

UMA ANÁLISE DA OPERAÇÃO DE UM SISTEMA DE CINCO RESERVATÓRIOS DO ALTO CAPIBARIBE, PERNAMBUCO

Aldo Sidney Oliveira Albuquerque¹; Paulo Romero Guimarães Serrano de Andrade²;
Rosires Catão Curi³ & Wilson Fadlo Curi⁴

Resumo - O trabalho apresenta resultados de um estudo sobre a operação integrada ótima dos reservatórios Poço Fundo, Jataúba, Tabocas, Oitis e Machado, localizados na parte alta da bacia hidrográfica do rio Capibaribe, no agreste semi-árido do Estado de Pernambuco. Pelo grave problema de escassez hídrica presente na região, aspecto que prevalece, regra geral, durante quase nove meses do ano, esses reservatórios assumem grande importância no desenvolvimento social e econômico de toda a área. Para análise e estimativas sobre o comportamento operacional desse sistema hídrico foi utilizado o modelo ORNAP de otimização, de base mensal, que faz uso da programação não linear. A otimização ensejou a maximização da receita líquida advinda da agricultura irrigada, avaliando-se também o retorno financeiro da prática da piscicultura extensiva nos reservatórios. Foram consideradas restrições físicas, operacionais e agrônômicas pertinentes ao sistema, incluída a sustentabilidade hídrica dos reservatórios. Na modelagem do sistema foram estabelecidos diferentes cenários climáticos, para um período de doze meses, os quais representam anos chuvosos, secos e médios, bem como condições iniciais dos reservatórios, atendimento de demandas com o abastecimento de cidades e com a irrigação de culturas tradicionais da região.

Abstract - This work is concerned with the design of an optimal operation for a system of five reservoirs, which are the Poço Fundo, Tabocas, Jataúba, Oitis and Machado, located at the upper part of the Capibaribe river basin in the semiarid region of Pernambuco state. Due to the water shortage, generally during nine months of the year, they are very important for the social and economic development of that region.

¹ Engenheiro Civil, M. Sc. Rec. Hídricos; Doutorando da UFPE; rua Antônio Bernadino de Sena 192; 58104-100 Campina Grande-PB; fone: 341-8042; e-mail: aldosydney@yahoo.com.br

² Engenheiro Civil, M. Sc. Rec. Hídricos; IPA-PE; Doutorando do CCT-UFCG, Av. Aprígio Veloso 882; Caixa Postal 505; 58109-970 Campina Grande-PB e-mail prserrano@yahoo.com.br

³ Profa. Adjunta do Departamento de Eng. Civil, CCT-UFCG; Av. Aprígio Veloso 882; 58109-970 Campina Grande-PB; fone: 83-310-1290, e-mail rosires@dec.ufpb.br

⁴ Prof. Adjunto do Dept. de Física, UFCG; Av. Aprígio Veloso 882; 58109-970 Campina Grande-PB; e-mail: wcuri@df.ufpb.br

The solution presented herein was obtained with the ORNAP - Optimal Reservoir Network Analysis Program, which is based on nonlinear programming regarding the maximization of the net profit attained from the selection of reservoirs water releases, choice of crops and their areas at five potential irrigated croplands and fishing activities at each reservoir. All the physical, agronomic and operational constraints, including the sustainability of the reservoir, were taken into account. The analysis was made based on climate scenarios of a twelve months period, which represents rainy, dry and average years, as well as reservoirs' initial conditions, cities water demand and regional cropping patterns.

Palavras-chave - Operação de reservatórios, otimização, irrigação, piscicultura.

INTRODUÇÃO

Há alguns anos atrás, a questão da água no Brasil já despertava reações diversas. Havia os despreocupados e confiantes na abundância, e outros, mais conscientes, previam que a água é um recurso finito e que a riqueza de recursos hídricos no país poderia não ser suficiente no futuro. Pois o futuro chegou e o planejamento hídrico é assunto-chave e premente no Brasil atual.

A necessidade de melhorar a gestão da água para enfrentar a concorrência pelo seu uso múltiplo, em particular devido ao incremento da demanda pelas concentrações urbanas, assim como pela agricultura irrigada, é agravada pelos problemas crescentes de contaminação dos corpos de água. Esses fatores provocam interesses diversos e exarcebam enfrentamentos entre aqueles que compartilham uma mesma fonte hídrica, sejam usuários agrícolas ou não agrícolas. A Lei n.º 9.433, de 08.01.1997, que instituiu a Política Nacional de Recursos Hídricos, preconiza que no âmbito da bacia hidrográfica, consolidada como a unidade de planejamento hídrico, sejam compatibilizados e assegurados os usos múltiplos da água.

Na região semi-árida do Nordeste brasileiro, os processos de sustentabilidade e desenvolvimento sócio-econômico são fortemente relacionados à escassez de água e à disponibilidade hídrica em reservatórios, os chamados açudes. Esses reservatórios, constituindo-se nos mais importantes elementos que compõem os sistemas de aproveitamento de recursos hídricos de superfície dessa região, carecem de ser gerenciados eficientemente a fim de possibilitar a atenuação do desequilíbrio entre a oferta e a demanda de água, possibilitando o desenvolvimento sustentável dos sistemas produtivos que usam a água como insumo básico. O gerenciamento de reservatórios envolve a alocação da água disponível para os seus diversos usos e usuários,

minimizando os riscos de prejuízos que possam advir de uma escassez hídrica ou pela ocorrência de inundações eventuais, a jusante, e maximizando os benefícios originados do uso múltiplo da água.

Para desenvolver regras de gerenciamento e operação de reservatórios é necessário, mais que um caríssimo processo de tentativa e erro, efetuar uma modelagem matemática que simula o comportamento físico do sistema e quantifica, com alguma flexibilidade, um julgamento qualitativo do seu uso, a fim de otimizar os possíveis benefícios. Excelentes textos sobre gerenciamento e operação de reservatórios foram produzidos nas últimas quatro décadas, como os trabalhos de Hall e Dracup (1979), Louks et al. (1981), com destaque para o trabalho de Yeh (1985) que provê uma revisão do “estado da arte” sobre modelos para gerenciamento e operação de reservatórios, envolvendo modelos de programação linear, de programação dinâmica, de programação não-linear, e modelos de simulação. Simonovic (1992) e Wurbs (1993), ampliando o trabalho de Yeh, contribuem com novas referências sobre modelos de gerenciamento e operação de sistemas de reservatórios. Segundo Barbosa (2001), a programação dinâmica foi utilizada na operação de reservatórios por diversos autores, podendo ser citados: Little (1955), Young (1967), Hall et al.(1969), Schweig e Cole (1968), Fitch et al.(1970), Russel (1972), Liu e Tedrow (1973).

A literatura de recursos hídricos aborda muita discussão sobre qual é a melhor técnica, simulação ou otimização, para análise da operação de reservatórios, embora não seja raro se referenciar o uso combinado das duas técnicas. Basicamente, os modelos estão enquadrados em duas classes: modelos de otimização e modelos de simulação. Nos primeiros, o objetivo é representado, analiticamente, através de uma função objetivo (geralmente de cunho econômico) que pode ser maximizada ou minimizada, sujeita a restrições. Já num modelo de simulação, que não gera, diretamente, uma solução ótima para um problema de operação de reservatório, não existe a preocupação de determinar o conjunto de elementos ou regra operativa ótima. No entanto, se um modelo de simulação é exercitado várias vezes, envolvendo políticas de decisão alternativas, ele pode detectar a solução ótima ou uma próxima da ótima. Zahed (1987) fez uma discussão sobre a aplicação de modelos na operação de sistemas de reservatórios, classificando-os em otimizantes e não otimizantes. A importância dos modelos otimizantes está associada ao uso racional dos recursos hídricos.

Alguns recentes estudos sobre otimização da operação de reservatórios, para usos e objetivos múltiplos, podem ser ainda aqui referidos: Curi et al. (1997) desenvolveram e fizeram uso do modelo CISDERGO - Cropping and Irrigation System Design with Reservoir and Groundwater Optimal Operation, baseado em programação linear, para estudar a alocação ótima das águas de um reservatório para abastecimento e irrigação; Andrade, et al. (2002), usaram o modelo ORNAP- Optimal Reservoir Network Analysis Program, baseado em programação não linear, para estudar a otimização da operação integrada de um sistema hídrico formado por dois reservatórios em série, de

múltiplos usos, e três perímetros irrigados; Almeida, et al. (2001), usaram o CISDERGO-2.0 para estudar as condições de operação ótima para múltiplos objetivos de um sistema composto de dois grandes reservatórios interligados e perímetros de irrigação; Barbosa, et al. (2001) estudaram, via modelo de otimização baseado em programação não linear, o comportamento da operação de um sistema constituído de três reservatórios em paralelo, para usos e objetivos múltiplos, visando maximizar a receita líquida advinda da agricultura irrigada e da piscicultura, além da maximização da geração de empregos.

O presente trabalho busca ilustrar uma aplicação do modelo de otimização ORNAP, desenvolvido por Curi e Curi (1999, 2001), na análise da operação integrada ótima do sistema hídrico formado pelos reservatórios Poço Fundo, Jataúba, Tabocas, Oitis e Machado, localizados na parte alta da bacia do rio Capibaribe, destinados a múltiplos usos, inclusive a irrigação de terras aptas à exploração agrícola situadas nas proximidades desses reservatórios. Este estudo de otimização visa a maximização de benefícios financeiros líquidos advindos da agricultura irrigada e piscicultura. Os resultados aqui expostos, constituindo parte do estudo concluído por Albuquerque (2003), podem servir de subsídio ao planejamento da exploração racional das disponibilidades hídricas dos reservatórios, ou de outro qualquer sistema de reservatórios, mormente em regiões semi-áridas.

A REGIÃO E O SISTEMA EM ESTUDO

A parte alta da bacia hidrográfica do rio Capibaribe, entendida como a porção geográfica situada a montante da cidade de Toritama (Figura 1), localiza-se no nordeste da Mesoregião Geográfica do Agreste do Estado de Pernambuco, entre as latitudes S 7°47' e S 8°17', e longitudes W 35° 56' e W 36°42'. Limita-se ao norte com o Estado da Paraíba, ao sul com a bacia hidrográfica do rio Ipojuca, a oeste com o Estado da Paraíba e a bacia hidrográfica do rio Ipojuca, e a leste, para fins desse trabalho, com o exutório da área de drenagem da estação fluviométrica Toritama (Código 39130000), localizada no rio Capibaribe na latitude S 8° 00' e longitude W 36° 03'. Sendo drenada pelo rio Capibaribe, que ali se apresenta com regime intermitente, tem área aproximada de 2.692,12 Km², representando 35,6% da área total da bacia do rio Capibaribe, que é de 7.557,41 Km².

A região é caracterizada pela ocorrência de baixos índices pluviométricos anuais, variando de 400 mm a 650 mm, registrando-se precipitações anuais de até 1.100 mm nas partes mais elevadas da sub-bacia, nos chamados brejos de altitude. A precipitação média anual é da ordem de 615 mm, distribuindo-se o período chuvoso de março até julho, concentrando-se nestes meses cerca de 60 a 70 % da precipitação total anual. A evaporação anual média fica em torno de 1.850 mm, com os meses de outubro a março registrando as maiores taxas de evaporação, em média 210 mm mensais. A temperatura média mensal é de 25,2 °C. As temperaturas mínimas ficam em torno de 20,4 °C,

ocorrendo entre os meses de junho a agosto. A umidade relativa do ar oscila entre 49% e 81%. A direção predominante dos ventos é sudeste. A litologia dominante é composta de rochas do complexo gnáissico-migmatítico e granitóide, com destaque para os granitos, migmatitos e granodioritos. Os solos são, regra geral, rasos e apresentam cobertura vegetal com domínio da vegetação natural tipo caatinga hiperxerófila, com pequenas áreas aproveitadas com pastagens plantadas e palma forrageira. Mais de 90% da região em estudo é assentada sobre rochas do embasamento cristalino e apresenta com reduzida capacidade de acumulação de águas subterrâneas, que possuem elevados teores de sais.

Cinco reservatórios de porte médio estão localizados na região, cujas características principais estão apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1. Características dos reservatórios

Reservatório	Finalidade	Capacidade (m ³)	Rio barrado	Área drenagem (km ²)
Poço Fundo	Abastec. e irrigação	27.630.000	Capibaribe	909,48
Tabocas	Abastec. e irrigação	14.026.053	Tabocas	405,54
Oitís	Abastec. e irrigação	3.020.159	Laranjeiras	77,50
Machado	Abastecimento	1.228.340	Laranjeiras	177,94
Jataúba	Abastecimento	935.320	Jataúba	42,54

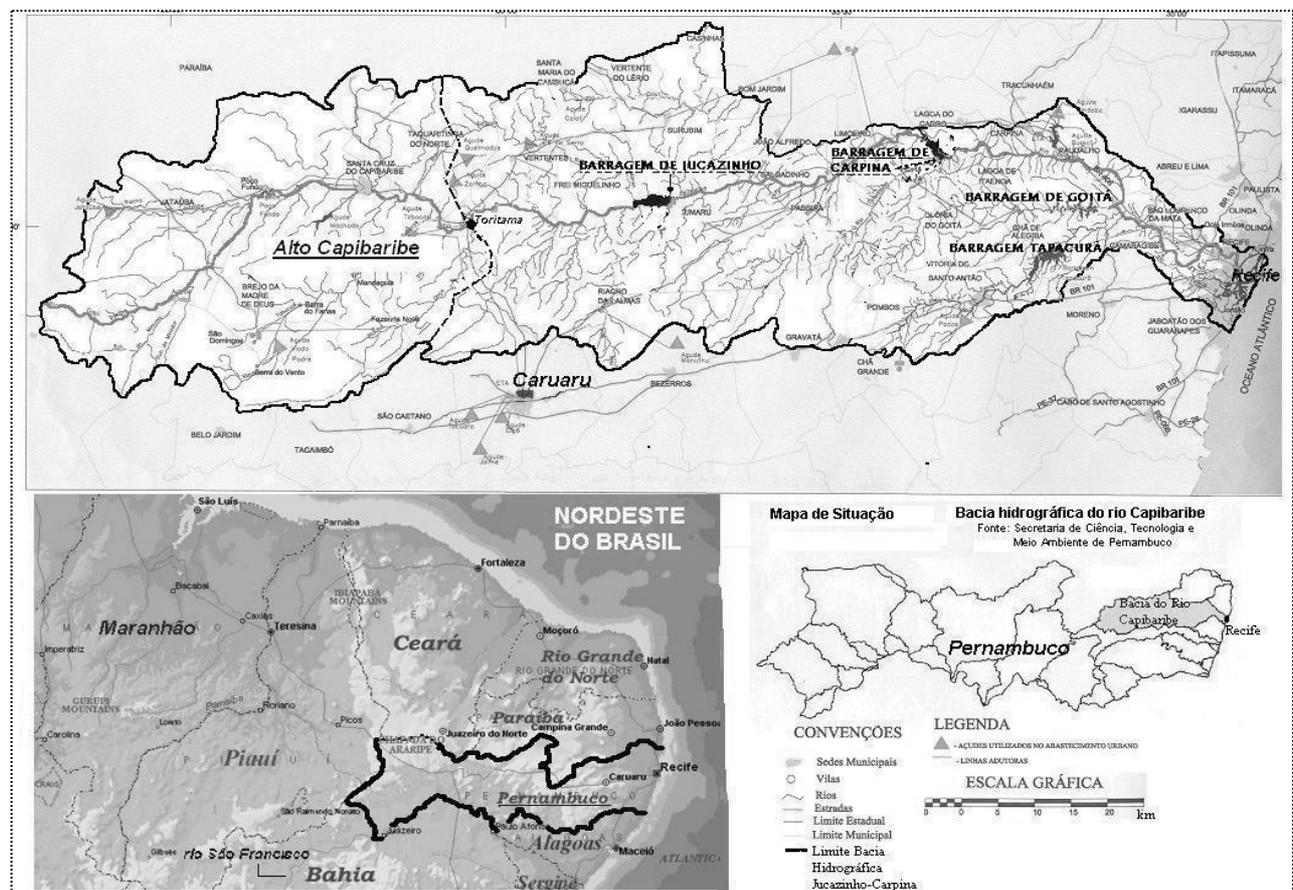


Figura 1. Configuração da área de estudo na bacia hidrográfica do rio Capibaribe.

O MODELO ORNAP

Para otimização da operação do sistema hídrico composto pelos reservatórios do alto Capibaribe, utilizou-se o modelo ORNAP. O ORNAP opera a nível mensal e permite inferir o comportamento do sistema para vários cenários hidroclimáticos, com diferentes volumes de acumulação, de espera e de sustentabilidade hídrica para os reservatórios. Permite, ainda, incorporar as áreas totais, máximas e mínimas, a serem plantadas em cada perímetro, por tipo de cultura. O processo de otimização é resolvido, numericamente, através da programação não-linear. A função objetivo se expressa por:

$$\text{Max } fo = RL + RI \quad (1)$$

em que, RL é a receita líquida advinda da agricultura irrigada e RI é a receita líquida advinda da piscicultura extensiva. A receita líquida é o resultado da diferença entre a renda bruta total auferida com a venda da safra agrícola, ou do pescado, e os respectivos custos de produção envolvidos.

Na representação do comportamento hídrico do sistema, empregou-se a técnica da simulação em que se executa balanços mensais de massas entre afluências, efluências e variações de volumes armazenados para cada reservatório, sendo que a demanda para irrigação, traduzida pela necessidade hídrica suplementar para as culturas, é avaliada pelo balanço hídrico mensal do solo, conforme as áreas de cultivo definidas durante o processo de otimização. As variáveis de decisão, áreas cultivadas e descargas dos reservatórios, trabalhadas pelo modelo se relacionam a elementos naturais (hidroclimáticos e hidroagrícolas) e artificiais (demandas, características físicas, parâmetros comerciais, entre outros) pertinentes ao sistema. As saídas do modelo determinam valores mensais para volumes, cotas e áreas de espelho d'água, vazões mensais de afluxos, de descargas e de sangria, por reservatório; vazões mensais nas tomadas d'água e nas calhas do rio; vazões mensais para irrigação por perímetro, áreas irrigadas e mão de obra alocadas, por cultura e por perímetro; receita líquida anual auferida por cultura em cada perímetro; áreas mínimas de espelho d'água, produção de pescado, mão de obra e receita líquida anual advinda da piscicultura, para cada reservatório.

A configuração do sistema hídrico para o ORNAP é mostrada na Figura 2, indicando-se os principais componentes, como os cinco reservatórios (Jataúba, Poço Fundo, Oitis, Machado e Tabocas); as três cidades abastecidas - Santa Cruz do Capibaribe (abastecida pelos reservatórios Poço Fundo e Machado, com vazões derivadas de 0,06 e 0,085 m³/s, respectivamente) e as cidades de Toritama e Caruaru (abastecidas pelo reservatório Tabocas, totalizando uma derivação conjunta de 0,233m³/s), além de cinco manchas de terras aptas à irrigação.

Alguns aspectos matemáticos do modelo

a) Da agricultura irrigada: a receita líquida anual gerada pela otimização, por tipo de cultura, leva em consideração a renda bruta obtida com a venda dos produtos agrícolas, os custos de produção, o custo da água de irrigação e a atualização monetária. A renda bruta anual Rb_{jt} , em R\$/ano/cultura, é dada pela Equação (2). O custo de produção anual Cp_{jt} , em R\$/ano/cultura, obtem-se pela Equação (3).

$$Rb_{jt} = \sum_{k=1}^{n_i} \text{Prod}_{jt} * \text{Prc}_j * \text{Ac}_{jk} \quad (2)$$

em que, j indica o tipo de cultura ($j=1, \dots, n_c =$ número de culturas), t indica o ano ($t=1, \dots, n_a$) e k indica o perímetro irrigado, $k=1, \dots, n_i$.

$$Cp_{jt} = \sum_{k=1}^{n_i} C\text{prod}_{jt} * \text{Ac}_{jk} \quad (3)$$

em que, $C\text{prod}_{jt}$ é o valor atualizado do custo de produção por unidade de área da cultura j referentes a gastos relativos ao ano t .

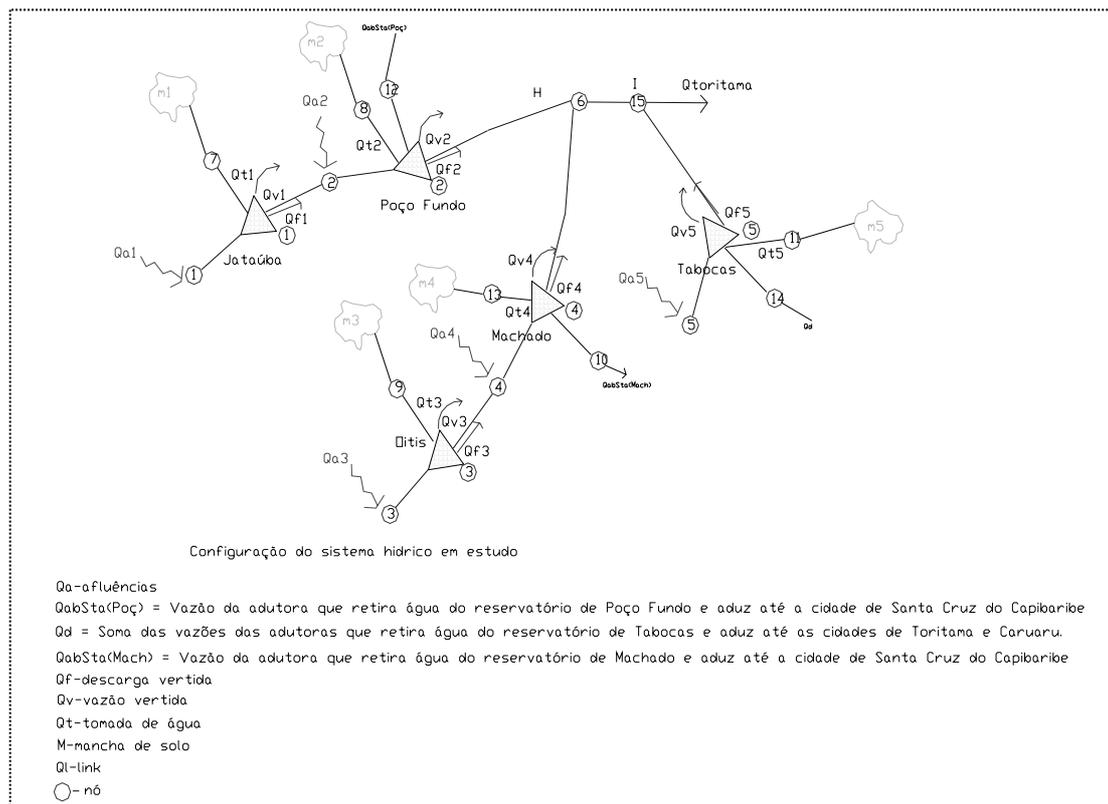


Figura 2 - Configuração do sistema hídrico para aplicação no ORNAP.

Para determinar a lâmina de rega, calcula-se a taxa de evapotranspiração potencial mensal da cultura j no mês t e perímetro k , Etp_{ijk} em mm/mês, estimada em função da taxa de

evapotranspiração de referência no mês t no perímetro k, $E_{to_{kt}}$ em mm/mês, representada por (Gomes, 1999):

$$E_{to_{kt}} = K_{Tk} * E_{v_{kt}} \quad (4)$$

em que, t indica o mês ($t=1, \dots, nm$); nm é o número de meses em estudo; K_{Tk} coeficiente do tanque evaporimétrico no perímetro k e $E_{v_{kt}}$ é a taxa de evaporação média mensal em mm/mês de um tanque evaporimétrico, normalmente do tipo classe A, colocado na região do perímetro k. Logo:

$$E_{tp_{jkt}} = K_{c_{jt}} * E_{to_{kt}} \quad (5)$$

em que, $K_{c_{jt}}$ coeficiente de cultivo no mês t da cultura j que reflete a sua necessidade hídrica em função de sua fase de crescimento.

A precipitação efetiva no mês t no perímetro k, $P_{ce_{kt}}$ em mm/mês, é dada por (FAO, 1998):

$$P_{ce_{kt}} = 0,8 * P_{c_{kt}} - 25 \text{ se } P_{c_{kt}} \geq 75 \text{ mm} \quad (6)$$

$$P_{ce_{kt}} = 0,6 * P_{c_{kt}} - 10 \text{ se } P_{c_{kt}} < 75 \text{ mm} \quad (7)$$

em que, $P_{c_{kt}}$ é a taxa de precipitação no mês t em mm/mês que ocorre no perímetro k.

A necessidade $N_{l_{jkt}}$ de irrigação líquida da cultura j para cada intervalo de tempo do seu ciclo vegetativo, no mês t, cultivada no perímetro k, é determinada por (Gomes, 1999):

$$N_{l_{jkt}} = E_{tp_{jkt}} - P_{ce_{kt}} - G_{jkt} - W_{kt} \quad (8)$$

em que, G_{jkt} é dotação de água por capilaridade à zona radicular da cultura j no mês t, em mm, que depende do tipo de solo e do nível do lençol freático do perímetro k, e W_{kt} é a reserva de água no solo no início do mês t, em mm. Neste trabalho, G_{jkt} e W_{kt} foram considerados iguais a zero. A quantidade de água a ser aduzida para cada tipo de cultura j depende da eficiência do sistema de irrigação, $E_{irr_{jk}}$, produto entre a eficiência do sistema de distribuição de água para cada perímetro e a eficiência da aplicação da irrigação por cultura, é dada pela Equação (9). Não se considerou dotação de para água de lixiviação, LR_{jkt} , para os perímetros.

A lâmina mensal de água para a irrigação da cultura j no mês t para o perímetro k, $Q_{irr_{jkt}}$, que é naturalmente transformada em vazão por unidade de área, é dada por:

$$Q_{irr_{jkt}} = \frac{N_{l_{jkt}}}{(1 - LR_{jkt}) * E_{irr_{jk}}} \quad (9)$$

O custo da água anual, Ca_{jt} em R\$/ano/cultura, aduzida para os perímetros é dada:

$$Ca_{jt} = \sum_{k=1}^{ni} \sum_{i=12*(t-1)+1}^{12*(t-1)+12 \leq nm} Pra_k * Q_{irr_{ijk}} * Ac_{jk} \quad (10)$$

em que, Pra_k é o preço da água por unidade de volume, aduzida para o perímetro k.

Finalmente a receita líquida total RL, em R\$, é dada pela Equação (11), como a seguir.

$$RL = \sum_{t=1}^{na} \left[\prod_{l=1}^t (1 + d_l) \sum_{j=1}^{nc} \prod_{m=1}^t (1 + dc_{jl}) * Rb_{jt} \right] - Cp_{jt} - Ca_{jt} \quad (11)$$

em que:

$\sum_{l=1}^t \prod (1 + d_l)$ = fator de atualização monetária referente a taxa de (inflação) desvalorização dl da moeda 1 no ano l;

$\sum_{l=1}^t \prod (1 + dc_{jl})$ = fator de atualização monetária referente a expectativa de crescimento ou decréscimo nos preços dc_{jl} , além do nível de inflação, da cultura j no ano l, que pode ser positiva ou negativa.

Outras restrições relacionadas à agricultura irrigada podem ser citadas, como:

$$\sum_{j=1}^{nc} \alpha_{jkt} * Ac_{jk} \leq Apmax_{kt} \quad (12)$$

em que, $\alpha_{jkt} = 1$ se a cultura j é plantada no mês t no perímetro k, ou $\alpha_{jkt} = 0$ se a cultura j não é plantada no mês t no perímetro k; $Apmax_{kt}$ é o limite máximo de área total que pode ser plantada por perímetro no mês t;

$$Amin_{jk} \leq Ac_{jk} \leq Amax_{jk} \quad (13)$$

em que, $Amin_{jk}$ é área mínima plantada com a cultura j no perímetro k; $Amax_{jk}$ área máxima plantada com a cultura j no perímetro k.

b) Dos reservatórios e seus componentes: os reservatórios são conectados a elementos do sistema a jusante deles, através dos descarregadores de fundo, etc., ligando-se também a nós de montante que recebem vazões afluentes. O balanço hídrico mensal de cada reservatório, que entra no modelo como restrição, é dado por:

$$Vr_{l,t+1} = Vr_{lt} + \sum_{\alpha(l)} Qa_{\alpha(l),t} - \sum_{f(l)} Qf_{f(l),t} - \sum_{t(l)} Qt_{t(l),t} + (Pr_{lt} - Evr_{lt}) * Ar_{lt} - \sum_{v(l)} Qv_{v(l),t} \quad (14)$$

em que, $\alpha(l)$ - representa a α -ézima vazão afluente ao reservatório l; $f(l)$ - representa o f-ézimo descarregador de fundo do reservatório l; $t(l)$ - representa a t-ézima tomada de água do reservatório l; $v(l)$ - representa o v-ézimo vertedouro do reservatório l; Vr_{lt} - volume do reservatório l no mês t; $Vr_{l,t+1}$ - volume do reservatório l no mês t+1; $Qa_{\alpha(l),t}$ - α -ézima vazão afluente ao reservatório l no mês t; $Qf_{f(l),t}$ - f-ézima vazão de descarga de fundo do reservatório l no mês t; $Qt_{t(l),t}$ - t-ézima vazão de tomada d'água do reservatório l no mês t; Pr_{lt} - precipitação direta no reservatório l no mês t; Evr_{lt} - taxa de evaporação sobre o reservatório l no mês t; Ar_{lt} - área média do espelho d'água do reservatório l no mês t, $Qv_{v(l),t}$ - e-ézimo volume vertido do reservatório l no mês t.

Relacionadas aos reservatórios, tem-se ainda, por exemplo, restrições do tipo:

$$0 \leq Qt_{t(l),t} \leq Qmax_{t(l)} \quad (15)$$

$$Q_{t(l),t} \geq 0 \text{ se } H_{r_{lt}} \geq H_{t(l)} \quad (16)$$

em que, $Q_{t(l),t}$ e $H_{t(l)}$ são, respectivamente, a vazão máxima de adução e a cota da t-ézima tomada d'água do reservatório l; $H_{r_{lt}}$ é cota do nível d'água do reservatório l no mês t. Restrições de ordem física e de critérios operacionais podem ser ainda impostas ao problema como:

$$V_{rmin_{lt}} \leq V_{r_{lt}} \leq V_{rmax_{lt}} \quad (17)$$

em que, $V_{rmax_{lt}}$ e $V_{rmin_{lt}}$ são, respectivamente, os volumes máximo e mínimo admitidos para o reservatório l no mês t.

c) De outros componentes do sistema hídrico como por exemplo, restrições que dizem respeito às calhas dos rios:

$$Q_{cmin_{ct}} \leq Q_{c_{ct}} \leq Q_{cmax_{ct}} \quad (18)$$

em que, c é um índice que indica a calha (trecho) de rio; $Q_{cmin_{ct}}$, $Q_{c_{ct}}$ e $Q_{cmax_{ct}}$ são, respectivamente, a vazão mínima, a vazão calculada e vazão máxima na c-ézima calha de rio no mês t. Além disso o ORNAP promove ainda o balanço de massa em cada nó estipulado para a representação do sistema hídrico, ou seja:

$$\sum_i Q_{entra_{in,t}} = \sum_j Q_{sai_{jn,t}} \quad (19)$$

em que, $Q_{entra_{in,t}}$ é a i-ézima vazão de entrada no nó n, no mês t, e $Q_{sai_{jn,t}}$ é a j-ézima vazão de saída do nó n, no mês t.

Finalmente, a receita líquida RI oriunda de atividades piscícolas nos reservatórios é dada por:

$$RI = (Prmp_l * Pdp_l - Cal) * (\min_t Ar_{lt}) \quad (20)$$

em que, $Prmp_l$ - preço médio do pescado na região do reservatório l; Pdp_l - produtividade média de pescado por unidade de área; Cal - custo de alevinagem por unidade de área, e $\min_t Ar_{lt}$ - área da superfície líquida mínima, entre os meses t de despesca, no reservatório l.

DADOS DO SISTEMA

Precipitação

Foram selecionados 15 postos representativos da pluviometria da região, trabalhando-se séries de dados mensais para um período de 29 anos (1963 a 1991), com base no trabalho Dados Pluviométricos do Nordeste (SUDENE, 1990). O preenchimento de falhas foi feito pelo método da “ponderação regional”. A homogeneidade dos dados foi verificada pela “curva dupla massa acumulativa”. Dividiu-se a área estudada em 10 sub-bacias, calculando-se através do método dos polígonos de Thiessen as respectivas séries de precipitação mensal média. Para as áreas de drenagem dos reservatórios, a precipitação média anual é mostrada na Tabela 2. A precipitação direta sobre cada reservatório foi estimada pela precipitação do posto pluviométrico mais próximo.

Vazões

O modelo ORNAP requer vazões afluentes para cada reservatório e para cada trecho de rio que não é barrado por reservatório. Para tanto, subdividiu-se a área em dez sub-bacias e, através do método SUDENE-ORSTOM (Molle e Cadier, 1992), estimou-se as vazões afluentes médias mensais para cada uma das 10 sub-bacias estipuladas, fazendo-se uma integralização e comparação do somatório com vazões médias mensais da estação Toritama (única estação fluviométrica em operação em toda a região estudada), conforme já exposto por Albuquerque, et al. (2002).

Tabela 2. Precipitação média anual na sub-bacia de cada reservatório

Reservatório	Precipitação média anual na sub-bacia (mm)
Jataúba	813,8
Poço Fundo	645,7
Oitis	814,3
Machado	671,3
Tabocas	674,3

Evaporação nos reservatórios

Os volumes evaporados médios mensais nos reservatórios (Tabela 3) foram estimados com base em dados de tanque classe A da estação evaporimétrica de Belo Jardim/PE. Adotou-se um coeficiente de tanque igual a 0,80.

Tabela 3. Lâminas de evaporação média mensal para os reservatórios

Mês	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
mm	162,2	129,3	119,1	106,1	85,92	72,7	75,2	92,9	108,88	151,9	164,4	161,4

Demandas

a) Abastecimento doméstico: fez-se obrigatório o atendimento das demandas para o abastecimento doméstico, fixando-se as vazões: 0,06 m³/s para a cidade de Santa Cruz do Capibaribe, com derivação a partir do reservatório Poço Fundo; 0,233 m³/s para Toritama e Caruaru, a partir do Tabocas, e 0,085 m³/s para complementação da demanda de Santa Cruz do Capibaribe, a partir do reservatório Machado; b) Irrigação: a demanda da irrigação é avaliada pelo balanço hídrico mensal do solo. No cálculo da evapotranspiração potencial mensal de cada uma das oito culturas selecionadas, são aplicados os coeficientes de cultivo mostrados na Tabela 4, que se coadunam com os respectivos planos culturais anuais adotados para as áreas irrigáveis, definidos conforme a aptidão agrícola de cada um deles tomando por base no trabalho Aptidão Agrícola das Terras de Pernambuco (1979). A estimativa da precipitação efetiva sobre as culturas em cada perímetro foi baseada na precipitação do posto pluviométrico mais próximo a cada um deles; c) Vazão para diluição de cargas poluidoras: o município de Santa Cruz do Capibaribe é responsável

pela maioria da carga poluidora, de origem doméstica e industrial (cerca de 2.223Kg DBO/dia), lançada no rio Capibaribe, a jusante do reservatório Poço Fundo. Para preservação da qualidade da água nesse trecho do rio, definiu-se para o estudo de otimização uma descarga mínima de 2,86m³/s a ser mantida pelo reservatório de Poço Fundo.

Piscicultura

Em reservatórios destinados ao abastecimento de água das populações, não se recomenda a prática de uma piscicultura racional sob o ponto de vista econômico, pelos riscos, entre outros, de causar eutrofização das águas. A piscicultura a ser desenvolvida nos reservatórios foi considerada de forma extensiva que, embora de baixa produtividade, não causa grandes modificações quantitativas e qualitativas nas águas. Os dados usados neste trabalho para fins de avaliação da atividade piscícola, conforme já adotados por Barbosa e Curi, foram os seguintes: número de meses para despesca=12; custo de alevinagem=R\$ 3,00/ha/ano; preço de venda do pescado=R\$ 1,2/kg, produtividade do pescado=120 kg/ha/ano e despesca média anual/pescador=1.500 kg/pescador/ano.

Tabela 4. Coeficientes de cultivo das culturas adotadas nos perímetros de irrigação

Cultura	Mês											
	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Tomate		0,45	0,75	1,15	0,80							
Melancia (entresafra)							0,75	1,00	0,75			
Feijão (safra)			0,70	1,10	0,90							
Feijão (entresafra)							0,70	1,10	0,90			
Banana	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90
Milho			0,40	0,80	1,15							
Goiaba	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70
Algodão					0,50	0,75	1,15	0,75				

Fonte: (Gomes, 1999)

Outros dados relevantes

Para a produtividade das culturas e custo médio de produção (Tabela 5), foram usados valores médios constantes do Manual de Orçamentos Agropecuários do Banco do Nordeste S/A (1997); os preços de venda das culturas, foram estimados pela média dos preços de atacado divulgados pela Cia. de Abastecimento e de Armazéns Gerais de Pernambuco, em 09/092002. Para os sistemas de irrigação, conforme Andrade (2000), os parâmetros considerados estão mostrados na Tabela 6, em que Eapl é a eficiência do sistema de aplicação da água de irrigação; Pirr, Vutil e Tam são, respectivamente, o custo do investimento de implantação, a vida útil e a taxa anual de amortização do investimento, e Pra é o preço médio da água aduzida para irrigação.

Tabela 5. Produtividade, custo médio de produção e preço médio de venda das culturas

Cultura	Produtividade (kg/ha/ano)	Custo médio de produção (R\$/ha/ano)	Preço médio de venda (R\$/kg)
Tomate	50.000	3.744,00	0,65
Melancia (entresafra)	25.000	1.055,00	0,16
Feijão (safra)	1.800	656,00	0,86
Feijão (entresafra)	1.800	656,00	1,10
Banana	40.000	1.260,00	0,42
Milho	8.000	596,00	0,25
Goiaba	16.000	1.121,00	0,31
Algodão	3.000	982,00	0,78

Tabela 6. Dados referentes aos sistemas de irrigação

Cultura	Sistema	Eapl (%)	Pirr (R\$/ha)	Vútil (anos)	Tam (%)	Pra (R\$/m ³)
Tomate	Sulco	40	1.000	1	8	0,05
Melancia (entresafra)	Aspersão	65	5.000	15	8	
Feijão (safra)	Aspersão	65	5.000	15	8	
Feijão (entresafra)	Aspersão	65	5.000	15	8	
Banana	Gotejamento	90	3.000	10	8	
Milho	Aspersão	65	5.000	15	8	
Goiaba	Gotejamento	90	3.000	10	8	
Algodão	Aspersão	65	5.000	15	8	

CENÁRIOS DE ANÁLISE

O comportamento anual do sistema hídrico, para condições variáveis no tempo, foi analisado mediante cenários de simulação, envolvendo diferentes situações climáticas e volumes iniciais para os reservatórios, mantidos constantes os planos culturais para os perímetros irrigados e suas respectivas áreas máximas, estipuladas em: mancha de solo 1 com 10.000 ha, próxima ao reservatório Jataúba; mancha de solo 2 com 350 ha (vinculada ao reservatório Poço Fundo), mancha de solo 3 com 500 ha (vinculada ao reservatório Oitis), mancha de solo 4 com 100 ha (vinculada ao reservatório Machado) e mancha de solo 5 com 100 ha (vinculada ao reservatório Tabocas).

Foram trabalhados dados de precipitação e vazão distintos para as situações climáticas média seca e chuvosa. A situação média foi caracterizada a partir da média referente à série hidrológica de precipitações e vazões médias mensais para cada uma das 10 sub-bacias (período 1963 a 1991). Para definir a situação climática seca e a chuvosa tomou-se a maior e menor média móvel anual das precipitações, dentro do período 1963-1991. Cada média móvel foi calculada para quatro anos, sendo a primeira a média dos valores de precipitação mensal do período 1963-1966, a segunda média móvel para os anos de 1964-1967 e assim, sucessivamente, até a média para os anos de 1988-1991. Sabendo-se os 4 anos adotados como referência para representar a situação climática

seca e chuvosa, usou-se o mesmo intervalo de 4 anos para calcular, em cada sub-bacia, as vazões médias para os períodos climáticos seco e chuvoso.

Foram idealizados três (3) diferentes cenários de simulação identificados pelas siglas Cm, Cs e Cc, caracterizando o cenário médio, seco e chuvoso, respectivamente, considerando-se os seguintes pressupostos: a) o intervalo de tempo para a otimização do sistema hídrico foi de um ano (doze meses); b) as culturas permanentes foram consideradas em plena capacidade de produção; c) a irrigação considera lâminas de rega fixas; d) impôs-se como restrição a sustentabilidade hídrica dos reservatórios; e) para início da simulação, adotou-se o mês de agosto (final do período chuvoso da região). A Tabela 7 destaca os principais parâmetros operacionais do sistema por cenário.

Tabela 7 - Cenários de análise

Parâmetro operacional	Un.	Situação climática		
		Média	Seca	Chuvosa
		Cm	Cs	Cc
Vrmax (1)	m ³	27.630.000	27.630.000	27.630.000
Vrmax (2)	m ³	11.220.000	11.220.000	11.220.000
Vrmax (3)	m ³	3.020.159	3.020.159	3.020.159
Vrmax (4)	m ³	1.227.700	1.227.700	1.227.700
Vrmax (5)	m ³	93.5320	93.5320	93.5320
Vro (1)	m ³	0,7 Vrmax	0,8 Vrmax	0,7 Vrmax
Vro (2)	m ³	0,5 Vrmax	0,8 Vrmax	0,5 Vrmax
Vro (3)	m ³	0,7 Vrmax	0,8 Vrmax	0,7 Vrmax
Vro (4)	m ³	0,7 Vrmax	0,8 Vrmax	0,7 Vrmax
Vro (5)	m ³	0,7 rmax	0,8 Vrmax	0,7 Vrmax
Vrmin (1)	m ³	308.400	308.400	308.400
Vrmin (2)	m ³	211.639	211.639	211.639
Vrmin (3)	m ³	85.174	85.174	85.174
Vrmin (4)	m ³	84.066	84.066	84.066
Vrmin (5)	m ³	64.330	64.330	64.330
Vsust (1 a 5)	m ³	Vro	Vro	Vro
QabSta (Poç)	m ³ /s	0,060	0,060	0,060
Qd	m ³ /s	0,233	0,233	0,233
QabSta (Mach)	m ³ /s	0,085	0,085	0,085

(1) Reservatório Poço Fundo; (2) Reservatório Tabocas; (3) Reservatório oitis;
(4) Reservatório Machado; (5) Reservatório Jataúba.

Na Tabela 7, Vrmax = volume máximo mensal permitido para o reservatório; Vro = volume do reservatório no início da simulação; Vrmin = volume mínimo mensal para a boa operação hidráulica das tomadas d'água; Vsust = volume de sustentabilidade hídrica do reservatório, em que V_{final} do último mês da simulação $\geq V_{\text{inicial}}$ do primeiro mês da simulação; QabSta (Poç) = vazão derivada de Poço Fundo para abastecer Santa Cruz do Capibaribe; Qd = vazão derivada do reservatório Tabocas para atender as cidades Toritama e Caruaru; QabSta (Mach) = vazão derivada do reservatório Machado para complementar o abastecimento de Santa Cruz do Capibaribe. Entre as

restrições operacionais dos reservatórios, vale destacar que as descargas máximas permitidas para cada reservatório, no sentido de não causar inundações a jusante, foram limitadas em: Poço Fundo = 20 m³/s; Tabocas = 10 m³/s; Oitis = 7m³/s, Machado = 5 m³/s e Jataúba = 4 m³/s.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nos cenários definidos, o entendimento sobre o desempenho hidroagrícola do sistema hídrico está realçado pelo valor da receita líquida potencial advinda da agricultura irrigada. As soluções otimizadas das variáveis de decisão foram obtidas para todo o sistema operando de forma integrada.

Situação climática média

Uma síntese comparativa dos resultados para a situação climática média é mostrada na Tabela 8, destacando-se que foram asseguradas as vazões para o abastecimento doméstico, não havendo violação de restrições impostas ao modelo. A maior receita líquida com irrigação ficou para a área irrigada (Mancha 3) suprida de água pelo reservatório Oitis, terceiro em capacidade de acumulação. Uma vez que esse reservatório não tem compromisso com o abastecimento doméstico, o modelo otimiza a alocação hídrica em benefício da agricultura irrigada, aproveitando 329,93 ha dos 350 ha de área máxima disponível, o que corresponde a uma taxa de ocupação de 94,26% dessa área. A maior receita líquida com piscicultura ficou para o reservatório Poço Fundo, o de maior capacidade e conseqüente maior área de espelho d'água.

Tabela 8. Resultados da resposta agrícola e piscicultura na situação climática média

Culturas	Reservatório / Mancha de solo irrigada					Total (ha)
	Jataúba	Poço Fundo	Oitís	Machado	Tabocas	
	Mancha 1	Mancha 2	Mancha 3	Mancha 4	Mancha 5	
Área Irrigada Otimizada (ha)						Total (ha)
Banana	12,25	52,77	69,94	66,59	10,00	211,55
Tomate	22,93	26,98	105,32	15,65	74,95	245,83
Melancia	0,33	33,69	15,94	22,96	4,81	77,73
Feijão (s)	11,19	11,26	53,96	5,00	5,00	86,41
Feijão (es)	0,11	0,04	14,07	2,34	0,15	16,71
Milho	95,69	11,12	5,63	5,00	5,03	122,47
Goiaba	0,49	0,20	11,55	1,52	0,00	13,76
Algodão	5,11	10,47	53,52	6,08	5,00	80,18
Total	148,10	146,53	329,93	125,14	104,94	854,64
Receita Líquida Potencial com a Agricultura Irrigada (R\$)						
Culturas	Mancha 1	Mancha 2	Mancha 3	Mancha 4	Mancha 5	Total
Banana	185.990	801.760	1.062.630	1.010.920	151.930	3.213.230
Tomate	634.890	748.230	2.920.750	433.210	2.077.130	6.814.210
Melancia	840	86.360	40.820	58.570	12.320	196.910
Feijão (s)	5.730	6.150	29.170	2.530	2.630	46.210
Feijão (es)	100	40	13.130	2.160	140	15.570
Milho	99.260	11.730	5.920	5.160	5.290	127.360
Goiaba	1.710	710	40.480	5.130	0	48.210
Algodão	4.150	8.740	44.730	4.960	4.170	66.410
Total 1	932.670	1.663.720	4.157.270	1.522.840	2.253.610	10.530.110
Receita Líquida Potencial com a Piscicultura (R\$)						
	Jataúba	Poço Fundo	Oitís	Machado	Tabocas	
Total 2	1.172	60.620	1.524	2.156	7.566	73.039
Total (1+2)	933.842	1.724.340	4.158.794	1.524.996	2.261.176	10.603.149

No processo de otimização da exploração das cinco áreas de cultivo, é importante verificar a apropriação das vazões mensais para a irrigação. Através da Figura 3, observa-se que as maiores demandas para a irrigação correspondem à mancha de solo 3 (vinculada ao reservatório Oitís), onde o maior pico de vazão mensal atinge 173.664 m^3 . Não foi possível atender a vazão $2,86 \text{ m}^3/\text{s}$ determinada para diluição das cargas poluidoras, a partir do reservatório Poço Fundo. Obteve-se apenas um volume total anual descarregado de 311.040 m^3 , o que equivale a uma vazão média anual de $9,86 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$, o que é muito inferior ao desejado.

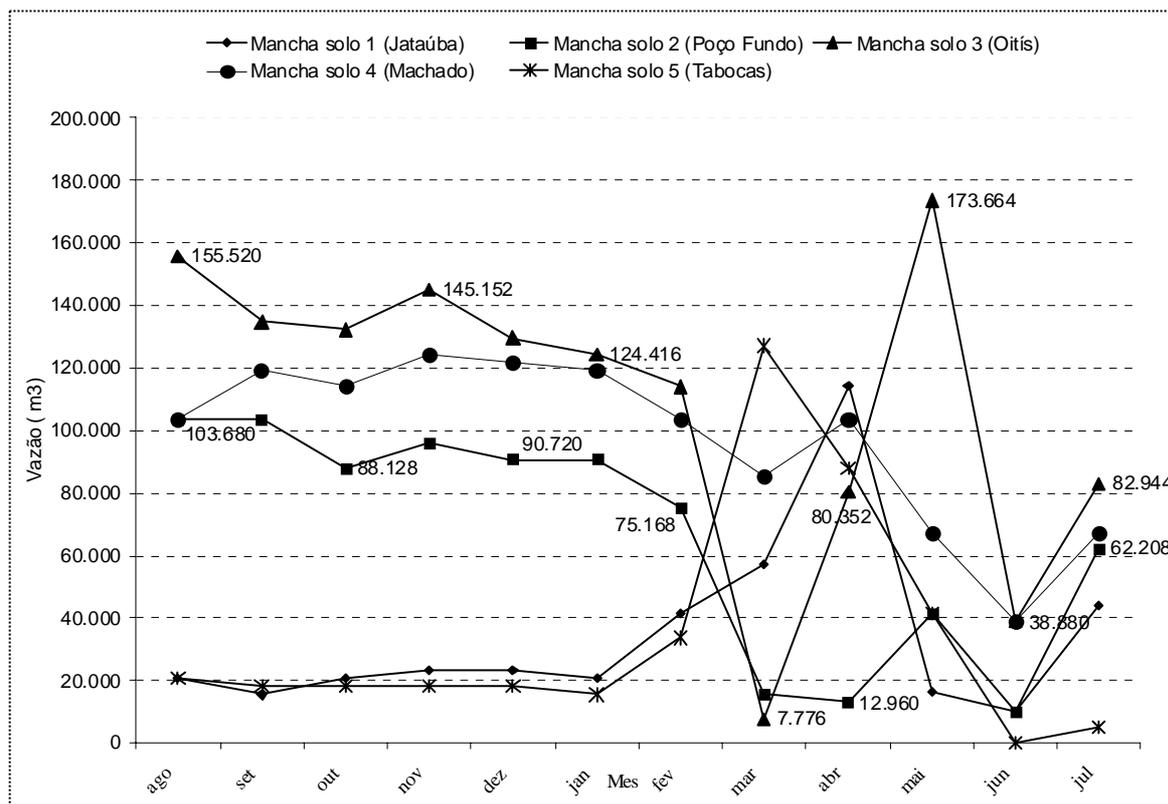


Figura 3 – Vazões captadas para as áreas irrigadas na situação climática média

As variações mensais de volumes armazenados nos reservatórios estão mostradas na Figura 4, onde os volumes finais atingidos pelos reservatórios evidenciam o atendimento do critério de sustentabilidade hídrica. A fase de depleção das disponibilidades hídricas se instala a partir do mês de setembro indo até fevereiro. O reservatório Tabocas, o último do sistema, manteve-se com uma variação de nível equilibrada, não vertendo e não descarregando, aproveitando-se as aflúências armazenadas no abastecimento urbano e o excedente na irrigação.

Situação climática seca

Nesse cenário, só se obteve convergência e um ponto ótimo de solução quando se iniciou o processo de otimização com os reservatórios mais cheios e reduziu-se o critério de sustentabilidade hídrica para os reservatórios Oitis, Machado e Tabocas. Mesmo assim, as áreas irrigadas foram fortemente reduzidas, sendo praticamente nulas aquelas vinculadas às disponibilidades hídricas dos reservatórios Poço Fundo e Tabocas. A receita líquida total de R\$ 2.159.680,00 advinda da agricultura irrigada foi 79,48% menor do que a resposta agrícola obtida para a situação climática média. A Tabela 9 apresenta uma síntese dos resultados.

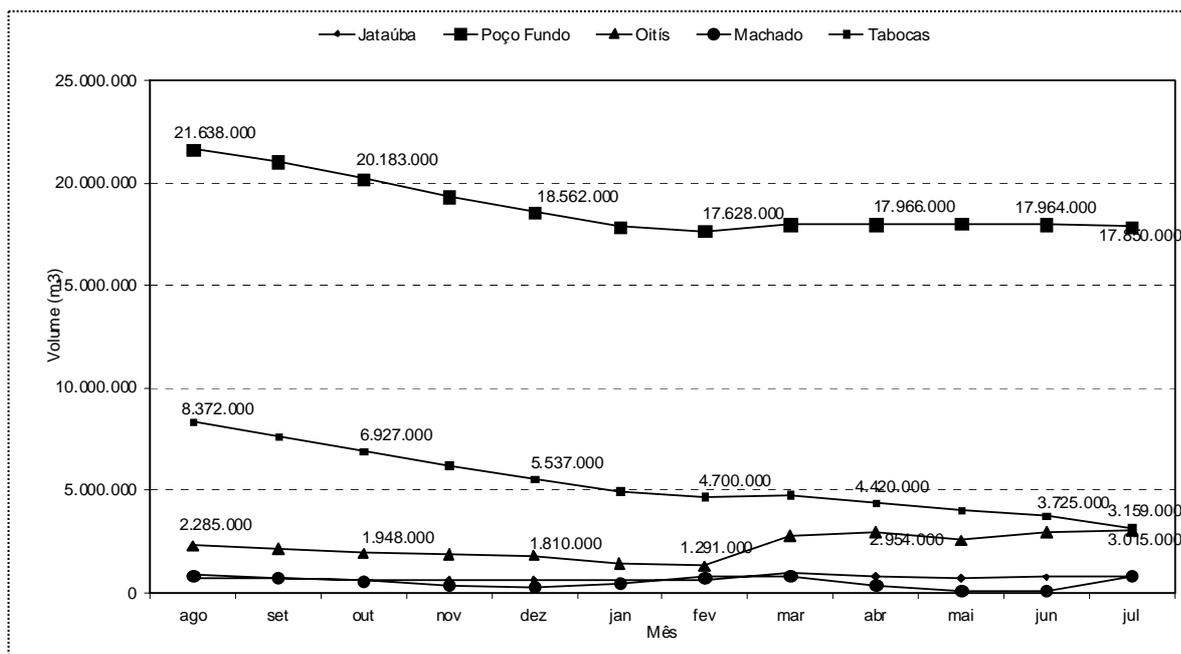


Figura 4 – Variação de volumes mensais nos reservatórios na situação climática média

Tabela 9. Resultados da resposta agrícola e piscicultura na situação climática seca

Culturas	Reservatório / Mancha de solo irrigada					Total (ha)
	Jataúba	Poço Fundo	Oitís	Machado	Tabocas	
	Mancha 1	Mancha 2	Mancha 3	Mancha 4	Mancha 5	
Área Irrigada Otimizada (ha)						Total (ha)
Banana	2,88	0,07	20,18	17,98	0,07	41,18
Tomate	14,54	0,12	10,05	20,54	0,12	45,37
Melancia	0,01	0,01	9,55	3,28	0,01	12,86
Feijão (s)	6,20	0	7,55	6,85	0	20,60
Feijão (es)	0	0	9,53	6,14	0	15,67
Milho	91,13	0,01	7,03	6,29	0,01	104,47
Goiaba	0,03	0,02	17,00	13,49	0,02	30,56
Algodão	0,01	0	7,37	1,77	0	9,15
Total	114,80	0,23	88,26	76,34	0,23	279,86
Receita Líquida Potencial com a Agricultura Irrigada (R\$)						
Total 1	542.380	4.400	694.410	914.100	4.390	2.159.680
Receita Líquida Potencial com a Piscicultura (R\$)						
	Jataúba	Poço Fundo	Oitís	Machado	Tabocas	
Total 2	2.869	65.972	3.035	1.167	7.820	80.862
Total (1+2)	545.249	70.372	697.445	915.267	12.210	2.240.542

A piscicultura registrou maior produção nesse cenário do que para o médio, em todos os reservatórios, exceto o de Machado. Isso se deve ao fato de ter sido adotado volumes iniciais mais elevados para todos reservatórios o que induz áreas de espelho d'água também maiores. Como a produção piscícola é calculada com base na área de espelho d'água líquido do ano, a piscicultura logicamente teria que apresentar melhores resultados. Para diluição de toda a carga poluidora a

jusante do reservatório de Poço Fundo, não foi possível atender a vazão $2,86\text{m}^3/\text{s}$ determinada, o que se justifica por se tratar de um período seco.

Situação climática chuvosa

No cenário chuvoso, o desempenho em termos de áreas irrigadas (Tabela 10) registra um aumento considerável para o perímetro vinculado ao reservatório Jataúba - incremento de 75,4 %, enquanto a receita líquida total é maior em 12,36%, quando se compara com os resultados obtidos na situação climática média. Obteve-se um volume total anual descarregado de Poço Fundo de $181.440\text{ m}^3/\text{s}$, representando uma vazão de $5,75 \times 10^{-3}\text{m}^3/\text{s}$, o que não atende o requerimento da diluição da carga poluidora lançada a jusante desse reservatório.

Tabela 10. Resultados da resposta agrícola e piscicultura na situação climática chuvosa

Culturas	Reservatório / Mancha de solo irrigada					Total (ha)
	Jataúba	Poço Fundo	Oitis	Machado	Tabocas	
	Mancha 1	Mancha 2	Mancha 3	Mancha 4	Mancha 5	
Área Irrigada Otimizada (ha)						Total (ha)
Banana	46,10	52,70	78,77	42,20	10,23	230,00
Tomate	47,03	27,17	104,90	24,85	74,56	278,51
Melancia	19,48	34,38	0	18,41	5,59	77,86
Feijão (s)	17,60	11,33	50,38	10,76	5,00	95,07
Feijão (es)	10,34	0,31	14,14	23,09	0,15	48,03
Milho	98,61	11,18	6,76	5,91	5,00	127,46
Goiaba	13,34	0,63	9,19	11,28	0,20	34,64
Algodão	7,28	10,56	50,00	5,00	5,00	77,84
Total	259,78	148,26	314,14	141,50	105,73	969,41
Receita Líquida Potencial com a Agricultura Irrigada (R\$)						
Total 1	2.229.070	1.670.380	4.229.940	1.453.700	2.248.980	11.832.070
Receita Líquida Potencial com a Piscicultura (R\$)						
	Jataúba	Poço Fundo	Oitís	Machado	Tabocas	
Total 2	399	63.961	1.513	1.142	11.218	78.233
Total (1+2)	2.229.469	1.734.341	4.231.453	1.454.842	2.260.196	11.910.303

As afluências médias mensais para os reservatórios Oitis e Machado não sofreram grandes alterações, sendo bem maiores para os demais, razão pela qual foi possível aumentar a área irrigada vinculada ao reservatório Jataúba, embora ele seja um reservatório com pequena capacidade de acumulação. Apesar de não ter havido vertimento em nenhum dos reservatórios, houve um grande aumento no volume médio mensal dos dois maiores reservatórios - Poço Fundo e Tabocas, para os quais as médias dos volumes mensais passaram para $18.587.667\text{ m}^3$ ($16.142.833\text{ m}^3$ no cenário médio) e $7.438.000\text{m}^3$ ($4.033.417\text{m}^3$ no cenário médio), respectivamente.

CONCLUSÕES

Os resultados deste trabalho mostraram que a área total cogitada para os cinco perímetros não é, totalmente, factível de ser beneficiada com irrigação. Para o reservatório Jataúba, que não tem compromisso com o abastecimento doméstico, conclui-se ser importante aproveitar suas disponibilidades hídricas para o desenvolvimento da agricultura irrigada, minorando as altas perdas evaporativas. O reservatório Poço Fundo não garante a descarga mínima de $2,86\text{m}^3/\text{s}$ para diluição da carga poluidora lançada no rio Capibaribe, a jusante, o que sugere que seja feito um maior controle, na fonte, desta poluição. O reservatório Oitis, por receber uma elevada afluência mensal, pode sustentar a irrigação de área superior à definida neste trabalho, o que evidencia sua importância para um incremento da agricultura irrigada na região.

Na situação climática média, a que melhor representa um prognóstico de longo termo para o sistema hídrico, respeitadas as restrições impostas, foi possível aproveitar 854,64 ha dos 11.050 ha definidos como aptos à irrigação, o que corresponde a uma taxa de ocupação de 7,73% dessa área, gerando uma receita líquida anual de R\$ 10.630.149,00 e assegurando o atendimento das demandas de abastecimento doméstico. A prática da piscicultura extensiva nos reservatórios é uma atividade recomendável para melhoria da renda regional. No período seco, o sistema trabalha em condições precárias não sendo recomendável a prática da irrigação. Mesmo que considerações determinísticas tenham sido adotadas, imaginando-se o futuro como conhecido através de cenários de planejamento, o ORNAP mostrou-se eficaz e os resultados alcançados são interessantes subsídios para o processo de estabelecimento de regras operacionais do sistema hídrico estudado.

AGRADECIMENTOS

Para a realização deste trabalho, o primeiro, terceiro e quarto autores agradecem a CAPES e o CNPq pelo apoio recebido. O segundo autor agradece o incentivo recebido da Empresa Pernambucana de Pesquisa Agropecuária - IPA e do CNPq, sendo o último através de uma bolsa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALBUQUERQUE, A. S. O. Operação ótima e integrada do sistema hídrico composto pelos reservatórios do alto Capibaribe. Campina Grande: UFCG, 2003. 210p. (Dissertação de Mestrado).
- ALBUQUERQUE, A. S. O., ANDRADE, P. R. G. S., CURI, R. C., CURI, W. F. Uma avaliação de escoamentos superficiais na parte alta do rio Capibaribe através do método SUDENE-ORSTOM. VI Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste. Anais em CD-ROM. Maceió-AL. 2002.
- ALMEIDA, M. A., CURI, R. C., CURI, W. F. Estimativa de variações no desempenho otimizado de um sistema hídrico para o semi-árido paraibano para diferentes cenários climáticos,

- fontes hídricas e funções objetivos. In: V Simpósio de Hidráulica e Recursos Hídricos dos Países de Língua Oficial Portuguesa. Aracajú-SE. Anais em CD- ROM. 2001.
- ANDRADE, P. R. G. S., CURI, W. F., CURI, R. C. ORNAP na otimização de três perímetros irrigados abastecidos por dois reservatórios conectados em série. Revista Engenharia Agrícola. Jaboticabal - SP: , v.22, n.1, p.22 - 32, 2002.
- ANDRADE, P. R. G. S de. Operação integrada ótima do sistema hídrico Jucazinho-Carpina, para múltiplos usos-rio Capibaribe-PE. Campina Grande: UFPB. 2000. 226p (Dissertação de Mestrado).
- Aptidão Agrícola das Terras de Pernambuco – Secretaria Nacional de Planejamento Agrícola, Ministério da Agricultura. Biblioteca Nacional de Agricultura, Brasília. 1979.
- Banco do Nordeste S/A. Manual de Orçamentos Agropecuários – CENOP-CDE, Campina Grande - PB. 1997.
- BARBOSA, D. L., CURI, R. C., CURI, W. F. Um estudo de caso da operação integrada ótima de três reservatórios em paralelo com usos múltiplos In: V Simpósio de Hidráulica e Recursos Hídricos dos Países de Língua Oficial Portuguesa. Aracajú-SE. Anais, v.1.p.1-20. 2001.
- COMPANHIA DE ABASTECIMENTO E DE ARMAZÉNS GERAIS DO ESTADO DE PERNAMBUCO – CEAGEPE. [www.ceagepe.pe.gov.br. 09/09/2002].
- CURI, W.F., CURI, R.C. ORNAP - Optimal Reservoir Network Analysis Program. In: V Simpósio de Hidráulica e Recursos Hídricos dos Países de Língua Oficial Portuguesa. Aracajú-SE. Anais em CD-ROM. 2001.
- CURI, W.F., CURI,R.C. Modelo de otimização para operação de reservatórios (ORNAP). Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande–PB. 1999.
- CURI, R. C.; CURI, W. F.; CELESTE, A. B. Alocação ótima da água do reservatório Eng.º Arcoverde para irrigação via programação não linear. Anais de XII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Vitória-ES. 1997.
- Dados Pluviométricos Mensais do Nordeste. SUDENE. Recife. 1990.
- GOMES, H. P. Engenharia de irrigação - hidráulica dos sistemas pressurizados, aspersão e gotejamento. Campina Grande: Editora da Universidade Federal da Paraíba. 3ª edição. 1999.
- Levantamento Exploratório–Reconhecimento de Solos de Pernambuco. Volume I. Divisão de Pesquisa Pedológica – DNPEA, Ministério da Agricultura, Recife. 1973.
- MOLLE, F., CADIER, E. Manual do Pequeno Açude. Recife. SUDENE - DPG. PRN – DPP – APR. 1992. 511p.

- SIMONOVIC, S.P. Reservoir systems analysis: closing gap between theory and practice. *Journal of Water Resources Planning and Management*, New York, Vol. 118, n° 3, p. 262-280, 1992.
- WURBS, R. A. (1993). Reservoir-system simulation and optimization models. *Journal of Water Resources Planning and Management*, New York, Vol. 119, n° 4.
- YEH, W. W. G. (1985). Reservoir management and operations models: a state of the art review. *Water Resources Research*, Washington, Vol. 21, n° 12.