



I SIMPÓSIO DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO SÃO FRANCISCO

Integrando conhecimentos científicos em defesa do Velho Chico.

Apoio a Decisão na gestão de recursos hídricos do Sub-médio do São Francisco usando modelagem hidro-econômica integrada

Souza da Silva, G.N.^{1} & Alcoforado de Moraes, M.M.G.² & Koch, H.³ & Figueiredo, L.E.⁴
& Selge, F.⁵ & Azevedo, J.R.G.⁶*

Resumo – Modelos hidro-econômicos podem mensurar os efeitos econômicos de diferentes regras operacionais, restrições ambientais, manutenção de ecossistemas, restrições técnicas e restrições institucionais. Para a determinação da alocação ótima dos principais usos da água para o Sub-Médio da bacia do rio São Francisco foi desenvolvido e aplicado um modelo de otimização hidro-econômico. Curvas de demanda são utilizadas para os usuários da agricultura irrigada e abastecimento humano, ao invés de requerimentos fixos pelos recursos hídricos. Este trabalho analisou várias alternativas operacionais e restrições em termos econômicos. Os resultados mostram que restrições institucionais, tais como prioridades no abastecimento humano e limites mínimos de liberação a jusante de reservatórios, bem como valores assegurados para a transposição impactam nos custos e benefícios dos principais usos econômicos da região. Especialmente os custos de escassez dos usuários de irrigação associados à manutenção de ecossistemas e restrições ambientais são significativos.

Palavras-Chave – Modelo hidro-econômico, alocação de água, custo de escassez

INTRODUÇÃO

A região do Sub-Médio da bacia do rio São Francisco tem uma variedade de usos consuntivos e não-consuntivos. Modelos hidro-econômicos são importantes para avaliar os custos de escassez e benefícios econômicos associados aos usos, bem como identificar o ótimo econômico da alocação de água entre os diferentes usuários. Os resultados de tal modelagem podem mensurar os efeitos econômicos de diferentes restrições ambientais, manutenção de ecossistemas e institucionais atualmente sendo discutidas. Devem ser úteis aos decisores no estabelecimento de políticas que criem incentivos adequados ao uso eficiente do recurso e evitem sua sobre-exploração, auxiliando na promoção de um desenvolvimento sustentável.

No lugar de requerimentos fixos pelo recurso, curvas de demanda são utilizadas para os usuários da agricultura irrigada e abastecimento humano, estimadas usando o método de Programação Matemática Positiva (HOWITT, 1995) e Expansão de Ponto (GRIFFIN, 2006). As curvas de demanda capturam o comportamento do usuário e o significado econômico da escassez, mostrando-se sensíveis a mudanças no padrão de comportamento dos usuários e a sua eficiência no uso da água. Isto permite a valoração econômica da água para diferentes usos, permitindo uma comparação mais realista entre os mesmos, bem como subsidiando a aplicação de políticas que incentivem o uso racional do recurso.

¹ UFPE - Universidade Federal de Pernambuco, Recife – PE, geraldsozadasilva@gmail.com

² UFPE - Universidade Federal de Pernambuco, Recife – PE, marcia.alcoforado.ma@gmail.com

³ Potsdam Institute for Climate Impact Research – PIK, P.O. Box. 601 203, D-14412 Potsdam, Germany, hagen.koch@pik-potsdam.de

⁴ UFPE - Universidade Federal de Pernambuco, Recife – PE, lenfigueiredo@yahoo.com.br

⁵ Technische Universität Berlin – TUB, Berlin, Germany

⁶ Departamento de Eng. Civil, Centro de Tecnologia e Geociências - CTG, Universidade Federal de Pernambuco - UFPE, Recife, Brazil

MÉTODOS

Hidrologia (Oferta de água)

Para simular os dados de oferta hidrológicos foram utilizados resultados do modelo SWIM (KOCH, LIERSCH, *et al.*, 2015a). O SWIM (KRYSAKOVA, MÜLLER-WOHLFEIL e BECKER, 1998; KRYSAKOVA, WECHSUNG, *et al.*, 2000) foi aplicado para a bacia hidrográfica do Rio São Francisco no âmbito do projeto INNOVATE. O SWIM é um modelo eco-hidrológico de fluxo permanente e espacialmente semi-distribuído. O modelo foi desenvolvido a partir de modelos SWAT (ARNOLD, ALLEN e BERNHARDT, 1993) e Matsalu (KRYSAKOVA, MEINER, *et al.*, 1989) para avaliação de impacto de mudanças no uso da terra e do clima. SWIM simula processos hidrológicos, crescimento da vegetação, erosão e dinâmica de nutrientes na escala da bacia hidrográfica (KOCH, LIERSCH e HATTERMANN, 2013).

Curvas de demanda

A estimativa dos benefícios marginais e a disposição a pagar pela água dos usuários, na forma de uma função da demanda de água, é um meio de integrar o comportamento econômico em modelos matemáticos desenvolvidos para estudar o efeito econômico das diferentes políticas e instrumentos da gestão de recursos hídricos. A utilização destes conceitos (benefícios econômicos e disposição a pagar) em modelos hidro-econômicos podem ser utilizados para análise integrada de demandas econômicas, revisão de políticas tais como a tarifação da água, bem como avaliação de restrições institucionais e ambientais.

As curvas de demanda descrevem a variação do benefício marginal da água em função da quantidade de água alocada para um determinado uso, substituindo o conceito de "demanda de água" como um requerimento fixo do usuário. Em regiões onde a água é escassa, torna-se cada vez mais complexa e custosa a estratégia de considerar a demanda de água como um requerimento fixo, do usuário, provendo ao mesmo o recurso até o ponto onde o seu benefício marginal seja igual ao custo marginal da oferta. Além disso, este último custo é muitas vezes subestimado, uma vez que não inclui os custos ambientais e outras externalidades (MORAES, 2012).

Os métodos usados nesta pesquisa para estimar as curvas de demanda de água são os geralmente usados em modelos hidro-econômicos, a saber: Programação Matemática Positiva (PMP) (HOWITT, 1995) e o método de Expansão de ponto (GRIFFIN, 2006). Curvas de demanda para os perímetros irrigados no Sub-médio e para os irrigantes difusos nas margens do rio foram obtidos com o método PMP (FIGUEIREDO e MORAES, 2015) e o método de expansão de ponto foi aplicado (SILVA e MORAES, 2015) para gerar curvas de demanda de água para o abastecimento humano dos municípios. Essas curvas de demanda de água foram incorporadas no modelo hidro-econômico, sendo utilizadas para mensurar os benefícios econômicos e custos de escassez associados a diferentes alocações de água aos diferentes usos (modelo de otimização).

Modelo de otimização

O modelo hidro-econômico foi desenvolvido em GAMS (*General Algebraic Modeling System*), que se constitui numa plataforma de modelagem para problemas de programação matemática, ou seja, problemas de otimização de uma função. Nesta plataforma é possível desenvolver tanto problemas de Programação Linear como Não-Linear, sendo muito útil especialmente para resolver problemas grandes e complexos, ou seja, aqueles que envolvem um grande número de variáveis e restrições, bem como alto grau de não-linearidade (ROSENTHAL, 2012). O modelo é determinístico, baseando-se no “*perfect foresight*” (previsão perfeita), o que significa que os resultados são obtidos sob o conhecimento perfeito do futuro, ou seja, da disponibilidade hídrica durante períodos de tempo estudados. Os períodos devem ser representativos das condições hidrológicas da região estudada e os resultados fornecem assim um limite superior de uso do sistema. O uso de modelos hidro-econômicos permite mensurar os trade-offs entre os usos, custos de escassez e benefícios, bem como preços-sombra de restrições institucionais e ambientais em discussão, tais como os estabelecidos pelo Koch *et al.* (2015).

Cenários

Um período de sete anos (2000-2006) de escassez no passado foi selecionado para representar a oferta hidrológica, diante da qual obter-se-á a alocação econômica ótima. As restrições utilizadas são técnicas, socioeconômicas e ambientais. Os dados do período representam um conjunto inicial (baseline) utilizado para a comparação de alteração nas regras operacionais, mudanças climáticas e mudanças de uso de solo. Em seguida foram medidos economicamente os impactos de diferentes estratégias de alocação de água, alterando-se as restrições e a função objetivo no modelo.

Referência (Baseline)

Inicialmente foram utilizadas apenas restrições operacionais e algumas institucionais dos reservatórios para determinar o ótimo econômico no período passado como referência. As restrições incluídas foram: as físicas da barragem, casa de força e vertedouro; o controle de cheias, e as institucionais: as vazões mínimas efluentes de Sobradinho > 1300m³/s e de Xingo > 1300m³/s. A função objetivo minimiza o custo de escassez dos perímetros irrigados, pequenos agricultores e abastecimento humano, além da diferença entre a produção de energia e a energia firme assegurada prevista para cada usina. Ao mesmo tempo maximiza-se o benefício econômico da produção de energia. A equação (1) mostra a função objetivo.

$$\text{Minimizar} \left(\begin{array}{l} \sum_{n \in \text{pi}} \sum_a \sum_m C_{n,a,m} + \sum_{n \in \text{id}} \sum_a \sum_m C_{n,a,m} + \sum_{n \in \text{ah}} \sum_a \sum_m C_{n,a,m} \\ - \sum_{n \in \text{ener}} \sum_a \sum_m B_{n,a,m} + \sum_{n \in \text{ener}} \sum_a \sum_m (E_{\text{assegurada}(n)} - E_{n,a,m})^2 \end{array} \right) \quad (1)$$

Sendo: n Usuário: pi (perímetro irrigado), id (irrigação difusa), ah (abastecimento), ener (energia)
C Custo de escassez [R\$]
B Benefício usuário [R\$]
E Energia [MW]
a, m Ano, Mês

Baseline priorizando o abastecimento humano

São utilizadas as mesmas restrições como no cenário anterior, entretanto com a prioridade para abastecimento humano como previsto na lei 9433.

Baseline com a transposição do SF

O projeto de integração do Rio São Francisco (PISF) é uma obra do Governo Federal cuja implantação, operação e manutenção, é de responsabilidade do Ministério da Integração Nacional. O PISF é concebido com o objetivo de garantir oferta hídrica para a região semiárida dos quatro Estados do Nordeste Setentrional (Paraíba, Pernambuco, Rio Grande do Norte e Ceará). Dois sistemas hidráulicos estão sendo construídos (Eixo Norte e Eixo Leste) e serão operados e mantidos pela Companhia de Desenvolvimento dos Vales do Paraíba e São Francisco - CODEVASF. (BRASIL, 2006; CASTRO, 2011) As retiradas médias da transposição são simuladas neste cenário para avaliar os impactos econômicos na bacia doadora.

Baseline com abastecimento humano sem perdas

Os sistemas de abastecimento dos municípios mostram perdas elevadas no Sub-Médio. É simulada neste cenário, uma eliminação nas perdas dos usuários de abastecimento humano do SM. Pode-se dessa forma mensurar os impactos econômicos nos mesmos e nos demais usos quando da diminuição dessas perdas. Neste cenário as curvas de demanda são alteradas considerando o abastecimento dos municípios sem perdas. Foram utilizadas as mesmas restrições como no cenário anterior, para avaliar o custo para o sistema.

Baseline com Hidrograma Ambiental (FERREIRA, 2014; MEDEIROS, FREITAS, et al., 2013)

Com a construção de reservatórios no rio São Francisco alterou-se o regime da vazão natural de períodos secos e úmidos, que alternavam-se. Para o Sub-Médio do São Francisco, hidrogramas ambientais foram sugeridos (FERREIRA, 2014; MEDEIROS, FREITAS, et al., 2013), que propunham valores-alvo mensais de vazões no rio a jusante do reservatório Xingo, com o objetivo de

tornar as condições no Baixo São Francisco ecologicamente favoráveis a processos naturais tais como: ciclos de plantas ribeirinhas/aquáticas e animais; bem como processos sociais de *stakeholders*, como usuários e instituições. A Tabela 1 mostra os valores do hidrograma ambiental propostos.

Tabela 1 – Vazões mensais mínimas do hidrograma ambiental

mês [m ³ /s]	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Aug	Set	Out	Nov	Dez
Ano normal	2 754	3 150	3 097	2 685	1 727	1 588	1 448	1 300	1 300	1 300	1 647	2 234
Ano seco	2 020	2 300	2 100	1 837	1 271	1 218	1 100	1 100	1 100	1 100	1 331	1 740

Baseline com ‘Controle de nível - Innovate’ (KOCH, SELGE, et al., 2015b)

No âmbito do projeto INNOVATE foram sugeridas regras operacionais alternativas para os reservatórios focando em aspectos ambientais, ou seja, o ambiente fluvial ou o ambiente dos próprios reservatórios com o objetivo de equilibrar ecossistemas e demandas de água antrópicas. Na opção de ‘Controle de nível’, as variações do nível de água são reduzidas a um máximo de 0,05 m/dia, restringindo o volume de água máximo diário a ser liberado em cada reservatório. Além disso, para reduzir a variação do nível máxima de 12 m e para reduzir a evaporação do reservatório de Sobradinho o nível máximo do mesmo foi restrito a 390,0 m., reduzindo o seu volume útil para 19.479 hm³. Reduzir as variações diárias no nível de água dos reservatórios aumenta a estabilidade e manutenção dos ecossistemas.

Baseline com ‘Capacidade reduzida - Innovate’ (KOCH, SELGE, et al., 2015b)

No mesmo trabalho foram analisadas outras alterações no volume útil. Portanto, para o reservatório Itaparica como opção de operação foi sugerida uma restrição das variações do nível de água para valores mínimos e máximos de 303,5 e 304,0 m. Nas simulações para Sobradinho variações do nível máximo do reservatório foram restritas aos valores mínimos e máximos de 388,5 e 389,0 m. Restringindo as variações do nível de água a essas cotas, as perdas por evaporação podem ser reduzidas significativamente, enquanto a altura de carga hidráulica não é muito reduzida. O objetivo dessa restrição é também aumentar a estabilidade e manutenção de ecossistemas dos reservatórios.

Baseline com restrição de vazão mínima a jusante de Sobradinho de 1.100 m³/s

O Plano de Recursos Hídricos da bacia hidrográfica do Rio São Francisco, estabeleceu provisoriamente uma vazão ecológica mínima de 1.300 m³/s na foz. O comitê recomendou estudos mais aprofundados por trecho da Bacia e a adoção de um regime de vazões sazonais (periódicas) no baixo São Francisco, para a manutenção dos ecossistemas (CBHSF, 2004). A redução da vazão a jusante de Sobradinho para um mínimo de 1.100 m³/s foi recentemente praticada, devido a problemas de escassez, e tem impactos significativos na operação de reservatórios e nos demais usos.

RESULTADOS

Referência (Baseline)

A Figura 1 mostra os volumes armazenados e a vazão efluente do reservatório Sobradinho no período estudado (Referência). Com as restrições operacionais e institucionais descritas, a otimização cria uma função sinusoidal natural, que é orientada pelo período chuvoso e utiliza quase todo o volume útil do reservatório para regularizar a vazão e atender aos usuários. A vazão mínima de 1.300 m³/s pôde ser garantida durante todo o período estudado (considerando que a energia firme não se constituiu em restrição).

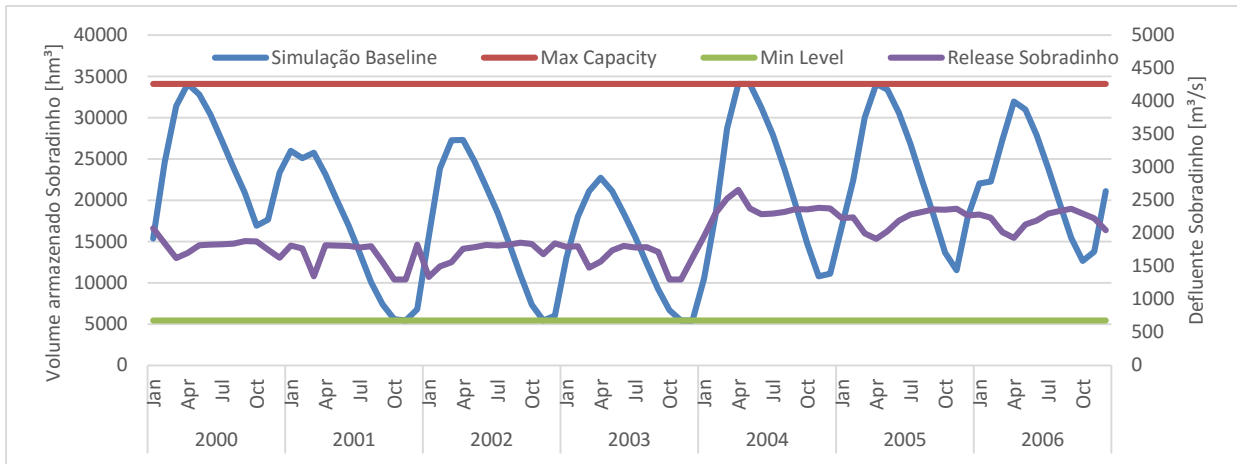


Figura 1 – Reservatório Sobradinho – período 2000 a 2006 – simulação volume armazenado e vazão efluente

A Figura 2 mostra a produção de energia do reservatório de Sobradinho no mesmo período (2000-2006). Pode ser observado que a energia firme não é alcançada durante períodos de menor disponibilidade hídrica. O benefício líquido da produção de energia no período foi de R\$ 46.614.268 (Sobradinho e Itaparica) e R\$ 144.720.007 de Moxotó, Paulo Afonso e do complexo Xingó.

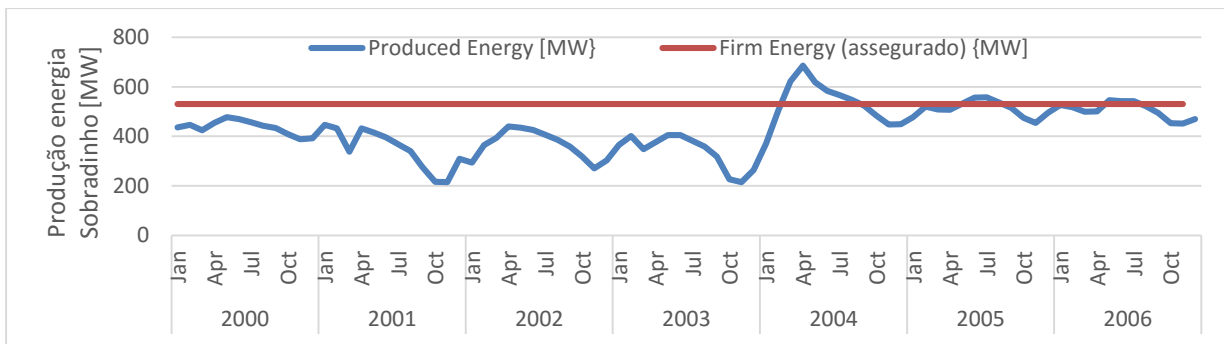


Figure 2 – Produção de energia e energia firme Sobradinho

A Figura 3 mostra a alocação de água para o município de Petrolina, onde pode-se observar a alocação de água para o abastecimento humano apenas no período de elevada disponibilidade hídrica, dado que restrições de prioridade no abastecimento humano não foram consideradas nesse cenário. Ocorre que devido a elevadas perdas associadas a baixos benefícios econômicos quando comparados a outros usos (Produção agrícola e energia), os valores alocados para o uso humano são reduzidos. Os custos de escassez do abastecimento para os municípios são neste cenário de R\$ 27.255.

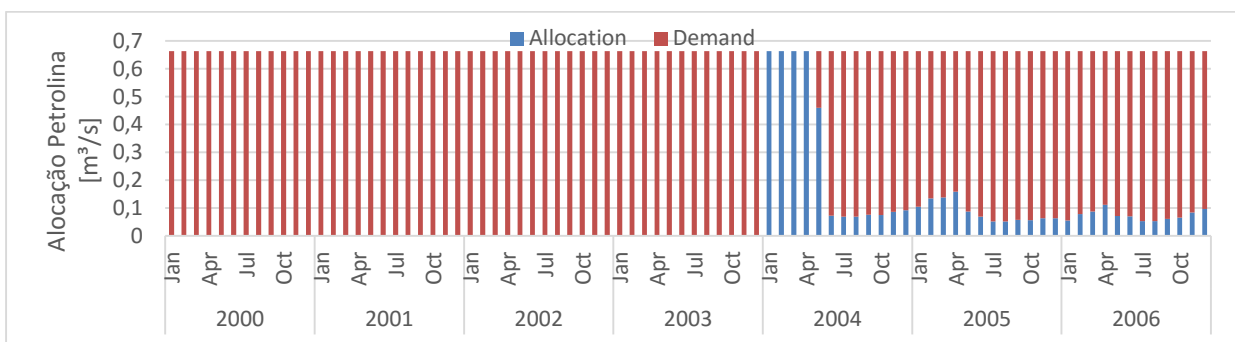


Figura 3 - Alocação para o abastecimento do município de Petrolina

A Figura 4 mostra a alocação de água para o perímetro de irrigação Nilo Coelho, que é também reduzida. Em períodos com maior disponibilidade de água, a alocação foi aumentada para os perímetros de irrigação. O custo total de escassez dos projetos públicos de irrigação foi de R\$ 230.107.

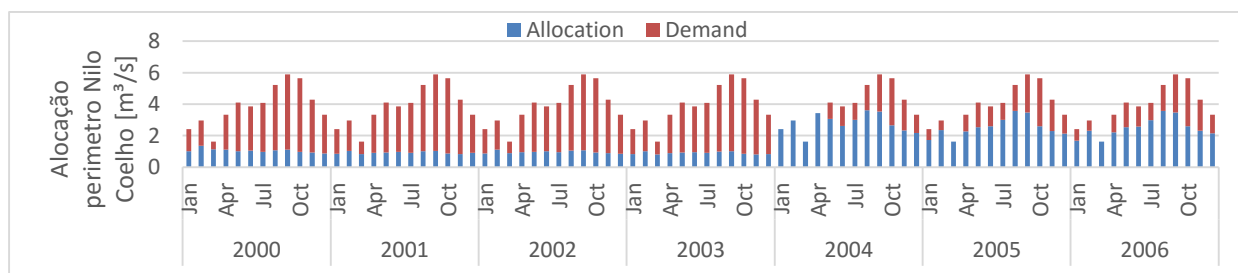


Figura 4 - Água Alocação de Irrigação Local (Nilo Coelho) 2000-2006

Os irrigantes difusos nas margens do rio agregados por município também recebem menos água durante períodos mais secos. A Figura 5 mostra valores alocados para os irrigantes difusos no município de Petrolina. Os custos de escassez são de R\$ 101.176.

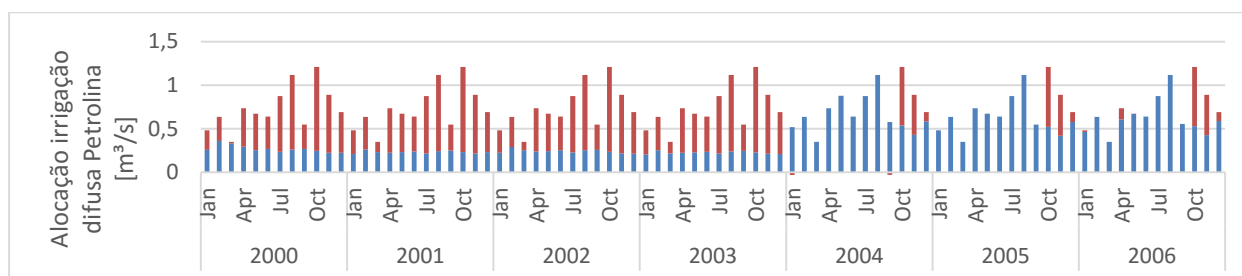


Figura 5 - Irrigantes difusos nas margens do rio em Petrolina

Baseline - Priorizando o Abastecimento Humano (PAH)

Usando o cenário que prioriza o abastecimento humano (considerando as elevadas perdas de água tratada existentes) como assegurado pela legislação brasileira, os custos de escassez dos usuários de irrigação aumentam (2,61% para os irrigantes difusos e 1,25% para perímetros em relação aos valores obtidos no baseline, ou seja, sem prioridades para o abastecimento humano) e benefícios econômicos da produção de energia são reduzidos (0,03% para as usinas Sobradinho-Itaparica e 0,04% para as usinas Paulo Afonso-Moxotó-Xingó).

Baseline com a transposição do SF e PAH

Quando foi incluído o projeto de transposição SF com a retirada média mensal para ambos os eixos como um requerimento fixo, os custos de escassez aumentaram ainda mais para os usuários de irrigação (mais 4,18% em relação ao nível anterior, com prioridade no abastecimento para os irrigantes difusos e mais 7,29% para os perímetros irrigados) e os benefícios foram mais uma vez reduzidos em relação aos valores anteriores com prioridade para abastecimento humano: mais 0,61% para usinas Sobradinho/Itaparica e 0,94% para as usinas do complexo Paulo Afonso e Moxoto.

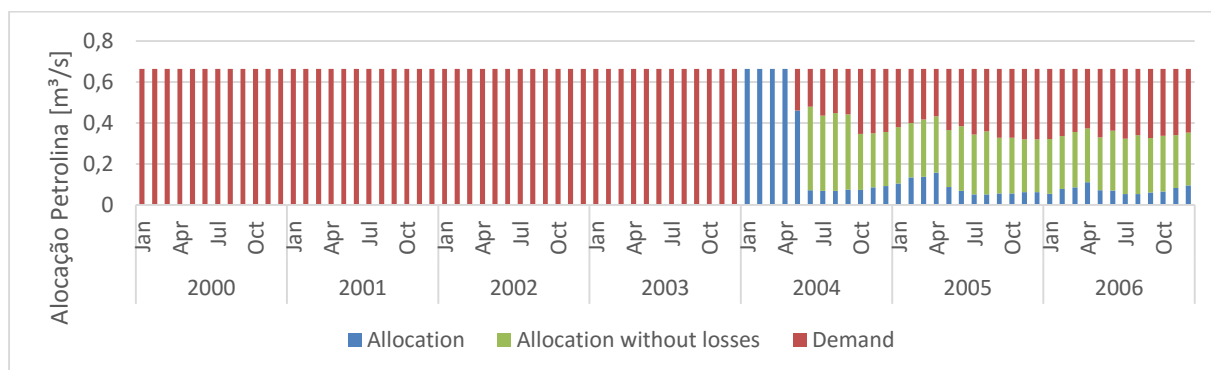


Figura 6 - Alocação de água com e sem perdas na distribuição no abastecimento humano

Baseline sem prioridade no abastecimento humano e sem perdas

Sem perdas para os sistemas de abastecimento humano, mais água é alocada para este uso. A alocação aumentará e o custo de escassez dos municípios diminuirá significativamente. Neste caso

será menos água alocada para o uso irrigação, que apresenta um custo de escassez crescente de cerca 2%, pois mesmo sem prioridade os resultados do abastecimento humano passam a ser melhores economicamente do que os de irrigação.

Baseline com Hidrograma ambiental e PAH

Utilizando as vazões estabelecidas no hidrograma ambiental os custos de escassez dos perímetros e da irrigação difusa aumentaram em cerca de 40%. Os benefícios das usinas hidroelétricas diminuíam de 1,34% para as usinas Sobradinho/Itaparica e 1,3% para as usinas do complexo Paulo Afonso/Moxoto. Pode ser observado que, principalmente, a alocação de água para a irrigação foi reduzida para fornecer água para a vazão ecológica do hidrograma ambiental. Os custos de escassez para os demais usos devido a introdução do Hidrograma ambiental totalizam R\$ 2.660.040.

Baseline com 'Controle de nível - Innovate' e PAH

As restrições ambientais chamadas controle de nível aumentam mais ainda os custos de escassez dos usuários de irrigação, reduzindo-se ainda mais as alocações de água para os perímetros irrigados do que o que foi reduzido pelo hidrograma ambiental. Para os perímetros irrigados os custos de escassez aumentaram com essas restrições 41,91% e de 46,91% para a irrigação difusa. Os benefícios da produção de energia diminuíram 6,73% nas usinas Sobradinho/Itaparica e 6,07% para as usinas do complexo Paulo Afonso e Moxoto. Em termos totais de custos para a manutenção dos ecossistemas são de R\$ 12.071.005 neste cenário.

Baseline com 'Capacidade reduzida - Innovate' e PAH

Os maiores impactos para o sistema aparecem sob essa restrição ambiental, os custos de escassez para todos os usuários são mais elevados em comparação aos custos obtidos em todos os outros cenários. A vazão mínima na foz de 1300 m³/s não pôde mais ser mantida no período estudado. Os custos para os perímetros irrigados aumentam 63,52% e para a irrigação difusa de 58,78%. O setor de produção de energia tem perdas acrescidas de 7,79% para as usinas Sobradinho/Itaparica e 8,98% para as usinas do complexo Paulo Afonso e Moxoto. Em termos totais de custos para a manutenção dos ecossistemas são de R\$ 16.862.866 neste cenário.

Baseline com restrição de vazão mínima a jusante de Sobradinho de 1100 m³/s e PAH

A redução da restrição institucional da vazão mínima a jusante de Sobradinho, com o fim de assegurar o volume do reservatório durante períodos secos, vem levando a conflitos com usuários a jusante. De acordo com a resolução da Agência Nacional de Águas, a vazão mínima de 1.300 m³/s foi reduzida para 1.100 m³/s (ANA, 2013), 900 m³/s (ANA, 2015) e mais recentemente para 800 m³/s (ANA, 2016). Para o modelo de alocação ótima a alteração da restrição mínima para 1.100 m³/s defluente de Sobradinho aumenta os custos de escassez para a irrigação difusa de 2,6% e para os perímetros irrigados de 1,96%. A alteração para o setor de produção de energia é muito pequena (<0,02%).

A Tabela 2 mostra todos os resultados resumidos utilizando os cenários/restrições em comparação ao baseline durante o período estudado:

Tabela 2 – Diferença em relação a alocação de referencia

Custos/Benefícios	Prioridade abast.	Transposiçã o SF	Abast. sem perdas (alocação)	Abast. sem perdas e 100%	Hidrograma Ambiental	Controle de nível	Capacidade reduzida*	Sobradinho 1100 m ³ /s
Custo escassez abastecimento			▼ -11.71%					
Custo escassez irrigação difusa	▲ 2.86%	▲ 6.91%	▲ 1.94%	▲ 2.74%	▲ 39.89%	▲ 46.91%	▲ 58.78%	▲ 2.60%
Custo escassez perímetros	▲ 0.43%	▲ 8.64%	▲ 1.40%	▲ 2.73%	▲ 40.02%	▲ 41.91%	▲ 63.52%	▲ 1.96%
Benefício Sobr./Itaparica	▼ -0.04%	▼ -0.85%	▲ 0.01%	▼ 0.00%	▼ -1.34%	▼ -6.73%	▼ -7.79%	▼ -0.01%
Benefício Moxoto, PA	▼ -0.05%	▼ -0.98%	▲ 0.01%	▼ -0.01%	▼ -1.30%	▼ -6.07%	▼ -8.98%	▼ -0.02%
Preço sombra Defl. Sobradinho	▼ -34.73%	▲ 7.37%	▼ -35.45%	▼ -34.84%	▲ 765.14%	▲ 1432.76%	▲ 2499.27%	▼ -87.56%

DISCUSSÃO

Os resultados mostram que custos de escassez relacionados à manutenção de ecossistemas e restrições ambientais são significativos, e têm maiores impactos (aumento nos custos de escassez) para os usuários consuntivos da irrigação. Além disso, as restrições institucionais tais como prioridades no abastecimento humano e limites mínimos de liberação a jusante de reservatórios, bem como valores assegurados para a transposição impactam nos custos e benefícios dos dois principais setores econômicos da região (irrigação e geração de energia elétrica) do Sub-Médio do São Francisco. Os custos da escassez para os usuários da irrigação em geral elevam-se mais (em termos percentuais) do que os dos demais usuários, diante das restrições ambientais e institucionais.

Interessante observar a variação dos valores do preço-sombra da liberação a jusante de Sobradinho, ou seja, o efeito na função objetivo (FO) otimizada (mínimo de custo de escassez e máximo de benefícios econômicos) de uma unidade adicional (1 m³) a mais de água tendo que ser liberada a jusante do lago. Nos cenários que mais impactam nos aumentos dos custos de escassez e redução de benefícios dos dois principais setores econômicos (Transposição do SF, Hidrograma ambiental, Controle de nível e Capacidade reduzida) como é esperado, os preços-sombra em relação ao *baseline* são elevados significativamente devido a introdução das referidas restrições. Os preços mostram assim a tendência de elevação do valor econômico da água liberada por Sobradinho em situações de maior escassez e refletem a expectativa do aumento dos custos totais de escassez dadas liberações adicionais. É importante salientar que esse aumento se dá sobre os custos totalizados sobre os usos representados na FO, o que não impede que alguns dos usos tenham os seus custos de escassez reduzidos com a liberação. Ademais, os benefícios dos usos ambientais não foram representados na função objetivo, bem como os benefícios dos setores econômicos ligados ao abastecimento humano (comércio e serviços). Nos casos em que é assegurada a prioridade ao abastecimento humano, liberações adicionais em Sobradinho tem um valor econômico menor em relação ao *baseline*, pois os custos de escassez do abastecimento humano já estariam zerados. Finalmente no cenário de limite mínimo de defluência em 1100m³/s, o valor do preço-sombra reduz-se também em relação ao *baseline* (limite mínimo de 1.300 m³/s) mostrando que a partir deste último nível, liberações adicionais elevam mais os custos totais de escassez na região.

As curvas de demanda de água utilizadas nos cenários foram estabelecidas utilizando-se valores de água cobrados atualmente na bacia, custos de produção, requerimentos de água e mix de culturas atuais dos usuários de irrigação. Variação nos custos (p. ex. com maiores valores de tarifação), nas produtividades, requerimentos de água e no mix de culturas podem ser simulados em cenários futuros, para avaliar políticas de gestão a ser utilizadas diante de novas condições climáticas e sócio-econômicas. Impactos econômicos das restrições ambientais e institucionais em cenários atuais e futuros, resultantes da modelagem, devem auxiliar na decisão da aplicação dos instrumentos de gestão dos recursos hídricos na região..

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CTHIDRO – Fundo Setorial de Recursos Hídricos, ao Ministério da Ciência e Tecnologia (MCTI) e ao CNPq pelo apoio à pesquisa, implementado através da Chamada no. 35/2013 de Gerenciamento de Recursos Hídricos e ao projeto INNOVATE.

REFERÊNCIAS

- ANA. Resolução 442 de 2013. Brasília: [s.n.], 2013.
- ANA. Resolução 1208 de 2015. Brasília: [s.n.], 2015.
- ANA. Resolução 287 de 2016. Brasília: [s.n.], 2016.
- ARNOLD, J. G.; ALLEN, P. M.; BERNHARDT, G. A comprehensive surface groundwater flow model. *Journal of Hydrology* 142, 1993. 47–69.
- BRASIL. DECRETO Nº 5.995. [S.l.]: [s.n.], 2006.
- CASTRO, C. N. D. Transposição do rio São Francisco: Análise de oportunidade do projeto. Rio de Janeiro: [s.n.], 2011.
- CBHSF. Plano Decenal de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco. Versão preliminar. ed. São José: CBHSF, 2004.
- FERREIRA, T. V. B. Hidrogramas ambientais para o Baixo Rio São Francisco: avaliação de impactos sobre a geração hidrelétrica. Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE., 2014.
- FIGUEIREDO, L. E. N.; MORAES, M. M. G. A. A Demanda Da Água Para Irrigação Para Os Perímetros Públicos Do Submédio Do Rio São Francisco. Submetido ao XXI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Brasília, 2015.
- GRIFFIN, R. C. Water resource economics: the analysis of scarcity, policies, and projects. Cambridge: MIT Press, 2006.
- HOWITT, R. E. Positive Mathematical Programming. *American Journal of Agricultural Economics* Vol. 77, No. 2, 1995. 329-342.
- KOCH, H. et al. Modelagem da disponibilidade e do manejo da água na bacia hidrográfica do rio São Francisco. XXI SIMPOSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HIDRICOS. Brasília/Brazil: ABRH. 2015a.
- KOCH, H. et al. Incluindo aspectos ecológicos na gestão de ecológicos na gestão de reservatórios: opções de gestão no Sub-médio e Baixo do rio São Francisco. XXI SIMPOSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HIDRICOS. Brasília/Brazil: [s.n.]. 2015b.
- KOCH, H.; LIERSCH, S.; HATTERMANN, F. F. Integrating water resources management in eco-hydrological modelling. *Water Science & Technology*, 2013.
- KRYSAANOVA, V. et al. Simulation modelling of the coastal waters pollution from agricultural watershed. *Ecological Modelling* 49, 1989. 7–29.
- KRYSAANOVA, V. et al. SWIM (Soil and Water Integrated Model) User Manual. Potsdam, Germany: Potsdam Institute for Climate Impact Research, 2000.
- KRYSAANOVA, V.; MÜLLER-WOHLFEIL, D. I.; BECKER, A. Development and test of a spatially distributed hydrological/water quality model for mesoscale watersheds. *Ecological Modelling* 106, 1998. 261–289.
- LIPSEY, R. G. *First Principles of Economics*. Oxford: Colin Harbury, 1988.
- MEDEIROS, Y. D. P. et al. Social Participation In The Environmental Flow Assessment: The São Francisco River Case Study. *Revista Eletrônica de Gestão e Tecnologias Ambientais*, v. v.1, 2013.
- MORAES, E. A. Modelos e Sistemas de Apoio a Decisão (SAD) para subsidiar a escolha de políticas de alocação sustentáveis de água: uma revisão e proposta de classificação. [S.l.]: [s.n.], 2012.
- ROSENTHAL, R. E. *GAMS User's Guide*. Washington, DC, USA: GAMS Development Corporation, 2012.
- SILVA, G. S. D.; MORAES, M. M. G. A. D. Curvas de demanda da irrigação difusa e abastecimento humano e a identificação da alocação econômica ótima no Sub-médio do rio São Francisco. XXI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Brasília: ABRH. 2015.