

OTIMIZAÇÃO DE UM SISTEMA DE MÚLTIPLOS RESERVATÓRIOS ATENDENDO A MÚLTIPLOS USOS NO NORDESTE BRASILEIRO

Josimar Alves de Oliveira

Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos
Av. Bezerra de Menezes, 1900
60325-002 - Fortaleza, CE
josimar@zeus.funcceme.br

Antonio Eduardo Leão Lanna

Instituto de Pesquisas Hidráulicas - UFRGS
Caixa Postal 15029
91501-970 - Porto Alegre, RS
lanna@if.ufrgs.br

RESUMO

A eficiente operação de um sistema de recursos hídricos visando a otimização das descargas a serem liberadas para atendimento de diversas demandas é de grande interesse em regiões como o Nordeste brasileiro, onde a água é escassa e a evaporação muito elevada. Este trabalho apresenta o desenvolvimento de regras de operação para um sistema composto por cinco reservatórios para abastecimento de demandas urbanas e de irrigação na bacia do rio Acaraú, no estado do Ceará. O objetivo é a maximização do valor presente dos benefícios líquidos da operação, sujeita a restrições de balanço hídrico nos reservatórios e de umidade do solo na área cultivada. Alguns artifícios de linearização foram empregados para permitir o uso de otimização linear na solução do problema. Duas formulações foram consideradas: 1) a área irrigada é fixa e a lâmina de rega variável e 2) a área irrigada é variável e a lâmina de rega é fixa, ao longo do tempo. Na primeira formulação regras operacionais foram derivadas para a irrigação de uma área cultivada ótima, a ser computada. A dotação da irrigação poderá atender parcialmente as demandas hídricas das culturas, estabelecendo déficit hidroagrícola e reduções na produtividade. Diversas relações funcionais para as regras operacionais foram testadas. Na segunda formulação a área irrigada pode variar ao longo do tempo em função das condições

hidrológicas. Neste caso, a dotação da irrigação deve ser igual à demanda hidroagrícola. Constatou-se que o sistema tem capacidade de irrigar áreas maiores que a originalmente definida no projeto. Nas duas formulações ficou demonstrado que técnicas de otimização podem incrementar a eficiência econômica dos investimentos na infraestrutura hídrica regional e fornecer importantes informações para o dimensionamento e operação ótimos de sistemas de recursos hídricos.

INTRODUÇÃO

O estado do Ceará, assim como o Nordeste brasileiro, é uma região castigada por secas periódicas que determinam perdas nas colheitas e dificuldades de abastecimento e miséria. Esse fenômeno tem por causas naturais a estrutura geológica do solo, predominantemente cristalino, a má distribuição espacial e temporal das chuvas, e o alto índice de evaporação. As causas econômicas são os baixos investimentos na infraestrutura hídrica regional e a ineficiência no seu aproveitamento.

A economia regional depende da agricultura, principalmente a de subsistência que, diante das condições naturais e da escassez de recursos e de tecnologia, realiza apenas uma colheita ao ano. A agricultura irrigada, que poderia elevar a produção, ainda é pouco difundida, comparada a outras regiões semi-áridas da Argentina, Espanha, Estados Unidos e México.

Nos últimos anos, técnicas modernas de gestão dos recursos hídricos têm sido aplicadas, orientadas pelo Plano Estadual de Recursos Hídricos (Ceará, 1992), pioneiro no âmbito nacional. Este Plano visa a uma eficiente alocação de recursos, que são escassos, voltada à promoção do desenvolvimento sócio-econômico. O uso de técnicas de otimização matemática no dimensionamento e operação da infraestrutura hídrica regional é ainda modesto, em face das suas potencialidades. Este trabalho relata resultados de pesquisas voltadas ao desenvolvimento de técnicas de otimização matemática adaptadas aos problemas regionais, que permitam aumentar a eficiência econômica dos investimentos.

CASO EM ESTUDO

Adotou-se como exemplo o sistema da bacia do rio Acaraú, representado na Figura 1. Esta bacia tem cerca de 14.500 km² tendo como cidade mais importante Sobral, com cerca de 124.000 habitantes (estimativa para 1989), e os projetos de irrigação de Araras Norte e do Baixo Acaraú. O sistema de suprimento previsto tem um total de 7 açudes, dos quais 3 estão implantados (Araras, Ayres de Souza e Edson Queiroz) e 4 em projeto (Poço Comprido, Taquara, Pedregulho e Sem Nome).

Vieira Neto (1991) estudou o problema da expansão da capacidade desse sistema para uma garantia de 90% de abastecimento às demandas de Sobral e dos projetos de irrigação, tendo verificado que os açudes Pedregulho e Sem Nome poderiam ser eliminados. Além disso, seus resultados apontaram que o açude Poço Comprido estaria superdimensionado, podendo ter seu volume reduzido para 85 hm³, ao invés dos 560 hm³ inicialmente propostos. A pesquisa buscou a determinação de regras operacionais para este sistema. Os açudes a serem considerados no sistema de suprimento de água, com seus respectivos volumes operacionais, encontram-se resumidos na Tabela 1. As curvas área-volume foram linearizadas através de regressão linear, para

uso no modelo. Para o açude Poço Comprido, foi feita uma linearização da curva área-volume para a nova capacidade proposta.

Tabela 1. Volumes operacionais dos açudes (hm³).

Açude	Volume máximo	Volume mínimo
Araras	891,1	30,1
Poço Comprido	85,0 *	11,7
Edson Queiroz	248,6	24,6
Taquara	278,8	6,1
Ayres de Souza	104,4	12,2

* Proposto por Vieira Neto (1991) - Fonte: Ceará (1992)

A cidade de Sobral é abastecida pelo açude Ayres de Souza sendo sua demanda hídrica mensal fixada em 2,592 hm³/mês (1,0 m³/s). O projeto Araras Norte, abastecido pelo açude Araras, foi considerado para efeito de estudo, totalmente implantado. O mesmo tem suas demandas hídricas conhecidas e apresentadas, em valores mensais, na Tabela 2.

Os dados econômicos e agrônômicos necessários para caracterização das culturas irrigadas no projeto Araras Norte e do Baixo Acaraú, como tipo de irrigação, tipo de cultura, calendário agrícola, coeficientes de cultivo e produtividade, foram obtidos a partir do estudo de viabilidade técnico-econômica do projeto Baixo Acaraú (DNOCS, 1987). Na falta de dados para o local, os mesmos foram estimados com base nos métodos e índices propostos pela FAO. O plano cultural e o percentual relativo a cada rotação, obtidos no estudo de viabilidade, podem ser vistos na Figura 2. A Tabela 3 mostra as despesas anuais por hectare com mão-de-obra, maquinário, e insumos para cada uma das rotações propostas no plano de cultivo. A Tabela 4 mostra os dados de produção agrícola máxima (Y_m), preço de venda (R_i) e a área máxima (A_{max,i}) e mínima (A_{min,i}) para cada cultivo.

Os dados hidroclimatológicos tais como pluviometria, vazões afluentes e curvas cota-área-volume foram coletados ou gerados através dos estudos realizados no Plano Estadual de Recursos Hídricos do estado do Ceará (Ceará, 1992). Detalhes sobre a

obtenção e consistência dos dados hidrológicos podem ser encontrados em Oliveira (1995). A vazão natural no ponto de captação para o projeto Baixo Acaraú foi estimada multiplicando-se um coeficiente, obtido por proporcionalidade de área, e igual a 1,62, pela soma das vazões naturais nas seções a montante.

Tabela 3. Despesas com maquinário, insumos e mão-de-obra.

Rotação	Despesas das Rotações (US\$/ha/ano)
1. Feijão/Algodão	825
2. Milho/Algodão	795
3. Hortaliças (tomate e pimentão)	1700
4. Forrageiras (capim)	973
5. Fruteiras (laranja)	1181

Fonte: DNOCS (1987)

METODOLOGIA

A concepção metodológica adotada foi a utilização conjunta de modelos de otimização linear e de simulação para solução do problema. O modelo de otimização linear, baseado nas técnicas de programação linear, tem a vantagem de produzir soluções ótimas, mas a desvantagem de exigir formulação linear, o que geralmente viola a realidade dos processos estudados. Embora alguns artifícios e simplificações possam ser realizados para linearizar as equações, isto resulta em uma

formulação aproximada da realidade e não, exatamente, a realidade. Por isto, é requerido que os resultados produzidos pela otimização sejam analisados por um modelo de simulação, onde a realidade é representada de forma mais aproximada, sem necessidade de linearizações. Este tipo de modelo tem o inconveniente de não apresentar soluções ótimas de forma automática. Por isto o uso conjunto de ambos os modelos permite a obtenção das vantagens da otimização automática, ao mesmo tempo em que se corrige os erros de aproximação necessários à linearização do problema, na simulação.

Dois enfoques foram adotados para solução do problema, visando sempre a maximização dos benefícios líquidos da operação. No primeiro deles supôs-se que a área irrigada fosse fixa em qualquer ano e o atendimento à demanda hidroagrícola pela irrigação variável. Isto permitiria a diminuição da dotação de água em algumas estações do ano, com conseqüentes reduções de produtividade das culturas irrigadas, sendo estas compensadas pelo incremento de produtividade em outras estações, devido a uma maior disponibilidade de água. No segundo enfoque permitiu-se que a área irrigada fosse variável, possibilitando a utilização de maior área quanto maior fosse a disponibilidade de água e, no sentido oposto, a diminuição da área cultivada nos períodos secos. Nesta situação supôs-se também, e ao contrário do enfoque anterior, que a dotação de água fosse exatamente igual à demanda

Tabela 4. Produção, preço e áreas para cada cultivo selecionado.

Cultura	Ym (kg/ha)	Preço* (US\$/kg)	Renda (US\$/ha)	Área máx. (ha)	Área min. (ha)
a. Feijão	1500	0,45	675	10137	1170
b. Milho	4000	0,10	400	20210	360
c. Algodão	2500	0,60	1500	6512	810
d. Tomate	10000	0,11	1100	1058	558
e. Pimentão	4000	0,40	1600	1058	558
1. Feijão/Algodão			2175		
2. Milho/Algodão			1900		
3. Hortaliças (tomate e pimentão)			2700		
4. Forrageiras (capim)	111250	0,02	22250	10710	600
5. Fruteiras (laranja)	14320	0,20	2864	6255	255

* US\$ 1,00 = Cz\$ 50,00. Fonte: DNOCS (1987)

hidroagrícola, evitando-se qualquer déficit hidroagrícola. Note-se que dois comportamentos extremos diante da escassez de água foram analisados: diminuir a dotação de água mantendo-se a mesma área irrigada, no primeiro enfoque, ou diminuir a área irrigada mantendo-se a dotação máxima, no segundo. Um terceiro enfoque possível, em que tanto a área irrigada quanto a dotação hídrica seriam variáveis não foi utilizado, embora existam evidentes interesses teóricos e práticos. Contudo, os problemas de ordem computacional neste caso são substancialmente maiores, devido a não-linearidade do problema obtido, pelo que decidiu-se abordar esta alternativa em outros trabalhos.

As seguintes condições foram usadas na formulação do problema: 1) o intervalo temporal de operação do sistema que reflete adequadamente a variabilidade das demandas e das disponibilidades hídricas é o mensal; 2) as séries de variáveis hidrológicas e hidroeconômicas (vazões, demandas hídricas, etc.) são consideradas conhecidas; 3) a evaporação dos reservatórios é uma função linear de seus armazenamentos, no modelo de otimização; no modelo de simulação adota-se a função cota-área-volume real; 4) todos os açudes encontram-se construídos e todos os perímetros de irrigação acham-se implantados.

Função-objetivo

O objetivo da operação é a maximização dos benefícios líquidos do sistema. Os benefícios são representados pela renda obtida da comercialização da produção agrícola e os custos são representados pelos custos variáveis de captação, transporte e destinação da água a ser usada na irrigação. Os custos de insumos, mão-de-obra e maquinário, são considerados fixos, não entrando portanto na otimização, quando o enfoque for o da área irrigada fixa. No outro enfoque eles variam proporcionalmente à área irrigada.

O benefício total anual (B_t) para um ano qualquer t , expresso pela soma das

parcelas de rendimento real de cada cultivo, é dado pela seguinte equação:

$$B_t = \frac{1}{(1+d)^t} \cdot \sum_{j=1}^{n_c} Y_j \cdot R_j \cdot A_j \quad (1)$$

onde Y_j é a produtividade do cultivo j (kg/ha); R_j é o seu preço de comercialização (U\$/kg); A_j é a área cultivada (ha); n_c é o número total de culturas; $1/(1+d)^t$ é o fator de atualização monetária; d é a taxa de descontos em percentual anual. Na formulação 1 a área (A_j) é considerada fixa; na formulação 2 ela é uma variável de decisão, função do tempo, sendo notada por $A_{j,t}$.

O custo anual variável (CV_t) para um ano qualquer t , pode ser expresso pela soma das parcelas de custo relativo a cada mês, sendo representado por:

$$CV_t = \frac{1}{(1+d)^t} \cdot \sum_{j=1}^{n_c} \sum_{i=1}^{12} IRR_{i,j} \cdot C \cdot A_j \cdot \frac{1}{EFT_j} \cdot 10 \quad (2)$$

onde $IRR_{i,j}$ é a lâmina de rega aplicada à cultura j no mês i (mm); C é o custo da água por unidade de volume (U\$/m³); EFT_j é a eficiência total de irrigação para a cultura j ; 10 é um fator de conversão de unidades.

Para quantificar a resposta dos cultivos à irrigação aplicada, adotou-se a função linear de produtividade proposta por Stewart et al. (1976), segundo Rao et al. (1988):

$$Y_j = Y_{m_j} - \sum_{i=1}^{n_j} Y_{m_j} \cdot ky_{i,j} \cdot \left(1 - \frac{ETr}{ETm} \right)_{i,j} \quad (3)$$

onde Y_j é a produtividade real da cultura j ; Y_{m_j} é a produtividade máxima da cultura j ; $ky_{i,j}$ é o fator de resposta ao déficit hídrico da cultura j no mês i ; $ETr_{i,j}$ é a evapotranspiração real da cultura j no mês i ; $ETm_{i,j}$ é a evapotranspiração potencial de referência da cultura j no mês i ; n_j é o período total, em meses, de desenvolvimento da cultura j .

Esta função foi modificada para considerar períodos mensais, sendo válida

para estimativa de produção na faixa de valores de evapotranspiração real tais que $E_{Tr} \geq 50\%$ da E_{Tm} .

A incógnita na Equação (3) é a evapotranspiração real (E_{Tr}) em cada intervalo de tempo. Esta variável é resultado do “poder de extração” de água do solo pela planta, que depende do tipo e umidade do solo, da cultura e condições meteorológicas. Supondo que todos os demais fatores, exceto a umidade do solo, estejam incluídos na estimativa da evapotranspiração potencial de referência $E_{Tm_{i,j}}$, Minhas et al. (1974) apresentaram várias funções teóricas que relacionam o quociente E_{Tr}/E_{Tm} como a umidade do solo que pode ser usada pela planta, aqui denominada por “umidade disponível no solo”. Uma função não-linear do tipo côncavo representa uma boa estimativa desta relação, podendo ser linearizada pelo artifício da linearização por segmentos, conforme é mostrado na Figura 3. Ela pode ser representada matematicamente pelo desmembramento do termo de umidade relativa (H) em um número m de intervalos h_k para $k = 1, \dots, m$ através de:

$$\frac{E_{Tr}}{E_{Tm}} = f(H) = \alpha_1 h_1 + \alpha_2 h_2 + \dots + \alpha_m h_m = \sum_{k=1}^m \alpha_k h_k \quad (4)$$

sendo H a umidade relativa, que representa a fração da umidade disponível no solo em relação à umidade que determinará com que $E_{Tr} = E_{Tm}$, $0 \leq H \leq 1$; h_k a parcela da umidade relativa na zona das raízes (mm); α_k o coeficiente angular da reta k no intervalo correspondente ($k = 1, \dots, m$); m o número de intervalos de discretização da umidade disponível. Verifica-se que quanto maior for m melhor será a aproximação por segmentos lineares da função não-linear.

Neste estudo foram adotados 3 segmentos lineares cobrindo os intervalos de umidade relativa entre 0 e 0,35, 0,35 e 0,70, e 0,70 e 1,00, para os quais devem ser determinadas as evapotranspirações relativas (E_{Tr}/E_{Tm}) em cada extremo, de acordo com a Figura 4. Pela inexistência destes valores para as culturas da região, eles foram estimados

com base em um método que relaciona curvas de retenção de água e o potencial matricial com curvas de rendimento relativo médio apresentadas por Millar (1989). Detalhes deste procedimento podem ser vistos no trabalho de Oliveira (1995).

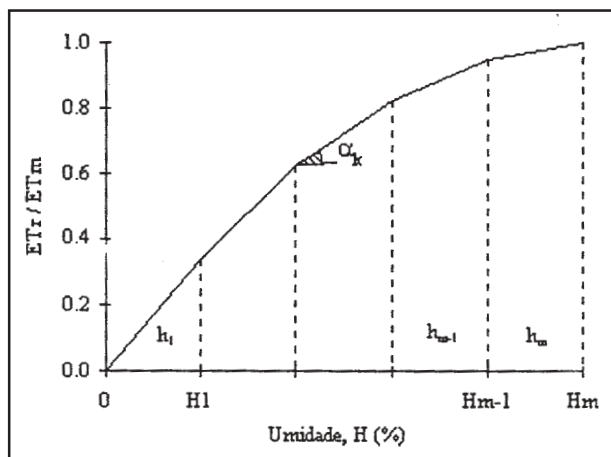


Figura 3. Curva generalizada de evapotranspiração relativa x umidade relativa no solo (Minhas et al., 1974).

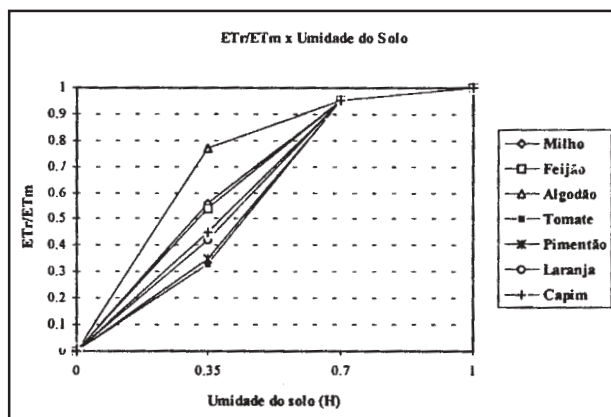


Figura 4. Curvas de evapotranspiração relativa em função da umidade relativa no solo para as culturas selecionadas.

Os valores obtidos foram próximos para as diversas culturas, conforme pode ser visualizado na Figura 4. Tendo em vista as imprecisões inerentes às estimativas das variáveis envolvidas no processo e o propósito de desenvolvimento metodológico deste estudo, adotou-se como simplificação uma curva única para todas as culturas, apresentada na Figura 5. Nota-se que isto não representa uma limitação do método

apresentado já que havendo informações mais confiáveis poderá ser considerada uma função individualizada para cada cultura.

O trecho decrescente final da função, correspondente ao intervalo h_3 , não faz parte da função original de MINHAS. Ele representa uma "penalização" imposta na função objetivo com objetivo de impedir a administração de excesso de água, além da umidade em que $ETr = ETm$ ($H > 1,00$), uma vez que esta não será utilizada pela planta. Ajustes desta penalidade poderão ser realizados para efeitos de controle da salinização, quando for necessário.

A umidade relativa do solo será portanto representada pela soma das três variáveis auxiliares:

$$H(i,j) = h_1(i,j) + h_2(i,j) + h_3(i,j) \quad (5)$$

sendo: $0,37 \leq h_1(i,j) \leq 0,70$; $0 \leq h_2(i,j) \leq 0,30$; $0 \leq h_3(i,j) \leq 0,25$.

Cabe ressaltar novamente que a função de produção utilizada só é válida para valores de $Etr \geq 50\% ETm$. Desta forma só são consideradas no modelo umidades relativas superiores a 0,37, conforme pode ser verificado na Figura 5. Estes valores limitam a faixa de utilização da água disponível entre 37 e 100% da capacidade de armazenamento de água no solo, valor razoável para as culturas em estudo.

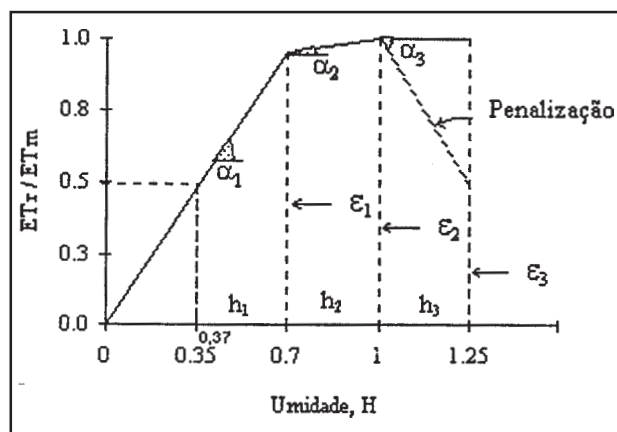


Figura 5. Curva de ETr/ETm versus umidade relativa.

Estimados os valores das evapotranspirações relativas nos extremos de cada intervalo, os parâmetros α_i da Equação

(4) podem ser estimados conforme o seguinte roteiro:

$$\begin{aligned} [ETr/ETm]_1=0,95 &\longrightarrow \alpha_1=(\epsilon_1-0,50) /0,33= 1,364 \\ [ETr/ETm]_2=1,00 &\longrightarrow \alpha_2=(\epsilon_2-\epsilon_1) /0,30= 0,167 \\ [ETr/ETm]_3=0,50 &\longrightarrow \alpha_3=(\epsilon_3-1,0) /0,25=-2,00 \end{aligned}$$

Dessa forma, para cada cultura, poderá ser obtida a relação entre a umidade relativa no solo ($H_{i,j}$) e a evapotranspiração relativa (ETr/ETm), conforme o roteiro abaixo:

$$\begin{aligned} 0 \leq H_{i,j} \leq 0,70 &\longrightarrow 0 \leq ETr/ETm \leq 0,95 \\ 0,70 < H_{i,j} \leq 1,00 &\longrightarrow \epsilon_1 < ETr/ETm \leq 1,00 \\ 1,00 < H_{i,j} \leq 1,25 &\longrightarrow \epsilon_2 < ETr/ETm \leq 0,50 \end{aligned}$$

Com a linearização, a função entre a evapotranspiração relativa e a umidade relativa no solo passa a ser escrita como:

$$ETr/ETm_{ij}=1,364.h_1(i,j)+0,167.h_2(i,j)-2,00.h_3(i,j) \quad (6)$$

Adaptação à formulação com área irrigada fixa e lâmina de rega variável

Na formulação do problema com área fixa o benefício total anual (B_t) será obtido multiplicando-se a produtividade obtida em cada cultura, a ser estimada de acordo com a lâmina de rega aplicada (em kg/ha), pela área irrigada de cada cultura (A_j em ha, dado do problema) e pelo preço de comercialização (R_j em U\$/kg, dado do problema), resultando em uma estimativa dos benefícios totais anuais capitalizados no presente como:

$$\begin{aligned} B_t = &\frac{1}{(1+d)^t} \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^n Ym_i . A_j . R_i - \frac{1}{(1+d)^t} \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^n Ym_i . ky_{ij} . A_j . R_i \\ &+ \frac{1}{(1+d)^t} \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^n Ym_i . ky_{ij} . A_j . R_i \sum_{k=1}^n (\alpha_k h_k) \end{aligned} \quad (7)$$

A função objetivo será a soma, ao longo do período de análise, desses benefícios subtraídos dos custos estimados pela Equação (2).

Adaptação à formulação com área irrigada variável e lâmina de rega fixa

Na formulação com área variável supõe-se que a irrigação atenderá totalmente às necessidades hidroagrícolas e, portanto, $E_{Tr} = E_{Tm}$ e a produtividade será a máxima ($Y_j = Y_{mj}$). Neste caso, a função benefício anual resultante é dada simplesmente por:

$$B_t = \frac{1}{(1+d)^t} \cdot \sum_{j=1}^{nc} \sum_{i=1}^{n_j} Y_{mj} \cdot A_j \cdot R_j \quad (8)$$

A incógnita nesta equação é simplesmente a área irrigada de cada cultura a cada ano. A função-objetivo é a soma, ao longo do período de análise, desses benefícios subtraídos dos custos de cultivo, que variam com a área. A equação que estima estes custos é a mesma Equação (2), devendo-se porém adicionar os custos variáveis de maquinário, mão-de-obra, e insumos por hectare, dados na Tabela 3. Observa-se que não foram considerados, por falta de informações, os custos de implantação da área irrigada incremental. No final do trabalho esta questão será retomada.

Uma informação relevante para a aplicação desta formulação é o conhecimento das funções $E_{Tr}/E_{Tm} = f(H)$ para então estimar as relações $Y/Y_m = f(E_{Tr}/E_{Tm})$, para cada cultivo. Elas podem ser obtidas a partir de experimentos de campo realizados no local, ou em áreas próximas com características semelhantes, o que nem sempre é possível de se obter devido aos custos e tempo necessários. Alternativamente, poderão ser obtidos dados de literatura. Por exemplo, relações entre produtividade relativa Y/Y_m e E_{Tr}/E_{Tm} foram apresentadas por Doorenbos e Kassam (1979) pela equação abaixo:

$$E_{Tr}/E_{Tm} = 1 - [1 - Y/Y_m] / k_y \quad (9)$$

sendo k_y o fator de resposta da cultura. Conhecendo-se a relação entre Y/Y_m e o potencial matricial do solo, para cada cultura, com a curva de retenção de água no solo

estima-se a curva de produtividade relativa Y/Y_m versus umidade relativa no solo. Em seguida aplica-se a Equação (8) para obter a E_{Tr}/E_{Tm} para cada teor de umidade. Esta abordagem foi utilizada na pesquisa. Informações mais detalhadas podem ser obtidas no trabalho de Oliveira (1995).

Restrições

As restrições a serem consideradas no modelo de otimização são:

Balanco hídrico do solo - O balanço hídrico no solo representa as variações de umidade disponível no solo ao longo dos intervalos de tempo considerando-se as entradas e saídas de água. As entradas de água são dadas pela precipitação efetiva (que corresponde à parcela que infiltra no solo, no sentido agrícola) e a lâmina de rega; as saídas são devidas à evaporação do solo e à percolação. A variação de armazenamento no solo pode ser representada por:

$$U_{i+1,j} = U_{i,j} + IRR_{i,j} + PE_{i,j} - E_{i,j} - PER_{i,j} \quad (10)$$

onde $U_{i,j}$ é a umidade disponível no solo, ao longo das raízes da cultura j no mês i (mm); $U_{i+1,j}$ é a umidade disponível no solo, ao longo das raízes da cultura j no mês $i+1$ (mm); $IRR_{i,j}$ é a lâmina de rega aplicada à cultura j no mês i (mm); $PE_{i,j}$ é a precipitação efetiva na cultura j no mês i (mm); $E_{i,j}$ é a evaporação do solo ou evapotranspiração da cultura j no mês i (mm); $PER_{i,j}$ é a percolação do solo na área com cultura j no mês i (mm).

A umidade disponível no solo na zona das raízes, em um período qualquer, é dada por:

$$U_{i,j} = H_{i,j} \cdot FS_{i,j} \quad (11)$$

onde $H_{i,j}$ é a umidade relativa no solo; $FS_{i,j}$ é o fator de água no solo.

Em função da linearização por segmentos representada na Figura 3 o valor de umidade relativa no solo ($H_{i,j}$) para uma dada cultura j em um período qualquer i , é dado por:

$$H_{i,j} = \sum_{k=1}^m (h_k)_{i,j} \quad (12)$$

com $H_{min} \leq H_{i,j} \leq H_{max}$. O termo H_{min} seria umidade relativa no solo correspondente a $E_{Tr}/E_{Tm} = 0,5$, para um mês com cultivo, por limitação do modelo água-rendimento utilizado, podendo chegar a zero nos meses sem cultivo.

O fator de água no solo ($FS_{i,j}$) é dado, em mm, por:

$$FS_{i,j} = (CC - PM) \cdot \gamma \cdot Prad_{i,j} \cdot 10 \quad (13)$$

sendo $Prad_{i,j}$ a profundidade do sistema radicular da cultura j no mês i (cm); CC a capacidade de campo em percentual gravimétrico; PM o ponto de murcha em percentual gravimétrico; γ a densidade aparente do solo (g/cm^3), e 10 um fator de conversão. A profundidade do sistema radicular pode ser obtida de dados experimentais, ou na inexistência destes, ser estimada através de modelos de crescimento de cultivos, ou através de dados empíricos.

Para estimativa da precipitação efetiva, que sob o ponto de vista agrônomo é a que infiltra no solo, em função da total foi considerada a abordagem proposta pela Fao (1988) que especifica a seguinte equação para terrenos com declividade entre 4% e 5%:

$$PE_{i,j} \begin{cases} 0,8.P - 25 & \text{se } P \geq 75\text{mm} \\ 0,6.P - 10 & \text{se } P < 75\text{mm} \end{cases} \quad (14)$$

sendo P a precipitação total (mm) e $PE_{i,j}$ a precipitação efetiva (em mm).

A lâmina de rega, em cada período ou estágio de cultivo, é dependente da umidade do solo, da chuva efetiva, da evapotranspiração e da eficiência do sistema de irrigação da cultura. Na formulação com área fixa e lâmina de rega variável, $IRR_{i,j}$ deverá ser otimizada de forma a maximizar o valor presente dos benefícios líquidos. Na formulação com área variável e lâmina de rega fixa, $IRR_{i,j}$ é a demanda de irrigação para que $E_{Tr} = E_{Tm}$, sendo portanto estimada com

base nos valores dos quais depende; a área irrigada deverá ser otimizada para maximizar o valor presente dos benefícios líquidos.

Balanco hídrico dos reservatórios - O balanço hídrico nos reservatórios representa as variações de seus armazenamentos, podendo ser expresso pela seguinte equação geral:

$$S_{i+1,r} = S_{i,r} + VP_{i,r} - VE_{i,r} + QA_{i,r} - QE_{i,r} - DEM_{i,r} \quad (15)$$

sendo $S_{i,r}$ o volume do reservatório r no início do mês i (hm^3); $VP_{i,r}$ o volume precipitado sobre o reservatório r durante o mês i (hm^3); $VE_{i,r}$ o volume evaporado do reservatório r durante o mês i (hm^3); $QA_{i,r}$ o volume afluente ao reservatório r durante o mês i (hm^3); $QE_{i,r}$ o volume defluente do reservatório r durante o mês i (hm^3); $DEM_{i,r}$ a demanda diretamente suprida pelo reservatório r durante o mês i (hm^3); r o índice representativo do reservatório r ($r = 1, \dots, 5$).

No modelo de otimização adotou-se uma relação linear como aproximação da função área-volume em cada reservatório. Esta simplificação não foi utilizada no modelo de simulação.

Como limite à variação de $S_{i,r}$, é estabelecido que:

$$Sr_{min} \leq S_{i,r} \leq Sr_{max} \quad (16)$$

sendo Sr_{min} e Sr_{max} o volume mínimo e máximo de acumulação do reservatório r .

O termo "demanda diretamente suprida" é introduzido para referenciar a demanda diretamente atendida por um reservatório. São considerados como demandas diretamente supridas os abastecimentos da cidade de Sobral e do perímetro Araras Norte, atendidos pelos reservatórios Ayres de Souza e Araras, respectivamente. Nos açudes Taquara, Poço Comprido e Edson Queiroz, em especial, o termo de demanda mensal direta ($DEM_{i,r}$) é nulo. As demandas do projeto Baixo Acaraú serão atendidas pelas vazões defluentes dos reservatórios. Para os reservatórios em série,

Ayres de Souza e Taquara, observa-se que a vazão afluente ao primeiro é igual à vazão defluente do segundo.

Os volumes precipitados e evaporados no reservatório em cada mês são determinados como uma função linear da área média do espelho de água no intervalo de tempo. Considerando que o volume efetivo precipitado ($\Delta V_{i,r}$), em hm^3 , é dado pela diferença entre o total precipitado ($P_{i,r}$) e o total evaporado no período ($EV_{i,r}$), pode-se expressá-lo por:

$$\Delta V_{i,r} = VP_{i,r} - VE_{i,r} = (P_{i,r} - EV_{i,r}) \left[\frac{A_{i,r} + A_{i+1,r}}{2} \right] \cdot 10^{-5} \quad (17)$$

onde os termos $A_{i,r}$ e $A_{i+1,r}$ são as áreas, em ha, da superfície líquida do reservatório r no início e no final do mês i, respectivamente. Esta simplificação de se considerar linear uma relação que é não-linear poderá ser corrigida iterativamente, caso possa afetar significativamente os resultados - este não foi o caso, porém.

Atendimento à demanda de irrigação do projeto do Baixo Acaraú - A demanda nos pontos de captação para os perímetros irrigados é uma função dependente da área irrigada e da lâmina aplicada a cada cultivo. Para o perímetro Araras Norte as mesmas são conhecidas, uma vez que o mesmo já está em operação. A demanda mensal para o perímetro Baixo Acaraú pode ser estimada pela equação abaixo:

$$QP_i = \sum_j IRR_{i,j} \cdot A_j \cdot \frac{1}{EFT_j} \cdot 10^{-5} \quad (18)$$

onde QP_i é a demanda de irrigação do perímetro de captação no mês i ($hm^3/mês$); EFT_j é a eficiência global de irrigação para a cultura j.

A demanda de irrigação do projeto Baixo Acaraú é atendida pelas defluências do conjunto de reservatórios à montante do perímetro. Admitindo uma perda total de QX_i na vazão que chega até o ponto de captação

no mês i, devido à evaporação, percolação e abastecimento das populações ribeirinhas, e uma contribuição de trecho QTr_i devido as demais entradas ao sistema, a restrição no ponto de derivação, é:

$$\sum_r QE_{r,i} + QTr_i - QX_i \geq Qp_i \quad (19)$$

sendo $QE_{r,i}$ a vazão defluente do reservatório r no mês i (hm^3). Estimou-se as perda totais, entre a captação e a liberação, em 10%.

Método de Solução

A solução deste problema de otimização operacional foi obtida adotando-se uma abordagem implicitamente estocástica (Lanna, 1982). Nesta abordagem resolve-se um problema de otimização considerando o futuro conhecido e obtém-se, desses resultados, esboços de uma estratégia operacional para a situação real de futuro incerto, que é otimizada de forma iterativa por simulação matemática. Ou seja, por otimização é obtida uma solução inicial, ótima para a formulação em que o futuro é suposto conhecido e o problema é simplificado para atender as demandas da técnica de otimização adotada, no caso a linear. Esta solução preliminar é submetida ao modelo de simulação, que faz uma representação mais consistente da realidade, sem necessidades de linearizações, e considerando a incerteza do futuro. De forma iterativa, mas com um pequeno número de tentativas, pode-se obter a solução ótima para o problema real.

Modelo de otimização

Supôs-se que as únicas fontes de incerteza fossem restritas aos processos de precipitação pluviométrica e vazões fluviais afluentes. Adotou-se os valores historicamente observados destas variáveis como representativos do que poderá ocorrer no futuro. A solução do problema foi feita através de um software de programação linear que utiliza uma técnica da família dos métodos dos

pontos interiores. Trata-se do programa denominado HOPDM desenvolvido por Gondzio e Makowski (1995).

Para geração dos arquivos, foi considerada a série de chuvas e vazões de 54 anos que vai de 1935 a 1988. O problema de otimização foi resolvido utilizando-se uma estação de trabalho Silicon Graphics, com 64 MB de memória.

Modelo de Simulação

Um modelo de simulação matemática mensal da operação do sistema foi desenvolvido, sendo denominado SIBAC (Modelo de Simulação do Baixo Acaraú). Este modelo representa em detalhes os processos hidrológicos que atuam no sistema, sem necessidade de simplificações do tipo linearização, que tiveram que ser adotados no modelo de otimização linear. Ele foi executado em um microcomputador da série 486 DX2, considerando o período hidrológico de 1912 a 1988, com 72 anos.

RESULTADOS

Para a formulação em que se considera a área variável e a lâmina de rega fixa, um único arquivo foi gerado. O objetivo foi determinar qual a maior área que poderia ser irrigada sem que houvesse déficit hidroagrícola em qualquer das culturas. Ou seja, atendendo toda a demanda hidroagrícola e, ao mesmo tempo, mantendo o solo sempre na capacidade de campo (H_{ij} da Equação 5 igual a 100%).

Para a formulação em que a área era fixa e a lâmina de rega variável foram consideradas 4 taxas de descontos anuais para fins de atualização dos benefícios líquidos futuros: 0, 5, 8 e 12 %. Para cada taxa de desconto foram consideradas as áreas cultivadas variando em 25, 50, 75 e 100% da área total disponível (cerca de 31.064 ha), além da área inicialmente proposta pelo projeto, igual a 16.780 ha, equivalente a 54% da área total. Nesta segunda formulação foram analisados

portanto 20 cenários, diferenciados pela área irrigada e pela taxa de descontos adotada.

Durante a etapa de otimização, o reservatório Poço Comprido atingiu durante a seca 79 a 84 volumes inferiores ao mínimo operacional, de acordo com a Equação (15), por efeito da evaporação. Para que a inviabilidade pudesse ser contornada, a restrição de volume mínimo foi modificada para ($S \geq 0$) e, além disso, as retiradas do reservatório foram evitadas, adicionando-se a restrição ($QE = 0$). Procedimento semelhante foi adotado por Valdés et al. (1992).

Formulação com área irrigada variável e lâmina de rega fixa

Dois problemas foram tratados: a situação teórica em que o futuro é suposto conhecido, na qual os eventos hidrológicos são os que foram observados no passado, e a situação real, onde o futuro é incerto. A análise da solução do primeiro problema determina formas para as regras de operação que serão testadas na solução do segundo problema.

Futuro suposto conhecido

Nesta formulação o modelo de otimização determina a máxima área anual que pode ser irrigada atendendo-se integralmente as demandas hidroagrícola. Entendeu-se esta área como aquela correspondente a maior área que poderia ser irrigada no projeto Baixo Acaraú com a água que ficaria disponível após o atendimento das demandas da cidade de Sobral e do projeto de irrigação Araras Norte. O problema resultante constou de 4.109 restrições e 7.403 variáveis, sendo a otimização realizada pela estação de trabalho em cerca de 39 segundos e com um total de 43 iterações. Como pode-se verificar aqui, a eficiência do método de otimização ficou comprovada pela sua rápida convergência e rapidez de execução, o que é essencial em problemas de grandes dimensões.

Os resultados, que são resumidos na Tabela 5, mostram que o sistema de oferta de

água, formado pelos reservatórios, teria capacidade para atender, em grande parte do tempo, a uma área irrigada superior àquela proposta pelo estudo de viabilidade do projeto do Baixo Acaraú, caso a série de eventos de chuva e de vazão fosse a que ocorreu no período de 1935 a 1988. Em mais de 60% dos anos pode-se irrigar uma área superior aos 16.780 ha propostos pelo estudo.

A solução obtida aloca anualmente praticamente toda a água disponível para irrigação, pouco reservando para os anos seguintes, o que é característico de decisões em que o futuro é suposto conhecido. A explicação para este resultado é a alta evaporação dos reservatórios que determina ser melhor o uso da água no presente do que o seu armazenamento para uso futuro com as perdas inevitáveis por evaporação. Isso levou durante o procedimento de otimização a uma inviabilidade que ocorreu durante os anos de seca mais intensa, nos quais as demandas hidroagrícolas não puderam ser atendidas com a área mínima de irrigação imposta. Esta inviabilidade foi contornada, através da redução da área mínima de irrigação em 60%.

Tabela 5. Frequência das áreas anuais alocadas na otimização.

Área anual (ha)	Número de anos	Percentual acumulado
8 136	17	31%
16 272	4	39%
24 407	3	44%
32 543	5	54%
40 679	3	59%
48 815	1	61%
56 951	3	67%
73 222	6	78%
89 494	9	94%
97 630	1	96%
122 037	2	100%

Área proposta no estudo de viabilidade: 16 780 ha

Futuro incerto: derivação de estratégia operacional

Procurou-se com os resultados da otimização determinista obter uma correlação entre a máxima área irrigada e volume total

armazenado no início do período. Havendo esta correlação seria esboçada uma regra operacional que definiria a área a ser irrigada a cada período de cultivo, em função do armazenamento inicial no sistema de oferta de água. Não se obteve, no entanto, correlações que indicassem a existência de qualquer relação entre estas variáveis. Os resultados desta formulação serviram, essencialmente, para se ter uma avaliação das potencialidades do sistema e sua configuração dentro do cenário proposto para implementação. Vê-se que uma situação como esta, em que a área irrigada variaria ao longo do tempo, resulta em grande instabilidade no sistema agrícola, que dificilmente teria viabilidade social e política. Afinal, um dos objetivos da irrigação no Nordeste é estabelecer uma maior estabilidade nos sistemas de uso da água.

Formulação com área irrigada fixa e lâmina de rega variável

Exatamente como na outra formulação, foi analisado o problema teórico em que o futuro é suposto conhecido, reproduzindo os eventos hidrológicos passados, como forma de esboçar regras operacionais a serem otimizadas iterativamente, por simulação, na situação real, em que o futuro é incerto.

Futuro suposto conhecido

Nesta situação o modelo de otimização determinou vazão mensal ótima a ser liberada de cada açude para atender às demandas de irrigação e abastecimento urbano. O problema resultante constou de 7.133 restrições e cerca de 23.240 variáveis. A otimização foi concluída em pouco mais de 460 segundos (7,6 minutos) e levou 140 iterações em média, onde novamente comprova-se a eficiência do método de otimização aplicado.

Uma avaliação da resposta do modelo para as diferentes taxas de retorno adotadas e diferentes percentuais de área irrigada, foi efetuada. Para taxas de retorno maiores que zero, esperava-se que o modelo alocasse água para o atendimento da demanda nos

anos mais recentes, onde o valor presente dos benefícios é maior, devido à taxa de desconto, ao invés de fazê-lo nos anos mais distantes. Verificou-se porém pouca ou quase nenhuma diferença nos resultados da operação do sistema, apesar de que o valor presente dos benefícios líquidos seja reduzido, como consequência do desconto nos seus valores futuros. Isto mostra que na operação ótima, mesmo quando a taxa de descontos é nula, há sempre a tendência de se utilizar a água quando ela é naturalmente disponibilizada, evitando-se o seu armazenamento para uso futuro. Isto é consequência das altas taxas de evaporação da região. Na Figura 6 observa-se a variação do valor presente dos benefícios líquidos nas soluções ótimas para cada taxa de desconto adotada.

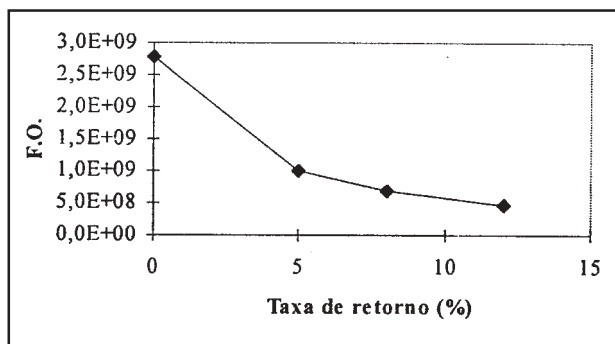


Figura 6. Variação da F.O. com a taxa de retorno (área: 16.780 ha).

A variação do valor presente dos benefícios líquidos em função da área irrigada pode ser vista na Figura 7. Verifica-se que no projeto Baixo Acaraú, mesmo com a área máxima disponível totalmente irrigada (31.064 ha), os benefícios são ainda crescentes. Isto sugere que se poderia investir na irrigação de áreas maiores, sem que se tenha perdas econômicas, embora os resultados sejam pertinentes à uma situação em que o futuro é suposto conhecido, diferente da realidade.

Com os resultados da otimização verificou-se que para a área fixa de 16.780 ha, quase não há déficit hidroagrícola nas culturas, mesmo em períodos excepcionais de seca, como foi o período de 1979 a 1983. Este fato é ilustrado pelos resultados já apresentados na Tabela 5, que mostraram

que o sistema teria capacidade de atender uma área irrigada superior durante grande parte do tempo, na ocorrência dos eventos hidrológicos do mesmo período estudado.

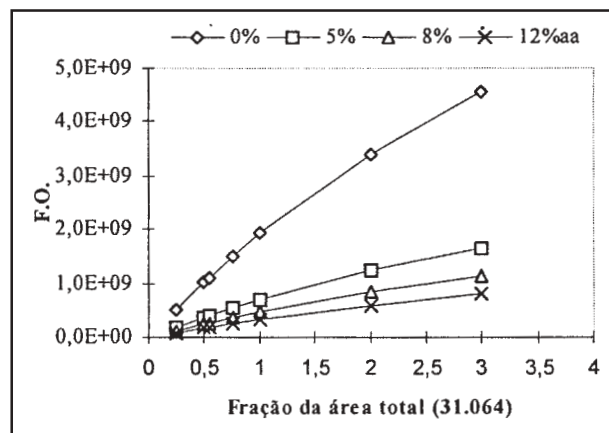


Figura 7. Variação da F.O. com a área irrigada.

Futuro incerto: derivação de estratégia operacional

Para o esboço de uma estratégia operacional para o sistema adotou-se inicialmente o conceito de "reservatório equivalente" muito usado em sistemas hidroelétricos. A estratégia procurada seria baseada em uma correlação entre o volume total defluente dos reservatórios e o armazenamento total disponível nos reservatórios e nas vazões afluentes. Buscou-se desta forma estabelecer uma estratégia operacional com a forma $QE_t = f(S_t + QA_t)$, considerando o sistema agregado em um único reservatório com capacidade equivalente à soma das capacidades individuais de cada açude. Entretanto, os resultados obtidos não forneceram qualquer indicativo de uma boa correlação, inclusive descartando a hipótese de equivalência. O gráfico mostrando essa correlação pode ser visto na Figura 8.

Partiu-se, então, para a procura de uma correlação entre o armazenamento total final e o volume total disponível para uso, ou seja, uma estratégia com a forma $S_{t+1} = f(S_t + QA_t)$, considerando o sistema agregado, como pode ser visto na Figura 9. Apesar do bom ajuste visual, esta regra de operação, ao ser

analisada com o modelo SIBAC de simulação, não apresentou bons resultados. Verificou-se que os desvios da descarga operada em relação ao valor ótimo podem ser muito grandes, devido aos grandes volumes com que se trabalha, com dimensões substancialmente maiores que as descargas.

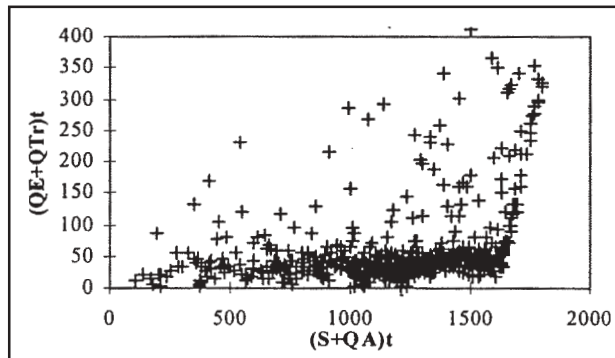


Figura 8. Resultado da correlação entre defluência e armazenamento total.

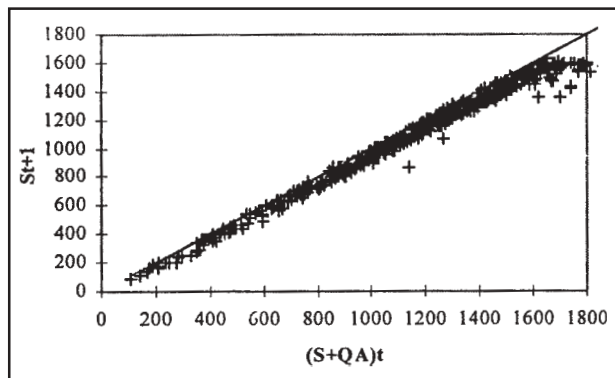


Figura 9. Resultado da correlação entre S_{t+1} e $(S + QA)_t$.

As regras apresentadas na Tabela 6 foram avaliadas. Para cada caso calculou-se o percentual dos meses em que houve falhas e em que a demanda hidroagrícola foi atendida em pelo menos 50%. A Tabela 7 mostra os resultados obtidos: para a regra 1, por exemplo, em 48% dos meses com falha, a vazão liberada foi suficiente para atender mais de 50% da demanda.

As três primeiras regras, que relacionam o volume defluente com o armazenamento inicial e afluência durante o mês, geraram bons resultados para o projeto Araras Norte, mas a garantia de abastecimento de Sobral e do projeto Baixo

Acaraú foram inferiores a 87%. A regra 4, que relaciona a defluência com o volume disponível $(S_t + QA_t)$ apresentou resultados melhores, mas ainda fornece garantia inferior a 82% ao projeto Baixo Acaraú.

Tabela 6. Regras de operação testadas.

n°	Regra operacional*	Observação
1	$QE_t = \alpha \cdot S_t + \beta \cdot QA_t + \gamma$	
2	$QE_t = \alpha \cdot S_t + \beta \cdot QA_t$	
3	$QE_t = \alpha \cdot S_t + \beta \cdot QA_t$	Jan-Jun
	$QE_t = \alpha \cdot S_t + \beta \cdot QA_t + \gamma$	Jul-Dez
4	$QE_t = \alpha \cdot (S_t + QA_t)$	
5	$QE_t = \alpha \cdot (S_t + QA_t) + \beta \cdot P_t$	
6	$QE_t = \alpha \cdot (S_t + QA_t) + \beta \cdot P_t$	$QE_t \geq QE_{min,t}$
7	$QE_t \geq QE_{min,t}$	
8 **	$QE_t = f(\text{demanda})$	

* Sendo QE_t o volume mensal a ser liberado, por cada açude; $QE_{min,t}$ o volume mensal mínimo a ser liberado, por cada açude; S_t o armazenamento no início do mês t, para um açude qualquer; QA_t o volume afluente durante o mês t, para um açude qualquer; P_t a precipitação total durante o mês t, sobre a área cultivada;

** A vazão liberada é função da demanda hídrica dos cultivos.

Tabela 7. Garantias do sistema para cada regra de operação (%).

Regra Oper.	Cidade Sobral	Araras Norte	Baixo Acaraú	> 50% Demanda*
1	86	98	81	48
2	87	99	81	46
3	84	99	78	47
4	100	100	82	42
5	100	100	82	39
6	99	97	88	49
7	100	96	77	58
8	95	94	92	64

* Percentual dos meses em que a regra de operação atendeu mais de 50% da demanda do projeto do Baixo Acaraú

Sabendo-se que as demandas dos cultivos são função da precipitação mensal (P_t), procurou-se correlacionar as defluências com esta variável na regra 5. Observou-se que a melhora não foi muito significativa. Uma garantia melhor foi conseguida na regra 6, através de uma modificação que limita a defluência a um valor mínimo mensal (QE_{min}), ajustado por tentativas. Nota-se que os resultados foram melhores, e a garantia para o projeto do Baixo Acaraú ficou em 88%.

Na tentativa de encontrar garantias ainda melhores para o projeto Baixo Acaraú procurou-se uma regra operacional através da análise das demandas mensais do modelo de otimização. A regra 7 limitou a descarga a uma vazão mínima, obtida como na regra anterior, sem fazer qualquer correlação com o armazenamento ou volume afluente - não se obteve porém resultados superiores aos já obtidos com outras regras. Partiu-se então para a análise das vazões mensais liberadas exclusivamente para complementar a demanda hidroagrícola mensal, que é parcialmente suprida pela contribuição de trecho (QTr). A variação temporal desta defluência pode ser vista na Figura 10. Entretanto, é importante não só se saber quanto de água se deve liberar mas, também, que parcela desta será fornecida por cada açude. Na análise dos resultados da otimização constatou-se que a demanda foi, preferencialmente, atendida pelos açudes Araras, Ayres de Souza e Edson Queiroz, respectivamente. O açude Taquara contribuiu de forma a suprir o açude Ayres de Souza, e o açude Poço Comprido pouca contribuição

oferece ao sistema. A Figura 11 mostra a distribuição espacial da água entre os quatro açudes que contribuem diretamente para o atendimento da demanda.

Uma estimativa do percentual de contribuição de cada açude, em cada mês, foi obtida da análise dos resultados da otimização e aplicada na regra 8, cujos detalhes são apresentados na Tabela 8. Nesta regra, caso haja água armazenada, cada açude deve liberar um volume (QE_i), que somente poderá ser ultrapassado nos meses de vertimento; caso não haja armazenamento suficiente para liberar QE_i toda água disponível deverá ser liberada. Os termos fp_i e QE_i para o conjunto de açudes são dados nas Tabelas 9 e 10, respectivamente.

Para o açude Poço Comprido uma regra específica de operação foi estabelecida, em virtude de seu comportamento não ser enquadrável nesta regra geral, devido a pequena importância que apresenta em termos de suprimento. A Tabela 11 apresenta os volumes mensais a serem liberados. Foram obtidas para a regra 8 garantias superiores a 90% para atendimento a todas as demandas (Tabela 7).

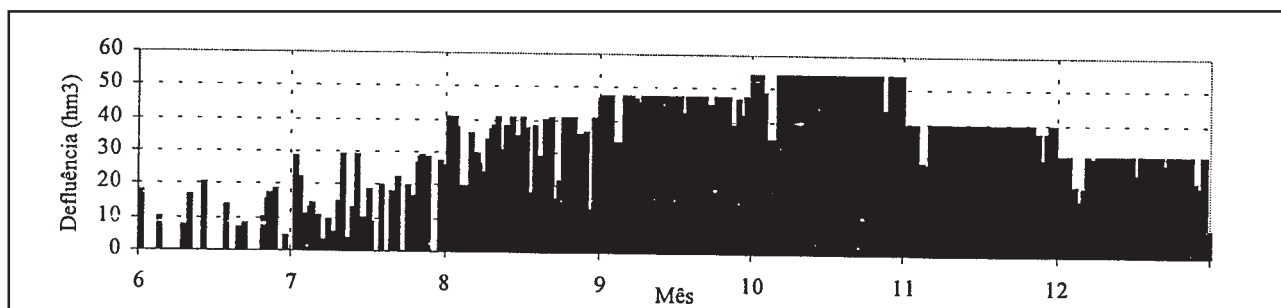


Figura 10. Defluência mensal total pelo conjunto de açudes.

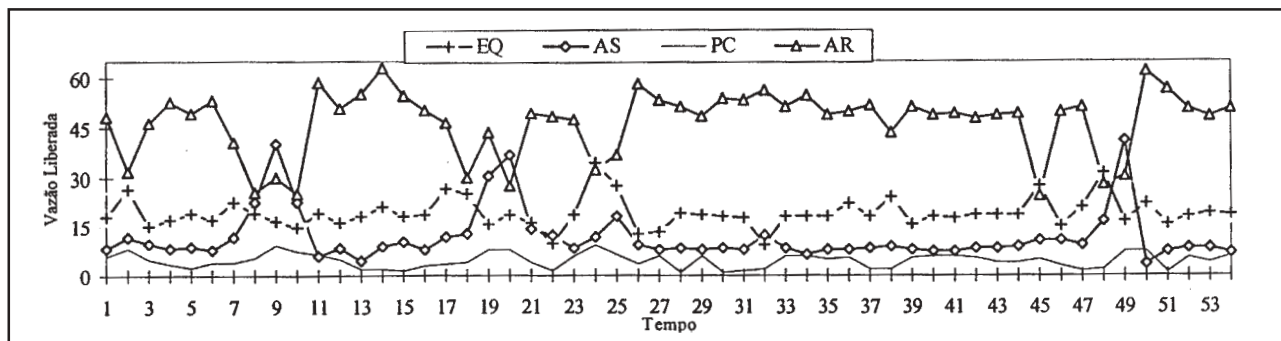


Figura 11. Vazão mensal liberada por cada açude (hm^3).

Tabela 8. Regra operacional 8, para cada açude.

Açude	Volume a ser liberado
Edson Queiroz	$QE_{t,r} = fp_r \cdot QM_t / 0,9$
Ayres de Souza e Araras	$QE_{t,r} = fp_r \cdot QM_t / 0,9 + DEM_{t,r}$
Taquara	$QE_{t,r} = fp_r \cdot QM_t / 0,9 + 3,64$
Poço Comprido	dado na Tabela 11

sendo: fp_r : percentual que cada açude deve liberar para atender à demanda (Tabela 9), $DEM_{t,r}$: demanda diretamente atendida pelos açudes; QM_t : volume mensal a ser liberado para atendimento da demanda (Tabela 10).

A análise realizada, que levou ao estabelecimento da estratégia operacional do sistema, evidenciou a importância do estudo de otimização determinista no esboço de regras operacionais que são sucessivamente testadas por modelo de simulação, considerando a situação real de incerteza dos valores de chuva e de vazão fluvial.

O efeito do déficit hidroagrícola

Outro estudo foi conduzido considerando o efeito do déficit hidroagrícola sobre o valor presente dos benefícios líquidos. Considerou-se a área de 16.780 ha como área inicial e a mesma foi progressivamente aumentada de um fator multiplicativo (p), limitado pela área máxima potencialmente irrigável, que é 31.064 ha. A simulação foi

efetuada usando a regra de operação 8, que havia gerado melhores resultados previamente. Os resultados estão na Tabela 12. Observa-se que os benefícios líquidos incrementais são positivos até uma área irrigada 80% maior que a de projeto, às custas de garantias cada vez menores de suprimento.

Os custos incrementais de investimento na expansão da área irrigada não foram considerados nos custos. No entanto, a coluna de benefícios líquidos incrementais medidos em US\$/ha estabelece um indicativo do ponto ótimo de expansão da área irrigada. Por exemplo, se os custos de investimento na expansão da área forem inferiores US\$ 10.131 por hectare, será eficiente, sob o ponto de vista econômico, a expansão da área em 10%.

O que se nota na prática de engenharia no semi-árido nordestino é que se estabelece como restrição uma garantia de suprimento de 90%, maximizando-se então o valor presente dos benefícios líquidos, quando a análise é realizada em maiores detalhes. Isto justifica a adoção do projeto com 16.780 ha, pois a garantia de suprimento seria 91,7%. Os resultados apresentados, porém, mostraram que quanto maior a garantia de suprimento, menor o valor presente dos benefícios líquidos. Esta perda representa o “custo da garantia” e sugere a adoção de um

Tabela 9. Percentual da demanda mensal liberado por cada açude (fp_r).

Açude	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
E. Queiroz	25	20	20	20	20	20	10	10	10	05	10	10
A.Souza	35	40	30	30	20	40	50	45	20	15	10	15
Araras	40	40	50	50	60	40	40	45	70	80	80	75
Taquara	25	20	20	20	20	20	10	10	10	05	10	10

Tabela 10. Volume mensal QM , a ser liberado pelo conjunto de açudes (hm^3).

Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
31	25	10	6	13	20	30	41	50	55	41	36

Tabela 11. Volume mensal a ser liberado pelo açude Poço Comprido (hm^3).

Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
0,5	1,5	1,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	1,5	1,5

Tabela 12. Benefícios líquidos e garantias obtidas com aumento da área irrigada.

Fator de área*	Benefício líquido total	Benefício líquido incremental		Cidade Sobral (%)	Garantias de suprimento		
		(10 ⁶ US\$)	(US\$/ha)		Araras Norte (%)	Baixo Acaraú (%)	> 50% Demanda (%)
(p)	(10 ⁶ US\$)	(10 ⁶ US\$)	(US\$/ha)	(%)	(%)	(%)	(%)
1,0	181	-	-	94,8	93,2	91,7	63,6
1,1	198	17	10131	94,8	93,2	84,4	74,3
1,2	210	12	7151	94,8	93,2	77,1	84,4
1,3	215	5	2979	94,8	93,2	79,3	79,1
1,4	222	7	4172	94,8	93,2	75,5	80,5
1,6	243	21	6257	94,8	93,2	69,9	77,3
1,7	247	4	2383	94,8	93,2	66,9	74,8
1,8	253	6	3576	94,8	93,2	61,8	75,9
1,9	250	-3	-1788	94,8	93,2	67,1	74,3

* Referente à área indicada pelo estudo de viabilidade, igual 16 780 ha

esquema de seguro agrícola. Nesta situação, o objetivo do dimensionamento dos sistemas de demanda de água seria a maximização dos benefícios líquidos subtraídos dos custos de seguro. Estes custos seriam derivados das medidas de controle que deveriam ser estabelecidas para gerenciamento dos projetos e das compensações a serem pagas aos usuários nos anos em que as demandas hídricas não puderem ser atendidas.

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

No esquema de derivação de estratégia operacional baseado na utilização conjunta de otimização e simulação, a otimização determinista mostrou ser de grande ajuda durante o processo de esboço das regras de operação, que foram hierarquizadas posteriormente com uso do modelo de simulação.

Como tópico de pesquisas futuras, recomenda-se o desenvolvimento de modelos em que tanto a área quanto a lâmina de rega possam ser consideradas variáveis. A não-linearidade desta formulação será o grande desafio computacional a ser enfrentado.

A análise dos resultados do modelo de otimização determinista permitiu concluir que a área adotada pelo estudo de viabilidade representa cerca de 40% da área potencialmente irrigável, com a configuração atual. Conclui-se também que irrigar uma área maior sob déficit hídrico parcial pode oferecer

maior retorno econômico que irrigar uma área sem déficit. A área inicial de 16.780 ha poderia ser elevada em 80%, caso o único objetivo fosse a maximização do retorno econômico e os custos de expansão da área irrigada fossem baixos; entretanto a garantia de suprimento à demanda hidroagrícola diminuiria substancialmente. Recomenda-se o desenvolvimento de pesquisas relacionadas a seguros agrícolas, que viabilizem a adoção de critérios de decisão que maximizem benefícios líquidos e conciliem, assim, a meta de crescimento econômico com a de estabilidade social.

Os resultados obtidos com a otimização não mostraram qualquer influência da taxa de retorno sobre a operação do sistema. Ou seja, a água foi aplicada de maneira praticamente invariável durante todo o período de análise, independentemente da taxa de desconto adotada. Isso talvez se deva ao fato de não ter havido déficit hidroagrícola de forma acentuada em nenhum intervalo de tempo, pois o modelo de otimização trabalhou com garantia de 100%. Outra explicação é que a alta evaporação dos reservatórios governa o processo, determinando ser melhor o uso da água no presente que reservá-la para uso futuro, efeito similar ao obtido com altas taxas de desconto.

Verificou-se que o açude Poço Comprido, com a dimensão adotada, pouco efeito tem no sistema de oferta. Isto leva necessariamente à recomendação de que a decisão de sua implantação seja reavaliada.

A falta de dados de umidade do solo e sua relação com a evapotranspiração das diversas culturas foi a principal carência informacional. Apesar dos trabalhos de Millar (1989) e Hargreaves (1974) apresentarem informações relevantes nas regiões de Petrolina e Juazeiro, elas são insuficientes para representarem a heterogeneidade do semi-árido nordestino. É fundamental que se proceda a estudos e testes experimentais de campo para que se conheça estas relações para as diversas culturas e regiões, permitindo que abordagens do tipo apresentado possam ser adotadas com segurança.

Finalmente, cabe comentar que não pode mais ser aceito na prática da engenharia de sistemas de recursos hídricos a adoção de critérios de dimensionamento destituídos de qualquer justificativa, seja econômica ou de qualquer outra natureza, como é o caso da adoção de garantias de 90%. Os resultados obtidos com a análise sistêmica de recursos hídricos, adotando técnicas de otimização e simulação matemática, permitem a adoção de critérios mais racionais e obtenção de resultados mais eficientes, sob qualquer ótica de análise que tenha sido estabelecida. As ferramentas teóricas e computacionais necessárias, no que diz respeito tanto ao software quanto ao hardware, são disponíveis e oferecem resultados de interesse não meramente acadêmico.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho relata resultados de pesquisa que o primeiro autor realizou sob a orientação do segundo autor como parte dos requisitos para obtenção do mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento pelo Instituto de Pesquisa Hidráulicas da UFRGS. Durante seus estudos J. A. Oliveira obteve bolsa da CAPES. A. E. Lanna é pesquisador-bolsista do CNPq. Os autores agradecem as instituições mencionadas o apoio que possibilitou a realização da pesquisa.

REFERÊNCIAS

- CEARÁ. Secretaria de Recursos Hídricos. 1992. *Plano Estadual de Recursos Hídricos: Ceará*. Fortaleza. 5v. em 4.
- DNOCS. 1987. *Estudo de viabilidade técnico-econômica do Baixo Acaraú*, Fortaleza.
- DOORENBOS, J., KASSAM, A.H. 1979. *Yeild response to water*. Rome: FAO, 193p (FAO Irrigation and Drainage Paper)
- FAO. 1988. *Irrigation water needs*. Rome. Paginação irregular. (Irrigation Water Management Training Manual 3).
- GONDZIO, J., MAKOWSKI, M. 1995. Solving a class of LP problems with a primal-dual logarithmic barrier method. *European Journal of Operational Research*, Poland, v.80, p. 184- 192.
- HARGREAVES, G.H. 1974. *Potencial evapotranspiration and irrigation requeriments for Northeast Brazil*, Utah State University, USA.
- LANNA, A. E. 1982. *Operação Estratégica de Reservatórios para Suprimento Hídrico e Controle de Cheias*. Porto Alegre: UFRGS - Curso de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento. 123f. Recursos Hídricos, Publicação n°4.
- MILLAR, A.A.. 1989. *Manejo racional da irrigação: uso de informações básicas sobre diferentes culturas*. PRONI/IICA, 2A. Ed., Brasília, 57f.
- MINHAS, B.S., PARIKH, K.S., SRINIVASAN, T.N. 1974. Toward the structure of a production function for wheat yields with dated inputs of irrigation water. *Water Resources Research*, v.10, n.3, p. 383-393.
- OLIVEIRA, J.A. 1995. *Otimização da operação de um sistema de reservatórios para irrigação e abastecimento urbano*. Porto Alegre: UFRGS-Curso de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento. 113f. Dissertação (Mestrado).
- RAO, N.H., SARMA, P.B., CHANDER, S. 1988. A simple dated water-production function for use in irrigated agriculture. *Agricultural Water Management*, Amsterdam, v.13, n.1, p. 25-32.
- VALDÉS, J.B., FILIPPO, J.M., STRZEPEK, K.M., RESTREPO, P.J. 1992. Aggregation-disaggregation approach to multireservoir operation. *Journal of Water Resources Planning and Management*, v.118, n.4, p. 423-444.
- VIEIRA NETO, J.F. 1991. *Dimensionamento ótimo do sistema de irrigação e barragens da Bacia do Rio Acaraú-Ceará*. Porto Alegre: UFRGS - Curso de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento. 113f. Dissertação (Mestrado).

Optimization of a Multireservoir Water Resources System Supplying Multiple Uses in Brazilian Northeast

ABSTRACT

Efficient operation of water resources systems, optimizing water discharges to supply several demands, is very relevant in regions like the Brazilian Northeast, where water is scarce and evaporation is high. This paper presents the development of operation rules for a system with 5 reservoirs used to supply urban and irrigation demands in Acaraú River basin, State of Ceará. The objective is the maximization of the present value of the operational net benefits, subject to reservoir and soil water balance constraints. Some linearization artifices was applied to solve the problem using linear optimization. Two formulations were considered: 1) constant irrigated area and variable water supply; 2) variable irrigated area and constant water supply. The first formulation derives operation rules to irrigate an optimal area, to be computed. The irrigation may partially supply crop water demands, establishing water stress and productivity decreases. Several functional relationships for operation rules were tested. In the second formulation irrigated area may vary along the time, according to the hydrologic conditions. The water supply must be equal to the crop water demand. It was concluded that the system under analysis could irrigate greater areas than the projected one. The two formulations showed that optimization techniques may increase economic efficiency of regional water resources investments and present relevant informations to optimal sizing and operation of water resources systems.