada

A curva de permanência de Santa Cecília para essa simulação é um ponto de verificação importante, pois vai determinar se o processo de transposição das águas da BRPS causará algum prejuízo ao atendimento do Rio de Janeiro. Se a permanência de vazões médias mensais afluentes for muito alterada, isto poderá ser um alerta. Entretanto os resultados mostram que a permanência de vazões para os três cenários difere muito pouco, uma vez que todas atendem à meta de 190 m³/s em mais de 80% do tempo. No entanto, a simulação 2, com regra operativa atual e sem retirada de água oferece maior segurança à cidade do Rio de Janeiro, como já se imaginava.

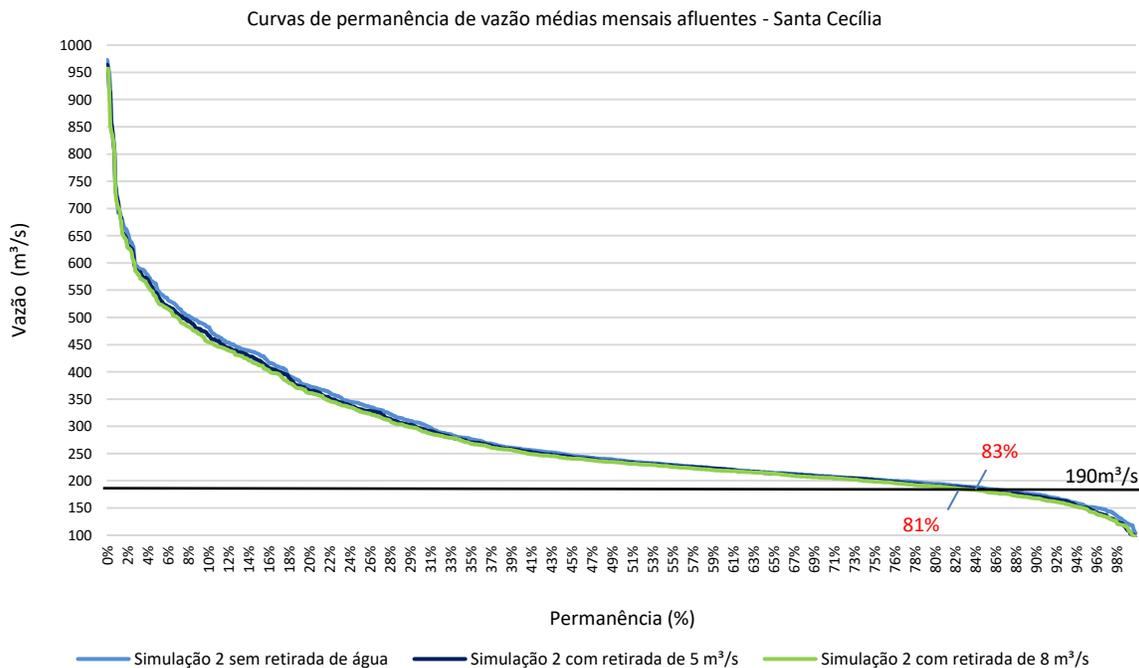


Figura 30. Curva de permanência em Santa Cecília para os cenários de retirada

É importante ressaltar que nas duas simulações, onde houve retirada de água, algumas demandas não foram atendidas. O problema se mostrou maior com a retirada de 8,5 m³/s provocando um não atendimento de 8,5 m³/s contra 0,5 m³/s no sistema de transposição com retirada de água de 5,13 m³/s. Nos dois casos, os locais prejudicados se encontram em sua maioria à montante da UHE Funil, ou seja, todos no Estado de São Paulo.

5 CONCLUSÕES

A BRPS desempenha um papel central na região Sudeste do Brasil, já que atravessa três dos estados mais importantes e é de importância estratégica para as metrópoles de São Paulo e Rio de Janeiro.

Em 2014-2015, a BRPS sofreu uma grave crise de escassez de água, o que levou a um aumento das discussões sobre o seu funcionamento. No Brasil, os recursos hídricos são administrados pelo governo federal (por meio da Agência Nacional de Águas) e pelos comitês de bacias hidrográficas, que promovem discussões entre as partes interessadas com uma local. Conflitos de interesse são comuns entre os participantes, levando a poucos ou nenhum acordo.

Para apoiar as decisões dos comitês de bacias hidrográficas e otimizar os usos múltiplos da água, é importante que as partes interessadas tenham um ponto de apoio técnico para as suas discussões. Nesse sentido, este trabalho fez uma avaliação integrada da BRPS usando o WEAP, uma ferramenta desenvolvida pela SEI para o planejamento e gestão dos recursos hídricos.

Este trabalho apresentou três simulações baseadas em diferentes operações da BRPS: (i) Cenário de Referência ou operação pré-crise, (ii) Operação pós-crise e (iii) Cenário Alternativo. Além desses cenários, a presente pesquisa contou com uma análise extra avaliando o impacto da interligação entre os reservatórios de Jaguari e Atibainha.

O primeiro cenário modela a operação antes da crise hídrica de 2014-2015, o segundo modela a operação atual, conforme estabelecido pela resolução 1382/2015, e o cenário alternativo propõe uma alternativa com base em curvas-guia para as operações do reservatório. Ademais avaliou-se a transposição de águas da BRPS através de outras duas simulações com retirada de água de 5,13 m³/s e 8,5 m³/s em comparação com o cenário que modela a operação atual.

Conforme constatado nos principais resultados avaliados, os três cenários possuem perfis de armazenamento e geração de energia hidroelétrica similares. No entanto, o cenário de referência tem um volume de armazenamento consistentemente menor, pois prioriza a geração de energia hidrelétrica. Os cenários restantes variam entre ter maiores volumes de armazenamento, mas o Cenário Alternativo mantém mais água armazenada durante o

período de crise (2014-2015). O Cenário Alternativo teve maior geração hidrelétrica, pois manteve maiores valores de exigências de vazão mínima.

O Cenário Alternativo também mostrou maior confiabilidade para a manutenção da demanda de fluxo a montante de Santa Cecília, que é crucial para o abastecimento de água do Rio de Janeiro. Assim, a regra de operação alternativa, estabelecida com base nas curvas-guia para os principais reservatórios, mostra ganhos globais para a BRPS (maior confiabilidade do suprimento de água sem sacrifício para a energia hidrelétrica).

Os resultados para as simulações que tinham por objetivo verificar a viabilidade da interligação Jaguari – Atibainha mostraram que com uma retirada menor que 5,13 m³/s a transposição é possível sem causar danos à bacia e ao abastecimento dos municípios que dependem de suas água. Mesmo uma retirada de 5,13 m³/s já causa algum tipo de “prejuízo” em alguns municípios, mas pode ser contornado. Já a retirada de 8,5 m³/s se mostrou inviável deixando sem atendimento diversos municípios à montante da UHE Funil, no Estado de São Paulo. Os resultados também mostraram que a segurança hídrica do Rio de Janeiro não será afetada com a transposição já que não há alterações significativa na permanência de vazões médias afluentes à Santa Cecília, onde ocorre o bombeamento que garante o abastecimento da cidade.

É importante ressaltar a falta de dados e de monitoramento das demandas, principalmente das industriais e de irrigação. As demandas precisam ser melhor determinadas para controle dos recursos hídricos da bacia e também de processos de outorga. Atualmente a ANA não exerce total controle sobre essas retiradas.

Para trabalhos futuros, sugere-se fazer um estudo com maior ênfase nos múltiplos usos da água. Neste caso poderiam ser utilizadas as demandas desagregadas por uso, além do crescimento populacional como fator de influência na demanda ao longo do tempo.

6 REFERÊNCIAS

AGÊNCIA DAS BACIAS PCJ. **Boletim de monitoramento dos reservatórios do sistema Cantareira**São PauloFundação agência das bacias hidrográficas dos rios Piracicaba, Capivari e Jundiá, , 2016.

ANA. **O COMITÊ DE BACIA HIDROGRÁFICA O QUE É E O QUE FAZ? VOLUME 1**BrasíliaANA, , 2011.

ANA. **FAQ Cantareira**.

AXELROD, R. Conflict of Interest: An Axiomatic Approach. **The Journal of Conflict Resolution**, v. 11, n. 1, p. 87–99, 1967.

CEIVAP. **Sistema de Informações Geográficas e Geoambientais da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul**.

GOMIDE, L. S. F. Range and Deficit Analysis Using Markov Chains. **Hydrology Papers** 79, n. 79, p. 83, 1975.

KUMLER, L. M.; LEMOS, M. C. Managing Waters of the Paraíba do Sul River Basin, Brazil: a Case Study in Institutional Change and Social Learning. **Ecology and Society**, v. 13, n. 2, 2008.

LIGHT. ANEXO I -O Sistema Gerador da LIGHT. 2005.

OECD. **Resources Governance in Brazil**. Paris: OECD Publishing, 2015.

ONS. **Atualizações de séries históricas de vazões - período 1931 a 2007**. Rio de Janeiro: [s.n.].

OTTO, F. L. et al. Factors other than climate change, main drivers of 2014/2015 water shortage in southeast Brazil. **American Meteorological Society**, v. 96, n. 12, 2015.

PRESIDÊNCIA DA REPÚBLICA. 9433. . 1997.

PSR. **Avaliação dos impactos de novas transposições de vazão no rio Paraíba do Sul**Rio de Janeiro, 2013.

SCHMIDT, M.; LIPSON, H. Distilling Free-Form Natural Laws from Experimental Data. **Science**, v. 324, n. 5923, p. 81–85, 2009.

SETHI, R. et al. Performance evaluation and hydrological trend detection of a reservoir under climate change condition. **Modeling Earth Systems and Environment**, v. 1, n. 4, p.

33, dez. 2015.

YATES, D. et al. WEAP21 – A Demand-, Priority-, and Preference-Driven Water Planning Model Part 1: Model Characteristics. **Water International**, v. 30, n. 4, p. 487–500, 2005.