

## Conflitos pelo Uso da Água no Setor Agrícola no Norte Fluminense (I): Propostas de Soluções e Análises Através de Programação Linear

Augusto César Vieira Getirana, José Paulo Soares de Azevedo, Paulo Canedo de Magalhães

Programa de Engenharia Civil – COPPE – UFRJ  
augusto@hidro.ufrj.br; zepaulo@hidro.ufrj.br; canedo@hidro.ufrj.br

Recebido: 18/08/05 - Revisado: 29/03/06 - Aceito: 30/01/07

---

### RESUMO

Este artigo tem como objetivo realizar a análise econômica de propostas para usos ótimos de água por usuários do setor agrícola quando o recurso é limitado e insuficiente para suprir todas as demandas, potencializando conflitos entre irrigantes. O estudo de caso trata do canal Coqueiros, integrante de uma complexa rede de irrigação e drenagem localizada na Baixada Campista, no Norte Fluminense, projetada e implementada gradualmente pelo extinto DNOS, entre as décadas de 40 e 70. Um modelo matemático em programação linear foi utilizado para obter resultados ótimos na utilização dos recursos hídricos disponíveis. Os cenários analisados foram propostos com base em previsões da demanda hídrica dos usuários do canal de acordo com diferentes tendências de mercado, práticas agrícolas e gestão do corpo hídrico. O caso, equacionado matematicamente em um problema de programação linear (PPL), também foi submetido a uma verificação do comportamento da produção agrícola sob a influência da taxa da água utilizada para a compensação de investimentos em intervenções estruturais e despesas com O&M no canal para a regularização e o aumento da vazão disponível ao longo de seu curso. Os resultados foram submetidos a uma análise econômica e algumas conclusões puderam ser tiradas para que soluções efetivas possam ser implementadas.

**Palavras-chave:** gestão de recursos hídricos, programação linear, agricultura irrigada

---

### INTRODUÇÃO

A tomada de decisões a respeito do destino que a água disponível no corpo hídrico terá em uma dada região e em um determinado instante deve considerar fatores econômicos, sociais, políticos, legais, ambientais e hidrológicos. Estas decisões se tornam mais complexas com o aumento da demanda de água, que tem como consequência o acirramento dos conflitos pelo recurso hídrico.

Tradicionalmente, tem sido recomendado que estudos e análises visando o aproveitamento de recursos hídricos se façam percorrendo as seguintes etapas (Maass *et al.*, 1962): i) definição dos objetivos; ii) formulação de medidas quantitativas dos objetivos; iii) geração de alternativas; iv) quantificação das alternativas; e v) seleção da alternativa ótima. São grandes os desafios que defrontados ao percorrer esta sistemática de análise, pois, muitas vezes, a falta de familiaridade com o problema estudado e a indisponibilidade de dados podem ser fatores limitantes na obtenção de resultados satisfatórios na análise de recursos hídricos. Entretanto, se bem utilizados, modelos matemáticos podem se tornar excelentes

suportes para contornar tais desafios, viabilizando o alcance de uma alternativa ótima.

A análise de sistemas complexos de recursos hídricos pode, às vezes, envolver muitas restrições e variáveis de decisão. A partir do momento em que as restrições e os objetivos tenham sido determinados, a maioria dos problemas se encaminha na direção de técnicas de solução fundamentadas no campo da pesquisa operacional e ciências de gerenciamento (Yeh, 1985; Porto *et al.*, 2002).

O termo otimização ou programação matemática refere-se a formulações matemáticas as quais algoritmos são usados para computar um grupo de valores de variáveis de decisão que minimizam ou maximizam uma função objetivo sujeita a restrições. Comparados aos modelos de simulação, a grande vantagem que os modelos de otimização apresentam é que estes também simulam o sistema (Wurbs, 1993).

Para Maass *et al.* (1962), um resultado ótimo de um sistema pode ser definido como a combinação de unidades do sistema, saídas e procedimentos operacionais que atendam os objetivos melhor que qualquer outra operação.

Há mais de quatro décadas as técnicas de otimização, em suas diversas modalidades vem sendo continuamente aperfeiçoadas e aplicadas para obtenção da alocação de água na melhor maneira possível em seus múltiplos usos (Hall, 1961; Maass *et al.*, 1962; Braga *et al.*, 1985; Oliveira e Lanna, 1997; Cruz e Tucci, 2005). Entretanto, pelo fato de a agricultura irrigada ser a atividade humana que retém a maior fatia do total de água consumida no mundo, a aplicação de modelos de otimização na alocação de recursos hídricos neste setor, torna-se extensa (Albuquerque e Labadie, 1997; Kumar *et al.*, 1998; Curi *et al.*, 2004; Getirana, 2005).

Ao planejar um projeto de irrigação, um número de culturas deve se desenvolver com sucesso. O problema está na etapa de se determinar quais culturas e como será realizada sua distribuição ou ainda, qual será o método de produção adotado que trará vantagens considerando-se os recursos limitados disponíveis. Deste modo, Blank (1974) diz que, no ponto de vista de um proprietário rural ou de um projetista, o objetivo não é, necessariamente, maximizar a produção de uma única cultura, mas sim maximizar a renda líquida gerada dentro dos limites de restrições de área, água, mão-e-obra, etc. Dentre as técnicas de otimização existentes, pode-se dizer que a mais comumente utilizada em projetos de irrigação é a Programação Linear (PL) (Paudyal e Gupta; 1990; Bomam e Hill, 1997; Salazar *et al.*, 2005; Devi *et al.*, 2005).

Em trabalhos recentes no Brasil, Carvalho *et al.* (2000) obteve épocas de cultivo ótimas de algumas culturas com a aplicação de PL, enquanto que Curi *et al.* (2004) aplicaram a técnica para a maximização da receita líquida sob condições de variações hídricas e econômicas em um perímetro irrigado no noroeste da Paraíba.

Neste sentido, objetiva-se com este trabalho a apresentação do emprego de modelos de otimização por gestores de recursos hídricos atentos aos altos consumos de água do setor agrícola, como ferramenta para a determinação de vazões ótimas requeridas na agricultura e a obtenção de diferentes propostas de soluções para conflitos pelo uso da água quando esta for insuficiente. Serão obtidas estimativas otimizadas dos benefícios econômicos do uso dos recursos hídricos do sistema de adução de água para a irrigação em diferentes cenários. Enquanto busca-se a maximização da receita líquida gerada no perímetro abastecido, com a determinação de áreas ocupadas por culturas previamente selecionadas, conforme algumas extrapolações de diferentes tendências regionais, tem-se em vista, concomitantemente, uma solução que satisfaça os

requerimentos relacionados aos limites físicos do sistema. Ao final, busca-se realizar uma avaliação econômica dos resultados obtidos com a possível implementação de cada proposta.

## CANAIS DE CAMPOS DOS GOYTACAZES

Localizada na Baixada Campista, na região Norte Fluminense, uma complexa rede de canais de irrigação e drenagem de, aproximadamente, 1.300 km compõe a fisionomia da região, cruzando seus solos férteis de norte a sul, desde a margem direita do rio Paraíba do Sul até o oceano Atlântico. Estes canais foram concebidos e projetados ao longo de mais de trinta anos, entre as décadas de 40 e 70, pelo extinto Departamento Nacional de Obras de Saneamento (DNOS) como medida definitiva para sanar os focos freqüentes de doenças, drenando inúmeros lagos, lagoas e brejos que um dia compuseram o cenário da região. Após a extinção do órgão federal, no início da década de 90, os canais passaram por uma fase de ociosidade e falta de manutenção, comprometendo o sistema e sua utilização.

Apesar de haver água suficiente para abastecer a demanda na região proveniente do rio Paraíba do Sul, que atravessa a baixada com uma vazão de 302 m<sup>3</sup>/s disponível na foz da bacia em 95% do tempo, os canais não têm capacidade de aduzir vazões suficientes que satisfaçam a todos os usuários sem que cause danos a outros, pois em determinados trechos, encontram-se, por vezes, depressões no relevo (local onde se encontravam antigas lagoas) e trechos assoreados, reduzindo a área da seção do canal e prejudicando consideravelmente sua capacidade de adução e alagando terras potencialmente produtivas nos seus arredores.

O uso da água para a irrigação fundamenta-se, basicamente, na produção canavieira, com alguns focos de policultura espalhados pela região. Apesar da significativa quantidade de agricultores que circundam os canais, a maior parte pratica a agricultura de sequeiro, não havendo grandes demandas pela água ao longo do ano, excluindo os meses de seca, quando há uma maior demanda.

Os dados climatológicos apresentados na tabela 1, evapotranspiração de referência (ET<sub>o</sub>) e precipitação (PP) correspondem às médias mensais de séries históricas de dados (1975-2003) adquiridas no posto climatológico do Campus Leonel Miranda da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro na latitude 21°47'50", longitude 41°17'47" e altitude de

**Tabela 1 – Evapotranspiração de referência (ET<sub>o</sub>) e Precipitação (PP) médias mensais representativas da unidade hidrológica do canal Coqueiros.**

	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Total Anual
ET <sub>o</sub> (mm/mês)	167	163	162	133	110	98	100	115	112	127	135	148	1.569
PP (mm/mês)	106	56	54	40	41	35	21	34	68	60	144	148	807

6,4 m. Observa-se nesta mesma tabela que há um grande déficit hídrico ao longo do ano exigindo a prática da irrigação para a obtenção de bons resultados agrícolas.

As culturas propostas para a análise, além da cana-de-açúcar, são o abacaxi, maracujá, goiaba, coco, cenoura e tomate (os dois últimos cultivados em rotação do uso do solo).

Devido ao fato de a água corrente nos canais ter origem no rio Paraíba do Sul, adotou-se o valor de cobrança pelo seu uso em R\$ 0,0007/m<sup>3</sup>. Este valor se refere à captação de recursos hídricos para o uso agrícola e sem retorno à bacia de origem obtido através da equação 1, desenvolvida no Laboratório de Hidrologia na COPPE/UFRJ e aprovada pelo Comitê de Bacia (CEIVAP) (LabHid, 2002).

$$C = Q_{\text{cap}} \times \text{PPU} \times [K_0 + K_1 + (1 - K_1) \times (1 - K_2 \times K_3)] \quad (1)$$

Onde:

- $Q_{\text{cap}}$  representa o volume de água captada durante um mês (m<sup>3</sup>/mês), fornecido pelo usuário;
- $K_0$  corresponde a um multiplicador de preço unitário para captação, definido pelo CEIVAP;
- $K_1$  corresponde a um coeficiente de consumo para a atividade em questão, ou seja, a fração da vazão captada pelo usuário e que não retorna ao manancial;
- $K_2$  corresponde ao percentual do volume de efluentes tratados em relação ao volume total de efluentes produzidos (ou índice de cobertura de tratamento de efluentes domésticos ou industriais);
- $K_3$  corresponde ao nível de eficiência de redução de DBO (Demanda Bioquímica de Oxigênio) na estação de tratamento de efluentes e;
- PPU representa o Preço Público Unitário, que corresponde à cobrança pela captação,

pelo consumo e pela diluição de efluentes para cada m<sup>3</sup> de água captada (R\$/m<sup>3</sup>), definido pelo CEIVAP.

No caso da captação de água do canal no rio, apenas os dois primeiros termos dentro dos colchetes são representativos, pois como não há retorno da vazão captada, a quantidade de efluentes que retorna ao manancial é nula. Para a agricultura irrigada, os índices estabelecidos pelo CEIVAP são de 0,4 para  $K_0$  e R\$ 0,0005/m<sup>3</sup> para PPU<sub>irrigação</sub>, desde que o valor total pago pelo usuário não exceda 0,5% dos custos de produção. Estes valores totalizam R\$ 0,0007/m<sup>3</sup> (R\$0,0005/m<sup>3</sup> × 1,4) a ser pago pelos irrigantes ao CEIVAP pela cobrança pelo uso da água do rio Paraíba do Sul.

Portanto, tratou-se como um “custo fixo” da água para os irrigantes usuários do canal o valor de R\$ 0,0077/m<sup>3</sup>, onde R\$ 0,0070/m<sup>3</sup> corresponde aos gastos estimados com energia elétrica necessária para o bombeamento da água.

Custos com mão-de-obra, manejo do solo, tratos culturais e bombeamento da água, assim como preços de mercado das culturas e seus coeficientes de cultura (kc) foram obtidos em pesquisas em campo e adaptações representativas do mercado regional.

Dentre os vários canais existentes na Baixada Campista, optou-se por realizar o estudo dos conflitos existentes e das potencialidades econômicas da região e baseado em um canal apenas, devido à dimensão significativa da área que a baixada abrange. De acordo com dados gerados por Getirana *et al.* (2005) com base em informações cartográficas, a bacia do canal Coqueiros possui cerca de 14.000 ha de solos potencialmente irrigáveis e 45 quilômetros de extensão do canal.

### Os conflitos

Os conflitos existentes entre usuários de recursos hídricos dos canais se devem principalmente

a duas causas: (1) manejo ineficiente das comportas das cabeceiras associado ao alto índice pluviométrico nos períodos de chuva e a problemas de natureza hidráulica, devido às baixíssimas declividades dos canais, trechos que cruzam depressões do terreno, além de assoreamentos freqüentes e; (2) nos períodos de seca, quando o nível d'água no canal fica consideravelmente reduzido, alguns irrigantes, constroem pequenas barragens de forma que o nível se eleve em seus pontos de captação prejudicando o abastecimento de outros irrigantes a jusante.

As dificuldades causadas pelos problemas dos canais poderiam ser resolvidas através da perenização da vazão necessária para suprir uma demanda mínima, a partir de intervenções estruturais como obras permanentes, manutenções constantes como dragagens e revestimento de alguns trechos dos leitos e o aumento da captação de água nas comportas do rio Paraíba do Sul, e não-estruturais como negociações entre usuários, mediados pelo órgão gestor dos canais, e a conscientização dos mesmos para a utilização mais eficiente dos recursos hídricos.

Tratando-se da gestão dos canais, ainda não se estabeleceu um órgão gestor competente que assuma as devidas responsabilidades de gerenciamento, apesar de haver propostas de modelos para gestão dos canais (Carneiro, 2004). Portanto, soluções para tais conflitos ainda não foram apresentadas de maneira estruturada.

## METODOLOGIA

Com a intenção de representar possíveis tendências que a região e a gestão dos canais podem vir a tomar nos próximos anos, doze cenários foram propostos. Estes cenários se distinguem uns dos outros através de considerações feitas sobre tais tendências, representadas por algumas restrições de ocupação do solo, além de serem fixados alguns critérios na condução e na distribuição de água entre os irrigantes. Em todos eles, considerou-se que a prática da irrigação passou a prevalecer na região, concomitante ao crescimento de programas estaduais de incentivo à agricultura irrigada, acarretando demandas de grandes vazões dos canais.

Os critérios estabelecidos podem ser resumidos em: (1) a água poderá ser alocada por quotas; ou (2) distribuída visando a maximização da renda líquida gerada pelos usuários do canal. Com relação à capacidade de adução, três hipóteses foram consideradas: o escoamento no canal priorizará: (1) o

abastecimento de todos os usuários (chama-se este critério de "Sem restrições"); (2) os proprietários de terras sujeitas a alagamentos, mantendo-as secas ao se estabelecer limites de água máximos nestes trechos ("Com Restrições"); ou (3) ambos, com a implementação de intervenções estruturais, de forma que o canal seja regularizado ("Com Intervenções"). Além disso, definiu-se como duas tendências regionais: (1) forte tendência a permanência da monocultura da cana-de-açúcar; ou (2) pelo contrário, o aumento do interesse na produção de outras culturas além da cana, levando a predominância da policultura irrigada. A combinação dos critérios apresentados resulta na formulação de 12 cenários, apresentados na tabela 2. Estes cenários se distinguem, resumidamente, pelo regime de distribuição de água com subgrupos que dizem respeito às culturas plantadas.

**Tabela 2 – Critérios adotados nos cenários propostos.**

Distribuição	Cultura	Cenário	Capacidade de Adução
Quotas	Mono	1	Restrições
		2	Sem restrições
		3	Intervenções
	Poli	4	Restrições
		5	Sem restrições
		6	Intervenções
Ótima	Mono	7	Restrições
		8	Sem restrições
		9	Intervenções
	Poli	10	Restrições
		11	Sem restrições
		12	Intervenções

## Considerações pré-otimização

De acordo com resultados apresentados por Getirana *et al.* (2005), distribuem-se na área de influência do canal Coqueiros e seus afluentes 15.690 hectares de solos potencialmente irrigáveis. Os autores agruparam estes solos, os quais são apresentados originalmente por Sondotécnica (1984), em quatro classes de aptidão, padronizadas pelo SCS (*Soil Conservation Service*). Dentre os parâmetros utilizados pelo SCS para classificar um solo conforme sua aptidão para irrigação, encontra-se a Capacidade de Água Disponível (CAD) no solo (mm/m), a qual foi utilizada no primeiro trabalho para caracterizar solos pelo consumo de água de irrigação por uma mesma cultura.

**Tabela 3 - Atributos dos usuários de recursos hídricos do canal Coqueiros.**

Usuário	Sub-bacia	Área potencialmente irrigável (ha)		CAD <sup>3</sup>
		Alagamento <sup>1</sup>	Restrições de vazão <sup>2</sup>	
1	1	1.074	1.074	167
2	1	2.334	2.334	149
3	1	611	611	97
4	2	1.863	2.163	149
5	2	977	977	97
6	3	29	29	167
7	3	2.704	2.94	149
8	3	225	322	97
9	4	1.060	1.355	149
10	4	1.010	1081	97
11	5	577	577	149
12	5	658	658	97
Total	-	13.123	14.121	-

<sup>1</sup> áreas disponíveis para irrigação caso seja decidido por haver alagamentos nos pontos de conflito.

<sup>2</sup> áreas disponíveis para irrigação caso seja decidido por haver intervenções estruturais no canal ou a implementação de restrições de vazão nos pontos de conflito, preservando a disponibilidade de terras para irrigação.

<sup>3</sup> os valores de CAD correspondem à lâmina de água, em milímetros, armazenada em uma profundidade 1 metro abaixo da superfície do solo (mm/m).

A partir da delimitação de cinco sub-bacias, foi possível distribuir em 12 grupos os solos com mesmas aptidões para irrigação. Cada grupo é classificado neste trabalho como um “usuário de recursos hídricos do canal” e para a determinação da taxa de ocupação potencial do solo, multiplicou-se a área total de cada terreno por 0,90 (considerando-se que 10% das terras são ocupadas com instalações residenciais, hidráulicas – canais de adução e drenagem – e armazenamento de material), resultando em um total de 14.121 hectares de solos potencialmente irrigáveis. Os resultados obtidos e a distribuição dos “usuários” são apresentados na tabela 3. Verifica-se nesta tabela que os usuários 1 e 6 têm solos com CAD superior (perdem menor quantidade de água) que os solos dos usuários 4, 7, 9 e 11 que, por suas vezes, apresentam valores de CAD superiores aos usuários 3, 5, 8, 10 e 11. Getirana *et al.* (2005) utilizaram uma metodologia proposta pelo SCS para a determinação da precipitação efetiva ( $PP_c$ ) que varia diretamente com a CAD. Ocorrendo uma maior  $PP_c$ , menor é a demanda de água para a irrigação. A

figura 1 apresenta dois passos na definição dos “usuários”: (1-a) delimitação das sub-bacias e; (1-b) distribuição das classes de solo.

Simulações do canal Coqueiros realizadas no Laboratório de Hidrologia da COPPE/UFRJ apontaram restrições de vazão em alguns trechos do canal que limitam o abastecimento de usuários localizados em determinadas bacias (Getirana, 2005). A tabela 4 apresenta as restrições de vazão, localização e sub-bacias prejudicadas.

**Tabela 4 – Restrições de vazão no canal Coqueiros.**

Q <sub>max</sub> (m <sup>3</sup> /s)	Localização <sup>1</sup> (km)	Sub-bacias a jusante
8,0	0,0	1, 2, 3, 4 e 5
4,7	12,0	2, 3, 4 e 5
2,0	21,0	3, 4 e 5

<sup>1</sup> Localização com relação à confluência do canal Coqueiros com o canal São José que realiza a conexão do primeiro canal com o canal Cambaíba (ambos com comportas no rio Paraíba do Sul) e abastece irrigantes no Coqueiros e usinas ao seu longo.

## Modelo Proposto

A determinação dos usuários de recursos hídricos do canal, os cenários propostos e as considerações apresentadas possibilitam a definição de um modelo apropriado para o prosseguimento da análise. O sistema de equações proposto corresponde a um modelo determinístico que otimiza a alocação de água no intervalo de doze meses, refletindo o resultado em um tempo de projeto de irrigação de seis anos. O modelo matemático proporciona a otimização de um canal de adução de irrigação responsável pelo fornecimento de água para diversos usuários, produzindo uma ou mais das culturas propostas nos cenários apresentados, os quais captam água em diferentes pontos ao longo do canal. Desta forma, o sistema de equações lineares (equações 2 a 7) é definido por:

Maximizar

$$L = \sum_{i=1}^N \sum_{c=1}^{CN} a_{i,c} \left[ \left( P_c \times Y_{p_c} \times \gamma_c \right) - n \cdot \left( cf_c + \sum_{t=1}^{12} cv_c^t \right) \right] \quad (2)$$

Sujeito a

$$Q_k^t = \sum_{i=1}^N \sum_{c=1}^{CN} NIB_{i,c}^t \cdot a_{i,c} \quad \forall t, k \quad (3)$$

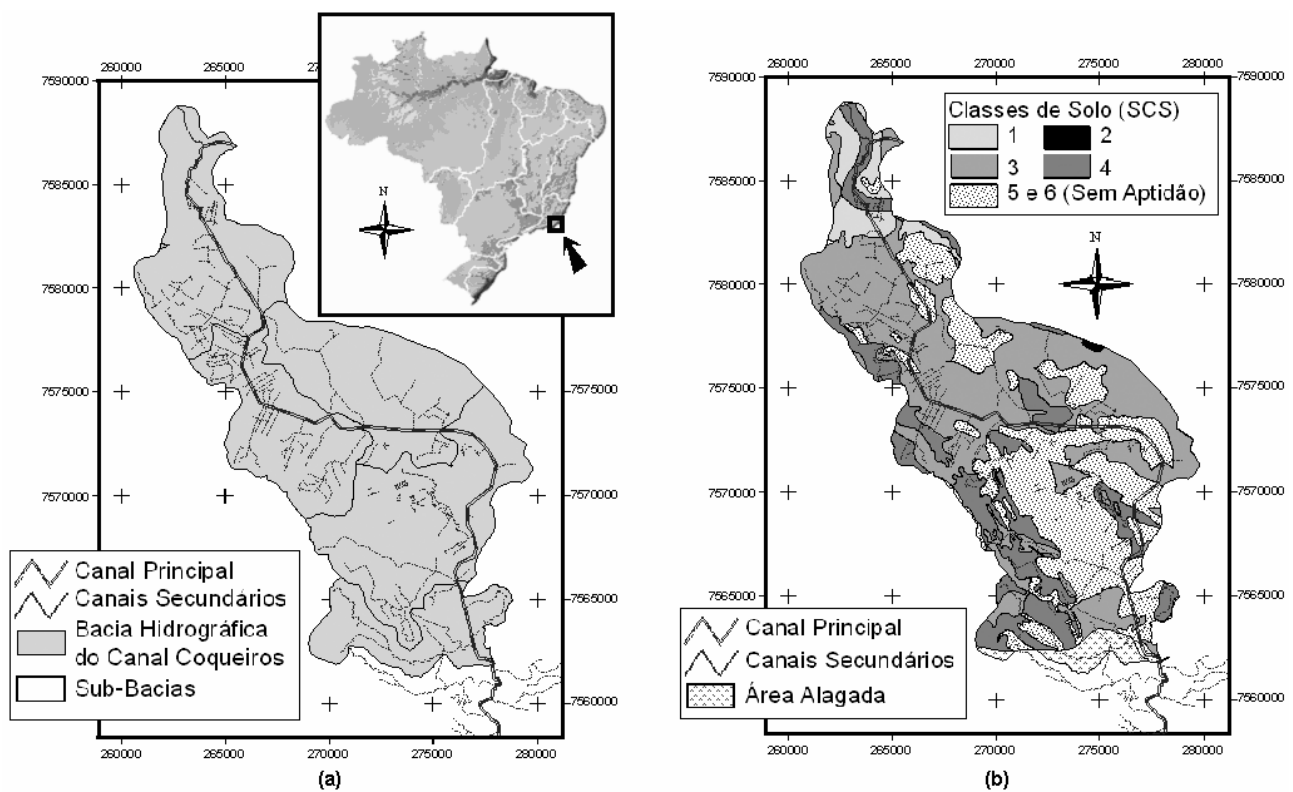


Figura 1 – Bacia do canal Coqueiros: (a) delimitação das sub-bacias e sua localização no Brasil; (b) distribuição das classes de solo de acordo com a aptidão para a irrigação.

$$Q \max_k^t \geq \sum_{x=k}^K Q_x^t \quad \forall t, k \quad (4)$$

$$A_i \geq \sum_{c=1}^{NC} a_{i,c} \quad \forall i \quad (5)$$

$$a_{i,c} \geq 0 \quad \forall i, c \quad (6)$$

$$a_{\min_c} \leq \sum_{i=1}^N a_{i,c} \leq a_{\max_c} \quad \forall c \quad (7)$$

Onde:

- $t, i, k$  e  $x$  correspondem, respectivamente, aos índices de contagem dos 12 meses do ano, dos  $N$  usuários de recursos hídricos, dos  $K$  pontos de restrição de vazão (contados de montante para jusante), dos pontos

de captação a jusante da seção  $k$  (também representados por  $K$ );

- $NIB$  (Necessidade de Irrigação Bruta) determina a lâmina de água necessária para uma cultura  $c$ , no mês  $t$  e cultivada na propriedade  $i$ ;
- $a, A, a_{\min}$  e  $a_{\max}$  são, respectivamente, a área irrigada (variável de decisão), a área potencialmente irrigável de uma propriedade  $i$  (ha) e as áreas mínimas e máximas ocupadas por uma cultura  $c$  no sistema;
- $P$  e  $Y_p$  determinam, respectivamente, o valor de mercado (R\$/ton) e o rendimento gerado (ton/ha) por uma cultura  $c$ ;
- $\gamma$  corresponde ao número de colheitas da cultura  $c$  que ocorrem nos  $n$  anos de projeto (6 anos);
- $Q$  é a vazão total requerida por todos os usuários a jusante de  $k$ ;
- $Q_{\max}$  corresponde à vazão máxima admissível na seção  $k$  e;
- $cf$  e  $cv$  são, respectivamente, os custos fixos e custos variáveis relacionados à produção da cultura.

Para o caso dos cenários de policultura, os limites mínimos e máximos de área ocupada por uma cultura  $c$  em todo o sistema, conforme é apresentado na equação 7, foram definidos como, respectivamente, 60% e 100%, do total de terra potencialmente irrigável no sistema, para a cana-de-açúcar e 2,5% e 10% para cada uma das demais culturas.

### Alocação de água

Alocação por quotas – optou-se por utilizar como critério para a determinação de quotas a área irrigável de cada propriedade. Tais quotas serão determinadas de acordo com um coeficiente  $Co$  descrito nas equações 8 e 9:

$$Co_k^t = \frac{Q_k^t}{\sum_{i=1}^N A_{i,k}} \quad \forall t, k \quad (8)$$

$$q \max_{i,k}^t \leq A_{i,k} \times Co_k^t \quad \forall t, i, k \quad (9)$$

Onde:

- $Co$  define o coeficiente de quota de vazão para os usuários a jusante de  $k$  e;
- $q_{max}$  representa a vazão máxima que um usuário pode captar no tempo  $t$ .

Alocação por otimização da receita líquida global – Propôs-se com este método de distribuição de água a maximização da renda líquida gerada pelos usuários do sistema (maior valor de R\$/m<sup>3</sup> gerado). A imposição, nesta situação, se limita a restringir o total de água demandada pelos usuários a jusante de uma seção igual ou menor que a vazão disponível neste ponto.

## ANÁLISE ECONÔMICA DAS SOLUÇÕES PROPOSTAS

### Alocação de recursos hídricos por quotas

Observa-se na tabela 5 que há um aumento de 14,8% ou R\$ 13,2 milhões na renda líquida gerada quando intervenções são realizadas no canal, partindo-se do cenário 1. Em contrapartida, não são observadas mudanças no lucro gerado pelos agricultores na hipótese de haver intervenções no canal ao se ter anteriormente um acordo pela irrestrrição de

vazão em trechos propícios a alagamentos (do cenário 2 para o 3).

Nota-se que, devido à pequena quantidade de água disponível aos usuários a jusante dos trechos com estreitamento da seção, a área irrigada total no cenário 1 é menor que a área irrigada nos outros dois cenários. Isso leva a crer que o fator limitante no desenvolvimento agrícola nestes cenários é a vazão máxima de água e não a área irrigável disponível. Tal hipótese é confirmada ao se observar a variação da demanda hídrica anual dos três cenários. Constatou-se que as demandas de água nos cenários 2 e 3 são praticamente iguais, acompanhando a tendência das áreas ocupadas.

Os resultados mostraram uma expressiva variação entre os benefícios gerados pelas intervenções estruturais no canal quando se trata da monocultura e, em seguida, da policultura. Ao se tratar de cenários onde os usuários praticam policultura, intervenções estruturais acarretam em variações mais significativas na renda gerada pelos produtores, tanto do cenário 4 para o 6, com um acréscimo de R\$ 22,92 milhões ou 13,8%, quanto do cenário 5 para o 6, acrescentando R\$ 4,54 milhões ou 2,5%.

Comparando os resultados obtidos nos cenários da policultura com os dos cenários da monocultura, nota-se uma grande diferença entre as rendas líquidas geradas pelo sistema nas situações com as mesmas condições hidráulicas do canal, apresentadas na tabela 5, variando desde 79,8% até 85,8%, nos cenários 2 e 1, respectivamente. Estes resultados comprovam o aumento do lucro gerado pelos irrigantes com a prática de outras culturas associadas à cana-de-açúcar. Vê-se também que as áreas ocupadas nos cenários onde se praticam a policultura são superiores às áreas ocupadas nos cenários submetidos somente à cana. Isto é causado pela menor demanda hídrica das outras culturas propostas, acarretando num maior rendimento hídrico que chega a atingir valores superiores a R\$ 252,00 por 1.000 m<sup>3</sup> de água no cenário 6, 65,6% maior que seu equivalente na monocultura (cenário 3).

Constata-se, pela tabela 6, nos cenários 1 e 4, que em momento algum foi alcançada a capacidade máxima de adução do canal. O primeiro cenário obteve a vazão média mensal máxima de 6,96 m<sup>3</sup>/s no mês de fevereiro e o quarto, 7,02 m<sup>3</sup>/s no mesmo mês, enquanto todos os outros cenários atingiram, em pelo menos um mês, o limite de adução do canal de 8,0 m<sup>3</sup>/s (monocultura no mês de fevereiro e policultura em março).

**Tabela 5 – Dados de área ocupada, demanda hídrica e renda líquida dos cenários propostos.**

Cenário			Área ocupada (ha)	Área ociosa (ha)	Renda líquida (6anos) (R\$×10 <sup>6</sup> )	Demanda hídrica anual (10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup> )	Ganhos após intervenções		Eficiência hídrica global (R\$/10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup> )
							(R\$×10 <sup>6</sup> )	(%)	
Alocação por Quotas	Mono	1	10.039	4.083	89,09	97,42	13,20	14,82	152,42
		2	11.526	1.597	102,28	111,96	0,01	0,01	152,26
		3	11.527	2.595	102,29	111,95	-	-	152,29
	Poli	4	11.464	2.658	165,54	107,77	22,93	13,85	256,02
		5	13.123	0	183,93	126,26	4,54	2,47	242,79
		6	13.431	691	188,47	124,56	-	-	252,17
Alocação Ótima	Mono	7	10.053	4.069	89,23	97,23	13,37	14,98	152,95
		8	11.545	1.578	102,47	111,71	0,13	0,13	152,95
		9	11.558	2.564	102,6	111,53	-	-	153,33
	Poli	10	11.478	2.643	165,76	107,69	22,83	13,77	256,53
		11	13.123	0	183,98	126,08	4,61	2,51	243,20
		12	13.438	684	188,59	124,26	-	-	252,94

**Tabela 6 – Vazões médias mensais aduzidas pelo canal para o abastecimento dos usuários nos cenários propostos.**

Cenário	Vazão média mensal (m <sup>3</sup> /s)											
	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
1	5,08	6,96	6,44	5,08	2,12	0,67	1,35	1,36	1,34	4,02	1,28	1,87
2	5,84	<b>8,00</b>	7,40	5,84	2,43	0,77	1,55	1,56	1,55	4,62	1,48	2,15
3	5,84	<b>8,00</b>	7,40	5,84	2,43	0,77	1,55	1,56	1,54	4,62	1,48	2,15
4	4,81	7,02	6,73	5,38	2,47	1,42	2,24	2,34	1,92	4,34	1,18	1,73
5	5,12	7,98	<b>8,00</b>	6,39	3,05	1,96	2,80	3,18	2,60	4,66	1,20	1,77
6	5,12	7,98	<b>8,00</b>	6,35	2,86	1,78	2,68	3,11	2,60	4,69	1,17	1,71
7	5,07	6,96	6,44	5,08	2,11	0,67	1,35	1,36	1,33	4,02	1,26	1,85
8	5,83	<b>8,00</b>	7,40	5,84	2,43	0,77	1,55	1,56	1,53	4,61	1,45	2,12
9	5,82	<b>8,00</b>	7,40	5,84	2,42	0,77	1,55	1,56	1,53	4,61	1,43	2,1
10	4,80	7,02	6,73	5,39	2,47	1,43	2,25	2,34	1,92	4,33	1,16	1,71
11	5,10	7,98	<b>8,00</b>	6,39	3,05	1,96	2,80	3,19	2,6	4,66	1,17	1,73
12	5,08	7,98	<b>8,00</b>	6,36	2,86	1,78	2,68	3,12	2,59	4,69	1,13	1,66

#### **Alocação de recursos hídricos por otimização da renda líquida global**

Variações desprezíveis são encontradas quando se deixa de alocar água por quotas aos usuários, passando a distribuí-las visando a maximização da renda líquida de todo o sistema. Tal resultado demonstra que a diferença dos rendimentos hídricos por hectare entre os usuários é insuficiente para que torne aparente o aumento do retorno econômico.

Por outro lado, comparando-se os resultados dos cenários 7, 8 e 9 (monocultura) entre si, percebe-se que ocorreram variações significativas

entre o primeiro cenário e os outros dois na renda líquida gerada (aumento de 15,0% ou R\$ 13,4 milhões) e na área irrigada.

Verifica-se que, das três propostas de capacidades de adução, todas com a prática da policultura alcançaram maior ocupação do solo, maior retorno econômico e maior aproveitamento dos recursos hídricos disponíveis. Destaca-se que as diferenças entre as áreas irrigadas e a renda gerada entre o cenário 10 e os outros dois cenários relacionados à policultura são significativas. Desta forma, após serem analisados ambos os métodos de distribuição de água (quotas e ótima), tanto praticando a monocultura quanto a policultura, conclui-se que é financeiramente



ramente menos atraente restringir a vazão em trechos propícios a alagamentos e inundações para que mais terras estejam disponíveis para a irrigação do que, ao contrário, alagando-as e aumentando a vazão disponível a jusante das mesmas.

De maneira geral, os cenários de 7 a 12 apresentaram vazões mensais na mesma ordem de grandeza que os cenários de 1 a 6. Entretanto, uma pequena redução na vazão anual foi constatada em cada situação.

A tabela 6 mostra que os cenários 7 e 10 não alcançaram a vazão máxima disponível em mês algum devido às restrições de vazão ao longo do canal. No entanto, os cenários 8 e 9 atingiram a vazão máxima de 8,0 m<sup>3</sup>/s no mês de fevereiro e os cenários 11 e 12 tiveram suas maiores captações no mês de março.

#### **Aumento da disponibilidade de água na cabeceira do canal**

Comparando os cenários 1 e 3 (respectivos às situações de restrições de vazão ao longo do canal e intervenções estruturais), verifica-se uma variação significativa na renda líquida gerada pelos irrigantes e a área coberta com cana-de-açúcar nos mesmos. Entretanto, se as mesmas comparações são feitas entre os cenários 2 e 3 (sem restrições de vazão e com intervenções estruturais, respectivamente), observa-se que não há praticamente qualquer variação no lucro, tornando as intervenções estruturais no canal desnecessárias, mesmo com a redução significativa de área potencialmente irrigável (tabela 5). Isso pode ter como causa provável a limitação da vazão máxima de 8,0 m<sup>3</sup>/s na cabeceira do canal. Dessa maneira, outra série de modelagens foi realizada, eliminando as limitações de vazão da cabeceira, de forma que não houvesse mais restrições na produção causadas pela falta de água a montante do canal.

De acordo com a tabela 7, percebe-se que as situações onde ocorreram as maiores variações foram nos cenários que prevaleceram a monocultura, após a realização de intervenções estruturais, com um acréscimo de, aproximadamente, 22,0% (cenários 3 e 9) na renda líquida gerada. Ou seja, o fator limitante para a produção de cana na região é, claramente, a disponibilidade de água. No caso da policultura, também é constatado um acréscimo de 5,5% (cenários 6 e 12) na renda líquida gerada pelos usuários quando propõe-se intervir estruturalmente no canal. Entretanto, os cenários que propõem restrições de vazão nos trechos de conflito não sofreram alterações na renda líquida gerada

com o aumento da disponibilidade de água (cenários 1, 4, 7 e 10).

**Tabela 7 - Comparação de rendas líquidas geradas com e sem restrições de vazão de 8,0m<sup>3</sup>/s na cabeceira do canal nos diversos cenários.**

Cenário	Renda líquida (10 <sup>6</sup> R\$)		Q max atingida (m <sup>3</sup> /s)
	Com restrições 8,0m <sup>3</sup> /s	Sem restrições	
1	89,1	89,1	8,0
2	102,3	116,5	9,1
3	102,3	125,3	9,8
4	165,5	165,5	8,0
5	183,9	184,8	8,1
6	188,5	198,9	8,8
7	89,2	89,2	8,0
8	102,5	116,5	9,1
9	102,6	125,3	9,8
10	165,8	165,8	8,0
11	184	184,8	8,1
12	188,6	198,9	8,8

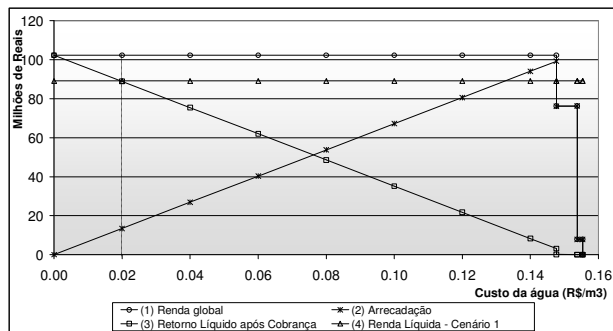
#### **Impactos econômicos causados pela tarifação da água alocada**

O que se propõe nesta seção é a realização de uma análise dos impactos econômicos causados sobre o sistema e cada irrigante quando são estabelecidas tarifas atribuídas a cada usuário do sistema, além da cobrança pelo uso da água já introduzido nos custos de irrigação, de forma a viabilizar a implementação de intervenções estruturais. Neste sentido, acredita-se que esta tarifação seja razoável e “justa” no caso em que cada usuário contribuirá de acordo com a fração de água utilizada, do total aduzido. O objetivo desta análise é observar até que ponto os usuários teriam condições financeiras de pagar pelas intervenções estruturais e despesas com O&M dos canais e como a variação dos custos estabelecidos influenciaria na produtividade, renda líquida global e retorno econômico individual, considerando-se sempre um horizonte de 6 anos.

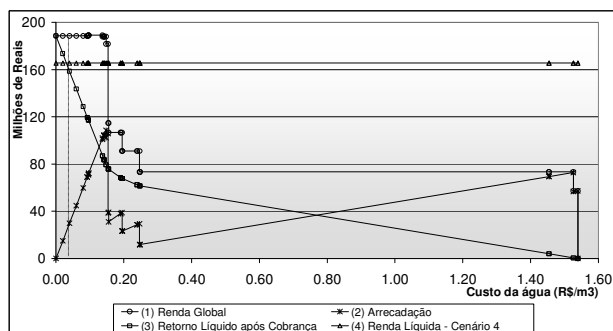
#### **Crítérios**

Tanto no cenário 3 quanto no 6, ambos adotados para esta análise por serem os únicos que propõem mudanças estruturais e alocação de água por quotas, foram feitas verificações das variações de alguns aspectos com a alteração do valor unitário do

metro cúbico captado por usuário. São eles: (1) renda líquida gerada pelo sistema; (2) arrecadação das contribuições pagas pela tarifação; (3) retorno econômico com a influência da tarifação – diferença entre (1) e (2) e; (4) renda líquida obtida nos piores cenários.



(a)



(b)

**Figura 2 – Variação da renda líquida gerada, do retorno financeiro e da quantia total arrecadada com o aumento do valor unitário da água captada: (a) na monocultura; e (b) na policultura.**

De acordo com a figura 2-a, percebe-se que a variação do custo da água não causou modificações na renda líquida do sistema até que se atingisse R\$ 0,148/m<sup>3</sup>, quando a cana-de-açúcar cultivada em solos de classe de aptidão 4 (menos apropriados para irrigação) passa a não ser mais lucrativa, levando os agricultores destes solos a não irrigarem mais. Por isso, quando este valor é atingido, a renda líquida gerada sofre uma queda considerável, causada pela inviabilidade de produção em tais solos. O mesmo ocorre com a cana produzida nos solos de classe de aptidão 3, em R\$ 0,154/m<sup>3</sup>, e posteriormente, ao atingir R\$ 0,155/m<sup>3</sup>, com a cana-de-açúcar cultivada nos solos de classe de aptidão 1 e 2.

No entanto, a maior contribuição arrecadada é atingida quando o metro cúbico de água é co-

brado a R\$ 0,148/m<sup>3</sup>, além dos custos fixos (bombeamento e cobrança pelo uso da água do rio Paraíba do Sul, citados anteriormente), havendo a arrecadação de R\$ 99,18 milhões ao longo dos seis anos de projeto. Entretanto, tratando-se da disposição dos usuários em pagar pela água, estabeleceu-se que, para que haja o interesse pelos irrigantes em haver as melhorias do canal sujeitas ao posterior pagamento pela captação, aqueles deveriam ter, ao menos, o mesmo retorno financeiro obtido na pior situação de suas produções irrigadas, ou seja, o cenário 1. Neste cenário, a renda líquida obtida no sistema ao longo dos seis anos de projeto foi de R\$ 89,09 milhões. Para que haja o pagamento pela água nestas condições, o valor a ser cobrado deveria ser de, no máximo, R\$ 0,020/m<sup>3</sup>, atingindo uma arrecadação de R\$ 13,43 milhões no final do sexto ano, além dos custos fixos.

Assim como a cana-de-açúcar, cada outra cultura apresenta um valor específico, que varia com o déficit hídrico, o valor de mercado e o solo ocupado. Devido a isso, a função “Custo da Água x Arrecadação” resultante do cenário 6 toma uma forma bastante irregular, como ilustra a figura 2-b.

Observa-se que a renda líquida global máxima alcançada no cenário da policultura com variação do custo pelo uso da água é de R\$ 189,1 milhões, quando o valor cobrado pela água é de R\$ 0,097/m<sup>3</sup>. Após atingir este máximo no sistema, a renda líquida gerada pelo sistema passa a sofrer seguidas quedas conforme o custo da água atinge os valores dos rendimentos hídricos (R\$/m<sup>3</sup>) de cada cultura cultivada em um dado solo.

A maior arrecadação obtida pela tarifação entre os usuários do canal para a viabilização dos interferências estruturais foi atingida quando o valor pago pelo metro cúbico da água é de R\$ 0,148 (além dos custos fixos – bombeamento e CEIVAP), atingindo o valor de R\$ 108,6 milhões. No entanto, este valor representa 60% do total gerado da produção que é R\$ 181,7 milhões, ao contrário da monocultura, que apresenta o percentual de 97% do total produzido. Isso se deve ao maior rendimento hídrico das culturas adicionais.

O aumento da eficiência hídrica causado pela adição de culturas mais rentáveis também interfere no valor unitário admissível para que os usuários permaneçam lucrando o equivalente à pior renda líquida obtida nos cenários de policultura (cenário 4). Este valor atinge a ordem de R\$ 0,031/m<sup>3</sup>, possibilitando a arrecadação de R\$ 29,9 milhões.

## CONCLUSÕES

O uso da PL neste estudo possibilitou a determinação da sensibilidade de possíveis alterações nas práticas agrícolas, viabilizando a análise de quais modificações devem ser realizadas de forma que se tornem sustentáveis as intervenções no canal estudado, necessárias para que haja o aumento da disponibilidade hídrica para usuários prejudicados com a falta do recurso.

A análise econômica dos diferentes cenários propostos possibilitou a avaliação da influência de diferentes critérios de alocação de água e a adoção de determinadas culturas na produção agrícola. Neste caso específico, conclui-se que a adoção da policultura, ao invés da monocultura canavieira, com alocação otimizada dos recursos hídricos, é a situação onde o retorno líquido ótimo global é atingido. No entanto, soluções como alocação ótima de recursos hídricos requerem análises mais aprofundadas com o uso de instrumentos como compensações financeiras e mercados de água, assunto abordado de maneira introdutória por Getirana (2005).

Verificou-se também que a tarifação sobre a água alocada entre os usuários do canal pode atingir valores muito superiores àqueles propostos pela cobrança pelo uso da água, estabelecida pelo CEIVAP, quando em condições de produção ideais. Isto levanta questões relacionadas à presumível “sub-taxação” do setor agrícola, comparado a outros setores usuários como o hidrelétrico, industrial e de abastecimento doméstico.

Apesar da análise proposta neste estudo, a solução de conflitos requer, de modo geral, a organização da gestão do sistema hídrico sob um enfoque coletivo, inibindo soluções individuais que impliquem danos a outros usuários. Dessa forma, a obtenção de soluções realmente efetivas para tais conflitos deve passar por outros processos que envolvam discussões entre sociedade e poder público, de maneira que mantenha a gestão dos recursos hídricos uma prática participativa e descentralizada.

## REFERÊNCIAS

- ALBUQUERQUE, F.G.; LABADIE, J.W. (1997) “*Optimal predictive control for canal operations*”. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, ASCE. v. 123, n.1, pp.45-54
- BLANK, H.G. (1974) “*Functions to predict irrigation problems*”. (Discussion) Journal of Irrigation and Drainage Division, ASCE, v.101, IR1, pp.75-77
- BOMAM, B.J.; HILL, R.W. (1997) “*LP operation model for on-demand canal system*”. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, ASCE, v.115, n.4, pp.687-700
- BRAGA, B.P.F.; CONEJO, J.L.; BECKER, L. et al. (1985) “*Capacity expansion of Sao Paulo water supply*”. Journal of Water Resources Planning And Management, ASCE, v. 111, n.2, pp.238-252
- CARNEIRO, P.R.F. (2004) Água e conflito na Baixada dos Goytacazes. REGA, v.1, n.2, pp.87-100
- CARVALHO, D.F.; SOARES, A.A.; RIBEIRO, C.A.A.S. et al. (2000) “*Otimização do uso da água no perímetro irrigado do Gorotuba, utilizando-se a técnica da programação linear*”. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.4, n.2, pp.203-209
- CRUZ, C.J.; TUCCI, C.E.M. (2005) “*Otimização e simulação comparativa de cenários de outorga*”. Revista Brasileira de Recursos Hídricos. v.10, n.3, pp.75-91
- CURI, R.C.; CURI, W.F.; OLIVEIRA, M.B.A. (2004) “*Análise de alterações na receita líquida de um perímetro irrigado no semi-árido sob condições de variações hídricas e econômicas*”. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v.9, n.3, pp.39-53
- DEVI, S.; SRIVASTAVA, D.K.; MOHAN, C. (2005) “*Optimal water allocation for the transboundary Subarnarekha River, India*”. Journal of Water Resources Planning And Management, ASCE, v.131, n.4, pp.253-269
- GETIRANA, A.C.V. (2005) *Análise de soluções de conflitos pelo uso da água no setor agrícola através de técnicas de programação linear*. Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ.
- GETIRANA, A.C.V.; SANTOS, C.S.M.; BOMFIM, E.; et al. (2005) *Metodologia para a determinação de usuários de recursos hídricos do setor agrícola através de SIG visando o planejamento de bacia hidrográfica*. In: Anais do XXII Simpósio Brasileiro de Cartografia. Macaé, RJ.
- HALL, W.A. (1961) “*Aqueduct capacity under an optimum benefit policy*”. Journal of Irrigation and Drainage Division, ASCE. v.87, IR3, pp.1-11
- KUMAR, C.N.; INDRASENAN, N.; ELANGO, K. (1998) “*Nonlinear programming model for extensive irrigation*”. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, ASCE, v.124, n.2, pp.123-130
- LABHID (Laboratório de Hidrologia e Estudos do Meio Ambiente) (2002) “*Plano de Recursos Hídricos da Bacia do Rio Paraíba do Sul*”. In: Projeto Gestão dos Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul (PGRHRE-09-R0), Fundação COPPE-TEC/ANA, Rio de Janeiro, RJ.

- MAASS, A.; HUFSCHMIDT, M.M.; DORFMAN, R. et al. (1962) "Design of water-resource systems". 1ª ed. Harvard University Press. U.S.A. 620p.
- OLIVEIRA, J.A.; LANNA, A.E.L. (1997) "Otimização de um sistema de múltiplos reservatórios atendendo a múltiplos usos no Nordeste brasileiro". Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v.2, n.7, pp.123-142
- PAUDYAL, G.N.; GUPTA, A.D. (1990) "Irrigation planning by multilevel optimization". Journal of Irrigation and Drainage Engineering, ASCE, v.116, n.2, pp.273-291
- PORTO, R.L.; LANNA, A.E.L.; BRAGA, B.P.F. et al. (2002) Técnicas quantitativas para o gerenciamento de recursos hídricos. 2ª ed. Editora UFRGS/ABRH. 219p.
- SALAZAR, R.; STONE, J.; YAKOWITZ, D.; et al. (2005) "Multicriteria analysis in an irrigation district in Mexico". Journal of Irrigation and Drainage Engineering, ASCE, v.131, n.6, pp.514-524
- SONDOTÉCNICA (1984) "Estudos e levantamentos pedológicos – Relatório técnico setorial". In: Projeto de irrigação e drenagem da cana-de-açúcar na região Norte Fluminense, v.1, Tomo 3.
- WURBS, R.A. (1993) "Reservoir-system simulation and optimization models". Journal of Water Resources Planning and Management, ASCE, v.119, n.4, p. 455-472
- YEH, W.W-G. (1985) "Reservoir management and operation models: a state-of-the-art review". Water Res. Res., v.21, n.12, pp.1797-1818

*ence of water billing to pay back the investments in structural interventions in the canal to increase water availability. Results were submitted to an economic analysis and several conclusions helped suggest effective solutions to be implemented.*

*Key-words: water resources management, linear programming, irrigated agriculture.*

### ***Water Use Conflicts In Baixada Campista, Northern Rio de Janeiro (I): Proposal Of Solutions And Linear Programming Analysis***

#### ***ABSTRACT***

*This paper aims to present an analysis of proposals for optimal water uses by irrigators when this resource is limited and is not sufficient to supply all the demands, increasing the chances of conflicts among water users. The case study deals with Coqueiros canal, part of a complex irrigation and drainage canal network located at Baixada Campista, in Northeastern Rio de Janeiro, Brazil, built between the 40's and 70's by DNOS, an extinct governmental department. A linear programming model was applied to obtain optimal results in available water allocation. The scenarios analyzed were proposed based on irrigators' water demand forecasts according to different market trends, agricultural practices, and discharge management. The case was mathematically described in a linear programming problem (LPP) and was also submitted to a verification of agricultural production behavior under the influ-*