

Análise Econômica Aplicada à Decisão sobre Alocação de Água entre os Usos Irrigação e Produção de Energia Elétrica: O Caso da Bacia do Rio Preto (DF/GO/MG)

Bruno Goulart de Freitas Machado

*Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL - Universidade de Brasília - UnB
brunogoulart@aneel.gov.br*

Oscar de Moraes Cordeiro Netto

*Universidade de Brasília – UnB
cordeiro@unb.br*

Recebido: 10/03/10 - revisado: 12/06/10 - aceito: 29/09/10

RESUMO

Este artigo tem o intuito de propor análise que possa servir de ferramenta para estudos de planejamento e de regulação do uso de recursos hídricos, notadamente em questões relativas à alocação da água em bases econômicas. Com efeito, dois importantes usos da água - irrigação e produção de energia elétrica – foram avaliados em um estudo de caso aplicado à bacia hidrográfica do rio Preto (DF/GO/MG). A técnica empregada para a valoração da água na irrigação foi o método da função de produção. Para a produção de energia elétrica, a estratégia de valoração econômica baseou-se em resultados de simulações do modelo de otimização utilizado no planejamento do setor elétrico brasileiro, o NEWAVE. A representação final do problema em sistema de rede fluxo corroborou para a constatação de que essa análise é diretamente influenciada pelas eficiências dos processos produtivos envolvidos e pela conjuntura macroeconômica da economia real. Não obstante, considera-se que o procedimento analítico adotado pode ser de grande valia para instituições responsáveis pela prática da gestão de recursos hídricos, uma vez que auxilia o estabelecimento de prioridades na alocação da água, maximizando o benefício econômico advindo de sua utilização.

Palavras-Chave: Análise Econômica, Alocação de Água, Irrigação e Geração de Energia Elétrica.

INTRODUÇÃO

A Política de Recursos Hídricos no Brasil foi instituída pela Lei nº. 9.433, de 8 de Janeiro de 1997. Essa norma regulamenta o que prevê o texto constitucional sobre a competência privativa do Estado em instituir o sistema nacional de gerenciamento de recursos hídricos e definir critérios para outorga de direitos de uso da água.

A referida lei estabelece os principais fundamentos para a gestão de recursos hídricos no país, dentre os quais: "... (i) a água é um recurso natural limitado, dotado de valor econômico e (ii) a gestão de recursos hídricos deve sempre proporcionar o uso múltiplo das águas...".

Embora a Lei não especifique quais práticas de gerenciamento que devam ser implementadas, segundo Porto e Lobato (2004), a consideração desses fundamentos pressupõe a adoção de moder-

nas práticas de gerenciamento de recursos naturais – incluindo-se, nessas, o manejo de recursos hídricos.

Segundo os citados autores, esse manejo costuma requerer a articulação de quatro mecanismos de gestão principais: (i) os tradicionais instrumentos de comando-e-controle, específicos do aparato institucional do Estado, que visam a assegurar as garantias estabelecidas na legislação; (ii) a descentralização da gestão por meio de mecanismos de responsabilização compartilhada entre o Estado e a sociedade civil organizada; (iii) a incorporação de instrumentos econômicos com vistas a compatibilizar o comportamento econômico das atividades produtivas aos requisitos de preservação ambiental e (iv) incentivos à adoção voluntária dos agentes econômicos às diretrizes ambientais, por meio da emissão de certificados de qualidade ambiental.

Uma das principais razões para a adoção de instrumentos econômicos, como ferramentas de suporte à gestão, mais especificamente na área de

recursos hídricos, é a possibilidade de esses instrumentos induzirem o mercado a internalizar os custos incorridos pela utilização da água nos processos produtivos da economia. Ademais, procura-se considerar, nesses custos, as características particulares da água, no que tange à sua variabilidade no espaço e no tempo, bem como a seus atributos de qualidade.

Nesse contexto, a avaliação econômica pode ser de grande utilidade ao processo decisório, pelo fato de poder agregar uma série de análises, dentre as quais se incluem a estimativa de demandas futuras, os estudos de viabilidade financeira, a valoração econômica de efeitos do projeto e a verificação de eficiência na alocação de recursos. Esse conjunto de análises, somado ao cabedal de conhecimento adquirido sobre os processos hidrológicos e ao ferramental analítico próprio do campo da engenharia, pode, segundo (Heinz *et al.*, 2007), proporcionar um significativo ganho em alternativas para a gestão e para a implementação de políticas públicas na área de recursos hídricos.

Com efeito, a complexidade envolvida em todo esse processo decisório leva à recorrência das metodologias calcadas em alguma racionalidade para que as resoluções atendam, da melhor forma possível, às expectativas dos vários segmentos da sociedade. Nesse sentido, o trato econômico da alocação de água visa a compatibilizar a utilização desse recurso com as atividades que agregam valor a esse insumo, de forma que possam ser priorizadas as alternativas de alocação que maximizem o produto interno líquido gerado com o uso da água.

É com esse enfoque que se propõe, neste trabalho, desenvolver uma abordagem que permita avaliar um estudo de caso em que há um contexto de conflito pela utilização da água entre dois importantes setores da economia – irrigação e geração de energia elétrica - e, dessa maneira, avaliar a aplicação de uma metodologia baseada em critérios econômicos para auxiliar o processo de tomada de decisão em casos análogos de gestão e regulação do uso da água em bacias hidrográficas.

MÉTODOS PARA A VALORAÇÃO ECONÔMICA DA ÁGUA

Segundo a classificação adotada por Mueller (2007), as técnicas de valoração econômica de benefícios e custos sobre recursos naturais - dentre as quais se inclui a água - podem ser agrupadas nas seguintes categorias: (i) técnicas que se valem dire-

tamente de preços e valores de mercado, ou que se apóiam nas mudanças de produtividade causadas pela alteração ambiental; (ii) métodos de mercados substitutos (métodos indiretos de valoração); e (iii) valoração direta por métodos de mercados construídos.

A primeira delas refere-se à hipótese de haver um mercado bem estabelecido para a tomada de preços. Essa assertiva requer a consideração dos pressupostos teóricos do funcionamento de mercados perfeitos, amplamente discutidos em livros-texto sobre microeconomia. O segundo tipo previsto de realidade econômica é aquela em que há um mercado, mas, no entanto, esse é tido como imperfeito, ou seja, não há condições plenas de competição e, por conseguinte, os preços não refletem a real disposição a pagar dos seus constituintes. No caso da terceira categoria, pode haver casos em que não haja qualquer mercado para valoração de insumos ou rendas, como ocorre em casos reais de estimativas dos benefícios da preservação ambiental, de recreação, ou danos decorrentes da degradação da qualidade da água.

Esses dois últimos tipos – mercados imperfeitos e ausência completa de mercado - são os mais presentes em projetos de valoração no contexto do planejamento em recursos hídricos (Young, 1996). Pelo fato de um método em especial – metodologia da função de produção - ser o que terá maior importância neste trabalho, optou-se por discuti-lo de forma mais específica a seguir.

A valoração direta por meio de mudanças de produtividade tem como prerrogativa principal o fato de a água constituir-se em insumo intermediário do processo de produção o que, por sua vez, relaciona-se com a premissa de que o seu uso se faz necessário em etapas anteriores à consecução do produto final.

Essa metodologia de valoração da água, considerando-a como um bem intermediário da etapa produtiva, é baseada na teoria do produtor. A sua construção analítica pressupõe o uso de uma função Z , tal que o nível de produção seja dado pela seguinte função - a derivação das equações a seguir baseia-se em Young (1996) e Seroa da Motta (2008):

$$Z = f(X_i, X_w) \quad (1)$$

em que X_i corresponde ao vetor de insumos necessários à produção de um bem qualquer e X_w é a quantidade de água requerida nesse processo.

Sendo p_z o preço do produto $Z = f(X_i, X_w)$, p_{xi} e p_{xw} os preços dos i insumos e o da água, respec-

tivamente, a função lucro π pode ser expressa pela seguinte relação:

$$\pi = p_z \times Z - \sum_{i \neq w} p_{X_i} \times X_i - p_{X_w} \times X_w \quad (2)$$

A teoria da produção mostra que o produtor ajusta o seu grau de utilização de cada insumo ao objetivo de maximizar o seu lucro, de forma que o valor da produtividade marginal de cada recurso se iguale ao seu preço. Assumindo-se também a hipótese de que os preços se mantêm constantes (a variação marginal de Z é suficientemente pequena em relação ao mercado do produto Z), então a condição de primeira ordem para maximização do lucro em relação a uma variação dos insumos pode ser expressa como:

$$\frac{\partial \pi}{\partial X_i} = p_z \times \frac{\partial Z}{\partial X_i} - p_{X_i} = 0 \quad (3)$$

Manipulação algébrica simples da Equação 3 leva à constatação de que, na condição de máximo lucro, o valor do produto marginal de cada insumo (VPM_i) é dado pelo seu respectivo produto marginal (Pmg_i) valorado pelo preço do bem produzido (Equação 4). Chama-se atenção ao fato de que o mesmo resultado seria obtido caso a derivação tivesse sido feita para o insumo água.

$$VPM_i = p_z \times Pmg_i \quad (4)$$

Um segundo postulado econômico – válido para as condições de perfeita concorrência – enuncia que o valor total de um produto (VTP_z) pode ser dividido segundo parcelas em que cada insumo é pago de acordo com a sua respectiva produtividade marginal. Assumindo as hipóteses estabelecidas nessa afirmativa como factíveis, estabelece-se, então, a seguinte equação:

$$VTP_z = \sum_{i \neq w} VPM_i \times X_i + VPM_w \times X_w \quad (5)$$

O valor da produtividade marginal da água (VPM_w) – preço por unidade de volume – pode ser isolada na Equação 5, de modo a se obter uma expressão para o valor da água, como um insumo do processo produtivo:

$$P_w = \frac{\left[(Z \times P_z) - \left(\sum_{i \neq w} P_{X_i} \times X_i \right) \right]}{X_w} \quad (6)$$

A formulação apresentada na Equação 6 recebe a denominação de *método do valor residual* ou *método da função de produção*. A utilização mais geral desse método, envolvendo a produção de múltiplos produtos e vários insumos, é conhecida como *método da variação da renda líquida* (Young, 1996). É importante frisar, com efeito, que, em consonância com a exposição matemática ora desenvolvida, o valor da água contido na Expressão 6 indica o peso que o insumo água tem no fator produtividade final de um processo produtivo, no qual a água seja um dos fatores componentes.

Young (1996) apresenta duas ressalvas quanto à utilização da formulação ora descrita. A primeira delas remete à dificuldade de se identificar e contabilizar a produtividade de todos os insumos que têm participação relevante no processo produtivo. Se houver omissão de um ou mais fatores, a produtividade do fator omitido será conseqüentemente atribuída ao valor do insumo objeto da análise, ou seja, haveria uma superestimativa para o valor da água. A segunda questão trata da dificuldade em se estabelecerem as características da função de produção, haja vista, por exemplo, o tradicional formato da função Cobb-Douglas, largamente empregada em livros-texto de microeconomia, cujos parâmetros são comumente estimados via estudos de regressão múltipla (econométricos), os quais, por sua vez, carecem de dados reais para tanto. Ademais, estimativas precisas sobre os níveis de produção associados a cada um dos fatores de uma função de produção consistem, também, em outra adversidade inerente a esse tipo de análise. Está-se sujeito, nesse caso, a observar super ou subestimativas do valor residual da água, dependendo da acurácia com que se mede o nível de produção para cada combinação inicial de insumos.

O MODELO MODSIM

O MODSIM é um aplicativo que usa um modelo de rede de fluxo de caráter geral e com amplo espectro de aplicações em recursos hídricos (Labadie *et al.*, 2000). O aplicativo é capaz de simular planos operacionais sujeitos a metas de níveis d'água em reservatórios, prioridades e limitações específicas. Uma de suas funções, que interessa diretamente à finalidade deste trabalho, refere-se à avaliação de compensações (*trade-offs*) entre usos conflitantes da água. O aplicativo realiza uma otimização em rede – via programação linear – para atender

metas operacionais realizadas de modo sequencial a cada intervalo de tempo.

O sistema de recursos hídricos é representado por meio de nós e arcos, em que arcos são conexões entre os nós e representam canais, trechos de rio, tubulações e outras estruturas semelhantes. Os nós, por sua vez, referem-se tanto a volumes armazenados em reservatórios quanto a confluências, pontos de desvio, de entrada e de demanda do sistema. Diversos nós e arcos artificiais são criados automaticamente pelo aplicativo, com vistas a assegurar o balanço de massa do sistema, assegurando que a rede tenha seu ciclo completamente fechado, condição essa requerida pelo algoritmo de solução do problema (Labadie *et al.*, 2000).

Com efeito, seu algoritmo de solução - denominado *out-of-kilter* - resolve um problema de otimização em uma rede de fluxo, para cada intervalo de tempo $t = 1, \dots, T$, da seguinte maneira (Azevedo *et al.*, 2002):

$$\text{Min} \sum_{k \in A} c_k q_k \quad (7)$$

Sujeito a

$$\sum_{k \in O_i} q_k - \sum_{j \in I_i} q_j = b_{it}(q) \quad \forall i \in N \quad (8)$$

$$l_{kt}(q) \leq q_k \leq u_{kt}(q) \quad \forall k \in A \quad (9)$$

onde N é o conjunto de todos os nós; A representa o conjunto de todos os arcos do problema, O_i o conjunto de todos os arcos com origem no nó i (arcos de defluências); I_i o conjunto de todos os arcos com término no nó i (arcos de afluências); b_{it} representa o ganho (positivo) ou a perda (negativo) do nó i no tempo t ; q_k é vazão no arco k ; c_k representa o custo, fator de ponderação ou prioridades de uso por unidade de vazão no arco k ; l_{kt} e u_{kt} são, respectivamente, as capacidades mínima e máxima de vazão no arco k , no instante de tempo t .

Baltar (2001) elaborou módulo de avaliação econômica que foi posteriormente incorporado ao aplicativo Aquanet, da Universidade de São Paulo (Porto *et al.* 2003). Esse módulo teve o intuito de constituir-se em uma ferramenta de auxílio à tomada de decisão em problemas relacionados ao aspecto quantitativo da alocação de recursos hídricos, notadamente em casos que envolvam a análise econômica de longo prazo. Sua formulação esteve fundamentada no fornecimento de curvas de benefícios marginais para os respectivos usos da água em análi-

se, de modo a permitir uma avaliação de eficiência em estudos de alocação.

O MODELO NEWAVE

O atual modelo de regulação do setor elétrico brasileiro determina que uma entidade – o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) – administre a geração de energia de cada usina que compõe o chamado Sistema Interligado Nacional (SIN). O SIN é o maior sistema de produção e transmissão de energia elétrica no Brasil, constituído por usinas térmicas e hidrelétricas, com forte predominância dessas últimas, e composto por múltiplos agentes e empresas do setor público e privado, presentes nas cinco grandes regiões do país. Apenas 3,4% da capacidade de produção de eletricidade do país encontra-se fora do SIN, em pequenos sistemas isolados, localizados, principalmente, na região amazônica (ONS, 2008a).

O ONS centraliza o despacho-ótimo de geração de cada usina utilizando, como ferramenta de auxílio à tomada de decisão, um modelo de otimização chamado NEWAVE (Modelo Estratégico de Geração Hidrotérmica a Subsistemas Interligados). Tal otimização é função do custo unitário do déficit de energia, do custo operativo das termelétricas disponíveis, das informações sobre a disponibilidade hídrica atual (volume acumulado nos reservatórios) e das afluências e demandas previstas futuramente (Moreira *et al.*, 2003).

Os principais desafios impostos à operação de sistemas hidrotérmicos são a aleatoriedade natural do fenômeno hidrológico e o limite físico da capacidade de armazenamento dos reservatórios. Somam-se a essas dificuldades a característica não-linear da função de produção de energia em hidrelétricas e a grande dimensão do problema de otimização, o qual resulta do elevado número de usinas e possíveis estados de armazenamento de seus respectivos reservatórios (Pereira e Pinto, 1985).

A questão de usar a água hoje, ou estocá-la para o futuro, implica em um *trade-off* entre os custos imediato e futuro de operação do sistema. Tal relação é ilustrada na Figura 1.

O ponto ótimo de utilização da água estocada nos reservatórios corresponde àquele que minimiza o somatório das funções de custo imediato (*FCI*) e futuro da operação (*FCF*). Matematicamente, esse ponto representa a igualdade entre as derivadas dessas duas funções com respeito à quantida-

de de água armazenada. A essas derivadas dá-se o nome de *valor da água* (veja Figura 1).

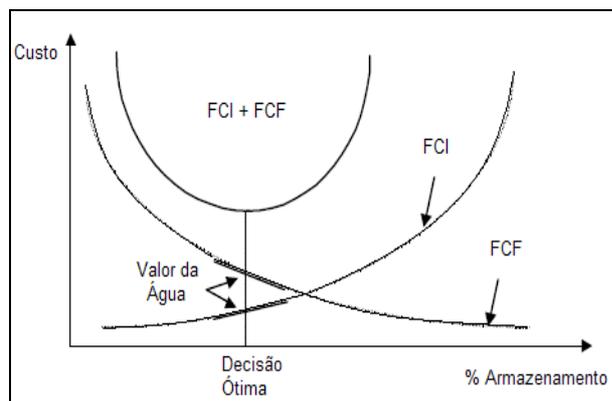


Figura 1 - Decisão Ótima de Operação de Sistemas Hidrotérmicos

É importante ressaltar que o valor da água aqui definido, embora represente, da mesma forma como na irrigação, um valor monetário atribuído à água enquanto insumo do processo produtivo, sua forma de cálculo difere-se conceitualmente da primeira. No caso da energia elétrica, o valor da água representa o custo de oportunidade em se utilizar a água estocada nos reservatórios, custo esse mensurado a partir do combustível empregado na geração termelétrica. No caso da irrigação, por outro lado, o valor da água é contabilizado a partir da mensuração indireta do ganho de produtividade que a água traz ao processo de produção de grãos, subtraídos, nesse cálculo, todos os outros insumos e fatores intervenientes a esse processo.

O objetivo da operação é, portanto, minimizar o somatório dos custos imediatos e futuros. Essa soma compõe a função-objetivo desse problema, o qual também está sujeito a cinco restrições principais (Pereira e Pinto, 1985; Pereira, 1989):

$$F_t(s_t, q_{t-1}) = E_{q_t | q_{t-1}} \left\{ \underset{r_t}{\text{Min}} [f_t(s_t, q_t, r_t) + F_{t+1}(s_{t+1}, q_t)] \right\} \quad (10)$$

Sujeito a

$$s_{t+1} = s_t + q_t + C(r_t + l_t) - e_t(s_t) - d_t \quad (11)$$

$$s_{t+1, \min} \leq s_{t+1} \leq s_{t+1, \max} \quad (12)$$

$$r_{t, \min} \leq r_t \leq r_{t, \max} \quad (13)$$

$$g_{t, \min} \leq g_t \leq g_{t, \max} \quad (14)$$

$$\sum_k^{I+J} g_t(k) + y_t = d_t, \quad \forall k \in (1, \dots, I+J) \quad (15)$$

onde $f_t(s_t, q_t, r_t)$ é a função de custo imediato e $F_{t+1}(s_{t+1}, q_t)$ a de custo futuro; s_t representa o volume armazenado no início da análise; E é o valor esperado para a afluência q_t , dado que se dispõe do valor observado no passo de tempo anterior q_{t-1} ; l_t compõe o vetor de vertimentos de cada usina hidrelétrica; C é a matriz de conectividade (em que $C_{j,k} = 1(-1)$ quando o reservatório j recebe (libera) água de (para) o reservatório k); e_t é o vetor de perdas por evaporação; d_t representa as demandas requeridas ao sistema; $s_{t+1, \min}$ e $s_{t+1, \max}$ são os vetores de armazenamento mínimo e máximo respectivamente; $r_{t, \min}$ e $r_{t, \max}$ correspondem aos vetores de capacidade mínima e máxima de engolimento das turbinas respectivamente; r_t é o vetor de vazão turbinada em cada usina; $g_t(k)$ indica a energia gerada na k -ésima unidade de produção (térmica ou hidráulica); I e J são, respectivamente, o número total de térmicas e hidrelétricas existentes; e y_t representa o vetor que contabiliza o déficit de energia.

CASO DE ESTUDO: BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO PRETO (DF/GO/MG)

O rio Preto nasce próximo à cidade de Formosa, no Estado de Goiás, e constitui a divisa leste entre o Distrito Federal e o Estado de Goiás. Esse rio é afluente do rio Paracatu e compõe uma das sub-bacias da região hidrográfica do rio São Francisco. Desde a nascente até a foz, são cerca de 400 km de extensão (SEINFRA, 2006).

Na Figura 2, mostra-se a divisão política da bacia do rio Preto, notadamente, as parcelas territoriais referentes às três unidades da Federação que compõem a totalidade de sua área de drenagem.

A atividade antrópica na região é basicamente de natureza agrícola, sendo que essa se constitui na principal demanda por água na região, majoritariamente caracterizada por irrigação sob pivô-central a partir de mananciais superficiais (Sano *et al.* 2002). Conflitos pontuais entre agricultores irrigantes são registrados, especialmente, no período de estiagem e na região mais a montante da bacia, onde há uso expressivo de pivôs-centrais, os quais reduzem consideravelmente a disponibilidade de água (SEINFRA, 2006).

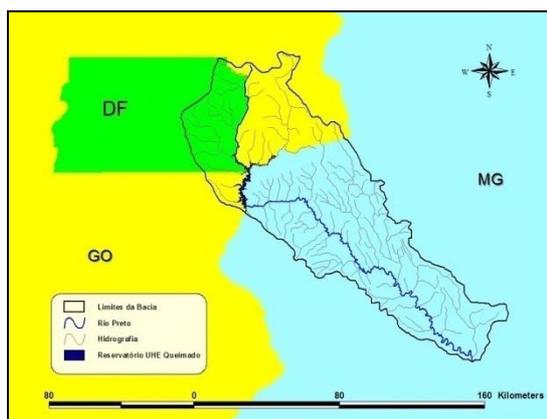


Figura 2 – Mapa Hidrográfico-Político da Bacia do Rio Preto

A demanda hídrica da bacia do rio Preto apresenta ainda outro importante uso da água, a geração de energia elétrica pela usina hidrelétrica (UHE) de Queimado – operada pelo consórcio constituído pelas Companhias Elétrica de Brasília (CEB) e Energética de Minas Gerais (CEMIG). A potência instalada da UHE Queimado é de 105 MW. No local do barramento, o rio Preto possui área de drenagem total de 3.773 km² (SEINFRA, 2006).

Objetivo e Metodologia

O objetivo do presente trabalho foi analisar a alocação da água entre dois importantes usos – irrigação e hidroeletricidade – baseando-se em fundamentos microeconômicos e, com efeito, contribuir em aspectos relacionados à regulação e ao planejamento do uso de recursos hídricos. Em face dos objetivos expostos, optou-se pela escolha da bacia do rio Preto como caso de estudo para a presente análise.

Em linhas gerais, a abordagem metodológica adotada envolveu a consecução de quatro etapas principais: (i) construção de curva de demanda econômica pela água utilizada na irrigação; (ii) construção de curva de demanda econômica pela água utilizada na produção de energia elétrica; (iii) representação, simulação e otimização da operação do sistema hídrico objeto do estudo de alocação econômica; e (iv) avaliação dos resultados e conclusões sobre a metodologia proposta.

Para consecução da primeira etapa, adotou-se o *método da função de produção*, descrito em maior detalhe no Item anterior deste artigo. No caso da

estimativa do valor da água para a produção de energia elétrica, optou-se por utilizar resultados de simulações do modelo NEWAVE.

A terceira etapa foi dedicada à análise do estudo de caso, a partir da representação do sistema hídrico da bacia, contando com as respectivas informações sobre as demandas econômicas referentes à irrigação e à produção de energia elétrica. Essa representação foi feita em um aplicativo que utiliza modelo matemático de rede-de-fluxo, baseado no MODSIM, o Aquanet.

A quarta e última etapa correspondeu à análise dos resultados do procedimento sugerido para avaliação econômica de alocação. Uma análise geral sobre a abrangência do procedimento adotado foi realizada, assim como uma análise específica envolvendo as características econômicas das duas demandas por água, estudadas para a região do rio Preto. Ao final, relatam-se alguns desafios impostos à generalização do problema, bem como alternativas para o aprimoramento do procedimento analítico proposto.

Demanda Econômica pela Irrigação

Nesta seção, buscar-se-á apresentar, de forma sucinta, as etapas referentes à construção da curva de demanda pela água para a irrigação na bacia do rio Preto. A descrição pormenorizada de todo procedimento seguido para a consecução desse objetivo pode ser consultada em Machado e Cordeiro Netto (2009a).

Em suma, o processo supracitado seguiu a seguinte seqüência de atividades: (i) identificação e delimitação dos pivôs-centrais presentes na bacia via técnicas de geoprocessamento; (ii) pesquisa sobre a dinâmica da produção agrícola no rio Preto, com vistas à caracterização de um ou mais perfis predominantes de agricultor presentes na região; (iii) modelagem estatística da produtividade agrícola; (iv) levantamento de valores médios de variáveis econômicas relacionadas aos custos da produção e aos preços de mercado dos principais produtos agrícolas envolvidos; (v) estimativa do consumo médio de água na irrigação e (vi) confecção de curvas de demanda pela água para a irrigação no rio Preto.

Como resultado da primeira atividade, foram identificados 207 pivôs-centrais ao longo de toda extensão da bacia, o que resultou em um montante de 17.620 hectares de terras irrigadas contabilizados. Na Figura 3, mostra-se a disposição espacial de todos esses pivôs-centrais.

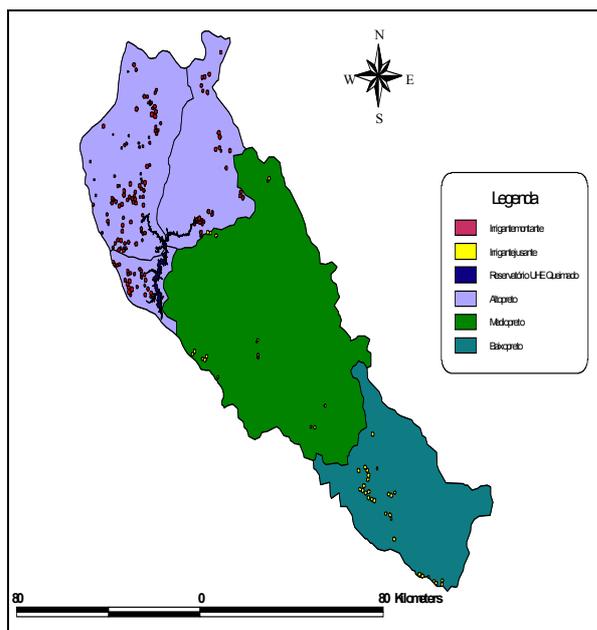


Figura 3 – Localização dos Pivôs-Centrais

No que diz respeito à dinâmica produtiva da agricultura no rio Preto, tendo em vista a complexidade de se alcançarem todas as possibilidades produtivas existentes na região de estudo, algumas simplificações foram implementadas com o objetivo de se buscar explicar um comportamento médio do agricultor da bacia do rio Preto. Por meio de discussões com técnicos da Empresa de Assistência Técnica e Rural do Distrito Federal (EMATER/DF), identificaram-se os principais ciclos produtivos da região, que se acham representados esquematicamente na Figura 4.

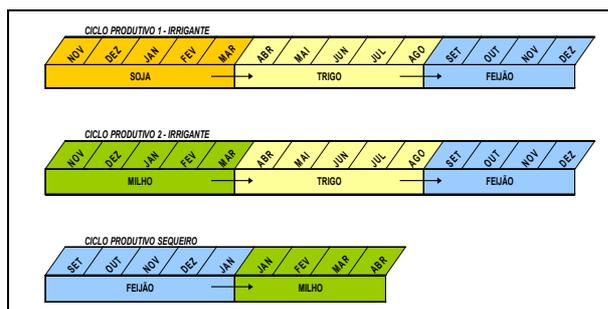


Figura 4 – Calendário Produtivo de Grãos

A modelagem estatística da produtividade agrícola adotou, como premissa principal, a aderência desse parâmetro à distribuição de Gauss, apoiando-se em trabalhos apresentados por Just e Wenin-

ger (1999) e Ker e Coble (2003). Na Figura 5, em caráter exemplificativo, mostra-se o resultado obtido para o milho de sequeiro.

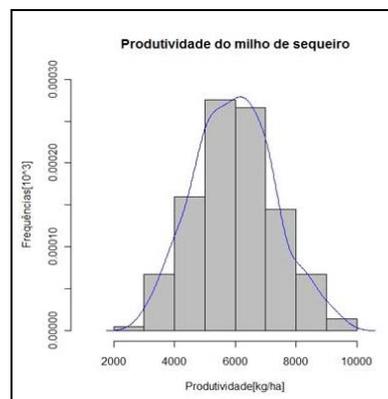


Figura 5 – Variabilidade da Produtividade Agrícola

Em relação ao levantamento feito para a apreciação dos preços médios de mercado dos produtos agrícolas, registra-se que foram utilizados dados provenientes de pesquisa de mercado feita junto à Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB). Maiores detalhes sobre esse procedimento podem ser obtidos em Machado e Cordeiro Netto (2009a).

Em relação aos custos de produção, esses foram diferenciados em termos de cultura e modalidade de produção. Para tanto, adotaram-se planilhas de custos disponibilizadas no sítio da internet da EMATER/DF. Exceção é feita apenas ao trigo, para o qual se utilizaram informações da CONAB.

Também, a partir do arranjo produtivo concebido para a bacia do rio Preto (Figura 4), procurou-se inferir qual seria o volume médio captado nos mananciais da bacia para a produção irrigada, em especial aquele feito por meio de pivôs-centrais. O resultado dessa análise está apresentado na Figura 6.

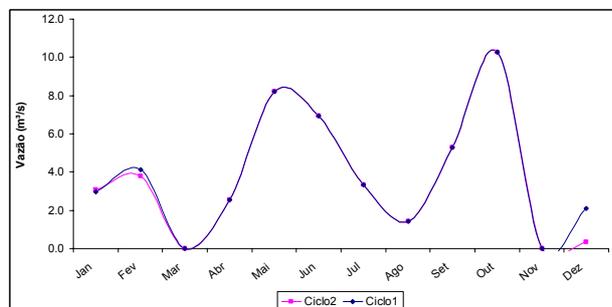


Figura 6 – Irrigação por Pivô-Central no Rio Preto

O primeiro passo para a confecção da curva de demanda foi efetuar o cálculo da renda bruta e do custo total de cada célula produtiva, entendida aqui como sendo a área delimitada por um pivô-central. Uma vez contabilizados esses dois fatores, a renda líquida da irrigação é obtida efetuando-se a diferença entre eles. De maneira análoga, pode-se, também, contabilizar quais seriam os custos e a renda percebida nessa mesma área de plantio, só que para o caso (hipotético) em que essa fosse destinada a um sistema de produção em sequeiro.

Com efeito, o valor da água é derivado utilizando-se a Equação 6. Tendo em vista o fato de a produtividade agrícola ter sido considerada como uma variável aleatória, aderente à distribuição Normal, os resultados obtidos para o valor da água também apresentaram uma variabilidade estatística. Como exemplo, na Figura 7, mostra-se a variação do valor da água calculado em toda bacia para o ciclo 1 de produção, bem como algumas estatísticas relevantes.

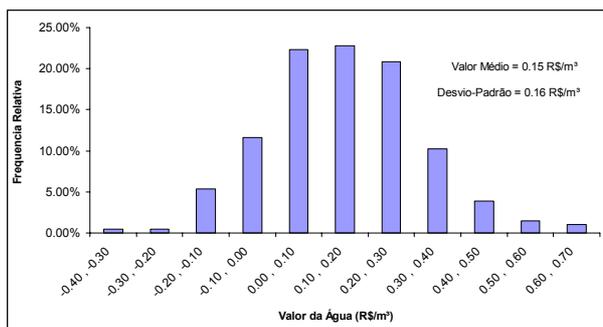


Figura 7 – Valor da Água para Irrigação - Ciclo 1

A partir desses últimos resultados, pôde-se construir uma curva de demanda pela água a partir da contabilização do benefício incremental que a água proporcionaria à próxima célula de irrigação. Esse benefício apresenta uma tendência decrescente, na medida em que o retorno marginal líquido decai quanto mais unidades do insumo água são consumidas. Com efeito, os dados de renda líquida, calculados para todas as células produtivas, foram ordenados de forma decrescente e, a partir dessa ordenação, procedeu-se ao cálculo da renda acumulada em toda bacia, que nada mais é do que o somatório desses valores de renda decrescente, armazenados em um novo vetor de dados. De forma análoga, ordenou-se o consumo d'água de cada célula produtiva em ordem decrescente e, após isso, pro-

cedeu-se à soma desses valores, gerando um vetor adicional contendo volumes de água acumulados.

A divisão do vetor de renda acumulada pelo vetor de volume acumulado resultou no benefício marginal da água para a irrigação. Todos esses valores, dispostos em um gráfico, correspondem à curva de demanda pela água utilizada para a irrigação. Na Figura 8, mostram-se os resultados alcançados para os dois ciclos produtivos estudados.

As curvas expostas nessa figura, embora contenham o formato esperado de uma função de demanda clássica, contêm algumas simplificações importantes em relação às premissas constantes do método da função de produção (Equação 6). Nesse caso, a função de produção Z , que seria uma função (não-linear) de vários insumos, incluindo a água, é substituída por uma constante: a produtividade (produção por hectare), fazendo com que a curva de demanda torne-se linear. Não obstante, o comportamento não-linear disposto nesse gráfico é essencialmente resultado das diferentes produtividades utilizadas para cada agricultor, via distribuição normal.

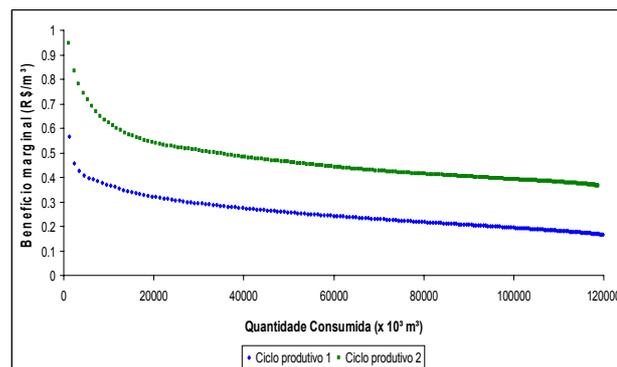


Figura 8 – Curvas de Demanda pela Água para a Irrigação

Outrossim, a curva de demanda agregada foi obtida a partir da soma das curvas de demanda de cada agricultor, ordenadas pela produtividade de forma decrescente. Com efeito, assume-se, implicitamente, que a alocação de água entre os irrigantes é feita de forma eficiente economicamente, ou seja, cada m^3 disponível será alocado primeiro para o agricultor que tem maior produtividade e, depois, para os que têm produtividade menor, o que, em realidade, dificilmente acontece na prática. De fato, acredita-se que esse tipo de alocação só ocorrerá se houver intervenção regulatória, ou seja, se a outorga (e fiscalização) assim o exigir ou se houver um mer-

cado de água estabelecido com os devidos sinais econômicos embutidos.

Demanda Econômica para a Energia Elétrica

A produção de energia elétrica na usina hidrelétrica de Queimado consiste em um segundo uso importante para a água na bacia do rio Preto. Essa usina está inserida no Sistema Interligado Nacional e, portanto, integra um dos sub-mercados de energia elétrica do país. A formação de preços nesses sub-mercados se dá por meio de simulações do modelo NEWAVE. De acordo com a metodologia desse modelo, os custos marginais de operação consistem em uma boa referência para o valor da água, uma vez que os mesmos refletem o custo de oportunidade de se utilizar a água estocada nos reservatórios das usinas hidrelétricas em detrimento do acionamento de unidades térmicas, essa análise sendo feita dentro do horizonte de planejamento do modelo, que é de cinco anos.

Contato junto ao ONS foi feito com intuito de adquirir os resultados de uma simulação corriqueira do modelo NEWAVE. Os resultados dessas simulações são apresentados em termos de Custo Marginal de Operação (CMO) e de Energia Natural Afluente (ENA) a cada subsistema. A ENA de um subsistema é o somatório do produto entre a vazão afluente e a produtibilidade acumulada de uma cascata de usinas, essa última entendida como sendo o conjunto de aproveitamentos hidrelétricos pertencentes às bacias hidrográficas que compõem esse mesmo subsistema. O parâmetro CMO exprime o custo incremental da operação do sistema associado a uma variação marginal de carga (demanda de energia) do mesmo (ONS, 2008b).

Uma ressalva quanto ao uso direto dos resultados do NEWAVE diz respeito ao fato de seu algoritmo de otimização não contemplar uma solução para cada usina individualmente (Pereira e Pinto, 1985). A convergência do modelo se dá em termos de cada um dos quatro grandes sub-sistemas (reservatórios equivalentes de energia), o que dificulta a validade de transposição direta dos resultados para casos mais específicos como o ora proposto.

Todavia, o fato de a UHE Queimado estar conectada ao SIN significa que o montante de energia produzida nessa usina, a cada instante, é determinado pelo planejamento realizado no âmbito do ONS, o qual avalia a operação e a confiabilidade do sistema como um todo. Assim, considera-se que, embora o regime hidrológico e a magnitude das vazões em Queimado possam diferenciar-se de ou-

tras bacias e regiões do Brasil, a sinergia causada pela interligação e centralização da operação de todo sistema elétrico brasileiro faz com que a energia produzida nessa usina possa ser valorada pelo custo marginal do sub-sistema Nordeste (que engloba o rio São Francisco, do qual o rio Preto é afluente), sem que, para isso, incorra-se em grande prejuízo em termos de consistência na avaliação.

Em realidade, sob o ponto de vista do sistema de transmissão, a UHE Queimado está conectada ao sub-sistema Sudeste/Centro-Oeste (ONS, 2008a). Todavia, a validade do uso dos resultados do sub-sistema Nordeste é respaldada pelas seguintes análises realizadas (Machado e Cordeiro Netto, 2009b): (i) a correlação das vazões afluentes à UHE Queimado com o parâmetro ENA da região Nordeste é substancialmente mais expressiva que a mesma relação verificada para o sub-sistema Sudeste/Centro-Oeste; (ii) os custos marginais de operação médios entre os sub-sistemas Sudeste e Nordeste, ao longo do histórico simulado (Figura 9), não apresentam diferenças significativas.

Essa última constatação provém do fato de haver intercâmbio de energia entre essas regiões. Essa compensação energética faz com o que o custo marginal de operação em qualquer sub-sistema seja igual ao valor do incremento de energia produzido na próxima usina (hidráulica ou térmica) mais barata, pertencente a qualquer um deles. A diferenciação observada na Figura 9, em alguns períodos, deve-se à limitação física de transporte dessas linhas de transmissão responsáveis pelo provimento do fluxo energético compensatório entre os sub-sistemas.

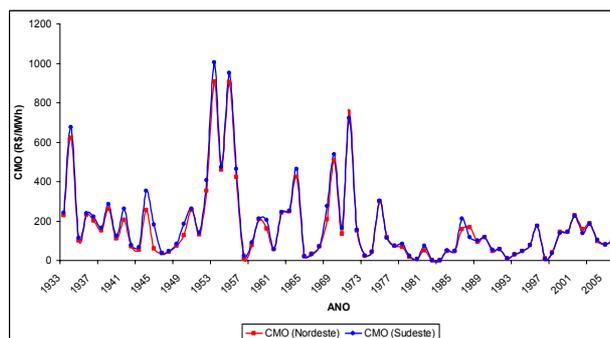


Figura 9 – Comparação entre CMOs

Com efeito, utilizaram-se integralmente os resultados da simulação do NEWAVE para a região Nordeste, como sendo referências adequadas para o valor da água turbinada na UHE Queimado. Ainda

sob esse aspecto, optou-se por estabelecer duas vertentes para o prosseguimento do cálculo do valor da água na geração hidrelétrica. A primeira delas envolve a consideração de todas as usinas que compõem a cascata do rio São Francisco – da qual a UHE Queimado faz parte - na análise do uso da água para a produção de energia no âmbito do rio Preto. Por questões de praticidade, denominou-se essa vertente de “caso 1”. A outra vertente adotada para a análise econômica do valor da água para a geração de energia foi a de se considerar apenas a usina de Queimado, descartando-se as demais usinas de jusante. Nessa vertente, à qual se atribuiu a denominação de “caso 2”, apenas a produtibilidade de Queimado foi considerada quando da confecção da segunda curva de demanda.

A distribuição empírica de frequências do valor da água para o segundo caso pode ser conferida na Figura 10. A curva de demanda para o uso da água na geração de energia elétrica, sob as hipóteses estabelecidas no segundo caso, é disposta na Figura 11. Maiores detalhes sobre critérios de conversão de unidades e premissas adotadas na confecção de curvas similares, assim como os gráficos resultantes do primeiro cenário, podem ser consultados em Machado e Cordeiro Netto (2009b).

Na Figura 11, a maior dispersão de dados verificada para o intervalo de vazões menores de 60 m³/s pode ser explicada pelo intercâmbio de energia que há entre os subsistemas do SIN, o qual é tanto mais significativo quanto menores forem as aflúncias a um subsistema. Outrossim, análise a que se procedeu sobre essa questão em Machado e Cordeiro Netto (2009b) mostrou grande fluxo de energia da região Sudeste para a Nordeste, o que explica a maior variabilidade dos valores de CMO em Queimado, especialmente nos períodos de estiagem.

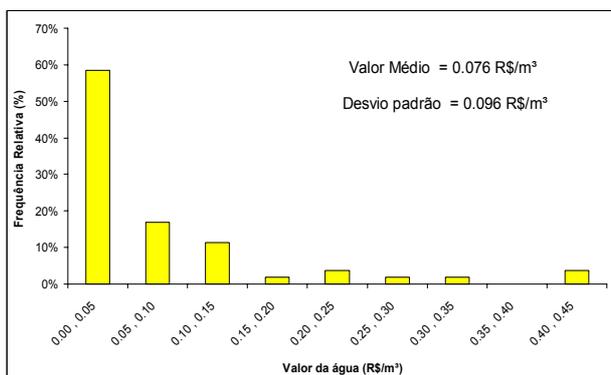


Figura 10 - Valor da Água para a Energia Elétrica – Caso 2

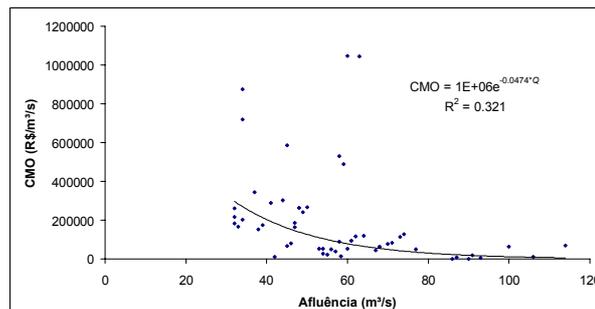


Figura 11 – CMO em Termos da Afluência – Caso 2

Análise de Alocação da Água no rio Preto

Como última etapa analítica do presente trabalho, propôs-se efetuar uma análise de alocação da água aplicada à bacia do rio Preto, mediante utilização do módulo de alocação econômica desenvolvido por Baltar (2001), o qual foi posteriormente agregado ao aplicativo Aquanet® (Porto *et al.* 2003).

Antes de proceder à construção de cenários de alocação da água na bacia do rio Preto, julgou-se importante apreciar as quatro curvas econômicas construídas - associadas aos dois usos em questão - em um mesmo gráfico, no qual elas pudessem ser confrontadas sob um mesmo patamar de vazões (Figura 12). Nesse sentido, à dispersão de pontos de cada uma delas foi ajustado um modelo de regressão estatística que mantivesse o caráter assintótico e decrescente esperado de uma curva clássica de demanda. O modelo escolhido, em ambos os casos, foi o de uma função exponencial de formato $y = Ce^{kx}$, em que se C e k são parâmetros estimados na análise de regressão.

Em relação à irrigação, sabe-se, da exposição feita até aqui, que a principal diferenciação entre os dois ciclos estudados corresponde aos parâmetros produtividade, valores de mercado de insumos e preços dos produtos agrícolas. Esses, por sua vez, como se pode notar na Figura 12, têm uma importante influência sobre o valor da água utilizada para a irrigação. Como primeira conclusão, pode-se inferir que a alteração dessas variáveis implica em diferenças importantes para os benefícios marginais computados.

De forma análoga, a diferença de patamar observada entre as duas curvas de energia elétrica na Figura 12 ressalta uma sensibilidade muito importante em relação à produtibilidade de cada usina. Basicamente, o que diferenciou os dois casos avaliados foi o ganho de escala do conjunto das usinas do São Francisco em relação a Queimado isoladamente.

Não obstante, esperar-se-iam diferenças significativas se a mesma comparação fosse feita entre pares de usinas, devido a grandes diferenças que há nos valores de produtibilidades (eficiência na conversão de água em energia) de cada planta hidrelétrica (vide ONS, 2008b).

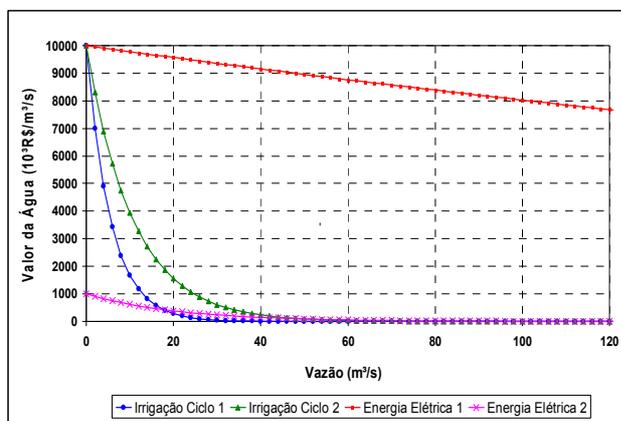


Figura 12 – Curvas de Demanda pela água no rio Preto

A última etapa analítica consistiu em se construir cenários de alocação no rio Preto, com vistas à avaliação e à contabilização dos efeitos econômicos oriundos da adoção das diferentes curvas às demandas caracterizadas nessa bacia hidrográfica. Nesse sentido, representou-se o sistema hídrico da bacia do rio Preto em uma rede de fluxo, composta por nós e arcos, em consonância com a arquitetura usual dos modelos MODSIM e Aquanet. Os irrigantes localizados a montante de Queimado foram agrupados em uma demanda única, de magnitude igual ao somatório dos seus respectivos consumos individuais. De forma análoga, foi também criada uma demanda para os irrigantes localizados a jusante. A configuração dessa bacia em uma rede de fluxo é mostrada na Figura 13.

Como informações de entrada para alimentar o aplicativo de rede de fluxo, utilizaram-se informações disponíveis nas seguintes referências: Eletrobrás (2008), ONS (2004) e CEMIG (2008). A taxa de desconto sobre o capital foi fixada em 12% ao ano e adotou-se uma tolerância de 5% sobre as metas de consumo (demandas). A simulação levou em conta as afluições dispostas em ONS (2008a), cujo período de extensão vai de 1931 a 2006. Os valores dos benefícios econômicos são contabilizados em cada instante da série histórica simulada (cuja base é mensal) e trazidos para um instante

único de comparação temporal (normalmente o presente), a partir da taxa de desconto especificada.

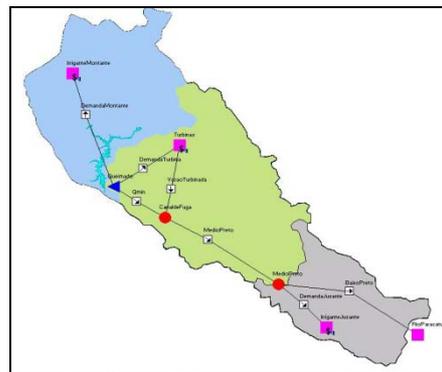


Figura 13 – Rede de Fluxo da bacia do rio Preto

Foram considerados três casos de simulação. No primeiro deles, a curva de benefício marginal referente ao Ciclo 2 de produção a montante (nó *Irrigante Montante*) foi atribuída à demanda para a irrigação. Já para os irrigantes a jusante (nó *Irrigante Jusante*), atribuiu-se a curva do Ciclo 1. Em relação à energia elétrica, associou-se a curva de número um – a de maior valor agregado – à água turbinada.

A segunda simulação adotou a troca das curvas de irrigação entre suas respectivas demandas e, quanto à energia elétrica, também se alterou a curva de número um para a de número dois.

O último cenário manteve a curva de número 2 para a energia elétrica, trocando-se, novamente, apenas as curvas entre os irrigantes, com intuito de aferir a sensibilidade do critério alocativo apenas entre os agricultores.

Na Tabela 1, apresentam-se, de forma resumida, os resultados obtidos para os três casos e, no segundo quadro, mostram-se os benefícios totais de cada cenário trazidos para o mesmo instante de tempo inicial de análise.

Tabela 1 – Resultados dos Cenários Analisados

Demanda	Frequencia abaixo da demanda (%)			Benefício anual médio (10³R\$ / 10³m³)		
	Cen. 1	Cen. 2	Cen. 3	Cen. 1	Cen. 2	Cen. 3
Irrigante Jusante	0,0	0,0	0,0	3,203	3,467	3,203
Irrigante Montante	24,45	0,11	0,11	3,272	2,713	3,159
Queimado	28,84	28,84	28,84	3,642	0,178	0,237

Tabela 2 – Benefício Total de Cada Demanda

Demanda	Valor Presente Líquido (10³R\$)		
	Cen.1	Cen.2	Cen.3
Irrigante Jusante	1.004.851	1.087.967	1.004.851
Irrigante Montante	1.581.261	1.915.108	2.230.268
Queimado	33.919.970	1.602.964	1.602.964

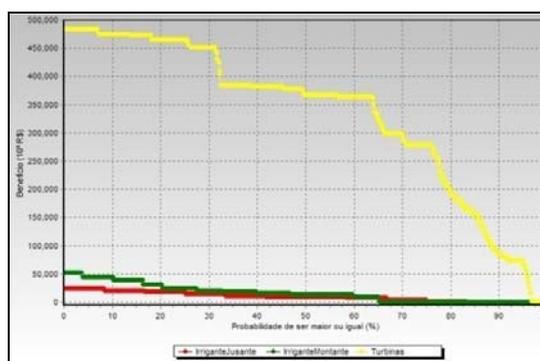
Análise dos Resultados

A análise das informações dispostas na Tabela 1 mostra que, em consonância com as curvas econômicas levantadas, houve forte disputa pela água no primeiro caso de simulação, notadamente em relação aos irrigantes localizados a montante do lago de Queimado e a produção de energia nessa usina. Esses dois usuários apresentaram déficits importantes no atendimento de suas respectivas demandas (25% do tempo para a irrigação e 29% para a energia elétrica).

Esses déficits representam, com efeito, a percentagem do tempo em que não foi possível atender à demanda estipulada em cada um dos três usuários, a partir das prioridades de alocação computadas automaticamente pela rotina de otimização. Não obstante, cabe também ressaltar que o motivo de a frequência de não-atendimento à demanda ter sido igual em todos os cenários para a usina de Queimado está associado ao fato de que essa foi computada como sendo a média da vazão turbinada desde o início de sua operação (CEMIG, 2008) e, portanto, em razão dessa demanda ser significativa em relação à flutuação das vazões em Queimado, os déficits computados refletem períodos de baixa afluência ao seu reservatório, não tendo, assim, qualquer relação com a prioridade de alocação da água definida na bacia nesses instantes de tempo.

No que tange aos aspectos econômicos, nota-se que a energia elétrica obteve o maior benefício relativo (R\$/m³) médio entre as três demandas analisadas, bem como o maior valor presente líquido, quando se confrontam os números do primeiro cenário. Esses benefícios refletem a média aritmética, ao longo do histórico simulado, dos benefícios econômicos percebidos em cada mês, estes divididos pela quantidade de água consumida nesse mesmo intervalo de tempo. Dessa forma, tal resultado reflete, em suma, a prioridade de alocação associada à

curva 1 de energia nesse cenário, uma vez que, em consonância com o apresentado na Figura 12, ela é a curva que apresenta o maior benefício marginal para quaisquer faixas de vazões observadas no rio Preto. Na Figura 14, em caráter ilustrativo da presente exposição, mostram-se as curvas de permanência para o benefício econômico médio auferido pelos usuários ao longo do primeiro cenário simulado.



**Figura 14 - Benefícios das demandas no rio Preto
Cenário 1**

Comparando-se os resultados do segundo cenário em relação ao primeiro, infere-se que houve uma queda significativa da renda auferida pela usina de Queimado – 95% em termos relativos. Com efeito, constata-se que há grande sensibilidade no resultado da análise quando se pressupõe o computo do benefício econômico advindo da cascata de usinas que compõem a macro-bacia em análise (rio São Francisco), visando a estabelecer critérios de alocação da água. No caso mais específico da agricultura, nota-se que os déficits percebidos pelos irrigantes a montante no primeiro caso praticamente inexistem nos segundo e terceiro cenários, fato esse que provém, também, da atribuição da curva 2 de energia a Queimado – o que muda a ordem de priorização de alocação na bacia.

Na Figura 15, dispõem-se os benefícios econômicos entre as três demandas para o segundo cenário de simulação.

Ao se comparar esse resultado com o primeiro caso, nota-se importante diferença entre os patamares de benefício econômico auferidos pela usina quando a mesma é avaliada isoladamente ou em conjunto com as demais hidrelétricas situadas a jusante. Também, nesse caso, embora os agricultores a montante tenham tido mais água à sua disposição em relação à primeira simulação, o fato de a eles ter sido atribuída uma curva de menor benefício mar-

ginal fez com que os seus ganhos sofressem uma diminuição, tanto em termos relativos (vide Tabela 1), quanto em termos absolutos (vide Tabela 2 e Figuras 14 e 15).

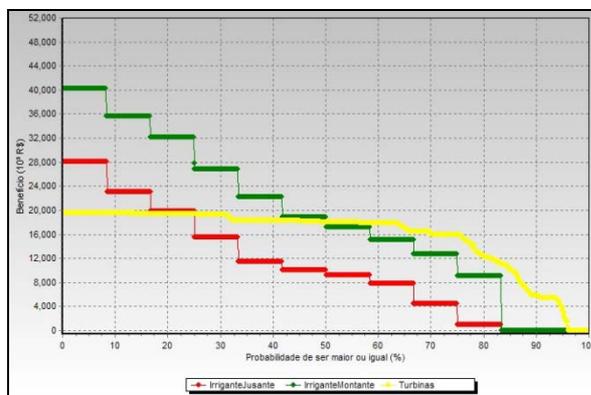


Figura 15 - Benefícios das demandas no rio Preto
Cenário 2

Essa mesma mudança de curvas entre os irrigantes na segunda simulação, por sua vez, fez com que os benefícios econômicos para os agricultores a jusante aumentassem em relação ao primeiro cenário. Com efeito, essa sensibilidade entre as duas curvas de irrigação pode ser melhor analisada comparando-se os resultados da Figura 16 com as permanências já disponibilizadas na Figura 15.

É interessante notar, portanto, que, nesse último caso, houve incremento das distâncias ente as duas curvas de permanência de benefício dos irrigantes em relação ao segundo cenário sendo que, em termos médios, isso representou aumento de 16% para aqueles localizados a montante e diminuição de cerca de 8% para os posicionados a jusante.

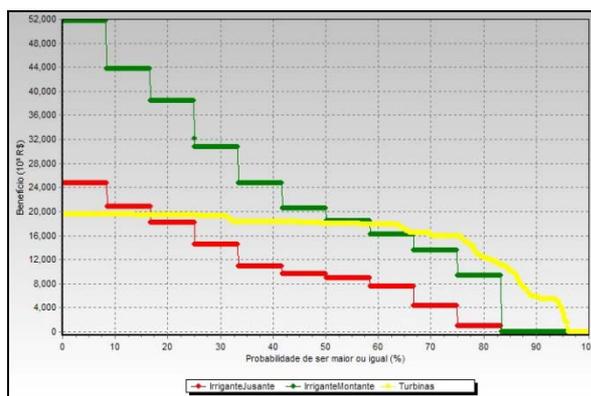


Figura 16 - Benefícios das demandas no rio Preto
Cenário 3

CONCLUSÕES

Considera-se importante destacar, primeiramente, que o procedimento analítico desenvolvido e adotado, assim como os resultados apresentados, mostraram a pertinência de se estabelecerem critérios regulatórios baseados na racionalidade econômica em questões envolvendo alocação de recursos hídricos. A análise de sensibilidade desenvolvida mostrou que os benefícios/prejuízos auferidos pelos agentes usuários, na bacia estudada, podem ser de grande monta, a depender da curva de demanda escolhida para compor cada uma das demandas envolvidas. Essa última constatação e, ademais, as simplificações metodológicas adotadas ao longo deste trabalho, expõem o grande desafio conceitual e metodológico envolvido no trato econômico da água, notadamente no que diz respeito à construção de curvas de demanda representativas dos diferentes usos e usuários. Em contrapartida, a despeito das limitações expostas, acredita-se, terem sido alcançadas algumas contribuições importantes nesse sentido no presente estudo.

A valoração econômica da água, além de ser um fundamento previsto na legislação brasileira, é um instrumento importante à eficácia dos modelos de gestão de recursos hídricos. Todavia, tendo em vista a complexidade associada ao uso desse recurso natural, envolvendo aspectos que vão desde sua ocorrência estocástica até a diversidade de fatores intervenientes em suas características física, química e biológica, não é trivial a adoção de mecanismos econômicos para o gerenciamento da água. Somam-se a esses aspectos fatores de cunho político e institucional, além da multiplicidade de objetivos em torno dos múltiplos usos da água.

Um primeiro aspecto importante na realização de uma análise econômica aplicada à regulação no uso da água diz respeito a uma criteriosa avaliação da realidade econômica em que se dá o uso da água. Tal avaliação deve perseguir uma completa delimitação das variáveis econômicas envolvidas em cada modalidade de uso da água. A depender dessa realidade, diferentes serão os métodos analíticos mais adequados à sua valoração – função de produção, valoração contingente, preços hedônicos, entre outros. Destaca-se que, não obstante essa avaliação, a estimativa do valor econômico da água necessariamente recai nas dimensões ambiental e social associadas à dinâmica dos processos produtivos. Essas duas vertentes, por sua vez, requerem a internalização das externalidades, as quais, por si só, constitu-

em em grandes desafios sob os pontos de vista metodológico e conceitual.

Em relação ao procedimento preconizado neste artigo, não foram consideradas quaisquer externalidades para os usos irrigação e produção de energia elétrica. Seria desejável que análises futuras incorporassem uma abordagem mais robusta para a aferição do valor da água associado a essas ou a demais atividades econômicas, que levantasse os impactos causados, no meio ambiente e na sociedade, pelas atividades produtivas em que a água seja um dos fatores principais envolvidos.

A disposição das curvas de demanda econômica em um mesmo gráfico, bem como a posterior análise dos efeitos da alocação realizada no Acquanet, mostrou que os resultados da simulação econômica obtida para as duas modalidades de uso da água sofreram influência importante - e direta - dos parâmetros e critérios de partida. Como se pode notar da contraposição das duas curvas de irrigação na Figura 12, cuja única diferença de concepção foi a primeira cultura de cada ciclo, há um descolamento importante entre os dois gráficos para valores abaixo dos 60 m³/s, o que, por conseguinte, mostra a influência direta do parâmetro produtividade dos grãos sobre o resultado alcançado.

Infere-se, portanto, por conta do constante avanço tecnológico a que os processos de produção estão submetidos, que o procedimento analítico ora construído é dinâmico e, dessa maneira, deve ser continuamente atualizado, não só por conta da evolução da eficiência na produção, mas em relação à sua metodologia propriamente dita – pesquisa de novas distribuições estatísticas para a produtividade agrícola, levantamento de curvas econômicas que considerem a operação de usinas de forma individualizada -, além das não menos importantes oscilações de preço de mercado das *commodities* envolvidas, notadamente, grãos agrícolas, petróleo e carvão (esses últimos relacionados ao custo da operação de usinas termelétricas).

A alocação de água também sofre influência direta das decisões políticas das áreas agrícola e energética, as quais são fortemente influenciadas pelos respectivos planejamentos setoriais governamentais. O plantio de culturas de maior valor agregado, como frutas ou legumes, elevam sobremaneira a renda líquida específica por metro cúbico de água captado do manancial hídrico e, por conseguinte, o valor da água para irrigação. Por outro lado, a opção de construção de mais centrais termelétricas, em detrimento de usinas hidráulicas, aumenta o custo de oportunidade da utilização da água estocada nos

reservatórios hidrelétricos e, como consequência, o valor da água para a produção de eletricidade.

Com efeito, tem-se, nessa vertente analítica, pautada pelos critérios marginalistas da ciência econômica, a maximização do produto econômico gerado na bacia e premia-se aquela atividade que usa o recurso hídrico de maneira mais eficiente, sem fazer distinção de uso, de volume requerido, ou de poder de barganha de um setor frente aos demais, consoante, portanto, com uma visão mais contemporânea do conceito de desenvolvimento sustentável.

REFERÊNCIAS

- AZEVEDO, L.G.T.; PORTO, R.L.L. e ZAHED FILHO, K. (2002). "Modelos de Simulação e de Rede de Fluxo". In: Porto, R.L.L. (Organizador). *Técnicas Quantitativas para o Gerenciamento de Recursos Hídricos*. Editora da UFRGS/ABRH, Porto Alegre, Brasil, 165-237.
- BALTAR (2001). *Sistema de Apoio à Decisão para Avaliação Econômica da Alocação de Recursos Hídricos: Aplicação à Barragem do Descoberto*. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF. 117p.
- CEMIG (2008). *Histórico de Vazões turbinadas na UHE Queimado*. Contato estabelecido com técnicos dessa instituição via correio eletrônico.
- ELETROBRÁS (2008). *Sistema de Informações sobre o Potencial Hidrelétrico Brasileiro – SIPOT*. ELETROBRÁS. Acesso em setembro de 2008.
- HEINZ, I., PULIDO-VELASQUEZ, M., LUND, J.R. e ANDREU, J. (2007). "Hydro-economic Modeling in River Basin Management: Implications and Applications for the European Water Framework Directive". *Water Resources Management*, 21, 1103-1125.
- JUST, R.E. e WENINGER, Q. (1999). "Are Crop Yields Normally Distributed?" *American Journal of Agricultural Economics*, 81 (2), 287-304.
- KER, A.P. e COBLE, K. (2003). "Modeling Conditional Yield Densities". *American Journal of Agricultural Economics*, 85 (2), 291-304.
- LABADIE, J., BALDO, M. e LARSON, R. (2000). "MODSIM: Decision support system for river basin management". *Documentation and user Manual*. Department of Civil Engineering, Colorado State University, Ft. Collins, Colorado, USA.
- MACHADO, B.G.F. e CORDEIRO NETTO, O.M. (2009a). *Construção de Curva de Demanda Econômica para Uso da Água na Irrigação: o caso da bacia do rio Preto*. In: XVIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Campo Grande, MS.

- MACHADO, B.G.F. e CORDEIRO NETTO, O.M. (2009b). *Construção de Curva de Demanda Econômica para a Produção de Energia Elétrica: o caso da usina hidrelétrica de Queimado*. In: XVIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Campo Grande, MS.
- MOREIRA, A.R.B., SEROA DA MOTTA, R. e ROCHA, K. (2003). "A Expansão do Setor Elétrico Brasileiro de Energia Elétrica: Falta de Mercado ou de Planejamento." *Notas Técnicas*. Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA), Rio de Janeiro, Brasil. 17p.
- MUELLER, C.C. (2007). *Os Economistas e as Relações entre o Sistema Econômico e o Meio Ambiente*. Editora Universidade de Brasília, Brasília, Brasil. 562 p.
- ONS (2004). *Evaporações Líquidas nas Usinas Hidrelétricas*. Operador Nacional do Sistema Elétrico, Rio de Janeiro, Brasil. 61p.
- ONS (2008a). *Sítio Institucional do Operador Nacional do Sistema Elétrico*. Disponível em <www.ons.org.br>. Acesso em abril de 2008.
- ONS (2008b). *Relatório Mensal de Previsão de Vazões e Geração de Cenários de Afluências*. Operador Nacional do Sistema Elétrico, Rio de Janeiro, Brasil. 58p. Disponível em <www.ons.org.br>. Acesso em novembro de 2008.
- PEREIRA, M.V.F. e PINTO, L.M.V.G. (1985). "Stochastic Optimization of a Multireservoir Hydroelectric System: A Decomposition Approach". *Water Resources Research*, 21 (6), 779-792.
- PEREIRA, M.V.F. (1989). "Optimal Stochastic Operations Scheduling of Large Hydroelectric Systems". *Electrical Power and Energy Systems*, 11 (3), 161-169.
- PORTO, M. e LOBATO, F. (2004). "Mechanisms of Water Management: Economics Instruments and Voluntary Adherence Mechanisms". *Revista de Gestão de Água da América Latina*, 1 (2), 131-146, Santiago, Chile.
- PORTO, R.L.L., ROBERTO, A.N., SCHARDONG, A., MELLO JÚNIOR, A.V., TEIXEIRA, C.A., OLIVEIRA, C.P.M., CASTRO, H.L., LISBOA NETO, H., PALOS, J.C.F., ZAHED FILHO, K., PORTO, M., CARVALHO, M.A. e MARCELLINI, S.S. (2003). "Sistema de suporte à decisão para análise de sistemas de recursos hídricos". In: VIERIA DA SILVA, R.C. (Editor). *Métodos Numéricos em Recursos Hídricos* 6. Editora da ABRH, Porto Alegre, Brasil, 93-240.
- SANO, E.E., LIMA, J.E.F.W., SILVA, E.M. e OLIVEIRA, E.C. (2005). "Estimativa da Variação na Demanda de Água para Irrigação por Pivô-Central no Distrito Federal entre 1992 e 2002." *Engenharia Agrícola*, 25 (2), 508-515, Jaboticabal, São Paulo, Brasil.
- SEINFRA (2006). *Plano de Gerenciamento Integrado de Recursos Hídricos do Distrito Federal*. Secretaria de Infra-Estrutura e Obras do Distrito Federal, Brasília, Brasil.
- SEROA DA MOTTA, R. (2008). *Manual para Valoração Econômica de Recursos Ambientais*. Ministério do Meio Ambiente, dos Recursos Hídricos e da Amazônia Legal, Brasília, Brasil.
- YOUNG, R.A. (1996). *Measuring Economics Benefits for Water Investments and Policies*. World Bank Technical Paper No. 338. The World Bank, Washington D.C., U.S.A.

Economic Analysis Applied to the Decision-Making Process of Water Allocation Among Irrigation and Energy Production

ABSTRACT

One of the main reasons for adopting economical instruments as management tools in water resources planning issues remains the possibility of making economic markets internalize the water economic value in their respective productive processes. Therefore, this article presents a methodological procedure for water allocation analyses, focusing on two relevant uses – irrigation and energy production –, which considers water as an important input of each of these economic activities. Hence, demand curves were estimated and an analytical process was developed for evaluating water allocation trade-offs in a case-study applied to the Preto River basin, Brazil. The technique employed for measuring water value in irrigation was the residual imputation approach; for estimating water's economic value in energy production, simulations of a stochastic dual dynamic programming model - utilized in the Brazilian's electricity sector planning - were incorporated. As a result, one might consider that this methodological approach can be very useful for institutions concerned with water resources regulatory practices, since it establishes priorities for water supplies based on the marginal benefits that each of the uses involved can in fact provide and enhances the maximization of the basin's economic profit.

Key-words: *Economic Analysis, Water Allocation, Irrigation, Energy Generation.*