

**TECNOLOGIA**  
**NA**  
**IRRIGAÇÃO**

**Ficha Catalográfica**

Tecnologia na irrigação/Manoel Valnir Júnior ... [et al.], organizadores.  
Fortaleza: Setor de Reprografia do IFCE, 2010.  
355p.

ISBN 978-85-63692-009

1. Agricultura 2. Tecnologias relacionadas  
I. Valnir Júnior, Manoel.

CDD 631.587

**MANOEL VALNIR JÚNIOR**

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará  
Doutor em Engenharia Agrícola

**FREDERICO ANTONIO LOUREIRO SOARES**

Universidade Federal de Campina Grande  
Doutor em Engenharia Agrícola

**SILVIO CARLOS RIBEIRO VIEIRA LIMA**

Instituto Centro de Ensino Tecnológico  
Doutor Ciências

**RAIMUNDO RODRIGUES GOMES FILHO**

Universidade Federal de Goiás  
Doutor em Engenharia Agrícola

**CLAYTON MOURA DE CARVALHO**

Instituto Centro de Ensino Tecnológico  
Mestre em Engenharia Agrícola

**ANTÔNIO EVAMI CAVALCANTE SOUSA**

Universidade Federal de Campina Grande  
Mestre em Engenharia Agrícola

A estrutura fundiária brasileira é caracterizada por grande número de pequenas propriedades rurais, sendo a agricultura a principal atividade. Contudo, a dificuldade de acesso ao desenvolvimento científico-tecnológico, voltado para o aproveitamento sustentável dos recursos hídricos, torna este ramo de atividade, o qual disciplina o uso da água e a implantação da decisão, descentralizada e participativa, dentro da visão sustentável, um dos mais debilitados na economia do país. Agravando a situação, nos últimos anos, a utilização dos recursos hídricos destinados à irrigação vem sofrendo grandes pressões de instituições internacionais e nacionais, tanto governamentais quanto particulares, visando à implantação de um sistema de gestão de recursos hídricos, com o funcionamento dos sistemas de outorga, a partir da elaboração dos planos de bacia, de forma integrada entre os diversos setores da sociedade, principalmente, por envolver o meio ambiente; implantação que demandará desenvolvimento científico e tecnológico, quer pelo próprio conhecimento dos sistemas hídricos, quer pelo desenvolvimento dos instrumentos de gestão.

A situação descrita anteriormente demanda enorme esforço para a geração de novos produtos e processos comercializáveis, tanto sob a forma de softwares e patentes, quanto de equipamentos, que contribuam para a solução de problemas específicos e a expansão das suas aplicações, de forma bastante eficiente, para todas as camadas sociais do país.

Os grandes desafios de necessidade de investimento de pesquisa em ciências, tecnologia e inovação em recursos hídricos envolvem monitoramento hidrológico e de qualidade da água; equipamentos para a produção de água; equipamentos para tornar eficiente o uso e reduzir o consumo desse recurso nos meios urbano e rural e na indústria; e equipamentos de redução e controle da poluição ambiental, pois o uso

do recurso hídrico ainda se processa a partir de uma visão fortemente setorial, ocasionada pela falta de qualificação técnica para gestão dos sistemas hídricos, em grande parte dos estados brasileiros, necessitando de uma visão integrada voltada para a otimização do aproveitamento desses recursos.

O desenvolvimento e a preservação dos recursos hídricos dependem de profissionais qualificados, tanto para a tomada de decisões quanto para a execução das diversas atividades, com o objetivo de atender, adequadamente, as diferentes realidades do país. Para tanto, faz-se necessária à implantação de um amplo programa de capacitação profissional, quer seja através de centros regionais de treinamento que atendam às necessidades locais específicas do setor e que fixem os profissionais da área nas diversas regiões do país, quer seja através de universidades federais, estaduais e particulares, abrangendo todos os níveis, do técnico ao de pós-graduação, incluindo-se, também, a extensão. O programa deverá favorecer os profissionais e atores do processo decisório, como membros de comitês e de conselhos de recursos hídricos, lembrando que nem sempre é possível importar tecnologia; na maioria das vezes, a tecnologia tem que ser desenvolvida no seio da realidade socioeconômica da região.

Neste contexto, o Instituto CENTEC, através das suas – FATEC - Faculdades de Tecnologia, assume papel de fundamental importância para a geração de tecnologias intermediárias e aplicáveis, buscando prover o homem do campo de estruturas compatíveis com as características ambientais e com as situações que lhe são impostas, a fim de assegurar a produção de maiores volumes de alimentos com maior rentabilidade, sem esquecer a preservação ambiental.

Com a apresentação das tecnologias no **I Workshop Internacional de Inovações Tecnológicas na Irrigação & I Conferência sobre Recursos Hídricos do Semi-Árido Brasileiro** objetiva-se

discutir os principais resultados científicos e tecnológicos, obtidos por instituições de ensino, pesquisa e extensão, para a racionalização e conservação dos recursos hídricos.

Espera-se que esta publicação venha a contribuir para os conhecimentos dos diversos profissionais da área, suprimindo, de forma consistente, a carência de informações sobre a agricultura irrigada, tendo em vista que o adequado desenvolvimento do setor agrícola somente se dará com a formação de equipes qualificadas, integradas, multidisciplinares e treinadas nas várias especificidades da respectiva região, principalmente nas regiões semi-áridas, as quais apresentam visível fragilidade em relação à sustentabilidade hídrica.

Ressalte-se que os assuntos aqui tratados são de responsabilidade dos seus respectivos autores, sendo os editores limitados à revisão, apresentação de algumas sugestões, uniformização e organização do trabalho final.

Embora o documento tenha sido amplamente revisado, quaisquer críticas ou sugestões poderão ser encaminhadas aos editores, para a publicação eventual de uma nova edição.

Os Editores

## **AUTORES DOS CAPÍTULOS**

---

**ANTÔNIO FÉLIX DOMINGUES**

Agência Nacional de Águas

**ANTHONY MORSE**

Department of Water Resources

**BEATRIZ SUSANA OVRUSKI DE CEBALLOS**

Universidade Estadual da Paraíba

**BRUNO MOLLE**

International Network of Irrigation Test Laboratory/Cemagref

**CAMILO LELIS TEIXEIRA DE ANDRADE**

Embrapa Milho e Sorgo

**CLARENCE W. ROBISON**

University of Idaho

**CRISTIANNY VILLELA TEIXEIRA GISLER**

Agência Nacional de Águas

**HANS RAJ GHEYI**

Universidade Federal de Campina Grande

**IGNACIO LORITE**

El Instituto de Investigación y de Formación Agraria y Pesquera (IFAPA)

**JAMES L. WRIGHT**

United States Department of Agriculture

**JOÃO CARLOS FERREIRA BORGES JÚNIOR**

Universidade Federal Rural de Pernambuco

**JOSÉ DANTAS NETO**

Universidade Federal de Campina Grande

**JOSE ANTONIO FRIZZONE**

Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”/USP

**LUIS SANTOS PEREIRA**

Universidade Técnica de Lisboa

**MANOEL VALNIR JÚNIOR**

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará

**MARCELO TAVARES GURGEL**

Universidade Federal Rural do SemiÁrido

**MARIA SALLYDELÂNDIA SOBRAL DE FARIAS**

Universidade Federal de Campina Grande

**MASAHIRO TASUMI**

Faculty of Agriculture, University of Miyazaki

**PAULO AFONSO FERREIRA**

Universidade Federal de Viçosa

**RAIMUNDO RODRIGUES GOMES FILHO**

Universidade Federal do Goiás

**RICARDO TREZZA**

University of Idaho

**RICHARD G. ALLEN**

University of Idaho

**SILVIO CARLOS RIBEIRO VIEIRA LIMA**

Instituto Centro de Ensino Tecnológico

**SUETONIO MOTA**

Universidade Federal do Ceará

**TADEU MIRANDA DE QUEIROZ**

Universidade do Estado de Mato Grosso

**TARLEI ARRIEL BOTREL**

Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”/USP

**VERA LÚCIA ANTUNES DE LIMA**

Universidade Federal de Campina Grande

**WILLIAM KRAMBER**

Idaho Department of Water Resources

**WIM BASTIAANSEN**

Delft Technical University

**RIDELSON FARIAS DE SOUSA**

Instituto Federal de Educação Tecnológica da Paraíba

Doutor em Engenharia Agrícola

**RUBENS DUARTE COELHO**

Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz/USP

Doutor em Engenharia Hidráulica

**ROBERTO VIEIRA PORDEUS**

Universidade Federal Rural do Semi Árido

Doutor em Recursos Naturais

**SÉRGIO LUIZ AGUILAR LEVIEN**

Universidade Federal Rural do Semi Árido

Doutor em Agromonia

**VICENTE DE PAULO MIRANDA LEITÃO**

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará

Doutor em Engenharia Civil

**WALESKA MARTINS ELOI**

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará

Doutora em Irrigação e Drenagem

---

**COLABORADORES**

**ADUNIAS DOS SANTOS TEIXEIRA**

Universidade Federal do Ceará

Doutor em Engenharia Agrícola

**ANA KELLIANE SILVA DO NASCIMENTO**

Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia Engenharia da Irrigação

Mestre em Engenharia Agrícola

**FRANCISCO ARIOSTO HOLANDA**

Deputado Federal do Ceará

Mestre em Engenharia Biomédica

**ARISTIDES MARTINS SANTOS NETO**

Instituto Centro de Ensino Tecnológico do Ceará

Tecnólogo em Recursos Hídricos

**BERNARDO BARBOSA DA SILVA**

Universidade Federal de Campina Grande

Doutor em Engenharia Civil

**CARLOS AUGUSTO FERREIRA**

Associação Brasileira da Indústria de Máquinas e Equipamentos

Engenheiro Agrícola

**CARLOS HENRIQUE CARVALHO DE SOUSA**

Universidade Federal do Ceará

Mestre em Engenharia Agrícola

**CHRISTOPHER M. U. NEALE**

Utah State University

Doutor em Engenharia Agrícola

**FABIO RODRIGUES DE MIRANDA**

Embrapa Agroindústria Tropical.

Doutor em Engenharia de Biosistemas

**FERNANDO BRAZ TANGERINO HERNANDEZ**

Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho  
Doutor em Irrigação e Drenagem

**FLÁVIO FAVARO BLANCO**

Embrapa Meio-Norte  
Doutor em Irrigação e Drenagem

**FRANCISCO MARCUS LIMA BEZERRA**

Universidade Federal do Ceará  
Doutor em Irrigação e Drenagem

**FRANCISCO LOPES VIANA**

Agencia Nacional de Água  
Mestre em Engenharia Civil

**FRANCISCO DE SOUZA**

Universidade Federal do Ceará  
Doutor em Engenharia Agrícola

**GERALDO ACCIOLY**

Secretária de Planejamento e Coordenação do Governo do Ceará  
Mestre em Sociologia

**JEANETE KOCH**

Instituto Centro de Ensino Tecnológico do Ceará  
Doutora em Engenharia Ambiental

**JOÃO CARLOS ANTUNES DE SOUZA**

Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial

**JOSÉ ELIÉSIO OLIVEIRA**

Instituto Centro de Ensino Tecnológico do Ceará  
Tecnólogo em Recursos Hídricos

**LUIS ANTONIO DA SILVA**

Instituto Centro de Ensino Tecnológico do Ceará  
Doutor em Agronomia

**LUIZ CARLOS GUERREIRO CHAVES**

Universidade Federal do Ceará  
Mestre em Engenharia Agrícola

**MARCELO BORGES LOPES**

Associação Brasileira da Indústria de Máquinas e Equipamentos

**MARCELO TAVARES GURGEL**

Universidade Federal Rural do Semi Árido  
Doutor em Recursos Naturais

**MARIA DO SOCORRO RIBEIRO HORTEGAL FILHA**

Instituto Centro de Ensino Tecnológico do Ceará  
Mestre em Engenharia Civil

**NILDO DA SILVA DIAS**

Universidade Federal Rural do Semi Árido  
Doutor em Agronomia

**JOSE NILSON BEZERRA CAMPOS**

Universidade Federal do Ceará  
Doutor em Recursos Hídricos

**PEDRO OLIVEIRA GARCIA**

Associação Brasileira de Normas Técnicas

**RAIMUNDO NONATO TAVORA COSTA**

Universidade Federal do Ceará  
Doutor em Irrigação e Drenagem

**RENATO CARRHÁ LEITÃO**

Embrapa Agroindústria Tropical  
Doutor em Ciências Ambientais

**REGINE HELENA SILVA DOS FERNANDES VIEIRA**

Universidade Federal do Ceará  
Doutor em Ciências Biológicas



## **CAPÍTULO X**

Aspectos microbiológicos da água de reúso destinada à irrigação .....284

## **CAPÍTULO XI**

Utilização de água de qualidade inferior na irrigação: águas salinas .....310

## **CAPÍTULO XII**

Experiências de reúso na irrigação e aquicultura: alternativa para o semiárido nordestino .....344

## **AGRADECIMENTOS**

---

**CENTEC** - Instituto de Ensino Tecnológico do Ceará

**FATEC Sobral** - Faculdade de Tecnologia de Sobral

**INOVAGRI** - Instituto de Pesquisa e Inovação na Agricultura Irrigada

**LEEI** - Laboratório de Ensaio em Equipamentos de Irrigação

**MAPA** - Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento

**CNPq** - Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico;

**FUNCAP** - Fundação Cearense de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico

**CAPES** - Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior;

**BNB** - Banco do Nordeste;

**SEBRAE** - Serviço Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas Empresas do Ceará

**DNOCS** - Departamento Nacional de Obras Contra as Secas

**EMBRAPA Caprinos** - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - Caprinos

**Governo do Estado do Ceará**

**Prefeitura Municipal de Sobral**

## **CAPÍTULO I**

Sustentabilidade da irrigação: estratégia de produção em agricultura irrigada.....1

## **CAPÍTULO II**

Planejamento da irrigação com uso de técnicas de otimização .....48

## **CAPÍTULO III**

Racionalização do uso da água na agricultura irrigada .....102

## **CAPÍTULO IV**

Uso de modelos na prática da determinação das necessidades hídricas das culturas .....125

## **CAPÍTULO V**

Application of the methodologies sebal and metric in irrigated agriculture .....168

## **CAPÍTULO VI**

Tensiômetro: características, Inovações e aplicações .....197

## **CAPÍTULO VII**

Racionalização do uso da água na agricultura irrigada .....240

## **CAPÍTULO VIII**

Laboratório de ensaios em equipamentos de irrigação: desenvolvimento e acreditação .....249

## **CAPÍTULO IX**

Impactos ambientais causados com a irrigação .....259

lidade de mão de obra, capacidade de investimento por parte do empreendedor, riscos à saúde pública, dentre outros (Andrade e Borges Júnior, 2008).

A adequação do manejo da irrigação envolve o emprego de meios para determinação de quando e quanto irrigar, além da avaliação periódica do desempenho da irrigação, verificando-se a uniformidade de irrigação, lâmina média aplicada, área adequadamente irrigada, eficiências de irrigação, coeficiente de déficit, perdas por evaporação e percolação.

Por fim, a racionalização na utilização de recursos hídricos na agricultura irrigada está relacionada também a um adequado planejamento de estratégias de produção, podendo-se buscar a otimização de variáveis de interesse do empreendedor (privado ou público) e daquelas relacionadas à sustentabilidade segundo aspectos ambientais e sócio-econômicos.

## **2. MÉTODOS DE PLANEJAMENTO EM AGRICULTURA IRRIGADA**

No contexto aqui abordado, planejamento em agricultura irrigada refere-se à determinação da estratégia de produção a ser adotada com vistas à otimização de uma ou mais variáveis, podendo ser inicial ou periódico.

Estratégia de produção compreende o conjunto de definições quanto a que produzir, onde produzir, quando produzir e que conjunto de técnicas e métodos a serem empregados. Em outras palavras, estratégia de produção refere-se ao conjunto de atividades a serem implementadas em determinado empreendimento (no contexto aqui apresentado, empreendimento está relacionado à atividade agrícola).

Este texto trata de planejamento em nível de propriedade, envolvendo análise financeira com base em princípios da Microeconomia.

# **SUSTENTABILIDADE DA IRRIGAÇÃO: ESTRATÉGIA DE PRODUÇÃO EM AGRICULTURA IRRIGADA**

João Carlos Ferreira Borges Júnior; Camilo Lelis Teixeira de  
Andrade; Paulo Afonso Ferreira

## **1. INTRODUÇÃO**

A importância da agricultura irrigada, para garantir o suprimento da crescente demanda por produtos agrícolas, incluindo alimentos, fibras e bio-combustíveis, nos âmbitos nacional e global, é amplamente reconhecida, devido ao considerável aumento na produtividade das culturas. Enquanto a agricultura de sequeiro ocupa 80% do total mundial da área agrícola cultivada e gera 20% da produção de alimentos, a agricultura irrigada, em 20% do total mundial da área agrícola cultiva-

da, supri 40% da produção de alimentos (Garces-Restrepo et al., 2007).

Aliando-se ao aumento na produtividade, cultivos irrigados propiciam também considerável aumento no valor agregado da produção. No Brasil, em 1998, 16% da safra de alimentos foi produzida por meio de cultivos irrigados, representando 35% do valor de produção (PNRH, 2006). A irrigação pode aumentar a viabilidade financeira e econômica de empreendimentos agrícolas ou propiciar esta viabilidade. Possibilita a expansão da fronteira agrícola e a permanência do homem em áreas sujeitas a climas secos, como o semi-árido brasileiro. A maior eficiência econômica, que pode ser obtida com a irrigação, favorece o aumento da competitividade de produtos agrícolas, nos mercados interno e externo, e contribui para a melhoria do padrão de vida de comunidades rurais. Outro benefício da irrigação é a diminuição do risco envolvido na atividade agrícola, já que minimiza as incertezas quanto à produtividade das culturas, oriundas da variabilidade da quantidade e frequência de chuvas.

Além dos benefícios proporcionados pela irrigação, profissionais atuantes na agricultura irrigada devem ter em mente os impactos proporcionados por esta atividade. Dentre os impactos, cita-se: consumo expressivo de recursos hídricos; modificação do meio ambiente; salinização do solo; contaminação dos recursos hídricos e problemas de saúde pública. Neste texto, o principal impacto da agricultura irrigada considerado é relativo à alta demanda de recursos hídricos. Um balanço entre os benefícios e impactos advindos da agricultura irrigada é apresentado por Bernardo (1997).

No Brasil, estimativas indicam que 69% do consumo de recursos hídricos ocorre na agricultura irrigada (ANA, 2005). Em regiões onde existem restrições quanto à oferta de água e a irrigação é prática intensiva, é comum a ocorrência de conflitos entre irrigantes.

Na Figura 1 apresenta-se a distribuição das demandas de re-

ursos hídricos nas regiões hidrográficas do São Francisco e Atlântico Nordeste Oriental e na Unidade Hidrográfica do Mundaú, podendo-se observar a expressiva demanda para irrigação. As demandas médias são de  $55 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$  na Bacia Hidrográfica do Mundaú,  $246 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$  na Bacia Hidrográfica Atlântico Nordeste Oriental e  $203 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$  na Bacia Hidrográfica do São Francisco (PNRH, 2003).

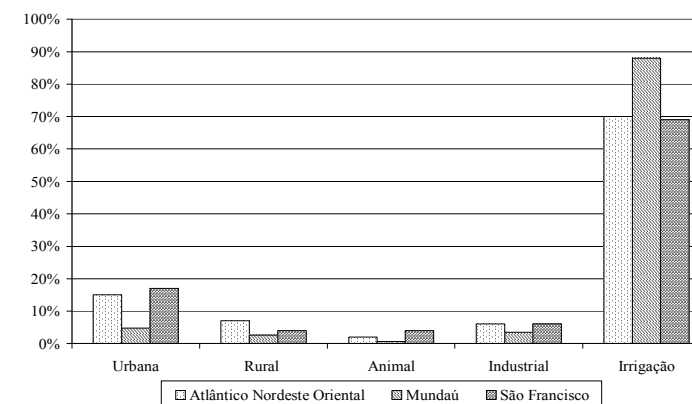


Figura 1. Distribuição das demandas das regiões hidrográficas do São Francisco e Atlântico Nordeste Oriental e na Unidade Hidrográfica do Mundaú.

O alto requerimento de água, comparativamente aos setores urbano e industrial, faz da agricultura irrigada a maior fonte potencial de problemas e, também, de soluções no tocante ao uso e conservação de recursos hídricos.

A racionalização do uso da água na agricultura irrigada passa pela adequação de projeto, manejo da irrigação e planejamento relativo às estratégias de produção. O projeto de irrigação transcende aos procedimentos de dimensionamento, iniciando-se com a escolha do método de irrigação com base um amplo conjunto de fatores, como: cultura, tratamentos culturais requeridos, características físico-hídricas do solo, forma e dimensão da área, disponibilidade hídrica, flexibilidade quanto ao suprimento de água, clima, suprimento de energia, disponibi-

seguir. Consideremos uma propriedade com área útil agricultável de 10 ha. Um consultor é solicitado pelo proprietário da fazenda em questão a determinar a estratégia de produção que acarrete o máximo retorno financeiro. Neste modelo, serão consideradas as seguintes atividades: milho, feijão, tomate e melão. Todas os cultivos considerados, neste caso, são irrigados. O planejamento será feito para um determinado período no ano. O consultor dispõe dos dados apresentados nas tabelas 1 a 4 (comumente são empregados valores médios).

Na Tabela 1 são apresentados os dados relativos a preço, produtividade e custos de produção. Estes dados definem a função objetivo a ser otimizada.

Na Tabela 2 são apresentados os requerimentos de recursos, por unidade de área, de cada atividade.

Tabela 1. Dados de preço, produtividade e custos de produção para as atividades consideradas

Cultura (atividade)	Símbolo	Preço (R\$/t)	Produtividade (t/ha)	Custos (R\$/ha)	Receita líquida (R\$/ha)
milho	X <sub>1</sub>	290	5	1.800	-350
feijão	X <sub>2</sub>	1.270	2	2.720	201
tomate	X <sub>3</sub>	500	65	29.000	3.500
melão	X <sub>4</sub>	600	25	10.000	5.000

Tabela 2. Requerimentos de recursos por unidade de área de cada atividade

Cultura (atividade)	Requerimento de irrigação (m <sup>3</sup> /ha)	Mão de obra (dia-homem/ha)	Terra (ha/ha)
milho	5.100	33	1
feijão	3.800	30	1
tomate	1.550	550	1
melão	1.350	85	1

Restrições quanto aos recursos água disponível para irrigação, mão de obra e terra são apresentadas na Tabela 3, enquanto na Tabela 4 são apresentados dados relativos às restrições de produção.

O planejamento em nível de propriedade envolve a otimização de variáveis de interesse do produtor, o qual é o tomador de decisão neste nível. De modo geral, a variável de interesse é o retorno financeiro, o qual deve ser maximizado. O retorno financeiro pode ser verificado por meio de critérios de avaliação de projetos, como o valor presente líquido, a taxa interna de retorno e a relação benefício-custo.

Segundo Woiler e Mathias (1994), o valor atual líquido, ou valor presente líquido, pode ser definido como a soma algébrica dos saldos do fluxo de caixa, descontando-se determinada taxa de juros (também denominada taxa de desconto) para determinada data. A grande vantagem na utilização deste índice é que o valor do dinheiro no tempo e as receitas líquidas, ao longo de toda vida do projeto, são levados em conta.

Quando se avalia um projeto, independentemente de alternativas, o critério de decisão consiste em aceitá-lo se  $VPL > 0$ . Na escolha entre projetos alternativos, a preferência recai sobre aquele com maior VPL positivo (Contador, 2000).

O termo ‘valor presente líquido’, preferivelmente a ‘valor presente’, é usado para chamar a atenção para o fato que os fluxos monetários medem as diferenças entre as receitas operacionais líquidas e os investimentos adicionais feitos com o projeto (Gittinger, 1982; Noronha, 1987).

O valor presente líquido (VPL) de um projeto é definido utilizando-se a equação

$$VPL = \sum_{t=0}^n \frac{L_t}{(1+i)^t} \quad (\text{eq. 1})$$

em que

$L_t$  - valor do fluxo líquido do projeto no ano  $t$ , \$;  $n$  - horizonte do projeto

(ex.: número de anos);  $t$  - ano  $t$ ; e  $i$  - taxa de desconto, decimal.

Contador (2000), descrevendo alguns critérios de avaliação de projetos, entre eles o valor presente líquido (VPL), taxa interna de retorno, payback e a relação benefício-custo, conclui que o único que permanece incólume é o VPL. O autor comenta que:

“... O bom-senso e a honestidade recomendam que o VPL seja o indicador básico. Isto não quer dizer que outros parâmetros não sejam utilizados para auxiliar no processo decisório, mas o papel destes parâmetros deve ser apenas complementar”.

A metodologia para planejamento em nível de propriedade, aqui apresentada, envolve procedimentos de otimização, por meio de programação linear, conjugado com análise de risco. As duas técnicas serão tratadas a seguir.

## 2.1. Programação linear

Um problema típico de programação matemática, de maximização, pode ser escrito como

$$\max Z = Z(\mathbf{X})$$

tal que

$$\begin{aligned} g_i(\mathbf{X}) &\leq 0 & i = 1, \dots, m \\ X_j &\geq 0 & j = 1, \dots, n \end{aligned}$$

em que

$\mathbf{X}$  - vetor de variáveis reais;  $Z(\mathbf{X})$  - função objetivo;  $g$  - restrição;  $i$  - número inteiro índice para a restrição;  $m$  - número de restrições;  $j$  - número inteiro índice para a atividade;  $n$  - número de atividades

Programação linear é o método de programação matemática mais difundido para planejamento de empreendimentos agrícolas (Hardaker et al., 2004). Em programação linear,  $Z(\mathbf{X})$  e as restrições são funções lineares. Isto não restringe, necessariamente, a liberdade de expressão do construtor do modelo, pois, na mai-

oria dos casos, problemas não lineares podem ser prontamente convertidos em uma forma linearizada. Usualmente, não existe perda computacional nesta conversão, podendo haver ganhos em alguns casos (Hazell & Norton, 1986).

Para citar um exemplo de conversão de um problema não linear em um linear, Dantas Neto (1994) implementou funções não lineares de resposta da cultura à água, em um modelo de programação linear aplicado ao planejamento da irrigação no Projeto Senador Nilo Coelho (Petrolina - PE).

Um modelo de programação linear, aplicável em nível de propriedade, requer as seguintes especificações:

- a) Conjunto de atividades alternativas para a propriedade em questão, bem como os requerimentos de recursos associados a cada atividade (ex.: requerimentos de irrigação, fertilizantes, defensivos, mão de obra, etc.) e restrições de produção (restrições devido a capacidade de mercado, processamento da produção, necessidade a atender contratos de produção mínima pré-estabelecidos, etc).
- b) Restrições de recursos (ex.: limitações de área, água para irrigação, mão de obra, capital, etc.)
- c) Produtividades de culturas, preços de produção e custos de produção, os quais definem o retorno financeiro de cada atividade.

Atividade é aqui definida com base na cultura, tecnologia empregada no cultivo (aparte irrigação), época de plantio, ano de plantio, tipo de solo, esquema de irrigação e, ou drenagem e categoria do produtor. Nível da atividade refere-se à área destinada para exploração de cada atividade.

## 2.2. Exemplo - modelo simples de programação linear

O entendimento da técnica da programação linear pode ser favorecido por meio do estudo de um modelo simples, apresentado a

ção linear pode ser escrito algebricamente como:

Função objetivo:

$$\max Z = Z(X) = \sum_{j=1}^4 c_j X_j = -350 X_1 + 201 X_2 + 3.500 X_3 + 5.000 X_4 \quad (\text{eq. 14})$$

tal que,

$$\begin{aligned} 5.100 X_1 + 3.800 X_2 + 1.550 X_3 + 1.350 X_4 &\leq 14.000 \\ 33 X_1 + 30 X_2 + 550 X_3 + 85 X_4 &\leq 1.600 \\ X_1 + X_2 + X_3 + X_4 &\leq 10 \\ 5 X_1 &\geq 4 \\ &\leq 10 \\ &\geq 100 \\ &\geq 100 \\ &\leq 130 \end{aligned} \quad (\text{eq. 15})$$

e

$$X_j \geq 0, \quad j = 1, \dots, n \quad (\text{eq. 16})$$

O problema acima apresentado é conhecido como problema de programação linear primal, utilizado na tomada de decisão em relação à quantidade de área a ser destinada a cada atividade, com o objetivo de maximizar o retorno financeiro. A cada modelo de programação linear primal associa-se um modelo de programação linear dual (Hazell & Norton, 1986; Frizzone et al., 2005), por meio do qual se obtém a valoração de quanto a variação unitária em cada recurso (coeficientes  $b_j$ ) impacta sobre a variável a ser otimizada (no caso, a variável a ser otimizada é o retorno financeiro, por meio de maximização). Da teoria econômica, estes valores são denominados ‘valor marginal do produto’; na literatura de programação linear, estes valores são denominados ‘preço-sombra’ (Hazell & Norton, 1986), que serão novamente abordados adiante.

Os procedimentos utilizados na solução de problemas de otimização sujeitos a restrições por desigualdades foram desenvolvidos apenas a partir da década de 40, por George B. Dantzig e John Von Neumann. A não ser para problemas com pequeno número de

Por meio de restrições quanto à produção, podem ser consideradas capacidades de armazenamento, processamento e de mercado, além da intenção em variar o cultivo, impondo, deste modo, limites superiores à produção. Também se pode representar a necessidade de produção mínima de algumas culturas, que podem existir, por exemplo, devido a acordos preestabelecidos com terceiros ou ao requerimento deste produto para consumo dentro da propriedade (ex.: milho pode ser necessário como fonte de ração animal).

Tabela 3. Restrições quanto a recursos

Água disponível para irrigação (m <sup>3</sup> )	Mão de obra (dias-homem)	Terra (ha)
14.000	1.600	10

Tabela 4. Restrições de produção

Cultura (atividade)	Restrições $\geq$ (t)	Restrições $\leq$ (t)
milho	4	
feijão		10
tomate	100	
melão	100	130

Com base nas tabelas 1 a 4, o modelo de programação linear pode ser montado. Conforme dito anteriormente, o objetivo do proprietário é a maximização do retorno financeiro, ou seja, do lucro, que representaremos por  $Z$  (R\$). Para uma determinada atividade representada por um número inteiro  $j$  (indexada por  $j$ ), o retorno financeiro  $Z_j$  é obtido por

$$Z_j = (P_j Y_j - C_j) X_j = c_j X_j \quad (\text{eq. 2})$$

em que

$P_j$  - preço de venda do produto, obtido pelo produtor, para a atividade  $j$ , R\$/t;  $Y_j$  - produtividade para a atividade  $j$ , t/ha;  $C_j$  - custo de produção para a atividade  $j$ , R\$/ha;  $X_j$  - nível da atividade  $j$ , ha;  $c_j$  - receita líquida da atividade  $j$ , R\$/ha

O retorno financeiro total,  $Z$ , é dado pela soma dos retornos financeiros de cada atividade, ou seja,

$$Z = Z(X) = \sum_{j=1}^n Z_j = \sum_{j=1}^n c_j X_j \quad (\text{eq. 3})$$

Assim,  $Z(X)$  é a função objetivo que, neste caso, deve ser maximizada. Os coeficientes  $c_j$ , que representam a receita líquida de cada atividade (última coluna da Tabela 1), são os coeficientes técnicos da função objetivo. Com base na Tabela 1, reescreve-se a Equação 3 como

$$Z(X) = \sum_{j=1}^4 c_j X_j = -350X_1 + 201X_2 + 3.500X_3 + 5000X_4 \quad (\text{eq. 4})$$

O problema em apreço consiste em maximizar  $Z(X)$ , respeitando-se um conjunto de restrições apresentadas nas tabelas 3 e 4 e as condições de não negatividade. Se não fosse pelas restrições, teríamos um problema a ser resolvido utilizando-se os métodos do cálculo diferencial. As restrições são representadas por meio de equações, tendo a seguinte forma:

$$\sum_{j=1}^n a_{ij} X_j \leq b_i, \quad i = 1, \dots, m \quad (\text{eq. 5})$$

em que

$a_{ij}$  - quantidade do  $i$ -ésimo recurso por unidade da  $j$ -ésima atividade. Neste contexto, a unidade de atividade é hectare; considerando o recurso mão de obra, a unidade respectiva de  $a$  seria então dias-homem  $ha^{-1}$ ;  $b_i$  - quantidade disponível do  $i$ -ésimo recurso (ex.: em relação à restrição de água disponível para irrigação, a unidade respectiva de  $b$  seria  $m^3$ ).

Na Equação 5,  $a_{ij}$  e  $b_i$  são os coeficientes técnicos das restrições. Por convenção, as restrições são denominadas linhas e as atividades colunas. As quantidades fixas de recursos  $b_i$  são denominadas “lado direito” do problema. No caso aqui apresentado, as restrições

são do tipo menor ou igual, podendo também ocorrer restrições do tipo maior ou igual ou igual. No problema aqui apresentado, os coeficientes  $a_{ij}$  são dados na Tabela 2, enquanto os coeficientes  $b_i$  são dados nas tabelas 3 e 4.

Com base nas tabelas 2 a 4, a Equação 5 pode ser expandida para cada restrição, conforme apresentado a seguir.

Restrição quanto à água disponível para irrigação:

$$5.100 X_1 + 3.800 X_2 + 1.550 X_3 + 1.350 X_4 \leq 14.000 \quad (\text{eq. 6})$$

Restrição quanto à mão de obra:

$$33 X_1 + 30 X_2 + 550 X_3 + 85 X_4 \leq 1.600 \quad (\text{eq. 7})$$

Restrição quanto à terra (área a ser cultivada):

$$X_1 + X_2 + X_3 + X_4 \leq 10 \quad (\text{eq. 8})$$

Restrição quanto à produção de milho:

$$Y_1 X_1 = 5X_1 \geq 4 \quad (\text{eq. 9})$$

Restrição quanto à produção de feijão:

$$Y_2 X_2 = 2X_2 \leq 10 \quad (\text{eq. 10})$$

Restrição quanto à produção de tomate:

$$Y_3 X_3 = 65X_3 \geq 100 \quad (\text{eq. 11})$$

Restrições quanto à produção de melão:

$$Y_4 X_4 = 25X_4 \geq 100 \quad (\text{eq. 12})$$

$$Y_4 X_4 = 25X_4 \leq 130 \quad (\text{eq. 13})$$

Na inequações 9 a 13, relativas às restrições de produção, as produtividades  $Y_j$ , dadas na Tabela 1, são os coeficientes técnicos. Alternativamente, as restrições de produção poderiam ser dadas como limite de área para cada cultura (ha) ao invés do limite na quantidade produzida (t), aqui utilizado.

O modelo de programação linear deve contar ainda com as restrições de não negatividade, que garantem que os níveis de atividades  $X_j$  sejam maiores ou iguais a zero. Resumindo, a partir das equações 3 a 13 e das restrições de não negatividade, nosso modelo de programa-



D - Campo onde são indicadas as restrições.

E - Botões empregados para adicionar, alterar e excluir as restrições.

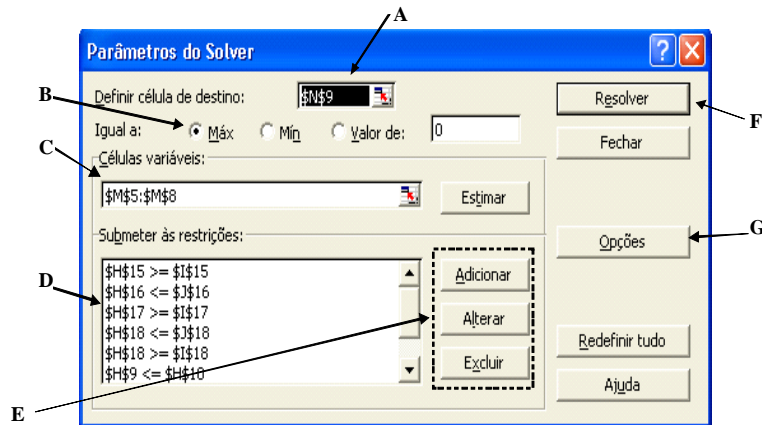


Figura 3. Formulário do Solver.

F - Botão para comando de resolução do problema, devendo ser acionado após o preenchimento completo do formulário e da configuração das opções (campo G).

G - Botão para acessar o formulário de opções, apresentado na Figura 4; nesta figura-se estão sendo indicadas as seguintes opções a serem efetivadas “presumir modelo linear” e “presumir não negativos”. Esta segunda opção refere-se à condição de não negatividade (inequação 16).

Após preenchidos os formulários do Solver e acionando o botão indicado no campo F da Figura 3, será disponibilizado o formulário de acesso aos resultados do Solver (nem sempre haverá solução possível para o modelo de programação linear estudado), conforme apresentado na Figura 5. Neste formulário, o usuário terá a opção de gerar relatórios com os resultados (campo na parte direita do formulário). Conforme se observa na Figura 5, solicitou-se a geração de três relatórios: Resposta, Sensibilidade e Limites.

variáveis (digamos até quatro variáveis), requer-se o emprego de computadores para obtenção da solução, sendo esta uma das razões para o desenvolvimento relativamente tardio dos procedimentos de solução para problemas de programação matemática.

O matemático George Bernard Dantzig (1914-2005), aclamado como o “pai a programação linear”, fez, em 1947, sua mais famosa contribuição para a Matemática, desenvolvendo o método Simplex de otimização. O desenvolvimento deste método teve início no trabalho de Dantzig junto à Força Aérea dos Estados Unidos, onde se especializou em métodos de planejamento resolvidos com calculadoras. O termo programação (‘programming’) advém da aplicação na logística militar. Dantzig mecanizou o processo de programação introduzindo a programação em uma estrutura linear.

Não é objetivo, neste texto, a apresentação do algoritmo Simplex ou de outros algoritmos baseados no Simplex, os quais são abordados na literatura relacionada à programação matemática, citando-se Hazell e Norton (1986), Gerald e Wheatley (2003) e Frizzone et al. (2005), além do clássico Linear Programming and Extensions (Dantzig, 1963).

Existem diversos programas computacionais em que algoritmos baseados no Simplex são implementados. Algumas ferramentas são disponibilizadas para serem utilizadas por meio de planilhas eletrônicas. Por exemplo, a ferramenta Solver é disponibilizada junto à planilha eletrônica Microsoft® Excel, sendo empregada para obtenção da solução no exemplo aqui apresentado. Os modelos de programação linear, típicos do problema em questão (nível de propriedade), possuem dimensão adequada ao uso desta ferramenta, que suporta até 200 variáveis lineares (atividades) e 200 restrições. Relatórios são também fornecidos com o uso do Excel-Solver, apresentando as soluções primal e dual, esta última fornecendo informações sobre preços sombra das restrições limitantes e custos reduzidos das atividades excluídas.

O modelo de programação linear exemplo, dado pela Equação 14 (função objetivo), pelo conjunto de inequações 15 (restrições) e 16 (não negatividade) foi implementado em uma planilha Excel, conforme apresentado na Figura 2. Nesta planilha, as células têm as seguintes referências:

◆ Células A2 a E8: células referentes à função objetivo (Tabela 1 e Equação 14); as células E5 a E8 são os coeficientes  $c_j$  da função objetivo.

◆ Células A12 a D18: coeficientes técnicos  $a_{ij}$  empregados nas restrições de recursos (Tabela 2; coeficientes empregados nas inequações 6 a 8).

◆ Células G2 a J10: implementação das restrições quanto aos recursos (nas inequações 6 a 8). Por exemplo, a célula H5 é igual ao produto da célula B15 pela célula M5. O valor inicial é igual a zero, devido ao valor inicial da célula M5, destinada à área para cultivo do milho, ou seja, destinada ao nível da atividade  $X_1$ . Outros exemplos, a célula I6 = célula C16 \* célula M6; célula J8 = célula D18 \* célula M18. As células H9, I9 e J9 são as somas das respectivas células acima. Nas células H10, I10 e J10 são colocadas as restrições, conforme a Tabela 3 (coeficientes  $b_j$ ).

◆ Células G12 a J18: Restrições quanto à produção (Tabela 4 e inequações 9 a 13). Na coluna H15 a H18 são implementados os produtos das produtividades (células C5 a C8) pelas áreas destinadas aos cultivos (células M5 a M8), ou seja, os coeficientes técnicos  $a_{ij}$  das restrições de produção. Os valores nas colunas I e J são restrições  $b_j$  relativas à produção

◆ Células M5 a M8: áreas a serem destinadas às diferentes atividades (níveis das atividades). Estas células serão modificadas conforme o algoritmo Simplex. Inicialmente, é necessário indicar valores iniciais (utilizou-se zero como valor inicial para todas as áreas).

◆ Células N5 a N8: receitas resultantes das atividades, resultantes da multiplicação das receitas líquidas por unidade de área (células E5 a E8) pelas áreas (células M5 a M8).

◆ Célula N9: somatório das receitas líquidas; é a célula a ser maximizada.

A ferramenta Solver pode ser acessada no menu do Excel Ferramentas/Solver. Caso não esteja disponibilizado o Solver no Excel, o mesmo pode ser instalado por meio do menu Ferramentas/Suplementos.

Na Figura 3 apresenta-se o formulário do Solver, já preenchido para o modelo em questão. Nesta figura, são indicados os seguintes campos no formulário do Solver:

A - Campo onde se indica a célula a ser otimizada.

B - Campo para indicar que o problema de programação matemática é de maximização.

C - Campo onde são indicadas as células a serem variadas para obtenção da solução ótima, neste caso, as células M5 a M8, referentes às áreas destinadas a cada atividades, ou seja, aos níveis das atividades. Conforme dito acima, foram utilizados valores iguais a zero como iniciais.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
1														
2	Cultura	Preço	Produtividade	Custos	Receita		Cultura	Requerimento	Mão de obra	Terra		Cultura	Áreas	Receita
3					líquida		de irrigação					de irrigação		líquida
4		(R\$/t)	(t/ha)	(R\$/ha)	(R\$/ha)		(m <sup>2</sup> )	(dia-homem)	(ha)			(ha)		(R\$/ha)
5	milho	290	5	1.800	-350		milho	0	0	0,00		milho	0,00	0
6	feijão	1.270	2	2.720	201		feijão	0	0	0,00		feijão	0,00	0
7	tomate	500	65	29.000	3.500		tomate	0	0	0,00		tomate	0,00	0
8	melão	600	25	10.000	5.000		melão	0	0	0,00		melão	0,00	0
9							Soma	0	0	0				0
10							Restrições	14.000	1.600	10				
11														
12	Cultura	Requerimento	Mão de obra	Terra			Cultura	Produção	Restrições	Restrições				
13		de irrigação							>=	<=				
14		(m <sup>2</sup> /ha)	(dia-homem/ha)	(ha/ha)				(t)	(t)	(t)				
15	milho	5.100	33	1			milho	0,00	4					
16	feijão	3.800	30	1			feijão	0,00		10				
17	tomate	1.550	550	1			tomate	0,00	100					
18	melão	1.350	85	1			melão	0,00	100	130				

Figura 2. Implementação do modelo de programação linear exemplo na planilha Excel; planilha apresentada antes da otimização

se alteração no nível apenas da variável em questão (condição *ceteris paribus*). O intervalo não pode ser considerado para analisar a estabilidade da solução com respeito a mudanças simultâneas em mais de um coeficiente.

As linhas 13 a 23 do relatório de sensibilidade, apresentado na Figura 7, referem-se à estabilidade da solução frente a modificações nos valores das restrições. São apresentados os preços sombra dos recursos em cada restrição atuante, bem como os acréscimos e decréscimos permissíveis. O preço sombra representa o máximo acréscimo sobre o valor otimizado da função objetivo (valor presente líquido total), para o aumento em uma unidade na correspondente restrição. Os acréscimos e decréscimos permissíveis indicam o intervalo, no qual pode-se variar o valor da restrição, mantendo o valor do preço sombra. Quando o valor da restrição limitante é alterado neste intervalo, os níveis das atividades serão alterados, mas não será alterada a base da solução ótima, ou seja, não será alterado o conjunto de atividades presentes na solução ótima. Observa-se que as restrições relativas à disponibilidade de água para irrigação (linha 23) e à produção de milho (linha 19) e melão foram limitantes.

Na linha 23 do relatório de sensibilidade apresentado na Figura 7, observa-se o preço sombra relativo à água disponível para irrigação, igual a R\$ 2,00/m<sup>3</sup>, significando que para cada metro cúbico extra de água, a ser somado ao valor da restrição (14.000 m<sup>3</sup>), será obtido um incremento igual a R\$ 2,00 no retorno financeiro. Ainda nesta mesma linha, com base nos acréscimos e decréscimos permissíveis, observa-se que o preço sombra teria este valor para a disponibilidade de água na irrigação variando de 13.485 a 14.289 m<sup>3</sup>.

Observa-se na Figura 7 um preço sombra negativo para a produção de milho, igual R\$ -2.373,23/t. Preços sombras negativos ocorrem quando uma restrição de valor mínimo, ou seja, do tipo maior ou

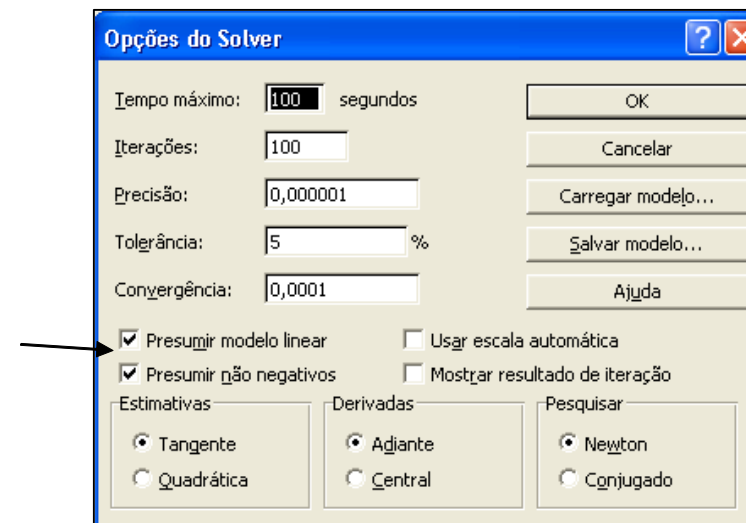


Figura 4. Formulário de opções do Solver, indicando-se as opções em “presumir modelo linear” e “presumir não negativos”.

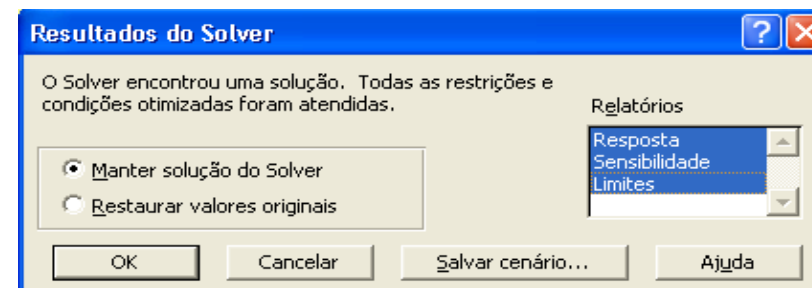


Figura 5. Formulário para acesso aos resultados do Solver.

Após a execução da otimização, algumas células terão valores modificados em relação ao que se observa na Figura 2, conforme apresentado na Figura 6. Na planilha, observa-se os níveis designados para as atividades (áreas de plantio, dadas nas células M5 a M8); o padrão ótimo de cultivo conta com 0,8 ha de milho, 0 hectare de feijão (essa variável não participa da base, sendo, portanto, não básica), 1,87 ha de tomate e 5,2 ha de melão. Na célula N9 observa-se o valor maximizado do retorno financeiro, igual a R\$ 32.268.

	G	H	I	J	K	L	M	N
1								
2	Cultura	Requerimento	Mão de obra	Terra		Cultura	Áreas	Receita
3		de irrigação						líquida
4		(m <sup>3</sup> )	(dia-homem)	(ha)			(ha)	(R\$)
5	milho	4.080	26	0,80		milho	0,80	-280
6	feijão	0	0	0,00		feijão	0,00	0
7	tomate	2.900	1.029	1,87		tomate	1,87	6.548
8	melão	7.020	442	5,20		melão	5,20	26.000
9	Soma	14.000	1.497	8				32.268
10	Restrições	14.000	1.600	10				
11								
12	Cultura	Produção	Restrições	Restrições				
13			>=	<=				
14		(t)	(t)	(t)				
15	milho	4,00	4					
16	feijão	0,00		10				
17	tomate	121,61	100					
18	melão	130,00	100	130				

Figura 6. Planilha no Excel após execução da otimização.

### 2.3. Análise de sensibilidade da solução do modelo de programação linear

A análise de sensibilidade consiste em fazer variarem variáveis de entrada e medir o efeito em variáveis de saída. Tal procedimento é, usualmente, empregado em análises de pós-otimização de modelos de programação matemática, em que a estabilidade da solução é avaliada, sob uma condição *ceteris paribus*, por meio da qual o efeito de uma mudança em um único coeficiente é considerado, enquanto todos os outros coeficientes são mantidos constantes (Hazell & Norton, 1986).

Os relatórios gerados pelo Solver são apresentados como novas planilhas no mesmo arquivo do Excel, sendo gerados por meio do formulário de acessos aos resultados do Solver (Figura 5). O relatório de sensibilidade, relativo à análise de sensibilidade do modelo de programação linear exemplo, definido pela Equação 14 (função objetivo), pelo conjunto de inequações 15 (restrições) e 16 (não negatividade), é apresentado na Figura 7. O relatório de sensibilidade é apresentado em dois conjuntos de células. O primeiro conjunto é o de “células ajustáveis”, referente aos coeficientes técnicos (receitas líquidas) na função objetivo. O segundo conjunto de células é relativo às restrições.

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	Microsoft Excel 10.0 Relatório de sensibilidade							
2	Planilha: [MPL-simples-auxiliar.xls]ModSimplesPL							
3	Relatório criado: 24/7/2008							
4								
5	Células ajustáveis							
6				Final	Reduzido	Objetivo	Permissível	Permissível
7	Célula	Nome	Valor	Custo	Coefficiente	Acréscimo	Decréscimo	
8	\$M\$5	milho (ha)	0,80	0,00	-350	11866,12903	1E+30	
9	\$M\$6	feijão (ha)	0,00	-8379,65	201	8379,645161	1E+30	
10	\$M\$7	tomate (ha)	1,87	0,00	3500	2240,740741	3418,013158	
11	\$M\$8	melão (ha)	5,20	0,00	5000	1E+30	1951,612903	
12								
13	Restrições							
14			Final	Sombra	Restrição	Permissível	Permissível	
15	Célula	Nome	Valor	Preço	Lateral R.H.	Acréscimo	Decréscimo	
16	\$H\$18	melão (t)	130,00	0,00	100	30	1E+30	
17	\$I\$9	Soma (dia-homem)	1.497	0	1600	1E+30	102,5677419	
18	\$J\$9	Soma (ha)	8	0	10	1E+30	2,129032258	
19	\$H\$15	milho (t)	4,00	-2373,23	-4	0,505279035	0,288650435	
20	\$H\$18	melão (t)	130,00	78,06	130	9,544159544	6,507572657	
21	\$H\$17	tomate (t)	121,61	0,00	100	21,61290323	1E+30	
22	\$H\$16	feijão (t)	0,00	0,00	10	1E+30	10	
23	\$H\$9	Soma (m3)	14.000	2	14000	289,0545455	515,3846154	

Figura 7. Relatório de sensibilidade gerado pelo Solver.

Na parte do relatório de sensibilidade relativa às células ajustáveis (linhas 5 a 11 na Figura 7), são apresentados o custo reduzido, o coeficiente de cada atividade na função objetivo e os acréscimos e decréscimos permissíveis nestes coeficientes. O custo reduzido indica o quanto o valor da função objetivo (retorno financeiro, Z) declinaria, caso uma correspondente atividade, excluída da solução ótima, fosse forçada dentro da solução, ou seja, fosse considerada no padrão de cultivo. O negativo do custo reduzido é a quantidade pela qual a receita líquida da atividade correspondente (coeficiente técnico da função objetivo da atividade correspondente) teria de ser aumentada, para que a atividade entrasse na solução ótima. Assim, observa-se na Figura 7 que a receita líquida para a cultura do feijão deveria ser aumentada em R\$ 8.379,65 para que esta atividade entrasse na base da solução ótima.

Os acréscimos e decréscimos permissíveis nos coeficientes da função objetivo (Figura 7, linhas 6 a 11, colunas G e H) indicam o intervalo no qual a base da solução (conjunto de atividades que compõe a solução ótima) não é alterada. Nestes intervalos, os níveis das atividades (áreas de cultivo) permanecerão constantes, embora o valor do retorno financeiro (função-objetivo) e os preços sombra sejam alterados. Ressalta-se que esses intervalos são obtidos considerando-

Os coeficientes técnicos de irrigação (por exemplo, os coeficientes listados na Tabela 2 e na inequação 6), são sujeitos a uma expressiva variabilidade. As principais fontes dessa variabilidade são as variações na quantidade de precipitação, demanda de evapotranspiração e fluxo ascendente oriundo do lençol freático, o qual depende, dentre outros fatores, da profundidade do lençol freático.

Quando o planejamento é executado em base mensal, deve-se considerar, na simulação de risco, que os coeficientes técnicos de irrigação (requerimentos de irrigação dos cultivos considerados) tem, geralmente, elevada correlação positiva (se para um cultivo *A* o requerimento de irrigação em um determinado mês for acima da média, o mesmo deve ocorrer para um cultivo *B*). Isto implica que, em certos meses, o requerimento total de irrigação pode alcançar valores consideravelmente acima da média. Em contrapartida, o volume de água disponível para irrigação, neste mês, deverá ser abaixo da média, pois, em geral, o requerimento de irrigação e a disponibilidade de água para irrigação são correlacionados negativamente. Evidencia-se, assim, a importância de se considerar a variabilidade nos coeficientes técnicos de irrigação e da avaliação do risco de ocorrência de escassez de água para os padrões de cultivo, obtidos com a programação linear.

No que se refere às incertezas relativas ao retorno financeiro, a análise de risco no escopo do planejamento em agricultura irrigada deve também abranger, além da variabilidade nos requerimentos de irrigação (determinantes de custos relativos à irrigação), a variabilidade na produtividade das culturas, preços de produtos e outros custos de produção, dentre outros fatores.

Assim como a programação linear, a análise de risco com base em métodos de simulação como o de Monte Carlo requer o emprego de recursos computacionais. O programa @RISK (Palisade Corporation, 2002) pode ser empregado junto a se o modelo de progra-

igual é limitante. Neste caso, foi considerada uma produção mínima de milho igual a 4 t. O preço sombra obtido implica que para cada tonelada de incremento no valor da restrição mínima para a produção de milho haverá um decréscimo de R\$ 2.373,23 no retorno financeiro. Este valor de preço sombra é válido para o valor da restrição no intervalo de 4,5 a 3,7 tonelada, conforme o acréscimo e decréscimo permissíveis verificados na linha 19 do relatório de sensibilidade (Figura 7).

Outra restrição limitante foi observada para a produção máxima de melão, igual a 130 t (linha 20 do relatório de sensibilidade - Figura 7), implicando que para tonelada incrementada na restrição haveria um incremento de R\$ 78,06, o que poderia indicar, por exemplo, que o proprietário deveria envidar esforços no sentido de aumentar o mercado para esta cultura. O valor do preço sombra, igual a R\$ 78,06/t é mantido para o intervalo de 123 a 140 t para a restrição na produção máxima de melão (acréscimo e decréscimo permissíveis).

#### 2.4. Análise de risco

Os termos ‘risco’ e ‘incerteza’ podem ser definidos de várias maneiras. Uma distinção comum consiste em dizer que risco é o conhecimento imperfeito, em que as probabilidades de possíveis resultados são conhecidas, enquanto a incerteza existe quando as probabilidades não são conhecidas. Entretanto, esta distinção tem pouca utilidade, pois os casos em que as probabilidades são objetivamente conhecidas são exceções. Preferivelmente, de acordo com o uso comum, a incerteza é definida como conhecimento imperfeito e o risco como conseqüências incertas, particularmente conseqüências desfavoráveis (Hardaker et al., 2004).

Para ilustrar, um produtor poderia dizer que estaria incerto acerca da produtividade esperada para a próxima safra de sequeiro, existindo risco de ocorrência de chuvas abaixo da média e, conseqüentemente, risco de baixa produtividade. Assumir riscos, portanto, implica

em exposição a possibilidades de prejuízos, perdas ou injúrias.

Análise de sensibilidade, abordada no item anterior, e simulação de risco são duas técnicas, dentre outras, para o tratamento de risco em projetos de investimento (Frizzone & Silveira, 1996).

Na análise de risco, as técnicas de análise de sensibilidade e simulação de risco são complementares. A análise de sensibilidade tem enfoque sobre parâmetros de entrada, verificando-se o efeito de variações em cada parâmetro de entrada, mantendo-se os demais constantes, sobre uma determinada variável de saída. Por outro lado, o enfoque na simulação de risco é a variável de saída, buscando-se gerar, com base nas distribuições de probabilidade de parâmetros de entrada e em correlações entre estes parâmetros, a função de probabilidade acumulada para a variável de saída. Como parâmetros de entrada tem-se, por exemplo, coeficientes técnicos da função objetivo e das inequações de restrições em modelos de programação linear; a variável de saída, neste exemplo, seria o retorno financeiro.

Na simulação de risco são utilizadas técnicas de amostragem, como o método de Monte Carlo, Hipercubo Latino ou Amostragem Descritiva (Saliby, 1997). O método de Monte Carlo é um tipo especial de simulação utilizada em modelos envolvendo eventos probabilísticos (Harr, 1987; Palisade Corporation, 2002). Esta denominação é devido ao método utilizar um processo aleatório, tal como o lançamento de dados ou o girar de uma roleta, para selecionar os valores de cada variável em cada tentativa. Este método permite, essencialmente, simular o comportamento de processos que dependem de fatores aleatórios. Originou-se do trabalho de von Neumann e Ulan, desenvolvido em 1940, e consistia de uma técnica que foi utilizada para solucionar problemas de blindagem em reatores nucleares.

No método de Monte Carlo utiliza-se a função de probabilidade acumulada (FPA),  $F(x) = P[x \leq r]$ , com imagem no intervalo  $[0,1]$ .

Assim, se um valor aleatório, ou número aleatório,  $R_v$ , no intervalo  $(0,1)$ , é gerado, o valor de  $x = r$ , satisfazendo  $F(r) = R_v$ , será um valor aleatório no domínio da função densidade de probabilidade  $f(x)$ , da qual  $F(r)$  é a FPA. O procedimento é ilustrado na Figura 8. O passo 1 consiste na geração do valor aleatório  $R_v$ , enquanto os passos 2 e 3 referem-se à determinação de  $x = r$ , tal que  $F(r) = R_v$ .

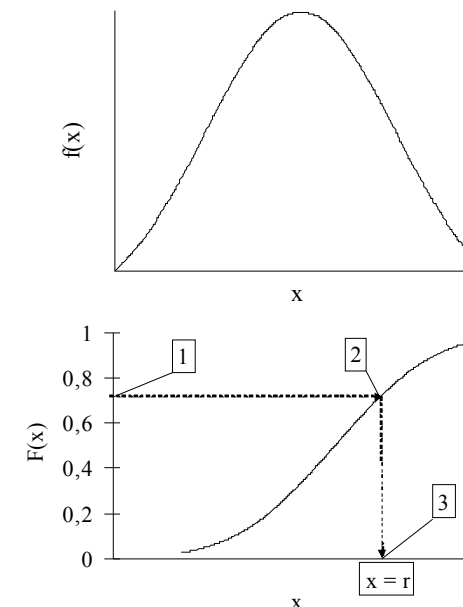


Figura 8. Representação gráfica do método de Monte Carlo, em que  $F(r) = P[x \leq r]$ .

São diversas as fontes de incertezas na atividade agrícola. A instabilidade quanto ao retorno financeiro é consequência da variabilidade nos preços de produtos agrícolas, custos, produtividades, fatores climáticos, entre outros. Técnicas que permitam avaliar, *a priori*, os riscos decorrentes dessas incertezas devem acompanhar os estudos de planejamento. No planejamento em agricultura irrigada, a análise de risco pode ser aplicada com vistas aos estudos de incertezas relativas ao retorno financeiro e à disponibilidade de água para irrigação.

de 8% ao ano, sendo este valor obtido pela diferença entre a taxa Selic anual, para junho de 2007, igual a 12,43% ao ano, e a meta de inflação em 2007 do Conselho Monetário Nacional, igual a 4,5% ao ano.

O exemplo de aplicação dos métodos de planejamentos será conduzido em nível de propriedade, considerando cenários do perímetro de irrigação do Jaíba, localizado no Norte de Minas Gerais, às margens do rio São Francisco. Serão consideradas dezesseis culturas no total, sendo três perenes e treze anuais:

- ◆ Culturas perenes: banana prata-anã, limão e maracujá;
- ◆ Culturas anuais: alface semente, algodão, cebola inverno, cebola verão, cenoura, feijão, melancia, melancia semente, melão, milho, pepino conserva, quiabo semente e tomate mesa.

### 3.1. Obtenção de requerimentos de irrigação e produtividade de culturas

Dados de requerimento mensal de irrigação para as diferentes culturas, RIT ( $m^3/ha$ ), e dados de produtividade, Y ( $t/ha$ ), relativos a diferentes métodos e manejos de irrigação, foram obtidos por modelagem, empregando-se o programa MCID (Borges Júnior et al., 2008(b); Ferreira et al., 2006). Outros programas, como o SISDA (Mantovani et al., 2003), são também potencialmente utilizáveis para obtenção de coeficientes técnicos de irrigação e produtividades. Vale frisar que no modelo de programação linear, MPL, serão utilizados valores modais (modas) de RIT e Y, enquanto na análise de risco é necessário um conhecimento dos parâmetros das distribuições de probabilidade. Como são consideradas distribuições de probabilidade normais para estas variáveis, os parâmetros necessários são as modas (equivalente à média) e o desvio padrão.

Serão considerados os seguintes dados de cultura, listados em Borges Júnior et al. (2008(a)): duração de estádios fenológicos e ci-

mação linear estiver implementado em planilha eletrônica, após a obtenção da solução ótima (por exemplo, máximo retorno financeiro), uma cópia da planilha pode ser utilizada para execução da análise de risco por meio do @RISK.

Outro software desenvolvido exclusivamente para execução de análise de risco, baseada no método de Monte Carlo, em modelos de programação linear para otimização de estratégias de produção em agricultura irrigada, é o P-RISCO (Borges Júnior, 2004; Borges Júnior et al., 2007). Neste programa, desenvolvido em Delphi (Borland Software Corporation), partes da planilha eletrônica contendo o modelo de programação linear resolvido podem ser coladas nos formulários. Para aplicação do P-RISCO, também são requeridos parâmetros de distribuições de probabilidade de variáveis de entrada (requerimento mensal de irrigação por cultivo, produtividade de culturas, preços dos produtos, custos variáveis e taxa de desconto anual), todas ou aquelas definidas pelo usuário como estocásticas. Uma aplicação do P-RISCO será apresentada no próximo item.

A análise de risco pode também ser conduzida diretamente em modelos de programação matemática, trabalhando-se com uma análise baseada na média (E) e na variância (V) do retorno financeiro. Na análise E-V, não contemplada neste capítulo, considera-se o princípio de que proprietários tendem a optar por estratégias de produção que conduzam a elevadas médias e baixas variâncias do retorno financeiro. Este tipo de análise pode ser conduzido por meio de programação quadrática e aproximações por programação linear, como o modelo MOTAD (Minimization Of the Total Absolute Deviations) (Hazell & Norton, 1986; Hardaker et al., 2004; Frizzone et al., 2005).

A análise E-V (ou análises com base na média e no desvio padrão) envolve o emprego de séries históricas de valores dos coeficientes técnicos da função objetivo (coeficientes  $c_j$  na equação 14), ou

seja, com valores obtidos em anos anteriores para a receita líquida por unidade de área de cada atividade. Com base nesta série histórica, são determinadas as variâncias e covariâncias dos coeficientes  $c_j$ . Limitações deste tipo de estudo do risco surgem quando novas atividades estão sendo contempladas no estudo de planejamento. E isto não se refere apenas a novos cultivos, mas, por exemplo, também a novas tecnologias a serem empregadas na produção, como o emprego de diferentes métodos de irrigação ou de tratamentos culturais. Ainda, as receitas líquidas advindas de um determinado cultivo podem diferir significativamente conforme a época de plantio, o que constitui um problema quando épocas de plantio inéditas são consideradas no planejamento. Outra questão é que séries históricas dos coeficientes  $c_j$  podem não representar adequadamente futuros cenários de produção.

### 3. EXEMPLO DE APLICAÇÃO DOS MÉTODOS

No item anterior empregou-se um exemplo de um modelo simples de programação linear, visando-se auxiliar a explanação sobre o método da programação linear na determinação da estratégia de produção. Neste item será apresentado um exemplo de aplicação conjunta da programação linear e da análise de risco, buscando-se uma maior aproximação em relação à complexidade dos aspectos envolvidos no planejamento em nível de propriedade.

Além do maior número de atividades, as principais diferenças entre o modelo de programação linear, MPL, agora apresentado, e aquele tratado no item anterior são:

- ◆ Horizonte de planejamento: enquanto no modelo simplificado objetivou-se o planejamento para uma determinada safra, o MPL atual será construído para um período de planejamento de quatro anos, com diferentes épocas de plantio em cada ano; e

- ◆ Base de tempo das restrições: enquanto no modelo simplifi-

cado as restrições quanto à água disponível para irrigação e mão de obra foram dadas para toda a safra, no MPL agora apresentado estas restrições serão dadas em base mensal.

Um horizonte de análise plurianual, de três ou quatro anos, é mais apropriado quando o estudo envolve também atividades referentes a culturas perenes, como frutícolas, permitindo um planejamento mais abrangente do que o realizado para o período anual. Isto não implica em que este planejamento não possa ou não deva ser revisado periodicamente, por exemplo, semestralmente. Observa-se, porém, que horizontes de planejamento demasiadamente prolongados podem ser inadequados devido à dificuldade na previsão de futuros cenários de produção, com alterações no mercado de certos produtos, custos de insumos, além da possibilidade de novas opções de cultivo, novas tecnologias, etc, que acarretem modificações nos coeficientes técnicos tanto da função objetivo quanto das restrições. Outro aspecto que deve ser ressaltado é que, para culturas com longevidade superiores ao horizonte de planejamento adotado, pode-se considerar um valor presente líquido residual (o valor presente líquido é o parâmetro considerado na análise financeira para mensurar o retorno financeiro) relativo ao período que excede o horizonte da análise.

Quando o planejamento é feito para um período plurianual, o retorno financeiro deve ser corrigido segundo uma determinada taxa de desconto, empregada no cálculo do valor presente líquido (Equação 2). À medida que a taxa de desconto aumenta, o valor presente líquido diminui. Tal fato ocorre porque a utilização de taxas baixas equivale a dar maior importância aos benefícios futuros, em detrimento dos gastos mais próximos. Por outro lado, à medida que a taxa aumenta, é dada maior importância aos gastos presentes do que aos benefícios futuros. Como exemplo, Borges Júnior et al. (2008(a)), em planejamento realizado para o ano de 2007, utilizaram uma taxa de desconto



ano de plantio, tipo de solo, esquema de irrigação e, ou drenagem e categoria do produtor.

Dado que o MPL é consideravelmente maior que aquele apresentado no item 2.2, é conveniente em termos de organização que o mesmo seja distribuído em diferentes planilhas dentro de um mesmo arquivo do Excel, diferentemente do que foi apresentado na Figura 2. Por exemplo, uma planilha pode conter células referentes à função objetivo, enquanto em outras planilhas são implementadas as restrições.

A função objetivo para maximização do valor presente líquido total é expressa por:

$$\text{maximize } U = \sum_{j=1}^N (P_j Y_j - C_j) X_j - C_{\text{fix}} \quad (\text{eq. 17})$$

em que,

U - valor presente líquido total (lucro), R\$; j - número inteiro para atividade; N - número de atividades;  $P_j$  - valor presente do preço recebido por um produto para a j-ésima atividade, R\$ kg<sup>-1</sup>;  $X_j$  - nível da j-ésima atividade ou área cultivada, ha;  $Y_j$  - produtividade da j-ésima atividade, kg ha<sup>-1</sup>;  $C_j$  - valor presente dos custos, por unidade de área, para a j-ésima atividade, R\$ ha<sup>-1</sup>; e Cfix - valor presente dos custos fixos, R\$ ha<sup>-1</sup>.

Considera-se a seguinte composição para os custos  $C_j$ :

- ◆ Custos de irrigação: custo da água de irrigação e custo da energia consumida em irrigação (custos de drenagem, como manutenção da rede de drenagem, quando for o caso, podem também ser considerados);

- ◆ Custos de mão-de-obra; e

- ◆ Outros custos (sementes, pesticidas, fertilizantes, operações

culos, coeficientes de cultura,  $K_c$ , fatores de resposta,  $K_y$ , fatores de disponibilidade de água, f, profundidade efetiva do sistema radicular, prof<sub>r</sub>, e produtividade potencial,  $Y_p$ . Estes dados foram obtidos da literatura especializada, em diferentes estudos, como nos boletins 56 (Allen et al., 1998) e 33 (Doorenbos e Kassam, 1979) da FAO. Contudo, em alguns casos, ajustes foram feitos visando à adequação às condições locais. Os dados de produtividade potencial foram definidos com base em relatórios técnicos do Distrito de Irrigação do Jaíba, DIJ, de 1999 a 2006, e na literatura especializada.

A modelagem conduzida como o MCID é baseada no balanço hídrico na zona radicular, em base diária. Portanto, aliados aos dados de cultura são necessários dados climáticos e de solo. Os dados climáticos, em base diária, consistiram em séries históricas de dados de precipitação, temperatura máxima, média e mínima, umidade relativa média do ar, insolação e velocidade do vento, empregados no cálculo da evapotranspiração de referência por meio do programa REF-ET (Window Version 2.0), pelo método FAO Penman-Monteith (Allen et al., 1998). A série histórica compreendeu um período de 28 anos, de 1977 a 2004, obtida junto à EMBRAPA Milho e Sorgo, em convênio com o INMET para uso desses dados, para a estação meteorológica de Mocambinho, MG.

Quanto aos dados de solo, considerou-se o teor de água na capacidade de campo,  $\theta_{cc}$ , igual a 0,077 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>, e o teor de água no ponto de murcha permanente igual a 0,051 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>. Trata-se de um solo com elevado teor de areia e com baixa disponibilidade total de água (DTA), igual a 25,8 mm/m, indicando necessidade de freqüências elevadas de irrigação. Neste exemplo será considerado apenas um tipo de solo, valendo observar que a metodologia empregada possibilita a consideração de vários solos, sendo necessários que requerimentos de irrigação, produtividade e demais coeficientes técnicos empregados posteriormente no modelo de programação linear sejam específicos para cada solo.

Diferentes métodos e manejos de irrigação foram considerados para as diversas culturas, conforme apresentado na Tabela 5.

Tabela 5. Métodos de irrigação e parâmetros de manejo de irrigação considerados para diferentes culturas (eficiência de distribuição de projeto, EDad, decimal; eficiência potencial de aplicação de água, EPa, decimal; fração da superfície do solo molhada pela irrigação, fwi, decimal)

Cultura	Método de irrigação	Turno de rega	EDad	EPa	fwi	Cessar irrigação (dafc)**
Alface semente	gotejamento	*	0,8	1	0,4	5
Algodão	aspersão	3 dias	0,8	0,9	1	10
Banana	microaspersão	*	0,9	0,95	1	
Cebola	aspersão	*	0,8	0,9	1	10
Cenoura	aspersão	*	0,85	0,9	1	1
Feijão	aspersão	2 dias	0,85	0,9	1	3
Limão	microaspersão	*	0,9	0,95	0,7	
Maracujá	gotejamento	*	0,9	0,95	0,7	
Melancia	gotejamento	1 dia	0,85	1	0,4	1
Melancia semente	gotejamento	1 dia	0,85	1	0,4	1
Melão	gotejamento	1 dia	0,85	1	0,4	
Milho	aspersão	3 dias	0,8	0,9	1	7
Pepino para conserva	aspersão	3 dias	0,85	0,9	1	3
Quiabo semente	microaspersão	2 dias	0,9	0,95	1	10
Tomate de mesa	gotejamento	*	0,9	1	0,4	7

\* Irrigar quando ocorrer depleção de água na zona radicular equivalente a 100% da capacidade real de água do solo, CRA;

\*\* dafc = dias antes do final do ciclo.

Os resultados de requerimento mensal de irrigação e produtividade, obtidos por meio do modelo computacional MCID, são listados em Borges Júnior et al., (2008(a); [www.cnpms.embrapa.br](http://www.cnpms.embrapa.br)).

### 3.2. Parâmetros econômico-financeiros

Coefficientes técnicos, relacionados aos custos de produção, para todas as culturas consideradas neste estudo, foram obtidos junto ao Distrito de Irrigação do Jaíba. Os custos dos vários componentes de produção foram atualizados para dezembro de 2006, com base em

valores de defensivos, fertilizantes, mão de obra, mudas, hora de máquina, água, energia, dentre outros, praticados no Norte de Minas, nas cidades de Montes Claros, Janaúba e Jaíba, e nos perímetros de irrigação do Jaíba e do Gortuba.

Foram considerados os seguintes valores cobrados dos irrigantes para as tarifas K1 (tarifa relativa ao investimento público no perímetro de irrigação) e K2 (tarifa referente aos gastos com operação e manutenção do sistema de irrigação do perímetro): K1 = R\$ 67,53 ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> e K2 = R\$ 26,74 por 1.000 m<sup>3</sup> de água, valores estes praticados em novembro de 2006. Empregou-se, relacionado ao custo de energia para bombeamento, uma tarifa de energia elétrica de R\$ 0,23 kWh<sup>-1</sup>, já acrescida com 18% ICMS.

Os preços de venda dos produtos das várias culturas foram ajustados considerando a série histórica de preços recebidos por produtores nos perímetros de irrigação do Jaíba e Gortuba, no período de 1999 e 2006. A fonte desses dados foram relatórios da CODEVASF, DIJ, DIG e EMATER-MG. Os preços foram corrigidos com base no IPCA anual (Índice de Preços ao Consumidor Ampliado; Ipeadata - Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada - <http://www.ipeadata.gov.br/>, Fonte: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, Sistema Nacional de Índices de Preços ao Consumidor). Ajustes de preços para culturas em diferentes épocas do ano foram feitos por meio de informações do CEASA-MG.

### 3.3. Modelo de programação-linear e análise de risco

Considerando as dezesseis culturas no total (três perenes e treze anuais), distribuídas no horizonte de planejamento de quatro anos, o modelo de programação linear, MPL, abrangerá um total de 75 atividades (Tabela 8). No contexto aqui abordado, define-se atividade em termos da cultura, tecnologia empregada no cultivo, época de plantio,

Tabela 8 (continuação). Resultados do padrão de cultivo (distribuição da área) da propriedade de 10 hectares no perímetro de irrigação do Jaíba, considerando valor presente líquido total maximizado

Cultura	Ano inicial	Ano final	Nome	Valor final (ha)
Milho dezembro	1	2	MD2 (ha)	0,50
Milho dezembro	2	3	MD3 (ha)	0,50
Milho dezembro	3	4	MD4 (ha)	0,50
Milho fevereiro	1	1	MF1 (ha)	0,46
Milho fevereiro	2	2	MF2 (ha)	0,46
Milho fevereiro	3	3	MF3 (ha)	0,46
Milho fevereiro	4	4	MF4 (ha)	0,46
Pepino conserva	1	1	PP1 (ha)	0,78
Pepino conserva	2	2	PP2 (ha)	0,78
Pepino conserva	3	3	PP3 (ha)	0,78
Pepino conserva	4	4	PP4 (ha)	0,78
Quiabo semente	1	2	QS2 (ha)	0,96
Quiabo semente	2	3	QS3 (ha)	0,96
Quiabo semente	3	4	QS4 (ha)	0,96
Tomate mesa	1	1	TM1 (ha)	0,55
Tomate mesa	2	2	TM2 (ha)	0,93
Tomate mesa	3	3	TM3 (ha)	0,72
Tomate mesa	4	4	TM4 (ha)	0,84

\* Período total considerado igual a 6 anos.

A ferramenta Solver (Frontline Systems, Inc - [www.solver.com/pricexls.php](http://www.solver.com/pricexls.php)), empregada junto à planilha do programa Excel (Microsoft® Office Excel), gera também relatórios relativos às restrições atuantes, preços sombra, acréscimos e decréscimos permissíveis, conforme apresentado na Tabela 9. O preço sombra representa o máximo acréscimo sobre o valor otimizado da função objetivo (valor presente líquido total), para o aumento em uma unidade na correspondente restrição (Hazell & Norton, 1986). Os acréscimos e decréscimos permissíveis indicam o intervalo, no qual pode-se variar o valor da restrição, mantendo o valor do preço sombra. Quando o valor da restrição limitante é alterado neste intervalo, os níveis das atividades serão alterados, mas não será alterada a base da solução ótima, ou seja, não será alterado o conjunto de atividades presentes na solução ótima.

Na Tabela 9 observa-se que as restrições mensais de água disponível para irrigação foram limitantes no mês de outubro dos anos 1 a 3 e no mês de fevereiro dos anos 2 a 4, com valores de preço sombra

mecanizadas, outros insumos e serviços).

O custo de aquisição de sistemas de irrigação e, ou implantação de sistemas de drenagem (quando for o caso), tarifas fixas de irrigação por unidade de área, bem como outros custos fixos, incidindo sobre o empreendimento, devem ser incluídos em Cfix (Equação 17).

Por meio da Equação 17, obtém-se o máximo valor presente líquido total ( $U_{max}$ ). No padrão de cultivo definido por meio da aplicação desta equação, é provável que restrições quanto à disponibilidade mensal de água para irrigação (dentre outras) sejam limitantes. Isto indica um risco considerável de escassez de água para irrigação, que pode ser potencializado por dois aspectos.

Primeiro, quando um determinado cultivo (atividade) tem requerimento de irrigação acima da média em um mês específico (geralmente são empregados valores médios para o coeficiente técnico relativo ao requerimento de irrigação), é provável que os demais cultivos, explorados naquele mesmo mês, também terão requerimento mensal de irrigação acima da média. Por outro lado, geralmente altos requerimentos de irrigação em relação à média são associados a demandas atmosféricas de evapotranspiração e evaporação também acima da média e, ou precipitações abaixo da média. A combinação destes fatores que pode, dependendo da fonte de água empregada na irrigação, acarretar uma disponibilidade hídrica abaixo da média (lembrando que em nossa análise utilizamos valores médios da disponibilidade hídrica mensal como restrição no modelo de programação linear).

Uma forma de trabalhar com o impacto da variação dos requerimentos de irrigação e disponibilidades hídricas é executar novamente o modelo de programação linear, para valores sucessivamente menores da restrição de água para irrigação nos meses em que esta restrição foi limitante. Este procedimento será executado no exemplo de aplicação aqui apresentado, inclusive com a análise de risco associada.

Restrições quanto a terra, mão-de-obra, produção e água disponível para irrigação são consideradas em base mensal (restrições anuais quanto à disponibilidade de água para irrigação também poderiam ser empregadas).

As restrições quanto a recursos, consideradas no MPL para o projeto Jaíba, são apresentadas na Tabela 6. Na Tabela 7 são apresentadas as restrições quanto à produção, consideradas neste MPL.

Na Tabela 8, apresenta-se o padrão de cultivo apontado como ótimo em termos de maximização do valor presente líquido total, U (R\$). O valor ótimo obtido de U, no período de quatro anos, foi igual a R\$ 110.938,57 na área de 10 hectares.

Tabela 6. Restrições quanto aos recursos, adotadas no modelo de programação linear, para o perímetro do Jaíba

Restrição	Unidade	Valor
Terra	(ha)	10
Mão-de-obra (mensal)	(dias-homem)	750
Água disponível para irrigação (mensal)	(m <sup>3</sup> )	8.250

Tabela 7. Restrições quanto à produção, adotadas no modelo de programação linear, para uma propriedade de 10 hectares no perímetro de irrigação do Jaíba

Cultura	Unidade	>=	<=
Banana ano 2	t ano <sup>-1</sup>	28	
Limão ano 3	t ano <sup>-1</sup>	8	
Limão ano 4	t ano <sup>-1</sup>		22
Maracujá ano 3	t ano <sup>-1</sup>	11	28
Alface - semente	t safra <sup>-1</sup>		1
Algodão	t safra <sup>-1</sup>	1	
Cebola inverno	t safra <sup>-1</sup>		33
Cebola verão	t safra <sup>-1</sup>		33
Cenoura diversas	t safra <sup>-1</sup>	11	39
Feijão	t safra <sup>-1</sup>	1	4
Melancia	t safra <sup>-1</sup>	11	50
Melancia - semente	t safra <sup>-1</sup>		1
Melão	t safra <sup>-1</sup>		33
Milho	t safra <sup>-1</sup>	2	
Pepino conserva	t safra <sup>-1</sup>		15
Quiabo semente	t safra <sup>-1</sup>	1	
Tomate mesa	t safra <sup>-1</sup>		

Tabela 8. Resultados do padrão de cultivo (distribuição da área) da propriedade de 10 hectares no perímetro de irrigação do Jaíba, considerando valor presente líquido total maximizado

Cultura	Ano inicial	Ano final	Nome	Valor final (ha)
Banana	1	4	B1 (ha)	1,04
Limão	1	4*	L1 (ha)	0,80
Maracujá 1	1	3	MA1 (ha)	0,55
Maracujá 2	2	4	MA2 (ha)	0,55
Alface - semente	1	1	AS1 (ha)	0,61
Alface - semente	2	2	AS2 (ha)	0,61
Alface - semente	3	3	AS3 (ha)	0,61
Alface - semente	4	4	AS4 (ha)	0,61
Algodão	1	1	AL1 (ha)	0,54
Algodão	2	2	AL2 (ha)	0,54
Algodão	3	3	AL3 (ha)	0,54
Algodão	4	4	AL4 (ha)	0,54
Cebola inverno	1	1	CI1 (ha)	1,38
Cebola inverno	2	2	CI2 (ha)	1,38
Cebola inverno	3	3	CI3 (ha)	1,38
Cebola inverno	4	4	CI4 (ha)	1,38
Cebola verão	1	2	CV2 (ha)	1,10
Cebola verão	2	3	CV3 (ha)	1,10
Cebola verão	3	4	CV4 (ha)	1,10
Cenoura diversas	1	1	CN1 (ha)	1,48
Cenoura diversas	2	2	CN2 (ha)	1,15
Cenoura diversas	3	3	CN3 (ha)	0,87
Cenoura diversas	4	4	CN4 (ha)	1,10
Feijão 1	1	1	F11 (ha)	0,45
Feijão 1	2	2	F12 (ha)	0,45
Feijão 1	3	3	F13 (ha)	0,45
Feijão 1	4	4	F14 (ha)	0,45
Feijão 3	1	1	F31 (ha)	1,67
Feijão 3	2	2	F32 (ha)	1,11
Feijão 3	3	3	F33 (ha)	1,42
Feijão 3	4	4	F34 (ha)	1,80
Melancia	1	1	ME1 (ha)	2,00
Melancia	2	2	ME2 (ha)	2,00
Melancia	3	3	ME3 (ha)	2,00
Melancia	4	4	ME4 (ha)	2,00
Melancia - semente	1	1	MS1 (ha)	1,47
Melancia - semente	2	2	MS2 (ha)	1,47
Melancia - semente	3	3	MS3 (ha)	1,47
Melancia - semente	4	4	MS4 (ha)	1,47
Melão	1	1	ML1 (ha)	1,22
Melão	2	2	ML2 (ha)	1,22
Melão	3	3	ML3 (ha)	1,22
Melão	4	4	ML4 (ha)	1,22

em RIT. A comparação entre U e RIT para os padrões de A e B indicados na Figura 9 é apresentada na Tabela 10. Observa-se que para uma redução de 21,2% em RIT, no PCB em comparação ao PCA, a redução em U foi consideravelmente inferior, igual a 3,6%.

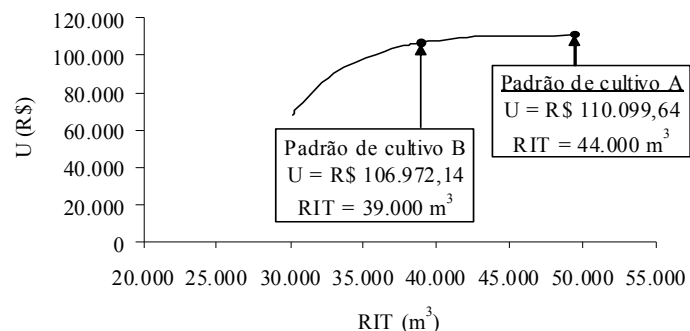


Figura 9. Linha de soluções de padrão de cultivo no plano valor presente líquido total (U) e requerimento de irrigação em meses críticos (RIT), considerando valores minimizados de RIT.

Tabela 10. Comparação entre requerimento total de irrigação (RIT) em meses críticos e valor presente líquido total (U) para os padrões de cultivo A (máximo U) e B (RIT fixado em 39.000 m³)

	RIT (m³)	U (R\$)
Padrão de cultivo A (PCA)	49.500,00	110.938,57
Padrão de cultivo B (PCB)	39.000,00	106.972,14
Diferença percentual	21,2%	3,6%

Análises de risco, com base em simulações de Monte Carlo, foram conduzidas com o programa P-RISCO (Borges Júnior, 2004; Borges Júnior et al., 2007) para as soluções dos modelos de programação linear relativas aos padrões de cultivo A e B. O formulário inicial deste programa, com entrada de dados a partir da planilha do modelo de programação linear, é apresentado na Figura 10. Considerou-se como variáveis de entrada estocásticas a taxa de desconto anual, requerimento de irrigação, outros custos além de irrigação, produtividade e preço, seguindo as distribuições de probabilidade e parâmetro de distri-

variando de R\$ 0,08/m³ a R\$ 0,36/m³. O preço sombra de R\$ 0,36/m³ no mês de fevereiro do ano indica que para cada metro cúbico de água disponível para irrigação adicionado à restrição, igual a 8.250 m³ (Tabela 6), obter-se-ia um aumento de R\$ 0,36 no valor presente líquido total. Nota-se que os valores dos preços sombra podem ser úteis na valoração de preços cobrados pela água, devendo esta análise, contudo, ser aliada à uma série de outros aspectos.

Conforme apresentado na Tabela 9, as restrições mensais de mão de obra, igual a 450 dias-homem, foram limitantes no mês de março dos anos 1, 2 e 4. A restrição quanto à área (terra), igual a 10 ha, foi limitante apenas no mês de fevereiro do ano 3, com valor de preço sombra equivalente a R\$ 501,71/ha. As médias de percentagens de ocupação mensal da área foram 59, 68, 71 e 61%, para os anos 1 a 4, respectivamente.

Tabela 9. Restrições atuantes no modelo de programação linear com maximização do valor presente líquido total para propriedade no perímetro de irrigação do Jaíba, preços sombra, acréscimos e decréscimos permissíveis

Tipo de restrição	Nome e unidade da restrição	Valor da restrição	Preço sombra*	Acréscimo permissível	Decréscimo permissível
água	out - ano 1 (m³)	8.250,00	0,10	148,53	1.343,37
água	fev - ano 2 (m³)	8.250,00	0,28	354,53	98,72
água	out - ano 2 (m³)	8.250,00	0,09	463,30	723,05
água	fev - ano 3 (m³)	8.250,00	0,36	684,38	296,47
água	out - ano 3 (m³)	8.250,00	0,08	426,58	1.065,31
água	fev - ano 4 (m³)	8.250,00	0,24	402,49	118,45
mão de obra	mar - ano 1 (dias-homem)	450,00	9,22	92,82	41,80
mão de obra	mar - ano 2 (dias-homem)	450,00	7,52	4,39	53,84
mão de obra	mar - ano 4 (dias-homem)	450,00	6,45	7,28	48,66
terra	fev - ano 3 (ha)	10,00	501,74	0,19	0,57
produção	Quiabo semente - ano 2 (t)	1,00	-134,92	0,06	0,12
produção	Quiabo semente - ano 3 (t)	1,00	-656,95	0,60	0,31
produção	Quiabo semente - ano 4 (t)	1,00	-115,68	0,18	0,35
produção	Melão - ano 1 (t)	33,00	198,62	37,62	33,00
produção	Melão - ano 2 (t)	33,00	180,51	2,45	28,84
produção	Melão - ano 3 (t)	33,00	154,67	22,58	8,65
produção	Melão - ano 4 (t)	33,00	154,75	7,86	32,74

Tabela 9 (continuação). Restrições atuantes no modelo de programação linear com maximização do valor presente líquido total para propriedade no Projeto Jaíba, preços sombra, acréscimos e decréscimos permissíveis

Tipo de restrição	Nome e unidade da restrição	Valor da restrição	Preço sombra*	Acréscimo permissível	Decréscimo permissível
produção	Milho dezembro - ano 2 (t)	2,00	-257,05	0,23	1,18
produção	Milho dezembro - ano 3 (t)	2,00	-372,85	2,11	1,23
produção	Milho dezembro - ano 4 (t)	2,00	-220,38	0,43	1,34
produção	Milho fevereiro - ano 1 (t)	2,00	-151,87	10,48	2,00
produção	Milho fevereiro - ano 2 (t)	2,00	-164,50	0,29	2,00
produção	Milho fevereiro - ano 3 (t)	2,00	-259,35	3,55	1,18
produção	Milho fevereiro - ano 4 (t)	2,00	-141,03	0,92	2,00
produção	Banana - ano 2 (t)	28,00	-67,80	1,35	0,00
produção	Algodão - ano 1 (t)	1,00	-202,06	4,49	1,00
produção	Algodão - ano 2 (t)	1,00	-183,23	1,59	1,00
produção	Algodão - ano 3 (t)	1,00	-143,14	1,42	1,00
produção	Algodão - ano 4 (t)	1,00	-157,09	1,78	1,00
produção	Maracujá 1 - ano 3 (t)	11,00	-37,28	1,36	4,77
produção	Maracujá 2 - ano 4 (t)	11,00	-39,97	5,04	7,38
produção	Limão - ano 3 (t)	8,00	-275,14	0,59	1,66
produção	Melancia - ano 1 (t)	50,00	4,35	25,30	5,65
produção	Melancia - ano 2 (t)	50,00	4,03	25,96	29,27
produção	Melancia - ano 3 (t)	50,00	3,73	40,56	16,24
produção	Melancia - ano 4 (t)	50,00	5,45	53,63	39,00
produção	Melancia - semente - ano 1 (t)	1,00	3.741,15	0,69	0,15
produção	Melancia - semente - ano 2 (t)	1,00	3.464,03	0,71	0,80
produção	Melancia - semente - ano 3 (t)	1,00	3.207,43	1,10	0,44
produção	Melancia - semente - ano 4 (t)	1,00	3.043,29	1,46	1,00
produção	Alface - semente - ano 1 (t)	1,00	2.618,35	7,53	1,00
produção	Alface - semente - ano 2 (t)	1,00	2.424,40	6,01	1,00
produção	Alface - semente - ano 3 (t)	1,00	2.244,81	5,38	1,00
produção	Alface - semente - ano 4 (t)	1,00	2.078,53	6,15	1,00
produção	Cebola inverno - ano 1 (t)	33,00	388,55	52,26	33,00
produção	Cebola inverno - ano 2 (t)	33,00	359,77	32,16	33,00
produção	Cebola inverno - ano 3 (t)	33,00	333,12	23,74	33,00
produção	Cebola inverno - ano 4 (t)	33,00	308,44	32,55	33,00
produção	Cebola verão - ano 2 (t)	33,00	22,75	1,57	12,95
produção	Cebola verão - ano 3 (t)	33,00	1,62	12,58	8,52
produção	Cebola verão - ano 4 (t)	33,00	19,51	2,74	14,70
produção	Cenoura - ano 1 (t)	39,00	12,14	12,00	28,00
produção	Feijão 1 - ano 1 (t)	1,00	-6,12	3,00	1,00
produção	Feijão 1 - ano 2 (t)	1,00	-166,77	0,12	0,61
produção	Feijão 1 - ano 3 (t)	1,00	-407,88	1,09	0,65
produção	Feijão 1 - ano 4 (t)	1,00	-142,98	0,21	0,69
produção	Feijão 3 - ano 4 (t)	4,00	37,82	2,83	3,00
produção	Pepino conserva - ano 1 (t)	15,00	67,58	3,13	7,77
produção	Pepino conserva - ano 2 (t)	15,00	60,75	5,53	0,50
produção	Pepino conserva - ano 3 (t)	15,00	117,88	2,69	15,00
produção	Pepino conserva - ano 4 (t)	15,00	52,08	5,00	0,82

\*A unidade do preço sombra é R\$ dividido pela unidade da restrição correspondente.

isto é, R\$/m<sup>3</sup>, R\$/dias-homem ou R\$/t.

Observa-se ainda na Tabela 9 que várias restrições quanto à produção foram limitantes no MPL. Para a cultura do melão como exemplo, observa-se que a restrição de produção máxima igual a 33 t/safra foi crítica, acarretando um preço sombra de R\$ 198,62 por tonelada, indicando que o produtor deve procurar meios de aumentar a capacidade de mercado ou de escoamento da produção, visando à expansão do limite superior de produção desta cultura. Os maiores preços sombras foram obtidos para a produção de semente de melancia e alface, indicando a importância na expansão das possibilidades de produção e, ou comercialização destas culturas.

Restrições de produção mínima foram limitantes para diversas culturas: quiabo semente, milho, banana, algodão, maracujá, limão e feijão. Por exemplo, para a cultura do algodão, na primeira safra, o preço sombra foi de - R\$ 202,06/t, relativa à restrição de produção mínima igual a uma tonelada (Tabela 7), indicando que para cada tonelada acrescida à restrição de produção mínima ocorrerá um decréscimo de R\$ 202,06 no valor presente líquido total.

Na Figura 9 apresenta-se a linha de soluções da programação linear no plano valor presente líquido total (U) e requerimento de irrigação (RIT) total dos meses críticos. Indica-se duas soluções como padrões de cultivo A e B (PCA e PCB). Os meses críticos aqui considerados são aqueles em que a restrição mensal de água foi limitante (outubro dos anos 1 a 4 e fevereiro dos anos 2 a 4), conforme visto na Tabela 9. O PCA é relativo à maximização de U, sendo apresentado na Tabela 8. O PCB foi obtido fixando-se RIT nos meses críticos em 39.000 m<sup>3</sup>.

Observa-se, na Figura 9, que a linha de soluções U(RIT) apresenta uma declividade decrescente, indicando que à medida que U aumenta, menores variações de U ocorrerão para grandes variações

tanto pelos modelos de programação linear quanto pela análise de risco (ver Figura 11 e a Tabela 12).

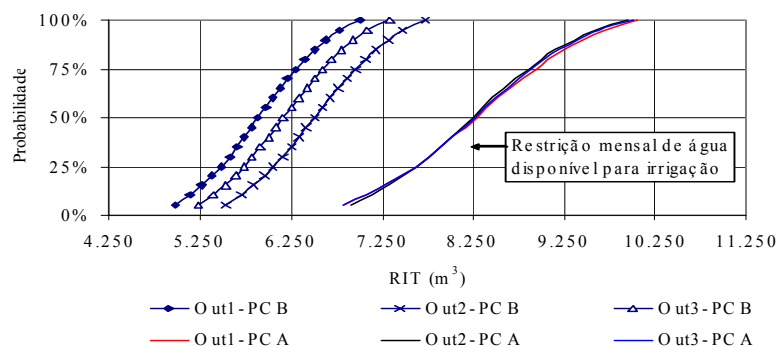


Figura 12. Distribuições de probabilidade acumulada do requerimento de irrigação total (RIT) no mês de outubro dos anos 1 (Out1), 2 (Out2) e 3 (Out3) para os padrões de cultivo A (PCA: máximo U) e B (PCB: requerimento de irrigação total RIT = 39.000 m³).

**REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop requirements**. 1. ed. Rome: FAO, 1998, 300p. (Paper 56).

ANA - Agência Nacional das Águas. Disponibilidade e demandas de recursos hídricos no Brasil. Brasília. 2005, 123p.

ANDRADE, C.L.T.; BORGES JÚNIOR, J.C.F. Seleção do Método de Irrigação In: **Uso e Manejo de Irrigação**. 1 ed. Brasília : Embrapa Informação Tecnológica, 2008, v.1, p. 317-400.

BERNARDO, S. Impacto ambiental da irrigação no Brasil. In: Silva, D.D., Pruski, F.F. (Eds.) **Recursos hídricos e desenvolvimento sustentável da agricultura**. Brasília-DF: MMA; SRH; ABEAS; Viçosa-MG: UFV, Departamento de Engenharia Agrícola, 1997, p.79-88.

buições apresentados na Tabela 11. No processo de simulação foram feitas 10.000 iterações.

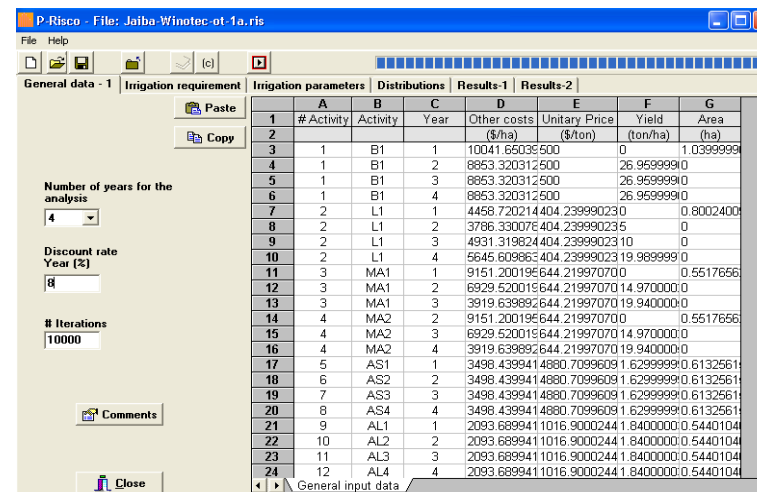


Figura 10. Formulário inicial do programa P-Risco para execução da análise de risco, com entrada de dados a partir da planilha do modelo de programação linear.

Tabela 11. Variáveis consideradas estocásticas na análise de risco, com respectivas distribuições de probabilidade e os parâmetros das distribuições - valor mínimo (min), valor máximo (max), moda (mo) e DP (desvio padrão)

Variável	Simbologia	Distribuição	Parâmetros
Taxa de desconto anual	TD	Triangular	min = 7%; mo = 8%; max = 12%
Requerimento de irrigação	w <sub>jym</sub>	Normal padrão Truncada	min = z <sub>5%</sub> = -1,64485; max = z <sub>95%</sub> = 1,64485
Outros custos além da irrigação	C	Triangular	min = 0,9C; mo = C; max = 1,1P
Produtividade	Y	Normal truncada	min = 0,85Y; mo = Y; max = 1,15Y; DP = 0,2Y
Preço	P	Triangular	min = 0,6P; mo = P; max = 1,2P

Na Figura 11 são apresentadas as distribuições de probabilidade acumulada do valor presente líquido total (U) resultantes para cada padrão de cultivo (PCA e PCB). Nota-se a proximidade de ambas, reforçando ou pequeno impacto no valor esperado de U quando se adota o PCB em relação ao PCA.

Na Tabela 12 apresenta-se a comparação do valor presente líquido total (U) obtido com os modelos de programação linear (MPL) e com a análise de risco. O valor de U indicado na análise de risco refere-se ao percentil de 50% (mediana), ou seja, com 50% de probabilidade de U ser inferior ou igual a este valor. Também nesta tabela são apresentadas as respectivas diferenças percentuais. Nota-se a significativa redução nos valores de U obtidos com a programação linear em relação aos obtidos com a análise de risco, aproximadamente igual a 36% para os dois padrões de cultivo (PCA e PCB). Esta diferença ocorre devido principalmente às distribuições de probabilidade assimétricas da taxa de desconto anual, TJ, e preço do produto, P, conforme observado na Tabela 11. Observa-se que as estas assimetrias são no sentido de diminuição de U (maiores probabilidades de TJ ser superior à moda e dos preços serem inferior à moda).

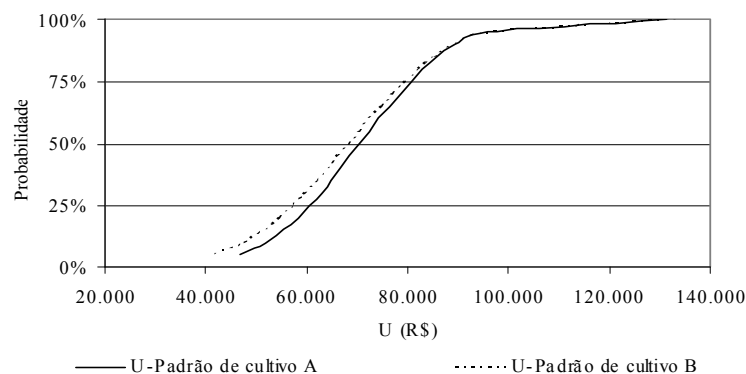


Figura 11. Distribuições de probabilidade acumulada do valor presente líquido total (U) para os padrões de cultivo A (máximo U) e B (requerimento de irrigação total RIT = 39.000 m<sup>3</sup>).

Tabela 12. Valor presente líquido total (U) obtido com os modelos de programação linear (MPL) e na análise de risco (mediana), para os padrões de cultivo de produção A e B

	Valor de U obtido no MPL (R\$)	Valor de U obtido na análise de risco (R\$)	Diferença percentual
Padrão de cultivo A (PCA)	110.938,57	70.590,92	36,4%
Padrão de cultivo B (PCB)	106.972,14	68.406,65	36,1%
Diferença percentual	3,71%	3,19%	

Na Figura 12 são apresentadas as distribuições de probabilidade do requerimento de irrigação total RIT para o mês de outubro dos anos 1, 2 e 3, para os padrões de cultivo A (máximo U) e B (requerimento de irrigação total RIT = 39.000 m<sup>3</sup>). O mês de outubro, nestes anos, foi aqui focado já que a restrição quanto à disponibilidade de água para irrigação foi limitante (no ano quatro não ocorreu a limitação), conforme se observa na Tabela 9 (preço sombra diferente de zero).

Na Figura 12 observa-se uma probabilidade de 50% do requerimento de irrigação ser superior à restrição mensal, igual a 8.250 m<sup>3</sup> (Tabela 6), no mês de outubro dos anos 1, 2 e 3, no PCA. Este resultado é esperado já que a distribuição de probabilidade normal padrão foi considerada para RIT. Assim, o valor indicado na análise de risco no percentil de 50% (equivalente ao valor médio na distribuição normal) deve ser próximo ao valor de RIT obtido no modelo de programação linear nestes meses, iguais à restrição (Tabela 9). Ainda na Figura 12 nota-se que para o PCB não foi indicado risco do requerimento de irrigação no mês de outubro dos anos 1, 2 e 3 ser superior à restrição.

Assim, pôde-se verificar que o padrão de cultivo B (PCB) de produção é mais vantajoso que o padrão de cultivo A (PCA), considerando que não foi identificado risco de o requerimento de irrigação no PCB, no mês de outubro dos anos 1, 2 e 3 exceder a restrição quanto à disponibilidade de água para irrigação, o que foi verificado no PCA. Também, o valor presente líquido total esperado para o PCB foi apenas ligeiramente inferior ao esperado para o PCA, conforme indicado



# PLANEJAMENTO DA IRRIGAÇÃO COM USO DE TÉCNICAS DE OTIMIZAÇÃO

José Antonio Frizzone

## 1. INTRODUÇÃO

A melhoria da eficiência da irrigação deve atender a uma análise holística das fases pelas quais se passa o processo. A aproximação holística, tão necessária para entender a agricultura irrigada, é incorporada através da consideração de todos os fatores que podem influenciar na forma como a água é usada, sejam eles técnicos, econômicos, políticos, sociais ou ambientais. A análise pode ser posteriormente refinada pela ponderação do impacto de cada fator que influencia no uso da água em uma dada situação (Burton, 1999).

Para entender o que acontece em um sistema de irrigação é

BORGES JÚNIOR, J.C.F. **Modelo computacional para tomada de decisão em agricultura irrigada**. 2004. 226 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2004.

BORGES JÚNIOR, J.C.F.; ANDRADE, C.L.T.; FERREIRA, P.A.; SOUSA JÚNIOR, G.C. Programa computacional para simulação de risco em modelos de programação linear para agricultura irrigada In: XXXVI Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola, 2007, Bonito, MS. **XXXVI Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola**. Jaboticabal, P: SBEA, 2007.

BORGES JÚNIOR, J.C.F; ANDRADE, C.L.T; FERREIRA, P.A.; OLIVEIRA, F.G; FERREIRA, E.J.; NERY, J.A. **Avaliação de estratégias de produção em agricultura irrigada no perímetro de irrigação do Jaíba**. Série Documentos. EMBRAPA: Sete Lagoas. 2008(a). 72p.

BORGES JÚNIOR, J.C.F; FERREIRA, P.A.; HEDDEN-DUNKHORST, B.; ANDRADE, C.L.T. Modelo computacional para suporte à decisão em áreas irrigadas. Parte I: Desenvolvimento e análise de sensibilidade. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.12, n.1, p.3-11, janeiro/fev. 2008(b).

CONTADOR, C.R. **Projetos sociais: avaliação e prática**. 4 ed. São Paulo: Atlas, 2000, 375p.

DANTAS NETO, J. **Modelos de decisão para otimização do padrão de cultivo em áreas irrigadas, baseados nas funções de resposta das culturas à água**. Botucatu: UNESP, 1994. 125p. Tese (Doutorado) – Faculdade de ciências agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, 1994.

DANTZIG, G.B. **Linear Programming and Extensions**. Princeton: Princeton University Press, 1963, 648p.

DOORENBOS, J., KASSAM, A.H. **Yield response to water**. Rome: FAO, 1979. 193p. (Paper 33).

FERREIRA, P.A.; BORGES JÚNIOR, J.C.F.; HEDDEN-DUNKHORST, B.; ANDRADE, C.L.T. Modelo computacional para suporte à decisão em áreas irrigadas. Parte II: Testes e aplicação. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.10, n.4, p.783-91, outubro/dez. 2006.

FRIZZONE, J.A., SILVEIRA, S.F.R. **Análise de viabilidade econômica de projetos hidroagrícolas**. Brasília: ABEAS - Associação Brasileira de Educação Agrícola Superior, 1996, 88p.

FRIZZONE, J.A.; ANDRADE JÚNIOR, A.S., SOUZA, J.L.M; ZOCOLER, J.L.. **Planejamento de irrigação. Análise de decisão de investimento**. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2005, 626 p.

GARCES-RESTREPO, C.; VERMILLION, D.; MUÑOZ, G. Irrigation management transfer. Worldwide efforts and results. FAO water reports 32. Roma: FAO. 2007, 78p.

GERALD, C.; WHEATLEY, P.O. Applied numerical analysis. 7ed. United States of America: Pearson Education. 2003. 609p.

GITTINGER, J.P. **Economic analysis of agricultural projects**. The Economic Development Institute International Bank for Reconstruction and Development. United States of America. 1982. 505p.

HARDAKER, J.B., HUIRNE, R.B.M., ANDERSON, J.R., LIEN, G. **Coping with risk in agriculture**. 2. ed. London: CABI Publishing, London, 2004. 352 p.

HARR, M.E. **Reliability based design in civil engineering**. New York: Mcgraw-Hill, 1987. 290 p.

HAZELL, P.B.R.; NORTON, R.D. **Mathematical programming for economic analysis in agriculture**. New York: Macmillan Publishing Company, 1986. 400 p.

MANTOVANI, E.C., VICENTE, M.R., MUDRIK, A. Irrigação do cafeeiro – em que condições a irrigação é necessária e como irrigá-lo nestas condições. In: Zambolim, L. (Ed.) **Produção integrada de café**. Viçosa: UFV, 2003. p.279-

NORONHA, J.F. **Projetos agropecuários: administração financeira, orçamento e viabilidade econômica**, 2.ed., São Paulo: Atlas, 1987. 269p.

PALISADE CORPORATION. **@Risk advanced risk analysis for spreadsheets**. Newfield: Palisade Corporation. 2002. 499 p.

PNRH - Plano Nacional de Recursos Hídricos. Documento base de referência, novembro, 2003. ANA - Agência Nacional de Águas - [www.ana.gov.br](http://www.ana.gov.br).

PNRH - Plano Nacional de Recursos Hídricos. Síntese executiva. Ministério do Meio Ambiente, Secretaria de Recursos Hídricos.- Brasília: MMA, 2006. 135p.

SALIBY, E. Descriptive sampling: an improvement over Latin Hypercube sampling. In: ANDRADÓTTIR, S.; HEALY, K. J.; WITHERS, D. H.; NELSON, B.L. **Proceedings of the 1997 Winter Simulation Conference**. Atlanta: WSC, 1997. p.230-3.

WOILER, S., MATHIAS, W.F. **Projetos: planejamento, elaboração e análise**. São Paulo. Atlas, 1986. 294p.