

# XIX SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS

## MODELAGEM DO USO AGRÍCOLA DA ÁGUA SOB O EFEITO DA COBRANÇA COM USO DE OTIMIZAÇÃO ESTOCÁSTICA DE DUPLO ESTÁGIO NA BACIA DO RIO PRETO, BRASIL

*Mariana Alcântara<sup>1</sup>, Guilherme Fernandes Marques<sup>2</sup>*

**Resumo** --- A identificação de estratégias eficientes para o planejamento e gestão da água incluindo, por exemplo, instrumentos econômicos como a cobrança pelo uso, depende largamente do bom entendimento da dinâmica de seu uso por atividades econômicas, como a agricultura irrigada. Por sua vez, esta dinâmica depende do processo de tomada de decisões pelo setor agrícola, o qual determina a demanda pela água em bacias onde a irrigação é intensiva. Embora já aplicada no Brasil, a cobrança pelo uso da água ainda tem seus efeitos em decisões como tipos de culturas e escolha de tecnologias de irrigação pouco conhecidas. Este artigo apresenta uma aplicação de otimização quadrática estocástica de duplo estágio para modelar decisões agrícolas de uso da água e escolha de tipos de culturas e tecnologias de irrigação sob diferentes cenários de valores cobrados pela água e disponibilidade hídrica, com o objetivo de avaliar potenciais respostas e impactos econômicos no setor agrícola. A função objetivo maximiza o retorno líquido esperado sob condições de disponibilidade hídrica probabilística. Resultados indicam que usuários da água para irrigação respondem a variações no valor cobrado alterando os tipos de culturas plantados e tecnologias de irrigação empregadas, embora com decisões diferentes conforme a escassez da água.

**Abstract** --- Agricultural decision making is a key element in understanding the dynamics of economic production, which is the driver of water demands and environmental impacts in watersheds where irrigated agriculture is a major activity. The identification of efficient water planning and management strategies depends on knowing the dynamics of the economic use of water. Water tariffs are already being applied in Brazil with the purpose of motivating water conservation and efficient use, however the analysis mostly quantifies the amount of resources that can be gathered, with limited insight into the impact on agricultural decisions. This paper applies a stochastic quadratic programming to model agricultural production in a 1.02 million ha agricultural region in Brazilian Midwest. The objective is to evaluate the effect of different water tariffs, differentiated by the type of irrigation technology adopted in agricultural decisions of crop types, irrigation technology and water use. The model's objective function maximizes the net expected agricultural benefit subject to stochastic water availability. Results indicate that farmers respond to water pricing changes by adjusting crop mix and irrigation technology use, but the responses differ depending on water scarcity. However, the differentiated tariff structure is successful in reducing the use of low efficiency irrigation technologies.

**Palavras-Chave** --- cobrança, otimização estocástica, irrigação

---

<sup>1</sup> Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET-MG): aluna de iniciação científica, Engenharia de Produção Civil. Endereço: Av. Amazonas, 7675, Nova Gameleira, Belo Horizonte, MG, Brasil, CEP 30510-000. Fone: 3319-6810. Fax: 3319-6812. E-mail: [marianacalcantara@gmail.com](mailto:marianacalcantara@gmail.com).

<sup>2</sup> Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET-MG): PhD, professor adjunto, Departamento Acadêmico de Engenharia Civil. Endereço: Av. Amazonas, 7675, Nova Gameleira, Belo Horizonte, MG, Brasil, CEP 30510-000. Fone: 3319-6810. Fax: 3319-6812. E-mail: [gmarques@civil.cefetmg.br](mailto:gmarques@civil.cefetmg.br).

## INTRODUÇÃO

A água é um recurso natural essencial à manutenção das sociedades, envolvida em praticamente todos os aspectos da mesma, tais como saúde pública, segurança, desenvolvimento socioeconômico e preservação dos recursos ambientais. Apesar de sua importância, a água é um recurso limitado, visto que menos de 1% de seu volume total no planeta está disponível para consumo humano. Graças a esse cenário de escassez, caracterizado por uma demanda superior à oferta, os recursos hídricos passam a ser dotados de valor econômico e a necessitar, portanto, de instrumentos de gestão.

No Brasil, a água é classificada como um bem de domínio público. Para garantir o acesso à mesma em quantidade e qualidade adequadas, a Política Nacional de Recursos Hídricos tem como instrumentos os Planos de Recursos Hídricos, o enquadramento dos corpos d'água, a outorga dos direitos de uso, a cobrança pelo uso, a compensação dos municípios e o Sistema de Informações sobre Recursos Hídricos. Desses seis instrumentos de gestão, a cobrança pelo uso da água é, sem dúvidas, o que provoca maior polêmica.

Baseado na implantação de tarifas diferenciadas para a captação, o consumo e o lançamento de carga orgânica nos corpos d'água, o instrumento de cobrança tem como objetivo principal a racionalização dos recursos hídricos, no que diz respeito tanto ao uso dos indivíduos como à alocação ótima entre os usuários da bacia (Thomas, 2002). Constitui-se em um importante aspecto a ser considerado nos instrumentos do planejamento hídrico que, ao promover a confiabilidade do abastecimento, é capaz de gerar o desenvolvimento econômico.

Apesar da garantia do uso múltiplo das águas pela Política Nacional de Recursos Hídricos, a escassez desse recurso também é responsável pela indução de conflitos, dos quais se destacam os que envolvem o abastecimento, a irrigação e a geração de energia elétrica. Machado (2009) analisa em seu trabalho a alocação de água entre a irrigação e a produção de energia elétrica. Levando-se em conta a demanda desses usos e a realidade econômica da área em estudo, o autor constrói uma metodologia com a finalidade de auxiliar o estabelecimento de prioridades na alocação da água, maximizando o benefício econômico público em detrimento de anseios particulares. Pabón (2009) propõe em seu trabalho uma metodologia para auxiliar a outorga dos recursos hídricos. Baseada em métodos multiobjetivo e multicritério, essa engloba aspectos políticos, econômicos, ambientais, sociais e técnicos, analisados em cenários futuros para a área em estudo.

Modelos de otimização economia-engenharia, nesse sentido, figuram como um promissor instrumento para o planejamento hídrico, uma vez que são capazes de auxiliar a tomada de decisão em cenários múltiplos e, a partir daí, avaliar o efeito das políticas hídricas. Quando aplicados a usuários agrícolas, tais modelos constituem-se de funções econômicas de produção capazes de

calcular as saídas (produtos) em função dos recursos disponíveis (água, capital, mão-de-obra e fertilizantes, entre outros). Essas funções são desenvolvidas segundo princípios da microeconomia. Na abordagem empregada neste trabalho, o processo de decisão de um usuário agrícola é modelado em uma estrutura de múltiplos estágios, com decisões de caráter permanente ocorrendo em um primeiro estágio, antes do evento aleatório, e decisões temporárias ocorrendo após sua previsão em um segundo estágio, na medida em que o futuro se desdobra em possíveis cenários diferentes. O objetivo é maximizar o valor esperado (esperança matemática) do custo de todas as decisões e suas consequências.

Abordagens de programação multiestágio têm sido aplicadas em vários tipos de problemas de recursos hídricos (Marques *et al.*, 2005; Watkins *et al.*, 2000; Huang e Loucks, 2000; Lund, 2002). Programação linear estocástica de duplo estágio tem sido aplicada na modelagem de medidas de conservação de água de curto e longo prazo para usuários urbanos de água sujeitos a eventos probabilísticos de escassez (Lund, 1995; Wilchfort e Lund, 1997; Alcubilla, 2002). Nessa abordagem, medidas de conservação de longo prazo são modeladas no primeiro estágio, enquanto que medidas de conservação da água de curto prazo são modeladas no segundo estágio, respondendo a eventos de escassez cada um com sua respectiva probabilidade de ocorrência.

Cai e Rosegrant (2004) aplicam um modelo de programação estocástica de duplo estágio para a simulação de decisões sobre o uso de tecnologias de irrigação e alocação de água entre culturas, considerando a disponibilidade incerta da água. Outras aplicações simulam decisões agrícolas incluindo o uso de tecnologias de irrigação em curto e longo prazo no estudo de benefícios de programas de transposição (Turner e Perry, 1997) e planejamento de cronogramas de irrigação (Ziari *et al.*, 1995).

Funções de produção lineares são encontradas em vários modelos na literatura. Se empregadas para simular o comportamento do usuário agrícola, entretanto, essas apresentam limitações por priorizarem a produção das culturas mais rentáveis. Essa situação levou alguns pesquisadores a adotar funções de produção quadráticas refletindo condições marginais e calibradas para situações reais observadas.

O presente trabalho aplica programação estocástica de duplo estágio com funções quadráticas de produção para modelar as decisões agrícolas de uso da água na bacia do rio Preto, envolvendo a escolha das culturas e das tecnologias de irrigação. As simulações são feitas em diferentes cenários de cobrança e disponibilidade hídrica e o objetivo final é avaliar potenciais respostas e impactos econômicos no setor agrícola.

## A bacia do rio Preto

Localizada na região centro-oeste brasileira, a bacia hidrográfica do rio Preto possui uma área de aproximadamente 10.269 km<sup>2</sup>, abrangendo os estados de Goiás e Minas Gerais, além do Distrito Federal. O rio Preto nasce no município de Formosa, Goiás, e deságua no rio Paracatu, com uma extensão total de cerca de 400 km. A Figura 1 ilustra a localização dessa bacia.



**Figura 1.** A bacia do rio Preto.

As terras da bacia são destinadas basicamente à produção agrícola, que ocupa 700 km<sup>2</sup> e responde por 90% da demanda hídrica da região (Maldaner, 2003, apud Carneiro *et al.*, 2007). Apesar de possuir um potencial superior, somente 10% da área agrícola da bacia constitui-se em cultivos irrigados (NCA, 2002, apud Carneiro *et al.*, 2007). Segundo Machado (2009), conflitos pontuais entre os agricultores irrigantes são registrados no período de estiagem, especialmente no trecho do alto Rio Preto, onde há presença significativa de agricultura irrigada.

Existe uma usina hidrelétrica em operação na bacia (UHE de Queimado) desde 2004, através de um consórcio entre a Companhia Elétrica de Brasília (CEB) e a Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG). Com uma capacidade nominal de geração de 105 MW e uma área de drenagem de 3.657 km<sup>2</sup>, esse reservatório configura junto à área agrícola mais um conflito de uso da água, visto

que tanto as áreas agrícolas a montante podem comprometer a operação do mesmo como este pode limitar o consumo das áreas agrícolas a jusante.

Na seção a seguir é apresentada a metodologia do trabalho, a qual inclui a caracterização agrícola da bacia, necessária para a configuração das demandas hídricas e da função econômica de uso da água pela agricultura irrigada. Essa função é empregada para definir a função objetivo do modelo. É importante salientar a presença de diversas simplificações devido à limitação de dados, como por exemplo, a existência de dados de produção agrícola por município, e não por bacia.

## METODOLOGIA

### Caracterização agrícola da bacia

Foi feito um levantamento a partir de dados do IBGE das áreas de culturas permanentes e temporárias plantadas nos municípios pertencentes à bacia no ano de 2008. Para os municípios não totalmente incluídos na bacia, as áreas plantadas consideradas foram proporcionais à área do município efetivamente incluída na bacia.

Segundo Bernardo *et al.* (2006), para fins de dimensionamento de projeto de irrigação nas condições do Brasil<sup>3</sup>, a demanda máxima de irrigação pode ser baseada em 80 a 90% da evapotranspiração potencial. Por esse motivo, foi adotada a Equação 1:

$$ITN = \frac{0,85 \cdot ETpc}{Ea} \quad (1)$$

Em que:

ITN é a lâmina total de irrigação necessária, em mm;

ETpc é a evapotranspiração potencial no período, em mm;

Ea é a eficiência de aplicação da água, em %.

A evapotranspiração potencial foi calculada segundo a metodologia proposta por Allen *et al.* (1998), que utilizam a equação de Penman-Monteith no cálculo da evapotranspiração de referência. Brasília foi considerada a cidade referência para esse fim e seus dados geográficos e climáticos foram obtidos para o ano de 2006 junto à Embrapa Hortaliças e ao Ministério da Ciência e Tecnologia.

---

<sup>3</sup> Exceto para a região Nordeste.

Os coeficientes culturais foram adotados para quatro estádios de desenvolvimento diferentes: inicial, desenvolvimento vegetativo, intermediário e final. Os valores desses coeficientes, bem como a sua duração e o mês de plantio das culturas foram adotados consultando-se Allen *et al.* (1998), Bernardi *et al.* (1971), EMBRAPA (2004) e Silva *et al.* (2006).

Os sistemas de irrigação considerados na bacia foram pivô central, aspersão convencional, auto-propelido, gotejamento, microaspersão e sulcos. Em geral, as culturas permanentes não utilizam os sistemas de pivô central e gotejamento. Constituem exceções a banana, que utiliza pivô central, e o café, que utiliza gotejamento e não é irrigado com microaspersão. As culturas temporárias, por sua vez, em geral não são irrigadas com gotejamento. Nesse caso, constituem exceções o milho, sorgo e trigo que, em contrapartida, não utilizam microaspersão.

A distribuição da área irrigada da bacia entre os sistemas de irrigação existentes foi baseada em Carneiro *et al.* (2007). Para a eficiência de aplicação de água, adotaram-se os valores de 85, 75, 65, 90, 90 e 50% para os sistemas pivô central, aspersão convencional, auto-propelido, gotejamento, microaspersão e sulcos, respectivamente, segundo dados fornecidos pelo professor e pesquisador do Instituto de Ciências Agrárias da UFMG, Flávio Gonçalves Oliveira.

### **Análise econômica do sistema agrícola**

Foi feito um levantamento a partir de dados da EMATER-MG, CONAB e FAEG dos custos de implantação e manutenção das culturas, bem como da produtividade e dos preços de mercado das mesmas. Foram calculados os custos de implantação e operação dos sistemas de irrigação, quantificados respectivamente através da quota anual de depreciação, dada pela Equação 2, e pelo gasto energético durante a irrigação das culturas.

$$d = \frac{C_o - R}{n} \quad (2)$$

Em que:

d é a quota anual de depreciação, em R\$;

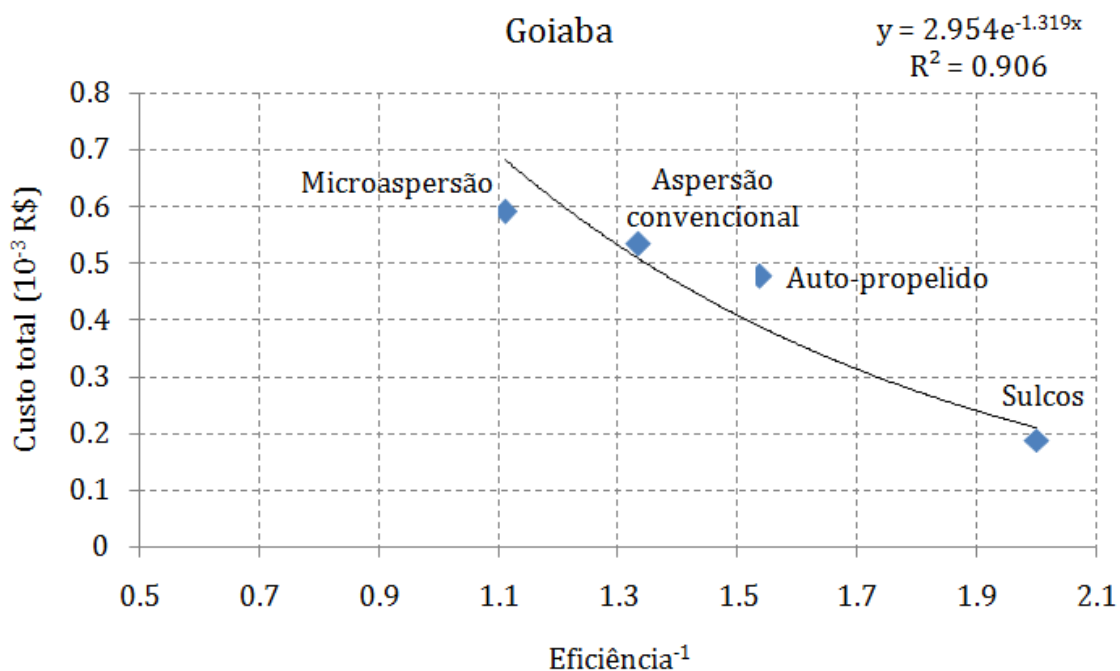
C<sub>o</sub> é o custo original do ativo, em R\$;

R é o valor residual do ativo ao final de sua vida, em R\$;

n é a vida útil esperada do ativo, em anos.

A relação entre o custo de irrigação e sua eficiência foi representada por funções exponenciais que buscam refletir isoquantas de elasticidade de substituição constante (*CES functions*). Um exemplo dessas curvas pode ser encontrado em CH2MHILL (1994). Essas funções permitem

avaliar os *trade offs* entre um sistema de irrigação que consome menos água (mais eficiente, porém mais caro) e um sistema que consome mais água (menos eficiente, porém mais barato). O aspecto fundamental é que em qualquer ponto da curva a produção da cultura é a mesma. Infelizmente, a calibração de curvas desta natureza requer dados não disponíveis na ocasião da realização deste estudo, de modo que foram adaptadas funções a partir de informações e consultas a especialistas da área de irrigação. Um exemplo das curvas empregadas neste trabalho é apresentado para a cultura da goiaba, na Figura 2.



**Figura 2.** Curva custo total *versus* inverso da eficiência para os sistemas de irrigação utilizados na cultura da goiaba.

Em seguida, foi calculado o valor unitário de cobrança da água para consumo na irrigação, para configuração dos cenários a serem investigados pelo modelo. Foi empregada a Equação 3, estabelecida pelo Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco (2008).

$$VU_i = PPU \times K_i \times K_t \quad (3)$$

Em que:

$VU_i$  é o valor unitário de cobrança pelo consumo da água na irrigação, ou seja, a relação entre o valor total de cobrança e o volume captado, em R\$/m<sup>3</sup>;

$PPU$  é o preço público unitário para o consumo de água, equivalente a 0,02 R\$/m<sup>3</sup>;

$K_i$  é o coeficiente que quantifica a proporção entre o volume de água consumido pela irrigação e o volume captado, equivalente a 0,8;

$K_t$  é o coeficiente que leva em conta as boas práticas de uso e conservação da água na irrigação, equivalente a 0,025. O valor final encontrado foi de R\$0,0004/m<sup>3</sup>.

Todo o procedimento descrito nessa seção foi realizado para calibrar a função de produção do agricultor irrigante da bacia, sendo esta dependente dos custos de implantação e manutenção das culturas permanentes e temporárias, da receita obtida a partir da venda das mesmas, dos custos de implantação e de operação dos sistemas de irrigação e também das tarifas de cobrança pelo uso da água.

### **Disponibilidade hídrica no modelo**

A disponibilidade hídrica no modelo é representada por eventos hidrológicos, aos quais estão associadas uma quantidade de água disponível (previsão) e uma probabilidade de ocorrência. Os eventos hidrológicos foram definidos a partir de um histograma de volumes que foi construído, por sua vez, através de uma série sintética de dados gerada neste trabalho.

O volume de água em cada evento hidrológico é concentrado espacialmente, de modo que a disponibilidade é superestimada para usuários a montante e subestimada para usuários a jusante do ponto considerado. Essa é uma limitação inerente à abordagem empregada, e pode ser atenuada reduzindo-se a área de análise e executando otimizações individualizadas para cada subárea. Essa correção necessita, entretanto, de um procedimento iterativo onde a água disponível para cada subárea é reavaliada após cada procedimento de otimização até a convergência. Tal procedimento será avaliado em futuros desenvolvimentos deste trabalho.

Foi buscada uma série de dados fluviométricos para o trecho a jusante da UHE Queimado, uma vez que esta é a localização de parte significativa das demandas. A disponibilidade hídrica para essas demandas, entretanto, é afetada pela operação da usina, que deve ser considerada no estudo. Devido ao início dessa operação recentemente, em 2004, a série de dados de vazão regulada disponível foi considerada muito curta para a geração da série sintética e do histograma. Por esse motivo, foi elaborado um modelo de otimização para simular vazões defluentes no reservatório, cuja função objetivo foi minimizar a diferença entre a demanda por vazões turbinadas e as vazões turbinadas calculadas pelo modelo. Foram ainda impostas restrições referentes ao volume inicial, mínimo e máximo do reservatório e à capacidade das turbinas e do vertedouro. Os dados de entrada nesse modelo foram as séries históricas de vazões registradas entre 1974 e 2003 no rio Preto. O propósito dessa simulação foi criar uma série longa de vazões defluentes do reservatório que representassem, mesmo que de forma simplificada, a influência da operação para geração de



energia. Esta série mais longa possibilitou o tratamento estatístico necessário para a geração das séries sintéticas e histograma, apresentados a seguir.

Inicialmente, essa série de vazões foi transformada em volumes e acumulada nos meses em que se pratica a irrigação na bacia. A série sintética de dados foi gerada segundo a metodologia descrita por Law (2006), que propõe as Equações 4, 5 e 6.

$$\bar{x}_s = \ln \frac{\bar{x}_o^2}{\sqrt{\bar{x}_o^2 + \sigma_o^2}} \quad (4)$$

$$\sigma_s^2 = \ln \frac{\sigma_o^2 + \bar{x}_o^2}{\bar{x}_o^2} \quad (5)$$

$$\sigma_s = \sqrt{\sigma_s^2} \quad (6)$$

Em que:

$\bar{x}_o$  é a média da série original;

$\bar{x}_s$  é a média da série sintética;

$\sigma_o^2$  é a variância da série original;

$\sigma_s^2$  é a variância da série sintética;

$\sigma_o$  é o desvio padrão da série original;

$\sigma_s$  é o desvio padrão da série sintética.

A série sintética foi gerada a partir de 15.000 números aleatórios com distribuição log-normal e média, variância e desvio padrão conforme as equações anteriores. Seus valores foram divididos em classes segundo a regra de Sturges, dada pela Equação 7 abaixo. O intervalo entre as classes foi dado pela Equação 8.

$$i = 1 + 3,22 \times \log N \quad (7)$$

$$h = \frac{L_{max} - L_{min}}{i} \quad (8)$$

Em que:

$i$  é o número de classes;

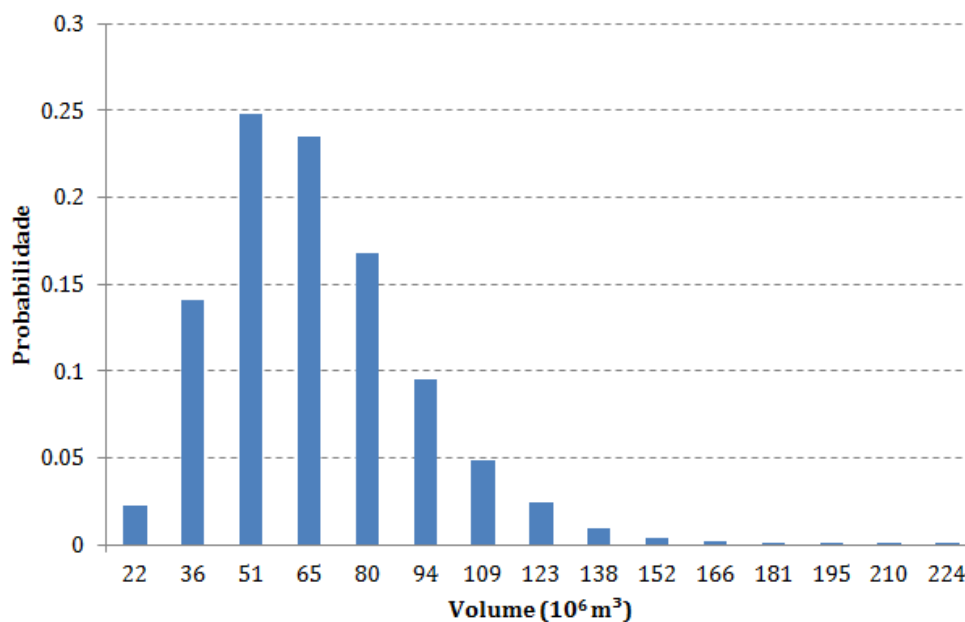
$N$  é o número de elementos da série;

$h$  é o intervalo entre as classes;

$L_{max}$  é o valor máximo da série;

$L_{min}$  é o valor mínimo da série.

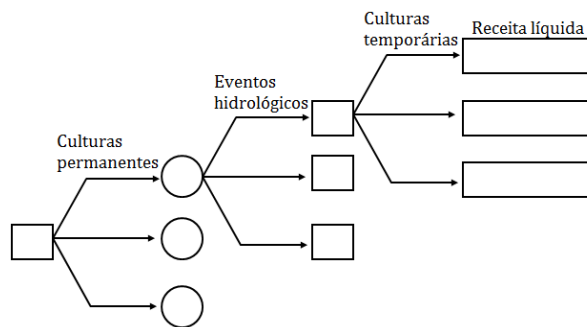
O histograma da série foi representado considerando, por segurança, o valor inferior de cada intervalo como o valor nominal da disponibilidade hídrica no período da irrigação. A partir do histograma foram configurados 15 eventos hidrológicos possíveis, caracterizados por um valor de disponibilidade hídrica e uma probabilidade de ocorrência. O gráfico da Figura 3 abaixo ilustra os resultados obtidos nessa seção.



**Figura 3.** Disponibilidade hídrica durante o período de irrigação.

### Modelo de otimização

A estrutura decisória do problema estudado foi modelada a partir de programação estocástica de duplo estágio com função quadrática de produção, desenvolvida por Marques *et al.* (2005). Essa abordagem consiste na decisão quanto à área das culturas permanentes no primeiro estágio e quanto à área das culturas temporárias no segundo estágio, sendo a segunda sujeita à disponibilidade hídrica dos eventos hidrológicos, associada à respectiva probabilidade de ocorrência. A estrutura de decisão é apresentada na Figura 4. As decisões de irrigação também fazem parte dessa estrutura e são baseadas na escolha da tecnologia a ser utilizada e da quantidade de água a ser alocada em cada cultura.



**Figura 4.** Estrutura decisória do modelo.

A função objetivo, dada pela Equação 9, maximiza a receita líquida esperada da produção agrícola e das decisões de uso da água, sujeitas a restrições quanto à disponibilidade de terra (Equação 10), água (Equação 12), ao estresse hídrico (Equações 11, 13 e 14) e à tecnologia de irrigação (Equação 15). A receita líquida inclui o custo de implantação das culturas permanentes e a compra dos equipamentos de irrigação no primeiro estágio e a receita líquida anual das culturas temporárias e permanentes no segundo estágio. A receita líquida no segundo estágio é calculada multiplicando-se o custo de produção marginal,  $(\alpha + 0,5\gamma X_2)$ , pela produção de cultura temporária,  $X_2$ , e subtraindo-se este valor da receita bruta ( $RE \times X_2$ ). Os custos marginais de produção incluem a operação do sistema de irrigação  $k$  e sua manutenção. O último termo de custo no segundo estágio penaliza a produção com  $CA_{1i}$  por unidade de área de cultura permanente perdida  $K_{1jik}$  devido ao excesso de estresse hídrico.

As decisões acerca da adoção das tecnologias de irrigação são de extrema importância, uma vez que são capazes de influenciar não só a produção agrícola, mas todos os usos da bacia que dependem da água. A opção por uma tecnologia de irrigação menos eficiente, por exemplo, apesar de envolver um baixo investimento inicial, pode não ser a mais interessante em cenários de escassez, visto que a água é utilizada com pouca eficiência. Essa situação, além de comprometer a sobrevivência das culturas, pode agravar o cenário de escassez de toda a bacia.

Para melhor representar as decisões de produção agrícola, foi também considerado no modelo o estresse hídrico, ou seja, a redução de água para as culturas permanentes no evento mais seco. Esse parâmetro foi necessário porque, embora realizada no primeiro estágio, a decisão quanto à área de cultura permanente é limitada pela quantidade de água disponível no segundo estágio. Assim sendo, caso a água não seja suficiente para irrigar toda a área, essas culturas estarão sujeitas a um estresse hídrico e sua área no segundo estágio,  $Y_{1jik}$ , será inferior que a área plantada no primeiro estágio,  $X_{1ik}$ . A diferença entre esses termos é a área perdida,  $K_{1jik}$ , que implica em uma penalidade na função objetivo correspondente ao replantio da mesma. Um aspecto não considerado pelo

modelo é a perda de produtividade das culturas permanentes após serem sujeitas ao estresse hídrico por anos consecutivos.

Função objetivo:

$$\begin{aligned} Max Z = & - \sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^h (INI_i X_{1ik}) - \sum_{p=1}^u IR_k + \sum_{j=1}^g p_j (\sum_{l=1}^n \sum_{k=1}^h (RE_{2l} X_{2jlk} - \\ & (\alpha_{2jlk} + 0,5\gamma_{2jlk}) X_{2jlk}) + \sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^h (RE_{1i} Y_{1jik} - (\alpha_{1ik} + 0,5\gamma_{1ik} Y_{1jik}) Y_{1jik}) - \\ & \sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^h CA_{1i} K_{1jik}) \end{aligned} \quad (9)$$

Sujeito a:

Disponibilidade de terra

$$\sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^h X_{1ik} + \sum_{l=1}^n \sum_{k=1}^h X_{2ljk} \leq L \dots \dots \dots \forall j \quad (10)$$

Área de culturas permanentes no segundo estágio

$$Y_{1jik} \leq X_{1jik} \dots \dots \dots \forall j, \forall i, \forall k \quad (11)$$

Restrição de água

$$\sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^h TAW_{1jik} + \sum_{l=1}^n \sum_{k=1}^h X_{2jlk} AW_{2jlk} \leq a_j \dots \dots \dots \forall j \quad (12)$$

Alocação de água nas culturas permanentes

$$Y_{1jik} = \frac{1}{AW_{1jik}} TAW_{1jik} \dots \dots \dots \forall j, \forall i, \forall k \quad (13)$$

Limite de estresse hídrico

$$K_{1jik} \geq X_{1ik} - \xi_i TAW_{1jik} \dots \dots \dots \forall j, \forall i, \forall k \quad (14)$$

Restrição à tecnologia de irrigação

$$\sum_{i=1}^m X_{1ik} IC_{ik} + \sum_{l=1}^n X_{2jlk} IC_{lk} \leq IR_k \dots \dots \dots \forall j, \forall k \quad (15)$$

Em que são parâmetros:

$\alpha_{1ik}$  é a declividade da função de oferta para a cultura permanente  $i$ , em R\$/ha\*ha;

$\gamma_{1ik}$  é o intercepto da função de oferta para a cultura permanente  $i$ , em R\$/ha;

$\alpha_{2jlk}$  é a declividade da função de oferta para a cultura temporária  $i$  no evento  $j$ , em R\$/ha\*ha;

$\gamma_{2jlk}$  é o intercepto da função de oferta para a cultura temporária  $i$  no evento  $j$ , em R\$/ha;

$\xi_i$  é o limiar de estresse hídrico para a cultura permanente  $i$ , em ha/m<sup>3</sup>;

$a_j$  é o total de água disponível no evento  $j$ , em  $m^3$ ;

$CA_{1i}$  é o custo de replantio da cultura permanente  $i$ , em R\$/ha;

$IC_{ik}$ ,  $IC_{lk}$  são os custos dos sistemas de irrigação para atender, respectivamente, a cultura permanente  $i$  e a cultura temporária  $l$  usando a tecnologia de irrigação  $k$ , em R\$/ha;

$INI_i$  é o custo de implantação da cultura permanente  $i$ , em R\$/ha;

$L$  é a área total de terra disponível para plantio, em ha;

$p_j$  é a probabilidade do evento hidrológico (ano)  $j$ ;

$RE_{1j}$  é a receita bruta da cultura permanente  $i$  no evento  $j$ , em R\$/ha;

$RE_{2l}$  é a receita bruta da cultura temporária  $l$ , em R\$/ha.

E variáveis:

$AW_{1jlk}$ ,  $AW_{2jlk}$  são os volumes de água alocados para a cultura temporária  $l$  com tecnologia de irrigação  $k$  no evento  $j$ , em  $m^3$ /ha;

$IR_k$  é o investimento em tecnologia de irrigação  $k$  no primeiro estágio, em R\$;

$K_{1jik}$  é a área de cultura permanente  $i$  perdida no evento  $j$  devido à escassez de água, em ha;

$TAW_{1jik}$  é a água total alocada para a cultura permanente  $i$  com tecnologia de irrigação  $k$  no evento  $j$ , em  $m^3$ ;

$X_{1ik}$  é a área de cultura permanente  $i$  plantada com tecnologia  $k$ , em ha;

$X_{2jlk}$  é a área de cultura anual  $l$  plantada com tecnologia  $k$  no evento  $j$ , em ha;

$Y_{1jik}$  é a área de cultura permanente  $i$  irrigada com tecnologia  $k$  no evento  $j$ , em ha.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para investigar os efeitos das tarifas de cobrança da água sobre a produção agrícola da bacia, a receita líquida dos agricultores e a escolha dos sistemas de irrigação, foram feitas simulações no modelo variando-se as tarifas desde valores nulos, passando pelo valor real calculado, R\$0,0004/ $m^3$ , até R\$0,40/ $m^3$ . Ressalta-se que a inclusão do valor R\$0,40/ $m^3$  presta-se à análise de sensibilidade do modelo, e não para a avaliação de cenários reais de cobrança, uma vez que se trata de um valor muito alto.

As funções econômicas do modelo foram calibradas para as áreas plantadas observadas no censo de 2008 (áreas de calibração). Isso significa que, mantendo-se as mesmas condições de disponibilidade de água, preços e custos desse período, os resultados das áreas plantadas devem ser próximos aos valores observados em 2008, de modo que o modelo de otimização é empregado de forma a simular o comportamento dos usuários, e não para gerar soluções prescritivas. Ao se

desviar das condições originais na configuração dos cenários de cobrança, o modelo irá recalculas as áreas plantadas.

As áreas das culturas permanentes simuladas pelo modelo, presentes na Tabela 1 a seguir, seguem em proporção as áreas de calibração fornecidas, principalmente no que diz respeito às culturas de maior relevância. A cultura do café, por exemplo, que na área observada corresponde a 76,3% da área total de cultura permanente, tem área similar para valores de cobrança da água até R\$0,04/m<sup>3</sup>. Para valores superiores de cobrança da água, entretanto, o resultado converge para as culturas de maior rentabilidade, que correspondem, respectivamente, às culturas de laranja (R\$20.263,79/ha), goiaba (R\$16.581,46/ha), tangerina (R\$15.477,66/ha), limão (R\$12.925,00/ha) e manga (R\$8.030,96/ha).

Culturas	Valor de cobrança da água (R\$/m <sup>3</sup> )									
	0		0.0004		0.004		0.04		0.40	
	Hectares	%	Hectares	%	Hectares	%	Hectares	%	Hectares	%
Banana	0.1	0.3	0.1	0.3	0.1	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0
Café	31.0	76.2	30.9	76.2	30.6	76.1	26.7	74.1	0.0	0.0
Goiaba	2.3	5.6	2.3	5.6	2.3	5.6	2.3	6.3	2.2	37.7
Laranja	3.0	7.3	3.0	7.3	3.0	7.4	3.0	8.2	2.7	46.1
Limão	1.1	2.7	1.1	2.7	1.1	2.7	1.1	2.9	0.3	5.8
Manga	2.4	5.8	2.4	5.8	2.4	5.9	2.3	6.3	0.0	0.1
Tangerina	0.8	2.0	0.8	2.0	0.8	2.0	0.8	2.2	0.6	10.2
<b>Total</b>	<b>40.6</b>	<b>100</b>	<b>40.6</b>	<b>100</b>	<b>40.2</b>	<b>100</b>	<b>36.0</b>	<b>100</b>	<b>5.8</b>	<b>100</b>

**Tabela 1.** Áreas de culturas permanentes simuladas pelo modelo para diferentes valores de cobrança da água.

A redução da produção das culturas permanentes entre tarifas extremas é ainda influenciada pela irrigação necessária, visto que quanto maior a demanda hídrica da cultura, maior o custo para o agricultor. Essa premissa pode ser comprovada pela Tabela 2 a seguir, que mostra que a redução da produção das culturas permanentes entre as tarifas nula e R\$0,04/m<sup>3</sup> concentrou-se naquelas de maior lâmina de irrigação (banana, café e manga).

**Tabela 2.** Redução da área de cultura permanente entre os valores de cobrança da água 0 e R\$0,04/m<sup>3</sup> e sua relação com as lâminas de irrigação.

Culturas	Redução	Irrigação
	%	mm
Banana	100.0	1333.1
Café	100.0	1294.3
Goiaba	3.6	445.3
Laranja	10.4	860.3
Limão	69.1	860.3
Manga	99.7	995.9
Tangerina	27.9	860.3

Alguns dos comportamentos anteriores foram similares para as culturas temporárias. A cultura da soja, por exemplo, que na área observada corresponde a 47,3% da área total de cultura temporária, tem área similar para valores de cobrança da água até R\$0,04/m<sup>3</sup>, conforme mostra a Tabela 3. Para valores superiores, entretanto, o resultado converge para a cultura do feijão que, entre as mais representativas da bacia (18,7% da área total de cultura temporária), é a que possui maior rentabilidade (R\$5.745,22/ha). As demais culturas temporárias plantadas foram a de batata-inglesa, tomate e alho. Apesar de possuírem maior rentabilidade que a cultura do feijão (R\$12.858,00/ha, R\$7.304,50/ha e R\$7.088,20/ha, respectivamente), essas culturas aparecem em menor proporção devido às suas áreas de calibração, que são consideravelmente inferiores (0,2%, 0,1% e 0,1% da área total de cultura temporária, respectivamente).

**Tabela 3.** Áreas de culturas temporárias simuladas pelo modelo para diferentes valores de cobrança da água, no evento mais seco.

Culturas	Valor de cobrança da água (R\$/m <sup>3</sup> )									
	0		0.0004		0.004		0.04		0.40	
	Hectares	%	Hectares	%	Hectares	%	Hectares	%	Hectares	%
Algodão	50.4	0.9	50.4	0.9	50.5	0.9	52.6	0.9	0.0	0.0
Alho	4.3	0.1	4.3	0.1	4.3	0.1	4.3	0.1	4.2	0.3
Arroz	22.4	0.4	22.3	0.4	22.0	0.4	12.1	0.2	0.0	0.0
Batata inglesa	12.4	0.2	12.4	0.2	12.4	0.2	12.4	0.2	12.2	1.0
Feijão	1247.3	21.2	1247.4	21.2	1248.1	21.2	1246.5	21.1	1221.9	98.1
Mandioca	20.4	0.3	20.4	0.3	20.5	0.3	19.8	0.3	0.0	0.0
Milho	1517.7	25.8	1518.0	25.8	1520.2	25.8	1518.7	25.7	0.0	0.0
Soja	2848.5	48.4	2849.0	48.4	2853.2	48.4	2887.7	48.8	0.0	0.0
Sorgo	155.9	2.6	155.6	2.6	152.9	2.6	155.5	2.6	0.0	0.0
Tomate	7.5	0.1	7.5	0.1	7.5	0.1	7.5	0.1	7.3	0.6
Trigo	1.1	0.0	1.0	0.0	0.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
<b>Total</b>	<b>5887.9</b>	<b>100</b>	<b>5888.4</b>	<b>100</b>	<b>5892.3</b>	<b>100</b>	<b>5917.0</b>	<b>100</b>	<b>1245.6</b>	<b>100</b>

Não foi observada influência considerável da lâmina de irrigação das culturas temporárias sobre a produção das mesmas. Isso ocorreu devido aos demais parâmetros (área calibrada e rentabilidade) que, por se concentrarem em poucas culturas, exercem maior influência sobre os resultados.

A Tabela 4 a seguir resume as áreas plantadas totais de culturas permanentes e temporárias para os diversos valores de cobrança da água. Paralelamente ao que foi observado nas tabelas anteriores, os resultados para as simulações com tarifas até R\$0,04/m<sup>3</sup> convergem para a área calibrada (neste caso, igual a 6.973 ha). Para a tarifa de R\$0,40/m<sup>3</sup>, entretanto, a área plantada total reduz cerca de 5 vezes, refletindo os impactos dos altos valores de cobrança.

**Tabela 4.** Áreas totais de culturas permanentes (X1) e temporárias (X2) simuladas pelo modelo para diferentes valores de cobrança da água e eventos hidrológicos extremos, em hectares.

Evento hidrológico	Valor de cobrança da água (R\$/m <sup>3</sup> )									
	0		0.0004		0.004		0.04		0.4	
	X1	X2	X1	X2	X1	X2	X1	X2	X1	X2
Mais seco	40.6	5887.9	40.6	5888.4	40.2	5892.3	36.0	5917.0	5.8	1245.6
Mais úmido	40.6	6123.5	40.6	6122.5	40.2	6114.0	36.0	6016.9	5.8	1245.6

A Tabela 4 permite notar ainda um aumento da produção de cultura temporária no evento mais seco, até a tarifa de R\$0,04/m<sup>3</sup>. Esse aumento consiste em uma maneira de compensar a perda econômica devida ao maior custo da água e se dá, sobretudo, através da redução das culturas de maior demanda hídrica (arroz) e do aumento das culturas de demanda inferior (algodão e soja), conforme se pode comprovar pela Tabela 5 a seguir.

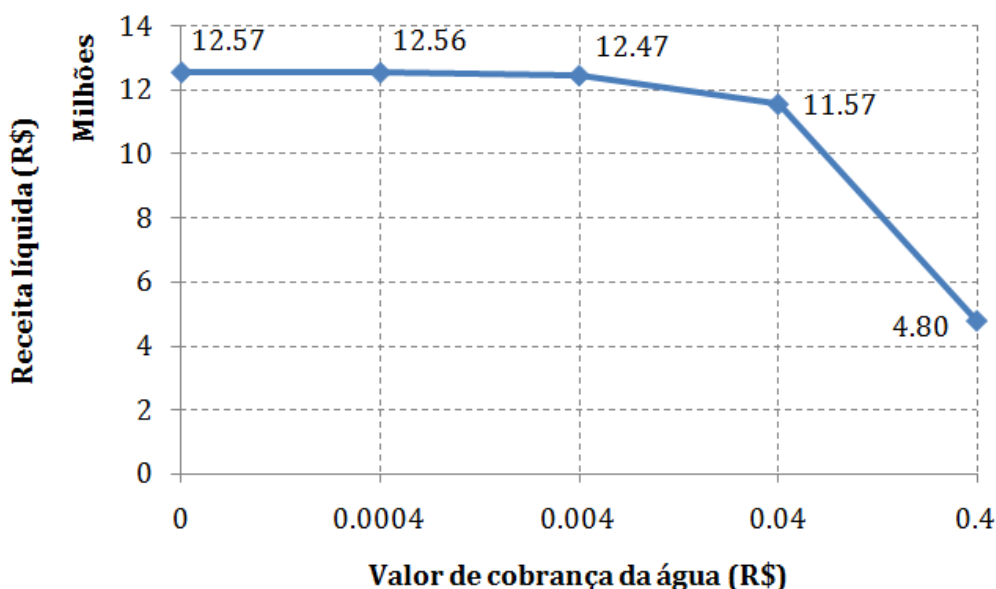
**Tabela 5.** Redução da área de cultura temporária entre os valores de cobrança da água 0 e R\$0,04/m<sup>3</sup> e sua relação com as lâminas de irrigação.

Culturas	Redução	Irrigação
	%	mm
Algodão	-4.5	567.4
Alho	0.0	432.0
Arroz	46.0	619.8
Batata inglesa	0.1	356.1
Feijão	0.1	278.7
Mandioca	2.9	358.3
Milho	-0.1	333.0
Soja	-1.4	260.7
Sorgo	0.3	317.4
Tomate	0.2	416.9
Trigo	100.0	316.9

Por outro lado, nota-se também pela Tabela 4 uma ligeira redução da área de cultura permanente no evento mais seco, até a tarifa de R\$0,04/m<sup>3</sup>. Isso acontece porque a decisão quanto à área de cultura permanente, realizada no primeiro estágio, compromete parte da água disponível, uma vez que o estresse hídrico é limitado. Em eventos hidrológicos com pouca água disponível, portanto, reduzir a área de cultura permanente no primeiro estágio é mais interessante por possibilitar maior flexibilidade ao agricultor irrigante.

Por fim, no evento hidrológico mais úmido descrito pela Tabela 4, a produção das culturas permanentes e temporárias é decrescente com o aumento no valor cobrado pela água. O gráfico da Figura 5 abaixo apresenta a receita líquida obtida a partir da produção em cada um dos valores de cobrança considerados.





**Figura 5.** Receita líquida obtida para diferentes valores de cobrança da água.

Quanto ao uso das tecnologias de irrigação, foi observado que até a tarifa de R\$0,04/m<sup>3</sup> a decisão aproxima-se das áreas calibradas. Para tarifas superiores, entretanto, o uso das tecnologias mais eficientes aumenta, refletindo a importância de um adequado manejo da água como meio de reduzir os custos de produção para os agricultores irrigantes. Percebe-se então que nesse cenário o investimento em uma tecnologia de irrigação mais cara no primeiro estágio é mais vantajoso devido à redução do consumo de água no segundo estágio.

Comparando-se diferentes eventos hidrológicos, nota-se que a decisão pela tecnologia de irrigação mais eficiente tem maior peso no evento mais seco. Isso acontece porque, nesse cenário, a água figura como um recurso que limita o benefício do agricultor. Investir em tecnologias de irrigação mais eficientes, portanto, é interessante por possibilitar o uso racional desse recurso. Esse efeito, entretanto, não foi observado nos eventos hidrológicos onde a água é abundante. Nesse cenário, um maior valor de cobrança da água resulta em um aumento no uso de tecnologias de irrigação menos eficientes. Como o objetivo é maximizar o benefício do agricultor irrigante, investir nessas tecnologias, que são mais baratas, é uma forma de compensar o aumento nos custos de produção devido à cobrança. O emprego dessas tecnologias em cenários de abundância hídrica não limita a produção.

## CONCLUSÕES

Na medida em que é empregada como insumo escasso para produção econômica, a disponibilidade e custo da água afetam diretamente várias decisões dos usuários, e a demanda hídrica em última análise depende destas decisões. Dessa forma, torna-se cada vez mais importante conhecer o comportamento econômico destes usuários para que os efeitos de políticas hídricas possam ser avaliados. Embora com várias limitações, o modelo aqui apresentado indicou que o aumento no custo da água para o produtor, via cobrança, interfere em decisões de áreas plantadas e uso de tecnologias, com reflexo no ganho econômico e nas demandas hídricas. Alguns resultados indicam que, em anos com baixa disponibilidade de água, tecnologias mais eficientes são priorizadas, enquanto que em anos com maior disponibilidade, o aumento nos valores cobrados pode resultar em aumento no uso de tecnologias de irrigação menos eficientes. Este último resultado é controverso e requer investigações futuras com mais detalhe, de modo a reduzir as incertezas e aproximações nos dados usados pelo modelo.

## Agradecimentos

Os autores agradecem aos pesquisadores Flávio Gonçalves Oliveira (UFMG), Lineu Neiva Rodrigues (EMBRAPA Cerrados) e à EMATER-MG pelas valiosas informações prestadas e ao CEFET-MG e à FAPEMIG pelos auxílios concedidos.

## BIBLIOGRAFIA

ALCUBILLA, R. G. (2002). *Derived Willingness-To-Pay For Water: Effects Of Probabilistic Rationing And Price*. Master Student Thesis – Department of Civil and Environmental Engineering, University of California, Davis.

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. (1998). “*Crop Evapotranspiration: Guidelines for Computing Crop Water Requirements*”. FAO – Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, 300p. (FAO Irrigation and Drainage Paper n.º 56).

BERNARDI, J. B.; IGUE, T. (1972). “*Comportamento de Cultivares de Alho de Curto e Médio Ciclos, na Região de Campinas*”. *Bragantia – Boletim Científico do Instituto Agrônomo do Estado de São Paulo*, v. 31, n.º 2, pp. 9 – 15.

BERNARDO, S.; SOARES, A. A.; MANTOVANI, E. C. (2006). *Manual de Irrigação*. Editora UFV, Viçosa – MG, 625 p.

BRASIL. Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco. Estabelece mecanismos e sugere valores de cobrança pelo uso de recursos hídricos na bacia hidrográfica do rio São Francisco.

*Deliberação CBHSF n.º 40, de 31 de outubro de 2008.* Disponível em: <<http://www.saofrancisco.cbh.gov.br/arquivos.aspx>>. Acesso em: 29 mai. 2011.

BRASIL. *Lei n.º 9.433, de 8 de janeiro de 1997.* Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, regulamenta o inciso XIX do art. 21 da Constituição Federal, e altera o art. 1º da Lei n.º 8.001, de 13 de março de 1990, que modificou a Lei n.º 7.990, de 28 de dezembro de 1989. Disponível em: <[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/Leis/L9433.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/Leis/L9433.htm)>. Acesso em: 16 mai. 2011.

BRASIL. Ministério da Ciência e Tecnologia. Sistema de Organização Nacional de Dados Ambientais. *Estação de Brasília.* Disponível em: <<http://sonda.ccst.inpe.br/basedados/brasil.html>>. Acesso em: 25 mai. 2011.

CAI, X.; ROSEGRANT, M. W. (2004). *“Irrigation Technology Choices under Hydrologic Uncertainty: A Case Study from Maipo River Basin, Chile”*. Water Resources Research, v. 40, n. 4.

CARNEIRO, P. J. R.; MALDANER, V. I.; ALVES, P. F.; QUEIRÓS, I. A.; MAURIZ, T. V.; PACHECO, R. F. (2007). *“Evolução do Uso da Água na Bacia do Rio Preto no Distrito Federal”*. Espaço & Geografia, v. 10, n.º 2, pp. 325 – 353.

CH2M HILL. (1994). *“Irrigation cost and Performance, Technical Memorandum, Central Valley Project Improvement Act, Mid Pacific Region, U.S”*. Bureau of Reclamation, Sacramento, California.

CONAB – COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. Disponível em: <<http://www.conab.gov.br/>>. Acesso em: 19 jun. 2011.

EMBRAPA HORTALIÇAS. *Dados Meteorológicos do Distrito Federal.* Disponível em: <[http://www.cnph.embrapa.br/paginas/servicos/dados\\_meteorologicos.htm](http://www.cnph.embrapa.br/paginas/servicos/dados_meteorologicos.htm)>. Acesso em: 25 mai. 2011.

EMBRAPA SEMI-ÁRIDO. (2004). *“Cultivo da Mangueira”*. Disponível em: <<http://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/FontesHTML/Manga/CultivodaMangueira/>>. Acesso em: 19 jun. 2011.

FAEG – FEDERAÇÃO DE AGRICULTURA E PECUÁRIA DE GOIÁS. Disponível em: <<http://www.sistemafaeg.com.br/faeg/site/Index.do>>. Acesso em: 19 jun. 2011.

HUANG, G. H.; LOUCKS, D. P. (2000). *“A Inexact two-stage stochastic programming model for water resources management under uncertainty”*. Civil Engineering and Environmental Systems, v.17, p.95 – 118.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br>>. Acesso em: 17 mai. 2011.

LAW, A. M. (2006). *Simulation Modeling and Analysis*. 4th edition. McGraw-Hill, New York – NY, 768 p.

LUND, J. R. (2002). *“Floodplain Planning with Risk-Based Optimization”*. Journal of Water Resources Planning and Management, ASCE, v. 128, n. 3, pp. 202 – 207.

- LUND, J. R. (1995). “*Derived Estimation of Willingness to Pay to Avoid Probabilistic Shortage*”. *Water Resources Research*, v. 31, n. 5, pp.1367 – 1372.
- MACHADO, B. G. F. (2009). *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*. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos) – ENC/FT/UnB, Brasília – DF, 145 p.
- MARQUES, G. F.; LUND, J. R.; HOWITT, R. E. (2005). “*Modeling Irrigated Agricultural Production and Water Use Decisions under Water Supply Uncertainty*”. *Water Resources Research*, 41, W08423, doi:10.1029/2005WR004048.
- PABÓN, D. A. R. (2009). *Metodologia Multiobjetivo e Multicritério de Auxílio à Outorga de Recursos Hídricos: Aplicação ao Caso da Bacia do Rio Preto*. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos) – ENC/FT/UnB, Brasília – DF, 165 p.
- SILVA, J. E. B. (2006). *Características Físicas e Químicas de Frutos de Goiabeira em Função de Níveis de Nitrogênio e Lâminas de Irrigação*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, UFCG, Campina Grande – PB, 64 p.
- THOMAS, P. T. (2002). *Proposta de uma Metodologia de Cobrança pelo Uso da Água Vinculada à Escassez*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro – RJ, 139 p.
- TURNER, B.; PERRY, G. M. (1997). “*Agriculture to Instream Water Transfers Under Uncertain Water Availability: a Case Study of the Deschutes River, Oregon*”. *Journal of Agricultural and Resource Economics*, 22, pp. 208 – 221.
- WATKINS JR, D. W.; MCKINNEY, D. C.; LASDON, L. S.; NIELSEN, S. S.; MARTIN, Q. W. (2000). “*A Scenario-Based Stochastic Programming Model for Water Supplies from the Highland Lakes*”. *International Transactions in Operational Research*, n. 7, pp. 211 – 230.
- WILCHFORT, O.; LUND, J. R. (1997). “*Shortage Management Modeling for Urban Water Supply Systems*”. *Journal of Water Resources Planning and Management*, v. 123, n. 4.
- ZIARI, H. A.; MCCARL, B. A.; STOCKLE, C. A. (1995). “*A Nonlinear Mixed Integer Program Model for Evaluating Runoff Impoundments for Supplemental Irrigation*”. *Water Resources Research*, v. 31, n. 6, pp. 1585 – 1594.