Alocação ótima dos recursos hídricos em sistema no Alto curso do rio Piranhas – PB

Optimum allocation of water resources in the Upper reaches of the Piranhas river – PB

• **Data de entrada:**
20/12/2018

• **Data de aprovação:**
26/05/2020

Thiago Cabral Nepomuceno^{1*} | Wilson Fadlo Curi¹ | Valterlin da Silva Santos¹ | Tarciana Ramos Diniz Nepomuceno²

DOI: <https://doi.org/10.36659/dae.2021.066>

ORCID ID

Nepomuceno TC <https://orcid.org/0000-0002-3452-6647>

Curi WF <https://orcid.org/0000-0002-7024-7127>

Santos VS <https://orcid.org/0000-0002-4789-2937>

Nepomuceno TRD <https://orcid.org/0000-0002-7552-1148>

Resumo

O presente estudo teve como objetivo alocar de maneira otimizada água para o atendimento urbano e agrícola em um sistema de recursos hídricos que compreende dois reservatórios em série. Foi utilizado um modelo de otimização multiobjetivo, baseado em programação linear, para a alocação ótima de água em região do Alto curso do rio Piranhas – PB. Para melhor avaliar o sistema de estudo, foram selecionados dois cenários. O primeiro não considerou a contribuição das águas da transposição do rio São Francisco (Eixo Norte); já no segundo foi computada tal entrada. O período de operação foi de cento e vinte (120) meses, ou dez (10) anos. Após os procedimentos de modelagem foi verificado que o atendimento urbano foi realizado sem a ocorrência de falhas. Para a agricultura irrigada, o atendimento ao Perímetro Irrigado de São Gonçalo apresentou falhas durante muitos meses. Com o aporte das águas do PISF, as respectivas falhas foram observadas apenas no final do período de operação.

Palavras-chave: Otimização. Programação linear. Recursos hídricos. Modelagem. Análise integrada. Abastecimento. Reservatórios.

Abstract

The present study aimed to optimally allocate water for urban and agricultural service in a water resources system that comprises two reservoirs in series. A multiobjective optimization model based on linear programming was used to optimize water allocation in the Upper Piranhas – PB river region. To better evaluate the study system, two scenarios were selected. The first one did not consider the contribution of the waters of the São Francisco River transposition (North Axis). The period of operation was one hundred twenty (120) months, or ten (10) years. After the modeling procedures, it was verified that the urban service was performed without the occurrence of failures. For irrigated agriculture, the service to the Irrigated Perimeter of São Gonçalo presented failures during many months. With the input of the PISF waters the respective failures were observed only at the end of the operation period.

Keywords: Optimization. Linear Programming. Water Resources. Modeling. Integrated Analysis. Supply. Reservoirs.

¹ Universidade Federal de Campina Grande – Campina Grande – Paraíba – Brasil

² Universidade Federal da Paraíba – Campina Grande – Paraíba – Brasil

* **Autor correspondente:** thiago.nepomucenoesa@gmail.com.

1 INTRODUÇÃO

Na engenharia de recursos hídricos, diversos problemas têm caráter multiobjetivo. Dessa forma, a estruturação de um sistema com um único objetivo pode beneficiar apenas um aspecto (KUREK e OSTFELD, 2013) em detrimento de diversos outros que possam ter influência significativa na tomada de decisão. Sobre essa perspectiva, estudos na área de recursos hídricos têm estruturado problemas de otimização a partir de rotinas matemáticas que permitem quantificar o atendimento aos mais variados objetivos, tais como: alocação de terras para agricultura, operação otimizada de redes hidráulicas, otimização de reservatórios de abastecimento e aspectos qualitativos dos recursos hídricos (WU et al., 2011; SINGH, 2014; MARQUES et al., 2015; HABIBI DAVIJANI, et al., 2016).

Segundo Rani e Moreira (2010), no planejamento e/ou operação de reservatórios de abastecimento, os objetivos estão relacionados a maximização dos benefícios, redução dos custos e atendimento das demandas de água, sujeitos a diversas restrições. Para o estabelecimento de regras operacionais ótimas para reservatórios, Aboutalebi et al., (2015) destacam que os procedimentos matemáticos podem ser divididos em três categorias, nomeadamente, programação matemática (com destaque para a programação linear), programação dinâmica e programação não linear. Essas metodologias são fundamentais para um efetivo planejamento do uso dos recursos hídricos, com destaque para localidades onde existe escassez desse bem (HABIBI DAVIJANI, et al., 2016), como no semiárido brasileiro.

A programação linear (PL) é uma das técnicas mais aplicadas na otimização de sistemas de reservatórios (AHMAD et al., 2014), podendo convergir para ótimos globais, além de possuir grande versatilidade, com aplicação em problemas de larga escala (RANI e MOREIRA, 2010). Além do mais, as não linearidades encontradas podem

ser contornadas a partir da aplicação de técnicas de linearização, como PL separável (CRAWLEY e DANDY, 1993) e PL sucessiva (MOUSAVI e RAMAMURTHY 2000; BARROS et al. 2003).

Baseado em PL, Santos et al. (2011) desenvolveram um modelo de otimização multiobjetivo que permite a operação integrada de sistemas de recursos hídricos, otimizando os múltiplos usos de reservatórios, com a implantação e/ou melhoramento de uma ou mais áreas irrigadas.

O presente trabalho teve como objetivo alocar de maneira otimizada água para o abastecimento urbano e agrícola em um sistema localizado no Alto Piranhas-PB. O modelo de utilização utilizado foi o desenvolvido por Santos et al. (2011), sendo avaliada a resposta do sistema a condições estabelecidas.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Área de Estudo

A área analisada compreende os reservatórios ligados em série Engenheiro Ávidos, localizado no município de Cajazeiras, e São Gonçalo, localizado no município de Sousa, ambos presentes no extremo oeste estado da Paraíba (entre as latitudes 6°50' e 7°25' Sul e entre as longitudes 38°10' e 38°40' Oeste), na Unidade de Planejamento Hidrológico (UPH) do Alto Piranhas, na bacia hidrográfica do rio Piancó-Piranhas-Açu. Os mesmos estão totalmente inseridos em clima semiárido, com grande variabilidade interanual de precipitações.

Os reservatórios da bacia exercem um efeito regularizador das vazões ao acumular parte das águas provenientes das precipitações de forma a reduzir déficits hídricos nos períodos de estiagem. No sistema estudado, as principais demandas hídricas estão associadas ao abastecimento urbano e a agricultura irrigada (ANA, 2016).

Na Fig. 1 encontra-se o layout quantitativo do sistema de recursos hídricos, com os principais componentes do balanço hídrico para os reservatórios e trechos dos rios. Para as demandas, destacam-se o abastecimento urbano dos municípios e o atendimento à agricultura irrigada, em especial,

ao Perímetro Irrigado de São Gonçalo (PISG). Vazões afluentes (Q_{af1} , Q_{af2} e Q_{af3}), entradas por precipitação direta sobre os reservatórios (P1 e P2) e saídas por evaporação da lâmina de água dos mesmos (Ev1 e Ev2) também foram quantificadas nos procedimentos de modelagem.

Figura 1 - Layout quantitativo do sistema de recursos hídricos.

2.2 Modelo de Otimização

No presente estudo foi utilizado o modelo multiobjetivo, baseado em PL, desenvolvido por Santos et al. (2011). Por meio da Fig. 2 é possível

observar componentes do sistema hídrico que podem ser considerados, como nós, links, afluência, reservatório, vertedouro, descarregador de fundo e demandas hídricas.

Figura 2 - Componentes para representação do sistema.

Fonte: Santos et al. (2011).

A função objetivo é uma combinação linear de cinco funções objetivo, que representam as seguintes metas: minimização do déficit entre o atendimento das demandas na d-ézima tomada d'água dos reservatórios e nós do sistema (DTDD);

minimização do déficit entre o volume liberado por um reservatório e a demanda a ser mantida a jusante do mesmo (VRr); minimização do déficit entre o volume de água em um reservatório no final do mês t e o volume meta estabelecido

nesse mês (VMr); maximização da receita líquida oriunda da agricultura irrigada, quantificada a partir da diferença entre a renda bruta total obtida com a venda da safra agrícola e os custos de produção na área agrícola k (RLk); maximização da mão de obra oriunda das práticas agrícolas na área agrícola k . Cada função objetivo é normalizada a partir do Método das Ponderações, sendo estabelecidos pesos para representar a relativa prioridade de atendimento das funções objetivo. O artifício de linearização por segmentos foi utilizado para que as não linearidades existentes pudessem ser contornadas, permitindo, assim, o emprego da programação linear.

As restrições impõem limitações ao sistema de ordem física, operacional, econômica, entre outras. Para os reservatórios e nós nos trechos dos rios, baseado na lei da conservação da massa, é aplicado o balanço hídrico. Descargas de fundo (se houver), vertimento e capacidade máxima de adução das tomadas d'água também podem ser computadas nos procedimentos matemáticos. No caso da agricultura, as restrições correspondem as áreas a serem irrigadas em cada perímetro irrigado e à vazão a ser captada para o atendimento as culturas.

2.3 Dados de Entrada do Modelo

2.3.1 Precipitação

A precipitação que incide diretamente sobre os reservatórios, parte integrante do balanço hídrico, foi estabelecida a partir de dados dos postos presentes no Quadro 1.

Quadro 1 – Postos pluviométricos em que foram coletados os dados de precipitação direta incidente nos reservatórios do sistema.

Reservatório	Período	Posto pluviométrico
Reservatório São Gonçalo	2007 a 2016	São Gonçalo
Engenheiro Ávidos	2007 a 2009	Engenheiro Ávidos
	2010 a 2016	São José de Piranhas

A mudança a partir do ano de 2010 (para o reservatório Engenheiro Ávidos), sendo incluído o posto de São José de Piranhas, ocorreu pela presença considerável de falhas nos dados do posto de Engenheiro Ávidos entre os anos de 2010 e 2016 (Quadro 1).

2.3.2 Vazão afluyente aos reservatórios

No plano de recursos hídricos na bacia hidrográfica do rio Pirancó-Piranhas-Açu (ANA, 2016), em sua etapa de modelagem da disponibilidade hídrica superficial, o modelo hidrológico do tipo chuva vazão SMAP, em sua versão mensal (SMAP-M), foi ajustado a postos fluviométricos de interesse, com a calibração e validação dos parâmetros necessários. Dessa forma, os parâmetros do modelo hidrológico foram obtidos já calibrados.

Com base no modelo SMAP-M, calibrado e validado junto à estação fluviométrica de Piancó (37340000), foram gerados os dados referentes às vazões afluentes aos reservatórios do sistema em estudo. Assim, por meio do Quadro 2 é possível visualizar os postos em que foram utilizadas as séries históricas de precipitação para o cálculo do volume mensal afluyente aos reservatórios. Na Tabela 1 encontram-se os parâmetros de calibração do SMAP-M para a estação fluviométrica selecionada.

Quadro 2 – Postos selecionados para o cálculo do volume mensal afluyente aos reservatórios.

Reservatório	Período	Posto pluviométrico
Reservatório São Gonçalo	2007 a 2009	Fazenda Timbaúba, Engenheiro Ávidos e São Gonçalo
	2010 a 2016	Aguiar, Cajazeiras e São Gonçalo
Engenheiro Ávidos	2007 a 2009	Bonito de Santa Fé, Serra Grande, Fazenda Timbaúba, Arapuã, Engenheiro Ávidos
	2010 a 2016	Bonito de Santa Fé, Serra Grande, São José de Piranhas e Aguiar

Tabela 1 – Parâmetros de calibração do SMAP-M.

Estação Fluviométrica	Período de Calibração	Parâmetros do Modelo SMAP - Mensal						
		Sat	Pes	Crec	K	Tuin	Ebin	R ²
Piancó	Jan/99 a dez/2004	539	3,9	0,0	3	19	0,0	0,81

Fonte: ANA (2016).

As médias mensais das vazões afluentes aos reservatórios e nós do sistema são encontradas na Tabela 2.

Tabela 2 - Vazões afluentes aos reservatórios.

Vazão Mensal (hm ³ .mês ⁻¹)												
Reservatórios e Nós	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
São Gonçalo	0,21	1,84	2,87	1,82	1,13	0,15	0,05	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00
Engenheiro Ávidos	3,70	9,90	33,93	18,47	11,62	1,58	0,88	0,10	0,00	0,10	0,16	0,31
Nó 2 - Rio Piranhas*	0,84	6,23	18,91	7,53	8,45	1,30	0,28	0,04	0,00	0,05	0,01	0,01

* Vazão referente à sub-bacia de contribuição do nó 2.

2.3.3 Evaporação nos reservatórios

O volume de água mensal evaporado nos reservatórios foi obtido a partir da multiplicação da área do espelho d'água pela lâmina evaporada em tanques evaporimétricos Classe A. Para os dois reservatórios foram utilizadas medições de evaporação obtidas junto à estação climatoló-

gica de São Gonçalo, sendo adotados os valores mensais do coeficiente do tanque Kt estimados por Oliveira et al. (2005) para a região do Cariri paraibano. Os dados de evaporação média mensal nos reservatórios e os respectivos coeficientes do tanque Kt podem ser observados por meio da Tabela 3.

Tabela 3 - Evaporação média mensal do tanque Classe A e valores de Kt.

Evaporação média mensal (mm.mês ⁻¹)												
Estação Climatológica	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
São Gonçalo	301	214	196	170	183	176	214	248	315	345	334	333
Kt	0,77	0,79	0,78	0,92	0,93	0,91	0,80	0,81	0,77	0,78	0,76	0,76

Fonte: Oliveira et al. (2005).

2.4 Demandas

Para o presente estudo de caso, as demandas relacionadas ao abastecimento urbano e à irrigação difusa (1 e 2) correspondem a valores outorgados pela Agência Nacional de Águas (ANA). Na Tabela 4 encontram-se os dados referentes ao abastecimento urbano dos municípios.

Tabela 4 - Demandas relacionadas ao abastecimento urbano.

Sistemas de abastecimento	Demandas urbanas (m ³ . hora ⁻¹)
Cajazeiras e Engenheiro Ávidos	663,1944
Sousa, Marizópolis e São Gonçalo	573,8889
Nazarezinho	25,8333

Na Tabela 5 são informadas as vazões médias mensais destinadas ao abastecimento da irrigação difusa 1 e 2.

Tabela 5 - Demandas relacionadas à irrigação difusa.

Demandas Mensais (hm ³ .mês ⁻¹)												
Demanda	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Irrigação Difusa 1	0,07	0,06	0,06	0,06	0,07	0,08	0,09	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10
Irrigação Difusa 2	0,23	0,15	0,15	0,15	0,24	0,29	0,37	0,47	0,53	0,48	0,57	0,49

Fonte: ANA (2016).

No caso do PISG, foi calculada a necessidade suplementar líquida das culturas por meio de um balanço hídrico no solo, sendo necessário o estabelecimento de um plano de cultivo. Levando em consideração a tradição agrícola da região, a adaptabilidade das culturas nas manchas de solo, além das informações conditas no próprio Plano de Recursos Hídricos da bacia do rio Piancó-Piranhas-Açu (ANA, 2016), foram selecionadas 2 (duas) culturas para o plantio durante o período analisado; são elas: banana e coco.

O balanço hídrico no solo, que resulta no cálculo da necessidade de irrigação líquida (NL_{i,j,t}), foi calculado pela seguinte expressão:

$$NL_{i,j,t} = ETP_{i,j,t} - Pe_{j,t} - G_{i,j,t} - W_{j,t} \quad (1)$$

Em que NL_{i,j,t} é a necessidade de irrigação líquida para a cultura i, na área agrícola j e no mês t;

G_{i,j,t} a dotação de água por capilaridade à zona radicular da cultura i, na área agrícola j durante o mês t e W_{j,t} a reserva de água do solo na área agrícola j no início do mês t. Os valores de G_{i,j,t} e W_{j,t} não foram computados, já que foi considerado que não existe dotação por capilaridade para a zona radicular e que as reservas de água no princípio de cada mês são desprezíveis (GOMES, 2013).

As informações de evapotranspiração utilizadas foram provenientes do banco de dados da Organização das Nações Unidas para a Alimentação e Agricultura - FAOCLIM, que apresenta o cálculo da evapotranspiração pelo método de Penman-Monteith. Por possuir um banco de dados mais representativo para as áreas de estudo, foi selecionada a estação climatológica de São Gonçalo. Os dados de evapotranspiração de referência estão presentes na Tabela 6.

Tabela 6 - Evapotranspiração de referência.

Evaporação média mensal (mm.mês ⁻¹)												
Estação Climatológica	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
São Gonçalo	210	183	189	173	164	148	162	189	202	222	217	220

Fonte: ANA (2016).

Assim, para uma cultura i, durante o mês t, a multiplicação do valor da evapotranspiração de referência pelo coeficiente de cultivo K_p resulta

em sua evapotranspiração potencial. Os valores de K_p para o coco e a banana estão presentes na Tabela 7.

Tabela 7 - Plano de cultivo e coeficientes de cultivo (K_p).

Culturas	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Banana	0,40	0,45	0,50	0,60	0,70	0,85	1,00	1,10	1,10	0,90	0,80	0,80
Coco	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75

Fonte: Gomes (1999).

Uma importante parcela para a determinação da necessidade de irrigação da cultura i corresponde à fração da chuva que efetivamente permanece disponível para as raízes das plantas, ou precipitação efetiva ($Pe_{j,t}$), uma vez que uma parte dela escapa superficialmente e outra pode ser perdida por percolação. A metodologia utilizada para o cálculo de $Pe_{j,t}$ foi a estabelecida pela FAO (1988) apud Curi e Curi (2001) para terrenos com declividade entre 4 e 5%, como é mostrado nas Eq. 2 e 3, em que $P_{j,t}$ envolve a precipitação média mensal na área agrícola j (mm. mês^{-1}).

$$Pe_{j,t} = (0,8 * P_{j,t}) - 25, \text{ para } P_{j,t} \geq 75 \text{ mm} \quad (2)$$

$$Pe_{j,t} = (0,6 * P_{j,t}) - 10, \text{ para } P_{j,t} < 75 \text{ mm} \quad (3)$$

Em relação aos dados de precipitação média mensal, para todas as manchas de terra com prática da agricultura irrigada foi selecionado o posto pluviométrico de São Gonçalo, uma vez que o mesmo é o mais próximo das áreas supridas pelo rio Piranhas e no entorno do reservatório de São Gonçalo, além do PISG. As médias mensais dos valores da precipitação no posto pluviométrico de São Gonçalo podem ser observadas por meio da Tabela 8.

Tabela 8 - Precipitação média mensal no posto de São Gonçalo.

Precipitação mensal (mm.mês^{-1})												
Posto	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
São Gonçalo	140,9	168,2	224,0	167,9	106,4	41,1	20,3	5,3	0,5	38,7	3,3	40,4

Rhoades e Merrill (1976) propuseram equações que permitem calcular a fração de água destinada a lavar os sais acumulados no solo ($LR_{i,j,t}$), para irrigação de alta frequência; as mesmas são destacadas abaixo:

$$LR_{i,j,t} = \frac{CEa_{j,t}}{2CEe_{i,j,t}} \quad (4)$$

Sendo $LR_{i,j,t}$ a água destinada a lavar os sais acumulados no solo onde é cultivada a cultura i na área agrícola j durante o mês t ; $CEa_{j,t}$ a condutividade elétrica da água de irrigação, medida a 25°C , aplicada a cultura i , na área agrícola j durante o mês t (dS.m^{-1}); $CEe_{i,j,t}$ a condutividade elétrica do extrato de solo saturado que acarreta determinanda redução no rendimento potencial da cultura i , na área agrícola j durante o mês t (dS.m^{-1}).

Para irrigação por gotejamento, esta última considerada no presente trabalho, o valor estimado de $CEe_{i,j,t}$ é aquele que reduz a zero o rendimento da cultura (redução de 100 %). Ayers e Westcot

(1985) sugerem valores de $CEe_{i,j,t}$ para os dois casos citados. O valor de $CEa_{j,t}$ foi obtido por meio de dados fornecidos pela Agência Executiva de Gestão das Águas dos Estado da Paraíba (AESA), para o reservatório de São Gonçalo, fonte de abastecimento do PISG.

Por fim, a lâmina de água mensal para atender à demanda da cultura i , na área agrícola j durante o mês t ($Q_{irr_{i,j,t}}$), convertida em vazão por unidade de área, pode ser obtida por:

$$Q_{irr_{i,j,t}} = \frac{NL_{i,j,t}}{(1 - LR_{i,j,t}) \times Es_{i,j} \times Ea_{p_{i,j}}} \quad (5)$$

Em que $Es_{i,j}$ corresponde à eficiência do sistema de distribuição de água para cada cultura agrícola i na área agrícola j ; $Ea_{p_{i,j}}$ é a eficiência da aplicação da irrigação por cultura agrícola. O sistema de irrigação adotado para o cultivo foi o de gotejamento, com eficiências de distribuição e aplicação de 90 e 92 % (ANA, 2004; GOMES, 1999).

Com base em informações obtidas a partir dos irrigantes, dos dados de outorga emitidos para as áreas de estudo e do plano de recursos hídricos concernente a bacia (ANA, 2016), foram definidas as áreas de irrigação difusa e do PISG, conforme observado na Tabela 9.

Tabela 9 – Áreas para o cultivo agrícola.

Local da Irrigação	Área (ha)
Irrigação Difusa 1	39,5
Irrigação Difusa 2	213,5
PISG	2514,86

2.5 Reservatórios

Os dados das curvas cota-área-volume dos reservatórios foram obtidos por meio do plano de recursos hídricos da bacia do rio Piancó-Piranhas-Açu (ANA, 2016). Na Tabela 10 podem ser observados os dados referentes ao descarregador de fundo do reservatório Engenheiro Ávidos, que permitem quantificar o volume máximo descarregado no intervalo de tempo t , sendo: Coeficiente de vazão de descarga de fundo (C_f); Diâmetro do tubo (D_t); Cota da geratriz inferior (H_{fs}). No caso do reservatório São Gonçalo, como o mesmo não dispõe de descarregador de fundo, não foi considerada a respectiva saída.

Tabela 10 – Dados do descarregador de fundo do reservatório Engenheiro Ávidos.

Reservatório	(C_f)	D_t^2 (mm)	H_{fs} (m)
Engenheiro Ávidos	0,6	1200	301

Fonte: ¹DAEE (2005) e ²PDRH/PB (SCIENTEC, 1997).

Na Tabela 11 estão presentes os dados dos vertedouros e a cota da soleira (H_{vert}) para cada reservatório estudado.

Tabela 11 – Dados dos vertedouros dos reservatórios.

Reservatório	(C_v1)	B_v^2 (m)	H_{vert}^2 (m)
Engenheiro Ávidos	0,8	130	317,2
São Gonçalo	0,8	230	247

Fonte: ¹DAEE (2005) e ²PDRH/PB (SCIENTEC, 1997).

A capacidade máxima de armazenamento dos reservatórios, bem como o volume morto dos mesmos encontram-se na Tabela 12.

Tabela 12 – Capacidade máxima e volume morto dos reservatórios.

Reservatório	Capacidade máxima (hm^3)	Volume morto (hm^3)
Engenheiro Ávidos	255	28
São Gonçalo	44,6	2,98

Fonte: ANA (2016).

2.6 Cenários estudados

O sistema estudado é alvo do Projeto de Integração das Águas do rio São Francisco (PISF), cuja contribuição será imputada por meio do ramal Engenheiro Ávidos, via Eixo Norte da transposição. Para uma melhor avaliação de possíveis alterações no sistema, foram estudados dois cenários: o primeiro sem considerar a vazão firme do PISF, e o segundo incluindo o respectivo aporte hídrico. A contribuição do PISF foi fixada como sendo $1,7 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (ANA, 2016).

O período temporal selecionado para os cenários foi de dez (10) anos, ou seja, cento e vinte (120) meses, sendo possível avaliar a dinâmica do sistema durante meses de seca e de maiores índices pluviométricos. Dessa forma, de acordo com o tempo de simulação descrito, dados como precipitação, evaporação e evapotranspiração foram estabelecidos para o período entre 2007 e 2016.

Como condições iniciais para o volume dos reservatórios foram considerados os apresentados pelos mesmos no mês de janeiro do ano de 2007. Assim, para Engenheiro Ávidos, o volume inicial foi de 158,075 hm³. Já para o reservatório de São Gonçalo, o volume inicial foi de 22,52 hm³. Em relação às prioridades de atendimento, foi dada primazia ao abastecimento urbano.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

As vazões defluentes dos reservatórios, para os dois cenários são mostradas na Fig. 3 (A, B, C e D). O reservatório Engenheiro Ávidos apresentou

vazão defluente em todos os meses, nos dois cenários, já que é necessário atender às demandas no leito do rio Piranhas, entre os dois reservatórios, e auxiliar o suprimento hídrico das demandas do reservatório São Gonçalo (Fig. 3 A e B). É relevante destacar que não existe uma demanda a ser atendida a jusante de São Gonçalo, fato que pode justificar o número menor de meses em que a vazão defluente foi observada, esta última ocorrendo, principalmente, por vertimento, nos meses com maior afluência. O aporte de 1,7 m³. s⁻¹ proveniente do PISF foi responsável por um incremento significativo do volume defluente nos dois reservatórios.

Figura 3 - Vazão defluente para os reservatórios nos dois cenários.

A variação mensal do volume dos reservatórios nos cenários estudados encontra-se na Fig. 4 (A e B). Para os reservatórios, a maior afluência durante os períodos chuvosos, principalmente entre fevereiro e julho, proporcionou um incremento em seu volume. Nos demais meses, foi observada redução do volume dos reservatórios, algo característico dos reservatórios de acumulação, que armazenam água durante os períodos de chuva para efetuar o suprimento hídrico nos meses de

maior déficit de precipitação pluvial (ULIANA et al., 2015; GUEDES e COSTA, 2016). O reservatório de São Gonçalo possui uma grande dependência da contribuição de Engenheiro Ávidos, apresentando decréscimos importantes em seu volume em curtos intervalos de tempo (inferiores a um ano), principalmente quando a vazão defluente de Engenheiro Ávidos é menor. Também deve ser enfatizada a grande demanda que São Gonçalo deve suprir, com destaque para o PISG.

Algo que pode justificar a dependência de São Gonçalo da vazão a montante do rio Piranhas é que cerca de 72,90% de toda a afluência do reservatório foi proveniente dessa entrada. A precipitação direta contribui, em média, com 19,93% de toda a efluência e, consequentemente, a bacia de contribuição com 7,17%.

A variação mensal do volume dos reservatórios sofreu positivo impacto após o acréscimo das águas do PISF (Fig. 4 - B). Durante os quatro anos iniciais de estudo, São Gonçalo permaneceu com sua capacidade máxima de armazenamento ($44,6 \text{ hm}^3$), algo observado apenas no primeiro ano de operação do cenário anterior. A partir de 2011, com intensificação da seca, o volume armazenado mensalmente passou a sofrer maior variabilidade, atingindo o volume morto durante

novembro de 2014, outubro e novembro de 2015 e outubro de 2016. Os picos positivos no volume do reservatório São Gonçalo podem ser justificados pela maior afluência ao reservatório durante esses períodos.

Ainda em relação à Fig. 4, é verificado que, para alguns meses, o nível do reservatório Engenheiro Ávidos permaneceu maior no cenário em que não foi considerada a contribuição do PISF (C1). Nestes períodos, no C1, o reservatório São Gonçalo apresentou capacidade correspondente ao seu volume morto. Assim, com o incremento das águas do PISF (C2), maior vazão foi destinada para o suprimento hídrico a jusante de Engenheiro Ávidos, incluindo a sustentabilidade do reservatório São Gonçalo, cujo volume final deve ser igual ou superior ao volume inicial do período de otimização.

Figura 4 - Volume dos reservatórios para os cenários estudados.

Na Tabela 13 estão presentes os volumes médios mensais evaporados nos dois reservatórios, para os dois cenários. Por apresentar uma maior área de espelho d'água, Engenheiro Ávidos foi responsável por maiores volumes evaporados. Deve

ser destacado que as parcelas evaporadas, para os dois reservatórios, no cenário 2 foram superiores ao cenário 1, devido à maior área do espelho d'água apresentada pelos reservatórios a partir da contribuição das águas do PISF.

Tabela 13 - Volume médio mensal evaporado nos reservatórios - sem transposição.

Reservatório	Evaporação média mensal ($\text{hm}^3.\text{mês}^{-1}$)											
	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
EA - C1	3,91	2,87	2,88	3,28	3,75	3,59	3,85	4,85	5,11	5,42	4,83	4,41
EA - C2	4,16	3,06	3,04	3,43	3,88	3,67	3,88	4,83	5,03	5,32	4,81	4,55
SG - C1	0,65	0,54	0,57	0,64	0,70	0,63	0,64	0,77	0,78	0,80	0,68	0,66
SG - C2	1,30	1,03	0,97	1,04	1,14	1,02	1,03	1,20	1,15	1,16	1,07	1,20

As vazões destinadas ao atendimento da irrigação difusa (I e II) e do PISG, nos dois cenários, estão presentes na Fig. 5. A irrigação difusa no leito do rio Piranhas (irrigação difusa I) e no entorno do reservatório São Gonçalo (irrigação difusa II) foram atendidas em sua totalidade (Fig. 5, A e B), porém, para o PISG, falhas no atendimento de sua demanda foram recorrentes. A elevada necessidade

hídrica do PISG, somada à escassez pluvial, pode justificar o menor atendimento a essa demanda. Mesmo com a contribuição do PISF (C2), ocorreram falhas de atendimento nos últimos quatro meses de operação. Esses meses demandaram, em média, 5.038.345 m^3 de água, vazão superior ao próprio acréscimo das águas do PISF, que forneceram, por mês, cerca de 4.406.400 m^3 de água.

Figura 5 - Abastecimento das demandas agrícolas para os cenários estudados.

Na Fig. 6 é possível verificar o atendimento das demandas relacionadas ao abastecimento urbano nos cenários estudados. É observado que o abastecimento urbano foi atendido sem a ocorrência de falhas durante os 120 meses de operação, mesmo sem considerar a contribuição do

PISF. Deve ser destacado que nas rotinas de cálculo foi dada prioridade ao atendimento das respectivas demandas, que incluem o atendimento à população dos municípios, como preconizado na lei 9.433/1997, que institui a Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH).

Figura 6 - Vazões destinadas ao abastecimento urbano.

4 CONCLUSÕES

O uso de técnicas de otimização é uma importante ferramenta para o auxílio do planejamento efetivo em sistemas de recursos hídricos, permitindo encontrar alternativas otimizadas para as mais variadas condições.

Para o presente estudo, o modelo de otimização empregado possibilitou a alocação ótima de água para o atendimento das duas principais demandas da bacia hidrográfica na qual o sistema estudado está inserido, abastecimento urbano e agricultura irrigada, sendo a primeira atendida em sua totalidade durante todo o período de operação, com a irrigação difusa. Para o PISG, falhas no atendimento foram observadas em vários meses, principalmente quando não foi imputado o aporte do PISF.

A contribuição das águas do PISF proporcionou um impacto quantitativo relevante no acúmulo e na distribuição dos recursos hídricos do sistema estudado, sendo esta fundamental nos meses em que foi observado grande déficit pluviométrico.

5 AGRADECIMENTOS

À Fundação de Apoio à Pesquisa do Estado da Paraíba - FAPESQ, pelo apoio financeiro fornecido ao primeiro autor.

6 CONTRIBUIÇÃO DOS AUTORES

Metodologia: Nepomuceno TC & Santos VS; **Redação:** Nepomuceno TC, Curi WF e Santos VS; **Adequação às normas da revista & Elaboração das imagens:** Diniz-Nepomuceno TR e Nepomuceno TC.

7 REFERÊNCIAS

- ABOUTALEBI, M.; BOZORG HADDAD, O.; LOÁICIGA, H. A. Optimal Monthly Reservoir Operation Rules for Hydropower Generation Derived with SVR-NSGAII. *Journal of Water Resources Planning and Management*, v. 141, n. 11, nov. 2015. [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0000553](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000553)
- Agência Nacional de Águas (ANA). **Plano de recursos hídricos da bacia hidrográfica do rio Piancó-Piranhas-Açú, resumo executivo**. Brasília. 2016.
- Agência Nacional de Águas (ANA). **Resolução nº 687, de 03 de dezembro de 2004**. Brasília: DOU, 2004.
- AHMAD, A. et al. Reservoir Optimization in Water Resources: a Review. *Water Resources Management*, v. 28, n. 11, p. 3391–3405, set. 2014. <http://dx.doi.org/10.1007/s11269-014-0700-5>.
- AYERS, R. S.; WESTCOT, D. W. **A qualidade da água na agricultura**. Campina Grande: UFPB, 1999. 153 p. (Estudos FAO: Irrigação e Drenagem, 29).
- BARROS, M. T. L. et al. Optimization of Large-Scale Hydropower System Operations. *Journal of Water Resources Planning and Management*, v. 129, n. 3, p. 178–188, maio 2003. [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9496\(2003\)129:3\(178\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9496(2003)129:3(178))
- BRASIL. Lei nº 9.433/1997. **Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos**. Brasília, 1997.

- CRAWLEY, P. D.; DANDY, G. C. Optimal Operation of Multiple-Reservoir System. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 119, n. 1, p. 1–17, jan. 1993. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9496\(1993\)119:1\(1\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9496(1993)119:1(1))
- CURI, W. F. e CURI, R. C. CISDERGO – Cropping and Irrigation System Design with Reservoir and Groundwater Optimal Operation. In: XIV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Aracaju, 2001^a. CD-ROM. **Anais...**
- DAEE (2005). **Guia Prático para Projetos de Pequenas Obras Hidráulicas**. São Paulo. Secretaria de Estado de Energia, Recursos Hídricos e Saneamento. Departamento de Águas e Energia Elétrica. 116p.
- DOORENBOS, J. e KASSAM, A. H. Tradução de H. R. Gheyi, A. A. de Sousa, F. A. V. Damasceno, J. F. de Medeiros. Efeito da Água no Rendimento das Culturas. **Estudos FAO: Irrigação e Drenagem**, v. 33, UFPB, Campina Grande, 2000.
- EMPASA. **Empresa Paraibana de Abastecimento e Serviços Agrícolas**. 2013.
- GOMES, H. P. **Engenharia de Irrigação Hidráulica dos Sistemas Pressurizados, Aspersão e Gotejamento**. Editora Universitária – UFPB, Campina Grande-PB, 3^a Edição. 412 p. 1999.
- GOMES, H. P. **Sistemas de Irrigação: Eficiência Energética**. João Pessoa: Editora da UFPB, 2013.
- GUEDES, J. DE A. Qualidade ambiental de dois reservatórios públicos na região do alto oeste potiguar (RN/Brasil). **Revista Geointerações**, Assú, v.1, n.1, p. 03–16, out. 2016.
- HABIBI DAVIJANI, M. et al. Multi-Objective Optimization Model for the Allocation of Water Resources in Arid Regions Based on the Maximization of Socioeconomic Efficiency. **Water Resources Management**, v. 30, n. 3, p. 927–946, fev. 2016. <http://dx.doi.org/10.1007/s11269-015-1200-y>
- IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Produção agrícola municipal: culturas temporárias e permanentes**, v.43, 2016.
- KUREK, W.; OSTFELD, A. Multi-objective optimization of water quality, pumps operation, and storage sizing of water distribution systems. **Journal of Environmental Management**, v. 115, p. 189–197, jan. 2013. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2012.11.030>
- MARQUES, J.; CUNHA, M.; SAVIĆ, D. A. Multi-objective optimization of water distribution systems based on a real options approach. **Environmental Modelling & Software**, v. 63, p. 1–13, jan. 2015. <http://dx.doi.org/10.1016/j.envsoft.2014.09.014>
- MOUSAVI, H.; RAMAMURTHY, A. S. Optimal design of multi-reservoir systems for water supply. **Advances in Water Resources**, v. 23, n. 6, p. 613–624, maio 2000. [http://dx.doi.org/10.1016/S0309-1708\(99\)00053-6](http://dx.doi.org/10.1016/S0309-1708(99)00053-6)
- RANI, D.; MOREIRA, M. M. Simulation–Optimization Modeling: A Survey and Potential Application in Reservoir Systems Operation. **Water Resources Management**, v. 24, n. 6, p. 1107–1138, abr. 2010. <http://dx.doi.org/10.1007/s11269-009-9488-0>
- SANTOS, V. et al. Um Modelo de Otimização Multiobjetivo para Análise de Sistema de Recursos Hídricos I: Metodologia. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 16, n. 4, p. 49–60, 2011. <http://dx.doi.org/10.21168/rbrh.v16n4.p49-60>
- SCIENTEC. Associação para o desenvolvimento da Ciência e Tecnologia. **Plano Diretor de Recursos Hídricos da Paraíba: Bacia do Piancó e do Alto Piranhas**. SEPLAN. (1997).
- SINGH, A. Optimizing the Use of Land and Water Resources for Maximizing Farm Income by Mitigating the Hydrological Imbalances. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 19, n. 7, p. 1447–1451, jul. 2014. [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0000924](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000924)
- ULIANA, E. M. et al. Utilização do índice de precipitação padronizado para a região norte do estado do Espírito Santo. **Irriga** v. 20, n. 3, p. 414, 28 out. 2015. <https://doi.org/10.15809/irriga.2015v20n3p414>
- WU, W. et al. Incorporation of Variable-Speed Pumping in Multiobjective Genetic Algorithm Optimization of the Design of Water Transmission Systems. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 138, n. 5, p. 543–552, set. 2012. [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0000195](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000195)