

TECNOLOGIA
NA
IRRIGAÇÃO

TECNOLOGIA NA IRRIGAÇÃO

**MANOEL VALNIR JÚNIOR
FREDERICO ANTONIO LOUREIRO SOARES
SILVIO CARLOS RIBEIRO VIEIRA LIMA
RAIMUNDO RODRIGUES GOMES FILHO
CLAYTON MOURA DE CARVALHO
ANTÔNIO EVAMI CAVALCANTE SOUSA**

Organizadores

1ª Edição

GRAFHOUSE

Fortaleza - CE - Brasil
2010

Ficha Catalográfica



EDITORES

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

PREFÁCIO

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 socioeconômico 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 Semiárido 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 BASTIAANSSEN
Delft Technical University

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

Secretaria de Planejamento e Coordenação do Governo do Estado

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

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

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 otimização47

CAPÍTULO III

Racionalização do uso da água na agricultura irrigada99

CAPÍTULO IV

Uso de modelos na prática da determinação das necessidades hídricas das culturas121

CAPÍTULO V

Application of the methodologies sebal and metric in irrigated agriculture163

CAPÍTULO VI

Tensiômetro: características, Inovações e aplicações191

CAPÍTULO VII

Racionalização do uso da água na agricultura irrigada229

CAPÍTULO VIII

Laboratório de ensaios em equipamentos de irrigação: desenvolvimento e acreditação239

CAPÍTULO IX

Impactos ambientais causados com a irrigação249

CAPÍTULO X

Aspectos microbiológicos da água de reúso destinada à irrigação273

CAPÍTULO XI

Utilização de água de qualidade inferior na irrigação: águas salinas299

CAPÍTULO XII

Experiências de reúso na irrigação e aquicultura: alternativa para o semiárido nordestino333

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, no âmbito 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 cultivada, 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 semiárido 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 minora 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 recursos 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).

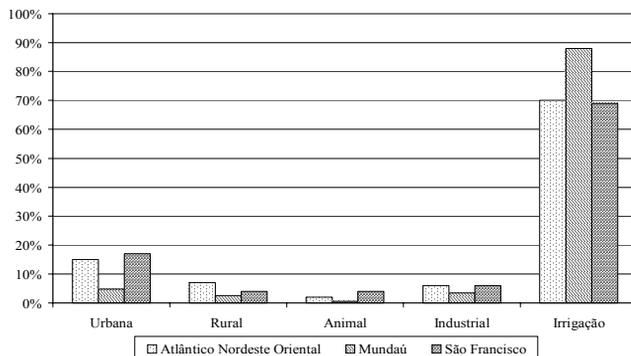


Figura 1. Distribuição das demandas das regiões hidrográficas do São Francisco e Atlântico Nordeste Oriental e na Unidade Hidrográfica do Mundaú.

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, disponibilidade de mão de obra, capacidade de investimento por parte do empreendedor, riscos à saúde pública, dentre outros (Andrade & 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. 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 & Mathias (1986), 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.

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.

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).

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

$$\max Z = Z(X)$$

tal que:

$$g_i(X) \leq 0, \quad i = 1, \dots, m$$

$$X_j \geq 0, \quad j = 1, \dots, n$$

em que:

X - vetor de variáveis reais; $Z(X)$ - função objetivo; g - restrição; i - número inteiro índice para a restrição; m - número de restrições; j - número inteiro índice para a atividade; e 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, $Z(X)$ e as restrições são funções lineares. Isto não restringe, necessariamente, a liberdade de expressão do construtor do modelo, pois, na maioria 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 capacida-

de 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. Modelo Simples de Programação Linear (Exemplo)

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

Todos 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 ₁	290	5	1.800	-350
feijão	X ₂	1.270	2	2.720	201
tomate	X ₃	500	65	29.000	3.500
melão	X ₄	600	25	10.000	5.000

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

Cultura (atividade)	Requerimento de irrigação (m ³ /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.

Tabela 3. Restrições quanto a recursos

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

Tabela 4. Restrições de produção

Cultura (atividade)	Restrições ≥ (t)	Restrições ≤ (t)
milho	4	
feijão		10
tomate	100	
melão	100	130

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).

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^{-1} ; Y_j - produtividade para a atividade j , $t \text{ ha}^{-1}$; C_j - custo de produção para a atividade j , R\$ ha^{-1} ; X_j - nível da atividade j , ha ; e c_j - receita líquida da atividade j , R\$ ha^{-1} .

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 (d”), podendo também ocorrer restrições do tipo maior ou igual (e”) 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 programação 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,

$$\begin{array}{rccccrcr} 5.100 X_1 & + 3.800 X_2 & + 1.550 X_3 & + 1.350 X_4 & \leq & 14.000 \\ 33 X_1 & + 30 X_2 & + 550 X_3 & + 85 X_4 & \leq & 1.600 \\ X_1 & + X_2 & + X_3 & + X_4 & \leq & 10 \\ 5X_1 & & & & \geq & 4 \\ & 2 X_2 & & & \leq & 10 \\ & & 65 X_3 & & \geq & 100 \\ & & & 25 X_4 & \geq & 100 \\ & & & 25 X_4 & \leq & 130 \end{array} \quad (\text{eq. 15})$$

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 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 & Norton (1986), Gerald & 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:

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
1														
2	Cultura	Preço	Produtividade	Custos	Receita		Cultura	Equipamento	Mão de obra	Terra		Cultura	Áreas	Receita
3					líquida			de irrigação						líquida
4		(R\$/t)	(t/ha)	(R\$/ha)	(R\$/ha)			(m ²)	(dia-homem)	(ha)			(ha)	(R\$)
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	Equipamento	Mão de obra	Terra			Cultura	Produção	Restrições	Restrições				
13		de irrigação							>=	<=				
14		(m ² /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

→ Células A_2 a E_8 : células referentes à função objetivo (Tabela 1 e Equação 14); as células E_5 a E_8 são os coeficientes c_j da função objetivo.

→ Células A_{12} a D_{18} : coeficientes técnicos a_{ij} empregados nas restrições de recursos (Tabela 2; coeficientes empregados nas inequações 6 a 8).

→ Células G_2 a J_{10} : implementação das restrições quanto aos recursos (nas inequações 6 a 8). Por exemplo, a célula H_5 é igual ao produto da célula B_{15} pela célula M_5 . O valor inicial é igual a zero, devido ao valor inicial da célula M_5 , destinada à área para cultivo do milho, ou seja, destinada ao nível da atividade X_1 . Outros exemplos, a célula I_6 = célula C_{16} * célula M_6 ; célula J_8 = célula D_{18} * célula M_{18} . As células H_9 , I_9 e J_9 são as somas das respectivas células acima. Nas células H_{10} , I_{10} e J_{10} são colocadas as restrições, conforme a Tabela 3 (coeficientes b_i).

→ Células G_{12} a J_{18} : Restrições quanto à produção (Tabela 4 e inequações 9 a 13). Na coluna H_{15} a H_{18} são implementados os produtos das produtividades (células C_5 a C_8) pelas áreas destinadas aos cultivos (células M_5 a M_8), ou seja, os coeficientes técnicos a_{ij} das restrições de produção. Os valores nas colunas I e J são restrições b_i relativas à produção

→ Células M_5 a M_8 : 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 N_5 a N_8 : receitas resultantes das atividades, resultantes da multiplicação das receitas líquidas por unidade de área (células E_5 a E_8) pelas áreas (células M_5 a M_8).

→ Célula N_9 : 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.



Figura 3. Formulário do Solver.

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 M_5 a M_8 , referentes às áreas destinadas a cada atividades, ou seja, aos níveis das atividades. Conforme dito acima, foram utilizados valores iguais a zero como iniciais.

D - Campo onde são indicadas as restrições.

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

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 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).

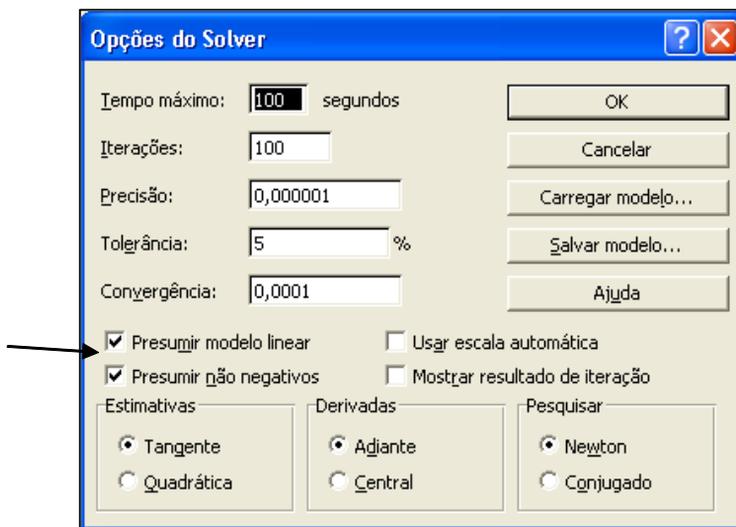


Figura 4. Formulário de opções do Solver, indicando-se as opções em “presumir modelo linear” e “presumir não negativos”.

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.

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 M_5 a M_8); 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\$ 32.268,00.

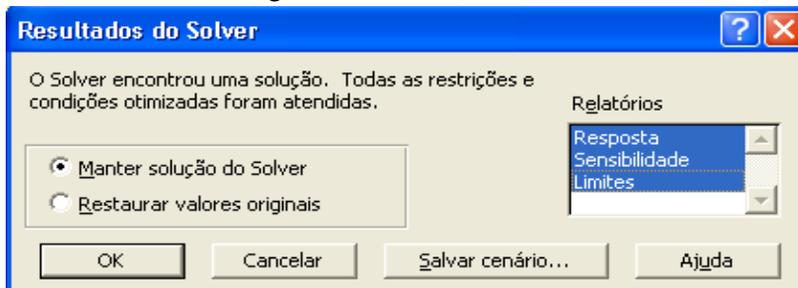


Figura 5. Formulário para acesso aos resultados do Solver.

	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 ³)	(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 (m ³)	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-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⁻³, significando que para cada metro cúbico extra de água, a ser somado ao valor da restrição (14.000 m³), 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 m³.

Observa-se na Figura 7 um preço sombra negativo para a produção de milho, igual R\$ -2.373,23 t⁻¹. Preços sombras negativos ocorrem quando uma restrição de valor mínimo, ou seja, do tipo maior ou 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⁻¹ é mantido para o intervalo de 123 a 140 t para a restrição na produção máxima de melão (acrécimo 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 co-

nhcimento 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 $F(r) = R_v$.

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.

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.

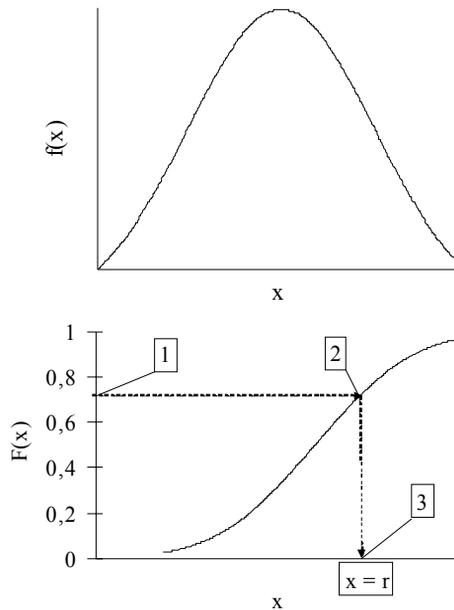


Figura 8. Representação gráfica do método de Monte Carlo, em que $F(r) = P[x \leq r]$.

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 programação 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 pro-

dução. 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 simplificado 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 consi-

derado 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 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 ($\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$), e dados de produtividade, Y (t ha^{-1}), relativos a diferentes métodos e manejos de irrigação, foram obtidos por modela-

gem, 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 ciclos, coeficientes de cultura, K_c , fatores de resposta, K_y , fatores de disponibilidade de água, f , profundidade efetiva do sistema radicular, 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 Mocaminho, MG.

Quanto aos dados de solo, considerou-se o teor de água na capacidade de campo, θ_{cc} , igual a $0,077 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, e o teor de água no ponto de murcha permanente igual a $0,051 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$. Trata-se de um solo com elevado teor de areia e com baixa disponibilidade total de água (DTA), igual a $25,8 \text{ mm/m}$, indicando necessidade de frequências 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).

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 K_1 (tarifa relativa ao investimento público no perímetro de irrigação) e K_2 (tarifa referente aos gastos com operação e manutenção do sistema de irrigação do perímetro): $K_1 = \text{R\$ } 67,53 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ e $K_2 = \text{R\$ } 26,74 \text{ por } 1.000 \text{ m}^3 \text{ de água}$, valores estes praticados em novembro de 2006. Empregou-se, relacionado ao custo de energia para bombeamento, uma tarifa de energia elétrica de $\text{R\$ } 0,23 \text{ kWh}^{-1}$, 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 cul-

turas 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, 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⁻¹; X_j - nível da j-ésima atividade ou área cultivada, ha; Y_j - produtividade da j-ésima atividade, kg ha⁻¹; C_j - valor presente dos custos, por unidade de área, para a j-ésima atividade, R\$ ha⁻¹; e Cfix - valor presente dos custos fixos, R\$ ha⁻¹.

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 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 C_{fix} (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.

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 ³)	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 ⁻¹	28	
Limão ano 3	t ano ⁻¹	8	
Limão ano 4	t ano ⁻¹		22
Maracujá ano 3	t ano ⁻¹	11	28
Alface - semente	t safra ⁻¹		1
Algodão	t safra ⁻¹	1	
Cebola inverno	t safra ⁻¹		33
Cebola verão	t safra ⁻¹		33
Cenoura diversas	t safra ⁻¹	11	39
Feijão	t safra ⁻¹	1	4
Melancia	t safra ⁻¹	11	50
Melancia - semente	t safra ⁻¹		1
Melão	t safra ⁻¹		33
Milho	t safra ⁻¹	2	
Pepino conserva	t safra ⁻¹		15
Quiabo semente	t safra ⁻¹	1	
Tomate mesa	t safra ⁻¹		

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 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

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), 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 dis-

ponível 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 variando de R\$ 0,08 m⁻³ a R\$ 0,36 m⁻³. O preço sombra de R\$ 0,36 m⁻³ 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⁻¹. 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 (m ³)	8.250,00	0,10	148,53	1.343,37
água	fev - ano 2 (m ³)	8.250,00	0,28	354,53	98,72
água	out - ano 2 (m ³)	8.250,00	0,09	463,30	723,05
água	fev - ano 3 (m ³)	8.250,00	0,36	684,38	296,47
água	out - ano 3 (m ³)	8.250,00	0,08	426,58	1.065,31
água	fev - ano 4 (m ³)	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

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	Melão - ano 4 (t)	33,00	154,75	7,86	32,74
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⁻³, R\$ dias⁻¹-homem ou R\$ t⁻¹.

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⁻¹ foi crítica, acarretando um preço sombra de R\$ 198,62 por toneexpansão 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⁻¹, 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 m³.

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 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%.

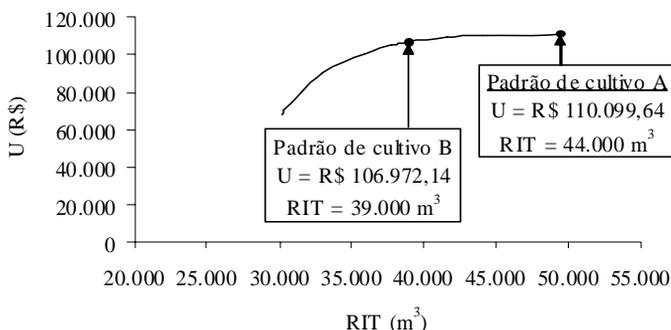


Figura 9. Linha de soluções de padrão de cultivo no plano valor presente líquido total (U) e requerimento de irrigação em meses críticos (RIT), considerando valores minimizados de RIT.

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

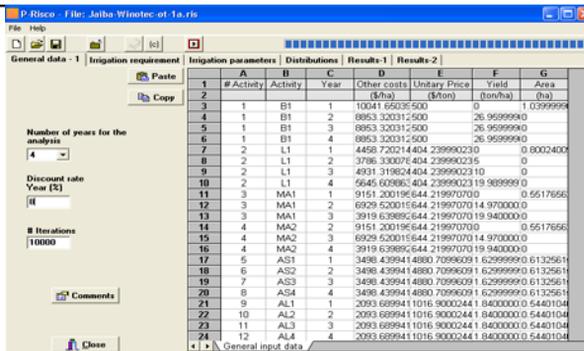


Figura 10. Formulário inicial do programa P-Risco para execução da análise de risco, com entrada de dados a partir da planilha do modelo de programação linear.

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_{jym}	Normal padrão	min = $z_{5\%} = -1,64485$; max = $z_{95\%} = 1,64485$
		Truncada	
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.

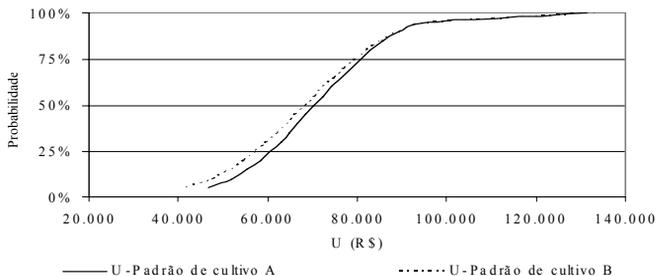


Figura 11. Distribuições de probabilidade acumulada do valor presente líquido total (U) para os padrões de cultivo A (máximo U) e B (requerimento de irrigação total RIT = 39.000 m³).

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%	

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).

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 m³). 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 m³ (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.

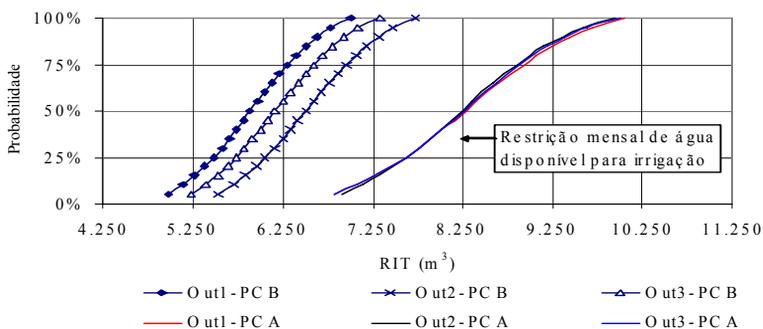


Figura 12. Distribuições de probabilidade acumulada do requerimento de irrigação total (RIT) no mês de outubro dos anos 1 (Out1), 2 (Out2) e 3 (Out3) para os padrões de cultivo A (PCA: máximo U) e B (PCB: requerimento de irrigação total RIT = 39.000 m³).

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 espera-

do para o PCA, conforme indicado tanto pelos modelos de programação linear quanto pela análise de risco (ver Figura 11 e a Tabela 12).

4. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water 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.

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.

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.

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 necessário realizar análise de diagnóstico para identificar as causas e os efeitos. A complexidade e a natureza das especificidades locais constituem a grande dificuldade para a solução de muitos problemas

potenciais na agricultura irrigada. Problemas e soluções são melhores tratados em um diagrama de árvore onde um dado problema pode ter, ao mesmo tempo, causa e efeito, isto é, um problema A é causado por um problema B, e causa um problema C. O problema C, por outro lado, causa um problema D. Assim, uma distribuição de água ineficiente pode ser causada por um calendário de irrigação inadequado e tem o efeito de proporcionar desuniformidade da produtividade das culturas. O uso de um calendário de irrigação inadequado pode ser causado por falta de treinamento dos irrigantes, pequeno nível de motivação, inadequada coleção de dados, etc. A identificação dos fatores envolvidos forma a base para um sistema hábil para a análise de diagnóstico.

Ao identificar soluções potenciais é importante investigar a exequibilidade daquelas soluções. Melhorar o manejo da irrigação e a operação dos sistemas através de treinamento só é possível se as pessoas envolvidas aplicarem o treinamento. Elas devem, portanto, ser motivadas e ter as facilidades necessárias.

A maior restrição para nosso entendimento sobre o uso da água é a dificuldade associada com sua medida e quantificação. Medições e registros de umidade do solo, vazão, pressão do sistema, variáveis de clima são raros e providos erros potenciais. A determinação correta quantidade de água requerida pela cultura em períodos específicos do seu desenvolvimento é difícil, se não impossível, para a maioria dos irrigantes. Sem a previsão da lâmina de irrigação definida como objetivo, é pouco provável que os agricultores apliquem a quantidade de água necessária. Dado o número e a natureza das variáveis que necessitam ser conhecidas (umidade do solo na capacidade de campo, conteúdo de água no solo em um dado momento, profundidade das raízes, vazão disponível, vazão aplicada, etc.) não é surpreendente que a eficiência de aplicação para a maioria dos irrigantes seja relativamente baixa – como poderia ser diferente?

Questões que poderiam ser dirigidas a esse respeito são: como o irrigante poderia decidir quando e quanto irrigar? Como ele sabe quando aplicou suficiente quantidade de água? É eficiente a forma como o irrigante opera o sistema de irrigação em função da sua experiência? Seu nível educacional, seu conhecimento, o aconselhamento que ele procura são adequados?

Na formulação das metas para uso de água é conveniente re-analisar e considerar não só quanto a água é produtiva, mas sim qual a produtividade potencial está sendo perdida pelo manejo inadequado do recurso hídrico. Um exemplo clássico é a escassa atenção dada à perda produtiva potencial por falhas provenientes da falta de manutenção dos sistemas de irrigação. As perdas potenciais, ao longo dos anos, podem somar uma quantidade muitas vezes maior do que a quantidade de recursos financeiros necessários para a adequada manutenção do sistema. As perdas de produtividade potencial nos projetos de irrigação, decorrentes da manutenção inadequada, são pouco discutidas na literatura.

Estudos recentes sobre uso da água em sistemas de irrigação têm questionado a validade da preocupação com as baixas eficiências de condução e aplicação quando a água resultante da drenagem é re-usada à jusante do sistema. Então, a questão que surge é a seguinte: é mais conveniente focar o re-uso da água de drenagem em vez de focar a melhoria do manejo da água derivada à parcela e do sistema de irrigação?

Para melhorar o manejo da irrigação é necessário estabelecer procedimentos para a avaliação do desempenho dos sistemas. A teoria do manejo requer que os objetivos sejam identificados e definidos; as metas sejam fixadas, e as medidas e os indicadores de desempenho sejam usados para monitorar a consecução das metas e, por conseguinte, os objetivos. A inadequação de procedimentos para avaliação do desempenho foi identificada por pesquisadores nos meados dos anos 80, quando eles estudaram como os sistemas de irrigação estavam sendo

manejados. Desde então muitos trabalhos de avaliação de desempenho foram conduzidos. Ainda serão necessárias pesquisas para identificar medidas práticas para atender às demandas da avaliação de desempenho de diferentes tipos de sistemas de irrigação e de drenagem. A disseminação destas informações em um formato utilizável pelos técnicos da extensão rural e pelos irrigantes é crucial para proporcionar melhoria no manejo e uso da água.

A caracterização dos tipos de sistemas de irrigação está associada com as questões do desempenho. Se as soluções para o baixo desempenho estão sendo aplicadas a outros sistemas além daqueles para os quais as pesquisas foram conduzidas, é necessário um procedimento para descrever e categorizar os sistemas de forma que as soluções potenciais possam ser transferidas.

Uma das mais surpreendentes características do manejo dos projetos públicos de irrigação é a aceitação tácita de que pouco ou nada pode ser feito nos projetos de gestão governamental para relacionar salários e remuneração com desempenho dos projetos de irrigação. A crença de que os funcionários públicos não podem ser recompensados pelas suas ações e o desempenho de um projeto de irrigação é inerente, é que faz o Banco Mundial e outras agências de financiamento forçarem os governos a mudar ou privatizar os projetos de irrigação. Existe espaço para idéias inovadoras para sugerir formas para remunerar os técnicos de agências públicas visando um bom desempenho dos projetos, em vez de fechar os olhos e seguir corrupto e continuar com práticas injustas. Sob esse foco muitas oportunidades valiosas identificadas pela pesquisa podem falhar ao serem implementadas.

O grau de desenvolvimento que segue a agricultura irrigada em alguns países é uma valiosa oportunidade para acumular experiência. O desenvolvimento que tem acontecido em certos países, as razões e as aptidões ambientais para tal desenvolvimento, fornecem indicações

para o desenvolvimento em outros países. Existe uma progressão natural dentro da sociedade para adaptar e refinar sua tecnologia de irrigação com base na sua própria história e no ambiente político/técnico/econômico. Têm ocorrido aprimoramentos no sentido de melhorar a eficiência de uso da água e a conservação da energia (sistematização do terreno a laser para irrigação por superfície; irrigação por superfície com vazão intermitente; sistema de re-uso da água escoada no final da parcela; substituição de sistemas de irrigação menos eficientes por mais eficientes como microirrigação). Estes aprimoramentos têm seguido aproximações passo-a-passo e, enquanto as restrições têm sido atenuadas, novos desafios têm sido encontrados. É valioso observar a experiência de outros países na busca de modelos para o processo de desenvolvimento.

A avaliação do desempenho dos sistemas de irrigação necessita ser focada em três áreas: primeiramente, o entendimento sobre o que está acontecendo. Segundo, como as avaliações podem melhorar as práticas de manejo da irrigação e, terceiro, onde existe a necessidade de adoção de tecnologias, de práticas e de procedimentos para maior eficiência do uso de água. Dada a limitação na disponibilidade de recursos financeiros para os trabalhos de avaliação, atenção também precisa ser dada a quanto dos resultados serão úteis e aplicados e a extensão dos impactos obtidos. Serão necessárias avaliações sobre a probabilidade das técnicas de manejo serem adotadas e do potencial para contribuir positivamente com a redução do desperdício de água, com o aumento da produtividade e com o aumento da renda do irrigante.

Este texto procura apresentar técnicas de manejo da irrigação que proporcionam aumento da eficiência do uso da água e identificam estratégias para a otimização da irrigação, visando à maximização do lucro da atividade agrícola, à economia de água e à redução dos impactos ambientais decorrentes da irrigação. Trata-se da maximização do lucro na propriedade agrícola, o que representa um problema de

otimização. Serão discutidas as características essenciais da otimização da irrigação focando algumas análises simples, que geralmente desconsideram muitas das complexidades da agricultura real, mas que poderão ilustrar a natureza essencial da otimização da irrigação.

2. ENFOQUES DO MANEJO DA IRRIGAÇÃO

O manejo racional da irrigação pressupõe o uso criterioso do recurso hídrico disponível para se maximizar a produtividade das culturas com o uso eficiente da água, da energia, dos fertilizantes e de outros insumos empregados na produção, considerando os aspectos sociais e ecológicos da região. Outros objetivos também podem ser estabelecidos, como maximizar a receita líquida por unidade de volume de água ou por unidade de área irrigada.

As práticas convencionais de irrigação baseiam-se na necessidade de água da cultura, definida pela demanda evapotranspirométrica, e na eficiência de aplicação de água. Para dar suporte à formulação de calendários de irrigação as pesquisas tem sido guiadas sob quatro enfoques de manejo da irrigação: irrigação total, irrigação suplementar, irrigação com déficit e irrigação de “salvação”.

Na irrigação total, toda água necessária para atender a demanda evapotranspirométrica da cultura é proveniente da irrigação. Esse tipo de manejo é aplicado em regiões de clima árido ou semi-árido, ou em regiões onde a precipitação é insignificante. Na irrigação suplementar, a água necessária ao atendimento da demanda evapotranspirométrica da cultura no intervalo entre duas irrigações consecutivas, é proveniente, em parte, da irrigação e, em parte, da precipitação pluviométrica efetiva. Nesse caso diz-se que a irrigação suplementará a precipitação efetiva no atendimento da demanda de água da cultura. Na irrigação com déficit, planeja-se atender somente uma fração da demanda de água da cultura por evapotranspiração. Esse tipo de manejo pode ser praticado com irrigação total e com irri-

irrigação suplementar. O déficit de água pode ser imposto durante todo o ciclo da cultura ou somente nas fases não críticas ao déficit hídrico. Neste último caso, são possíveis menores reduções na produtividade da cultura. Na irrigação de salvação, o objetivo é irrigar somente num período relativamente curto ou num estágio do cultivo. Exemplo típico ocorre na irrigação da cana-de-açúcar, onde se aplica por irrigação, a vinhaça ou a água proveniente da lavagem da cana, em duas ou três aplicações de 30 a 60 mm por mês, após o plantio para cana planta, ou após os cortes para cana soca (Matiolo, 1998; Bernardo, 2006). Esse tipo de manejo também tem sido utilizado na cultura do milho, no período do pré-pendoamento, e na cultura do feijão, antes da floração e na formação dos grãos, quando ocorre falta de chuvas nesses períodos. São duas as estratégias para o planejamento da irrigação: (a) suprir totalmente a necessidade de água da cultura, em condições de irrigação total ou irrigação suplementar – atendimento pleno da demanda evapotranspirométrica da cultura, ou irrigação sem déficit, e (b) suprir parcialmente a necessidade de água da cultura, em condições de irrigação total ou suplementar – atendimento parcial da demanda evapotranspirométrica da cultura, ou irrigação com déficit.

Na irrigação sem déficit, o objetivo é aplicar uma quantidade média de água, capaz de suprir totalmente o déficit hídrico e de proporcionar a máxima produção por unidade de área, evitando perda de produtividade ou de qualidade do produto por deficiência de água. Com esse objetivo fica implícito que a disponibilidade de água não é fator limitante da produção. Como a aplicação de água não é totalmente uniforme no espaço, o excesso de água poderá reduzir a produção da cultura pela redução da aeração do solo, por lixiviação de nutrientes e por doenças associadas a solos úmidos. Os níveis preconizados de eficiência técnica da irrigação planejada para satisfazer plenamente a demanda de água da cultura são aqueles possíveis de obter com um grau mínimo de adequação da irrigação de 90%, para culturas de alto ou médio valor econômico, ou de 75% para culturas de

baixo valor econômico (Cuenca, 1989). A irrigação convencional é, desse modo, definida em termos da quantidade de água a ser aplicada para evitar déficit hídrico em 90% ou 75% da área. Esses índices constituem, até hoje, os fundamentos da irrigação padrão em todo o mundo. O grau de adequação se refere à fração da área que deve receber água suficiente para evitar perdas de produtividade ou de qualidade do produto. A irrigação para atender plenamente a demanda de água da cultura é um problema relativamente simples e claramente definido, com o objetivo de maximizar a produção por unidade de área.

Na irrigação com déficit, o objetivo é maximizar a produção por unidade de volume de água aplicada (eficiência de uso da água = eficiência produtiva, atualmente denominada produtividade da água). Com esse objetivo, visa-se a aumentar a eficiência de uso da água e economizar água pelo aumento da eficiência de aplicação (eficiência técnica), redução das perdas de água e redução da eficiência de armazenagem (Phene, 1989), pressupondo-se que a disponibilidade de água constitui limitação à produção agrícola e que o manejo da irrigação deve priorizar a minimização das perdas de água. Se a lâmina de irrigação for menor que a evapotranspiração da cultura no período (irrigação com déficit), o grau de adequação será reduzido, as produtividades serão menores, mas, como resultado, reduz-se a percolação, aumenta-se a eficiência de aplicação e há redução nos custos operacionais da irrigação e redução da lixiviação de produtos químicos.

Uma mudança fundamental deverá ocorrer no manejo da irrigação nos próximos anos, em decorrência das pressões econômicas sobre os agricultores, da crescente competição pelo uso da água e dos impactos ambientais da irrigação. Tais fatores motivarão uma mudança de paradigma da irrigação, enfocando-se, além da eficiência técnica/produtiva, a eficiência econômica. Esse novo enfoque pode ser descrito simplesmente como "otimização" e o argumento é que a mudança é fundamental, desejável e inevitável e será um avanço significativo nas práticas atuais, já que uma

produção eficiente e rentável deve constituir o principal objetivo econômico de uma empresa agrícola. A otimização da irrigação considera explicitamente os custos e os lucros, porém, maximizar a lucratividade é um problema substancialmente mais complexo e desafiador. Identificar estratégias ótimas de irrigação necessitará de modelos detalhados das relações água-cultura e eficiência de irrigação. Fatores econômicos, como custos de produção, preços do produto, custos de oportunidade da água, deverão ser explicitamente incorporados nas análises.

A otimização da irrigação não deve ser confundida aqui com o manejo da água na parcela, ou com o monitoramento sistemático da umidade do solo ou do estado hídrico da cultura para se determinar quando e quanto irrigar. Isso não quer dizer, entretanto, que este monitoramento não seja parte do enfoque de otimização. Pelo contrário, novas e mais sofisticadas técnicas de monitoramento da irrigação serão necessárias para implementar planos ótimos de irrigação.

3. OTIMIZAÇÃO DA IRRIGAÇÃO PARA UMA CULTURA

Uma irrigação ótima implica menores lâminas aplicadas em relação à irrigação plena, com conseqüente redução da produtividade da cultura, porém com algumas vantagens significativas. Os benefícios potenciais da irrigação com déficit advêm de três fatores: aumento da eficiência de irrigação; redução dos custos da irrigação e redução dos riscos associados aos impactos ambientais adversos da irrigação plena.

Muitos pesquisadores analisaram os benefícios econômicos da irrigação ótima em circunstâncias específicas e concluíram que a técnica pode aumentar a receita líquida proporcionada pelas culturas irrigadas (Stewart; Hagan; Pruitt, 1974; English; Nuss, 1982; Frizzone, 1986; English; Nakamura, 1989; Martin; Brocklin; Wilnes, 1989; English, 1990; Frizzone et al., 1995; Frizzone et al., 1997; Calheiros et al., 1996; Queiroz et al., 1996; Sousa; Frizzone; Peres, 1998; Heinemann et al.,

2000; Andrade Júnior et al., 2001; Heinemann; Souza; Frizzone, 2001; Frizzone et al., 2001; Paz et al., 2002; English; Solomon; Hoffman, 2002).

Embora a otimização da irrigação tenha sido tema de pesquisa por mais de quatro décadas, nenhum procedimento ótimo, sistemático e rigoroso está sendo usado na agricultura produtiva atualmente. English; Solomon e Hoffman (2002) citam uma revisão de literatura sobre esse tema, apontando muitos artigos baseados em teorias, mas não citam exemplos de otimização sistemática em condições de campo. Apresentam uma pesquisa informal com 42 profissionais-chave em irrigação, perguntando aos entrevistados se eles estavam conscientes de qualquer aplicação sistemática dos princípios da otimização em áreas de produção agrícola. A conclusão foi que nenhum podia citar qualquer exemplo de estratégia de otimização com base científica rigorosa, em nenhuma parte do mundo, apesar de muitos relatarem algumas estratégias intuitivas visualizadas por algum produtor.

Uma revisão dos livros-textos de irrigação mais comuns mostra que sempre é recomendado o dimensionamento formal da irrigação para a máxima produtividade das culturas. Alguns textos recomendam que o sistema de irrigação deverá aplicar a quantidade de água necessária para satisfazer a demanda total da cultura (James, 1988; American Society Of Civil Engineers, 1990). Em outros textos o procedimento é baseado na máxima depleção admissível de água no solo e, embora o nível de depleção seja escolhido pelo projetista, sempre implica irrigação plena (Keller; Bliesner, 1990; Bernardo, 1995). Apenas um dos textos revisados (Cuenca, 1989) sugere que sob algumas circunstâncias pode ser permitida maior depleção de água no solo, resultando na diminuição da produtividade e no aumento da lucratividade, em relação aos maiores custos da irrigação plena. Entretanto o autor chama a atenção para o fato de que tal prática poderá aumentar o risco de uma grande redução da produtividade, devido às inesperadas falhas do equipamento de irrigação ou à ocorrência de condições climáticas adversas.

A aparente relutância para explorar completamente o conceito de irrigação ótima em um contexto formal, nos livros-texto, deve-se possivelmente à crença de que os benefícios dessa técnica podem não justificar os riscos associados.

3.1. Funções de Produção, Custos e Receitas

Para desenvolver estratégias ótimas de irrigação, é necessário utilizar relações entre a água aplicada e a produtividade, denominadas funções de produção água-cultura (Frizzone, 1998). Tais funções deveriam basear-se na evapotranspiração (ET), em vez de relacionar a produtividade com a água aplicada, porque seriam mais independentes do sistema de irrigação, do solo e de outros fatores locais que influenciam a forma da curva. Mas, na prática, os irrigantes controlam a lâmina aplicada e não a ET. Para baixos níveis de irrigação, inferiores a cerca de 50% da irrigação plena, a produção tende a variar linearmente com a água aplicada (Vaux Jr.; Pruitt, 1983; Hargreaves; Samani, 1984). Além desse ponto, a relação torna-se curvilínea com o aumento da quantidade de água aplicada, como consequência das perdas por percolação profunda, por escoamento superficial e por evaporação, até atingir um máximo. Para quantidades de irrigação superiores a esse ponto de máxima produção, ocorre um decaimento da curva, refletindo a diminuição da produtividade, em decorrência das condições anaeróbicas nas raízes, de doenças e de lixiviação de nutrientes associadas ao uso excessivo de água.

A irrigação necessária é geralmente definida como a quantidade de água requerida para atingir pleno potencial produtivo. Mas, devido à variabilidade espacial do solo e da água aplicada, não é possível irrigar toda a área com perfeita uniformidade e, conseqüentemente, não é factível atingir o pleno potencial produtivo em cada ponto da área cultivada. Assim, para os objetivos das análises aqui desenvolvidas, deve-se interpretar irrigação plena como a lâmina de água aplicada (w_m) capaz de proporcionar a maior produtividade média.

Sendo $y(w)$ a função de produção água-cultura, em que y indica a produção por unidade de área (kg ha^{-1}) e w a lâmina de água aplicada (mm), qual nível de água aplicada constituiria a irrigação plena? Se o objetivo é maximizar a produção por unidade de área, é necessário apenas igualar a zero a primeira derivada da função de produção, em relação à lâmina de água, e resolver para w . Assim, o objetivo da irrigação plena é definido por:

$$\frac{\partial y(w)}{\partial w} = 0 \quad (\text{Eq. 1})$$

Assumindo que a água é o único fator variável e que a função de produção água-cultura é um polinômio do segundo grau (equação 2), tem-se:

$$y(w) = r_0 + r_1 w + r_2 w^2 \quad (\text{Eq. 2})$$

$$\frac{dy(w)}{dw} = r_1 + 2r_2 w = 0 \quad (\text{Eq. 3})$$

$$w_m = -\frac{r_1}{2r_2} \quad (\text{Eq. 4})$$

$$y(w_m) = r_0 - \frac{r_1^2}{4r_2} \quad (\text{Eq. 5})$$

A receita bruta da unidade técnica é igual à produção da cultura multiplicada pelo preço do produto. Assim, as funções de produção água-cultura e de receita bruta têm a mesma forma geral. Portanto a quantidade de água que maximiza a produção por unidade de área (w_m) também maximiza a receita bruta. Neste ponto, a eficiência marginal da utilização de água é zero, uma vez que a aplicação de um volume adicional de água não produz acréscimo na produção.

Sendo a quantidade de água aplicada inferior a w_m , a eficiência marginal de um incremento de água será maior que zero porque produzirá um certo incremento de produção. A eficiência marginal da água aumenta enquanto a quantidade de água aplicada diminui. Dessa

forma, a irrigação parcial aumenta a eficiência do uso da água.

A função de receita bruta para a unidade técnica pode ser expressa como:

$$Ib(w) = p y(w) \quad (\text{Eq. } 6)$$

sendo: $Ib(w)$ – receita bruta da unidade técnica por unidade de área, \$ ha^{-1} ; p – preço unitário do produto da unidade técnica, \$ kg^{-1} ; $y(w)$ – produtividade da cultura em função da quantidade de água, $kg ha^{-1}$.

A relação entre a quantidade de água aplicada e o custo total de produção denomina-se função de custo e pode ser representada por uma linha reta, possuindo três importantes características. A primeira é o intercepto com a ordenada, associado aos custos fixos anuais de produção (custos de capital, taxas, seguros e outros custos fixos da irrigação, bem como custos fixos de preparo do solo, plantio, cultivo, uso de defensivos, fertilizantes e colheita). A segunda é a declividade, que representa os custos marginais variáveis da produção, incluindo os custos variáveis da irrigação (custos de bombeamento, de mão-de-obra envolvida na irrigação e de manutenção). Alguns custos podem variar indiretamente com a irrigação, uma vez que a produção varia com a quantidade de água aplicada. Por exemplo, um agricultor pode ajustar o uso de fertilizantes a uma expectativa de produtividade da cultura, que depende também da quantidade de água aplicada; os custos de colheita podem variar com a produtividade, e assim por diante. Todos esses fatores estão incorporados na declividade da função de custo. A terceira característica da função de custo é o seu limite superior, representando a capacidade do sistema, que define a máxima capacidade de derivação de água do sistema.

Embora a função de custo esteja representada por uma reta, no caso geral, ela pode ser curvilínea, especialmente quando se consideram os custos associados ao excesso de água aplicada, como custos da remoção do excesso de água e custos dos nutrientes percolados ou

perdidos por escoamento superficial. Assumindo que é razoável utilizar uma função de custo linear para a unidade técnica (Hart; Norum; Peri, 1980; English, 1990), tem-se:

$$c(w) = c_0 + h(w) + c_w w \quad (\text{Eq. } 7)$$

sendo: $c(w)$ – custo total de produção por unidade de área da unidade técnica, \$ ha⁻¹; c_0 – custos fixos de produção por unidade de área, \$ ha⁻¹; $h(w)$ – custos que dependem indiretamente da quantidade de água aplicada, \$ ha⁻¹; c_w – custos que dependem diretamente da quantidade de água aplicada, \$ m⁻³, e w – volume de água aplicada por unidade de área, m³ ha⁻¹.

Assumindo, como condição simplificativa, que a soma dos custos fixos (c_0) e dos custos indiretamente dependentes da quantidade de água aplicada [$h(w)$] são constantes (c_f), conforme sugerido por Hart; Norum e Peri (1980) e Frizzone (1998), pode-se expressar a função de custo total de produção da seguinte forma:

$$c(w) = c_f + c_w w \quad (\text{Eq. } 8)$$

Algumas análises de custo consideram somente os custos diretos da irrigação e não levam em conta os outros custos da produção. Essa análise incompleta conduz a uma sub-estimativa do valor ótimo do déficit de irrigação e do ganho na receita líquida. Deve-se salientar que a redução na quantidade de água aplicada e a conseqüente redução na produção não implicam somente a redução dos custos da irrigação, mas também a redução nos custos de fertilizantes, de colheita e outros fatores da produção, e pode ainda implicar a redução dos custos de capital envolvidos na derivação de água e nos sistemas de irrigação.

English e Nuss (1982) analisaram a economia potencial de custos que pode ser atingida por um projeto de irrigação especificamente dimensionado para a irrigação com déficit em uma cultura de trigo. A análise foi desmembrada em três categorias: (1) redução nos custos

de irrigação (energia, manutenção e mão-de-obra) - 37% de economia; (2) redução nos custos fixos (custos de capital) - 36% de economia; (3) redução em outros custos de produção (tratamentos culturais, aplicações químicas, colheita) - 27% de economia.

A função de receita líquida da unidade técnica para a fazenda, com área irrigada x , pode ser expressa da seguinte forma:

$$Z(w) = x [p y(w) - c_0 - h(w) - c_w w] \quad (\text{Eq. } 9)$$

ou,

$$Z(w) = x [p y(w) - c_f - c_w w] \quad (\text{Eq. } 10)$$

3.2. Maximização da Receita Líquida com Restrição de Terra

Frizzone (1986) apresentou uma aproximação analítica para otimizar a irrigação. Utilizou uma função de receita líquida por unidade de área e determinou a lâmina de água que maximiza $Z(w)$, isto é, o objetivo foi: $dZ(w)/dw = 0$. Esta derivada resulta em $dy(w)/dw = c_w/p$, significando que, sendo a água o único fator variável, a receita líquida por unidade de área se maximiza quando o produto físico marginal da água (dy/dw) for igual à relação de preços entre fator e produto (c_w/p).

A receita líquida é maximizada para uma lâmina de água w^* , inferior a w_m (irrigação plena). Neste ponto, a declividade da reta de custo é igual à declividade da curva de receita bruta. Para uma quantidade de água maior que w^* , a reta de custo tem uma declividade maior que a curva de receita bruta, uma vez que os custos totais são aumentados em uma proporção maior que a receita bruta.

No intervalo entre w^* e w_m , o fazendeiro pode se beneficiar da redução de custos. Além disso, uma decisão para utilizar menor quantidade de água pode possibilitar uma redução de capital e de outros custos fixos. Considerando que a disponibilidade de terra é o único fator limitante da produção, a estratégia ótima de irrigação é aplicar a

lâmina de água que maximiza a receita líquida por unidade de área. Para explicitar a restrição de terra e o preço sombra do recurso, Frizzone (1998) utilizou o processo de otimização com operadores de Lagrange. Assim, o objetivo da fazenda e a restrição de terra podem ser expressos, matematicamente, da seguinte forma:

$$\max Z(w) = x [p y(w) - c_0 - h(w) - c_w w] \quad (\text{Eq. 11})$$

ou,

$$\max Z(w) = x [p y(w) - c_f - c_w w] \quad (\text{Eq. 12})$$

sujeito a:

$$g = x - \bar{x} = 0 \quad (\text{Eq. 13})$$

sendo g a função de restrição de terra, x a área irrigada e \bar{x} a área disponível para o cultivo.

Aplicando-se operadores de Lagrange (L) para otimizar a função-objetivo com restrição de terra, tem-se:

$$L(x, w, \lambda) = x [y(w).p - c_0 - h(w) - c_w w] - \lambda(x - \bar{x}) \quad (\text{Eq. 14})$$

A condição de ótimo é obtida igualando-se a zero as derivadas parciais da função lagrangeana, em relação a w , x e λ :

$$\frac{\partial L}{\partial w} = x \left[\frac{dy}{dw} p - \frac{dh}{dw} - c_w \right] = 0 \quad (\text{Eq. 15})$$

$$\frac{\partial L}{\partial x} = y(w) p - c_0 - h(w) - c_w w - \lambda = 0 \quad (\text{Eq. 16})$$

$$\frac{\partial L}{\partial \lambda} = -x + \bar{x} = 0 \quad (\text{Eq. 17})$$

em que (pdy/dw) é o valor do produto marginal da água; (dh/dw) é o custo marginal dos fatores que dependem indiretamente da água e $(pdy/dw - dh/dw)$ é o valor líquido do produto marginal da água.

A equação (15) indica que, no ponto ótimo, o valor líquido do produto marginal da água deverá ser igual ao custo da água. A equação (16) indica que o valor marginal da terra $\lambda = \partial \mathcal{L} / \partial x$ é igual à receita líquida por unidade de área, a qual é determinada pela quantidade de água, pelo preço do produto e pelos custos de produção.

A máxima produção física só é justificada quando $h(w) = 0$ (ou $dh/dw = 0$) e a água é livre ($c_w = 0$); caso contrário, a quantidade de água aplicada por unidade de área é uma função decrescente de c_w .

Sendo o objetivo da fazenda expresso pela equação (12) e a disponibilidade de terra o único fator limitante da produção, obtém-se de $\partial \mathcal{L} / \partial w$ a seguinte relação:

$$\frac{dy}{dw} p = c_w \quad (\text{Eq. 18})$$

significando que a quantidade ótima de água (w^*), para a qual a receita líquida por unidade de área é maximizada, corresponde ao ponto em que o valor do produto marginal da água [$(dy/dw) p$] se iguala ao seu custo marginal [$c_w = dc(w)/dw$]. A equação (18) indica que, no ponto ótimo, a derivada da função de produção será positiva e diferente de zero, ou seja, o ponto de máximo lucro será encontrado na porção ascendente da curva de produção. Assim, uma estratégia de maximização de lucro permitirá usar menos água por unidade de área que a de maximização da produção. Considerando uma função de produção água-cultura na forma de um polinômio do segundo grau (equação 2) e aplicando-se a equação (18), resulta:

$$r_1 + 2 r_2 w = \frac{c_w}{p} \quad (\text{Eq. 19})$$

$$w^* = \frac{c_w - p r_1}{2 r_2 p} \quad (\text{Eq. 20})$$

Obtém-se o preço sombra da terra, que é uma medida do custo de oportunidade, pela derivada , fazendo-se $w = w^*$ e $y(w) = y(w^*)$:

$$\lambda = (r_0 + r_1 w^* + r_2 w^{*2})p - c_f - c_w w^* \quad (\text{Eq. 21})$$

A quantidade ótima de água representa apenas um ponto sobre a curva de produção, tendo pouco significado prático. É possível definir um intervalo de lâmina de irrigação no qual a receita líquida é maior que a obtida com irrigação para máxima produção. Conforme se observa na Figura 1, existe um intervalo de lâmina de água onde a irrigação com déficit é mais rentável que a irrigação plena, tendo-se como limite inferior um valor w_{el} , que resulta numa receita líquida equivalente àquela produzida por uma quantidade de água w_m .

No intervalo entre w_m e w_{el} , a irrigação com déficit é mais rentável que a irrigação plena, para o caso em que a disponibilidade de terra é o fator limitante da produção. A amplitude desse intervalo indica o grau de segurança no manejo da irrigação com déficit. Se o intervalo é relativamente amplo, o risco associado à decisão pode ser pequeno. Um intervalo pequeno representa maior risco e implica maior cuidado no manejo da irrigação. O valor ótimo, nesse intervalo, é w^* , definido pela equação (20). Qualquer quantidade de água entre w_{el} e w_m produzirá uma receita líquida, por unidade de área, maior que a obtida pela irrigação plena. O valor de w_{el} , para o qual a receita líquida é igual àquela que se consegue com w_m , é obtido pela solução do seguinte conjunto de equações:

$$Z(w_{el}) = x[p y(w_{el}) - c_f - c_w w_{el}] \quad (\text{Eq. 22})$$

$$Z(w_m) = x[p y(w_m) - c_f - c_w w_m] \quad (\text{Eq. 23})$$

Substituindo $y(w_m)$ e $y(w_{el})$ nas equações (22) e (23), a quantidade de água w_{el} é encontrada para $Z(w_{el}) = Z(w_m)$, o que resulta em:

$$p r_2 w_{el}^2 + (p r_1 - c_w) w_{el} + \frac{p r_1^2}{4 r_2} - \frac{c_w r_1}{2 r_2} = 0 \quad (\text{Eq. 24})$$

$$w_{el} = \frac{-b + \sqrt{b^2 - 4 a c}}{2 a} \quad (\text{Eq. 25})$$

sendo:

$$a = p r_2 \quad (\text{Eq. 26})$$

$$b = p r_1 - c_w \quad (\text{Eq. 27})$$

$$c = \frac{p r_1^2}{4 r_2} - \frac{c_w r_1}{2 r_2} \quad (\text{Eq. 28})$$

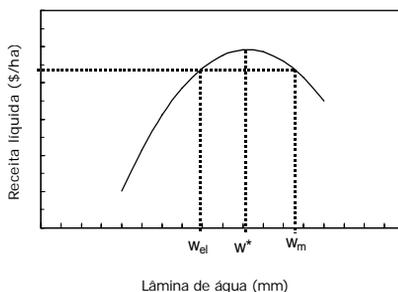


Figura 1. Intervalo para o manejo racional da irrigação com déficit, quando a disponibilidade de terra é fator limitante da produção

Aplicação 1: Para esta aplicação, utilizou-se uma função de produção para a cultura do feijoeiro, cultivar carioca (Figura 2), obtida por Figuerêdo et al. (1998), no Centro de Pesquisa Agropecuária dos Cerrados, Brasília – DF, durante três anos de experimentação em campo (1988, 1990 e 1991). A máxima produção física estimada (3031,8 kg ha⁻¹) ocorre para uma lâmina total de água de 573 mm.

Nessa aplicação, utilizam-se os valores de preços e os custos de produção do feijoeiro, relatados por Frizzone (1995), para a região de Guaira (SP), com sistema de irrigação por pivô central. No período de janeiro a dezembro de 1993, os preços reais da venda do feijão variaram de US\$ 21,07 a US\$ 41,28 por saca de 60 kg, com média de US\$ 31,51. Os custos variáveis diretamente dependentes da quantidade de água aplicada variaram entre US\$ 0,32 e US\$ 0,74 mm⁻¹ ha⁻¹, com média de US\$ 0,50 mm⁻¹ ha⁻¹. O custo médio de produção, excetuan-

do-se a irrigação, foi US\$ 420 ha⁻¹. Para valores de $c_f = \text{US\$ } 420 \text{ ha}^{-1}$, $c_w = \text{US\$ } 0,74 \text{ mm}^{-1} \text{ ha}^{-1}$ e $p = \text{US\$ } 0,5 \text{ kg}^{-1}$, obtiveram-se $w^* = 520 \text{ mm}$ e $z(w^*) = \text{US\$ } 692 \text{ ha}^{-1}$ e a lâmina de água que produz uma receita líquida equivalente àquela obtida pela irrigação sem déficit é $w_{el} = 467 \text{ mm}$ sendo $z(w_{el}) = \text{US\$ } 672 \text{ ha}^{-1}$. Os valores $w_m = 573 \text{ mm}$ e $w_{el} = 467 \text{ mm}$ representam o intervalo em que o déficit de irrigação é mais rentável, pois a receita líquida, dentro desse intervalo, é maior que a obtida com a irrigação plena (Figura 3).

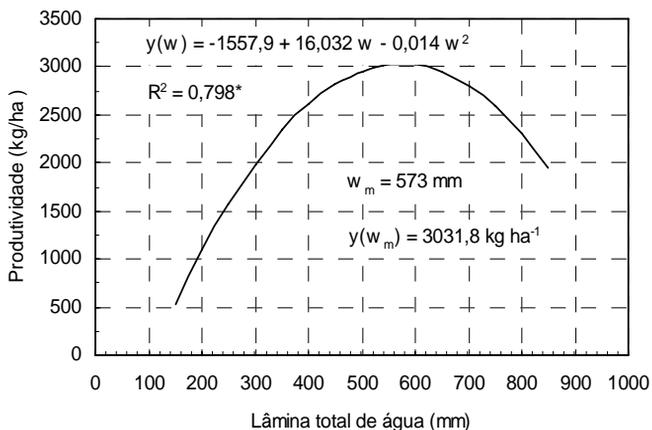


Figura 2. Função de produção do feijoeiro, cultivar carioca, obtida por Figuerêdo et al. (1998), no CPAC, Brasília – DF, para a média dos anos de 1988, 1990 e 1991.

Em relação à irrigação sem déficit, o nível de irrigação de máximo lucro economiza 53 mm de água (9,25%), sendo este o déficit ótimo (Tabela 1). A irrigação com a lâmina de água $w_{el} = 467 \text{ mm}$ economiza 106 mm de água (18,50%), sendo este um déficit economicamente viável.

Para a lâmina ótima de irrigação, em relação à lâmina para a produção máxima, a receita líquida por m³ de água aplicada aumentou de US\$ 0,1173 m⁻³ para US\$ 0,1331 m⁻³, representando um acréscimo de 13,47%. No limite inferior do intervalo de déficit viável, o aumento foi de 22,63%.

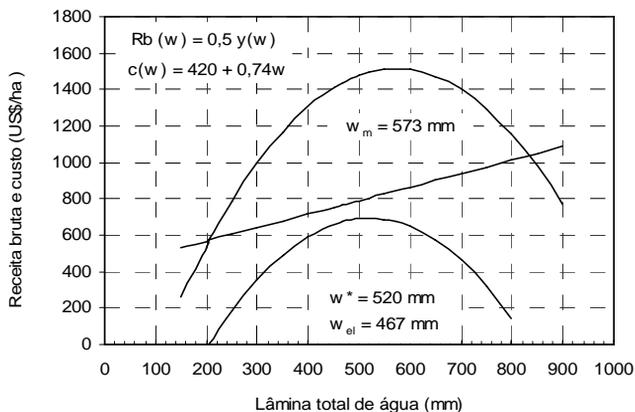


Figura 3. Custos, receita bruta e receita líquida para a produção de feijoeiro, em função da lâmina total de água aplicada, para $c_f = \text{US}\$420 \text{ ha}^{-1}$; $c_w = \text{US}\$ 0,74 \text{ mm}^{-1} \text{ ha}^{-1}$ e $p = \text{US}\$ 0,5 \text{ kg}^{-1}$, considerando limitação na disponibilidade de terra

Observando-se os valores da Tabela 1, pode-se verificar que:

- mantendo-se o preço do produto (p), a lâmina ótima de irrigação diminui enquanto os custos associados à água de irrigação (c_w) aumentam;
- para uma mesma relação c_w/p , a lâmina ótima mantém-se constante;
- a receita líquida máxima aumenta à medida que c_w/p diminui, atingindo maiores valores para relações menores que 1;
- sendo p baixo e c_w alto, mesmo a aplicação da lâmina ótima pode não justificar o investimento em irrigação;
- mantendo-se p , o acréscimo na receita líquida ótima por m^3 de água aplicada, em relação à irrigação plena, aumenta com o aumento de c_w ;
- mantendo-se p , o déficit econômico de irrigação aumenta com o aumento de c_w ;
- a receita líquida é muito dependente de p e, mantendo-se c_w , a lâmina ótima aumenta com o aumento de p e
- maiores déficits econômicos de irrigação estão associados aos maiores valores de c_w .

3.3. Maximização da Receita Líquida com Restrição de Água

Quando a quantidade de irrigação é limitada pela disponibilidade

de água ou pela capacidade do sistema e a terra é relativamente abundante, a estratégia ótima de irrigação é aplicar uma lâmina de água que maximiza a receita líquida por unidade de volume de água (Frizzone, 1998).

Tabela 1 - Irrigação ótima para diferentes combinações de preço do produto (p) e custos que dependem diretamente da quantidade de água aplicada (c_w)

p (US\$kg ⁻¹)	c_w (US\$mm ⁻¹ ha ⁻¹)	Uso de água		Receita Líquida			
		aplicada (mm)	déficit (%)	Z(w) US\$ ha ⁻¹	acréscimo (%)	Z(w) US\$ m ⁻³	acréscimo (%)
0,30	0,32 ($c_w/p=1,07$)	$w_m = 573$		306		0,0534	
		$w^* = 535$	7,10	312	1,96	0,0583	9,18
		$w_{el} = 496$	15,52	306		0,0617	15,54
	0,50 ($c_w/p = 1,67$)	$w_m = 573$		203		0,0354	
		$w^* = 513$	11,70	218	7,39	0,0425	20,06
		$w_{el} = 454$	26,21	203		0,0447	26,27
0,70	0,74 ($c_w/p = 2,47$)	$w_m = 573$		66		0,0115	
		$w^* = 485$	18,14	98	48,49	0,0202	75,65
		$w_{el} = 396$	44,70	66		0,0167	45,22
	0,32 ($c_w/p = 0,64$)	$w_m = 573$		913		0,1593	
		$w^* = 550$	4,18	916	0,33	0,1665	4,52
		$w_{el} = 527$	8,73	913		0,1732	8,73
0,50	0,50 ($c_w/p = 1,00$)	$w_m = 573$		809		0,1412	
		$w^* = 534$	7,30	819	1,24	0,1534	8,64
		$w_{el} = 501$	14,37	809		0,1615	14,38
	0,74 ($c_w/p = 1,48$)	$I = 573$		672		0,1173	
		$w^* = 520$	9,25	692	2,98	0,1331	13,47
		$w_{el} = 467$	18,50	672		0,1439	22,68
0,70	0,32 ($c_w/p = 0,46$)	$w_m = 573$		1519		0,2651	
		$w^* = 556$	3,06	1522	0,20	0,2737	3,24
		$w_{el} = 539$	6,31	1519		0,2818	6,30
	0,50 ($c_w/p = 0,71$)	$w_m = 573$		1416		0,2471	
		$w^* = 547$	4,75	1422	0,42	0,2600	5,22
		$w_{el} = 522$	9,77	1416		0,2713	9,79
0,74 ($c_w/p = 1,06$)	$w_m = 573$		1278		0,2230		
	$w^* = 535$	7,10	1293	1,17	0,2417	8,39	
	$w_{el} = 497$	15,29	1278		0,2571	15,29	

A restrição de água pode ser representada pela seguinte função:

$$g = x w - V = 0 \quad (\text{Eq. 29})$$

sendo V o volume de água disponível.

A seguinte função Lagrangeana pode ser formulada:

$$L(x, w, \lambda) = x [y(w) p - c_0 - h(w) - c_w(w)] - \lambda(x w - V) \quad (\text{Eq. 30})$$

em que o multiplicador de Lagrange λ representa o preço sombra da água, que é o acréscimo da receita líquida por unidade de volume de água adicional. Derivando-se L em relação a x, w e V e igualando-se as derivadas parciais a zero, obtêm-se:

$$\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial x} = y(w)p - c_0 - h(w) - c_w w - \lambda w = 0 \quad (\text{Eq. 31})$$

$$\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial w} = x \frac{dy}{dw} p - \frac{dh}{dw} - c_w - \lambda x = 0 \quad (\text{Eq. 32})$$

$$\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial V} = xw + V = 0 \quad (\text{Eq. 33})$$

Da equação (32), obtém-se que o preço sombra da água é:

$$\lambda = \frac{dy}{dw} p - \frac{dh}{dw} - c_w \quad (\text{Eq. 34})$$

Quando a disponibilidade de água para irrigação é restrita, o custo de oportunidade da água constitui o fator mais importante no manejo da irrigação. Sendo este o caso, a redução na quantidade de água aplicada deverá ser a estratégia racional de manejo da irrigação e a água economizada pela irrigação com déficit deve ser usada para irrigar uma área adicional, aumentando a receita líquida da propriedade agrícola. O acréscimo potencial da receita líquida proveniente do acréscimo da área irrigada é o custo de oportunidade da água e representa o maior preço que se poderá pagar para alocar uma unidade de volume de água para aquela atividade.

No ponto ótimo, o valor líquido do produto marginal da água iguala-se à soma do preço sombra e do preço da água:

$$\frac{dy}{dw} p - \frac{dh}{dw} = \lambda + c_w \quad (\text{Eq. 35})$$

Comparando-se as equações (31) e (34), obtém-se:

$$\frac{y(w)p - h(w) - w c_w - c_0}{w} = \frac{dy}{dw} p - \frac{dh}{dw} - c_w \quad (\text{Eq. 36})$$

isto é, sendo a água restrita, a alocação ótima desse recurso requer que a receita líquida por unidade de volume de água seja igual à receita líquida marginal. Pode-se observar que, sob tais condições, a receita líquida por unidade de volume de água é máxima. Esse resultado pode ser resumido na seguinte asserção: quando a disponibilidade de água é o único fator limitante da produção, a alocação de água deve objetivar a maximização da receita líquida por unidade de volume de água.

Assumindo a condição simplificativa estabelecida pela equação (10) e aplicando-se operadores de Lagrange das relações $\mathcal{L} / \partial \alpha$ e $\mathcal{L} / \partial w$ obtém-se:

$$p(r_0 + r_1 w + r_2 w^2) - c_f - w c_w = w [p(r_1 + 2r_2 w) - c_w] \quad (\text{Eq. 37})$$

de onde resulta a quantidade ótima de irrigação:

$$w^* = \sqrt{\frac{p r_0 - c_f}{p r_2}} \quad (\text{Eq.38})$$

Neste caso, também existe uma quantidade de água w_{ew} que produz uma receita líquida equivalente àquela obtida com um nível de irrigação w_m (Figura 4). Dessa forma, para $Z(w_m)$ e $Z(w_{ew})$, tem-se:

$$Z(w_m) = x z(w_m) \quad (\text{Eq. 39})$$

$$Z(w_{ew}) = x z(w_{ew}) \quad (\text{Eq. 40})$$

$$Z(w_m) = \frac{V}{w_m} z(w_m) \quad (\text{Eq. 41})$$

$$Z(w_{ew}) = \frac{V}{w_{ew}} z(w_{ew}) \quad (\text{Eq. 42})$$

Igualando-se as equações (41) e (42), obtém-se:

$$\frac{V}{w_{ew}} [p y(w_{ew}) - c_f - c_w w_{ew}] = \frac{V}{w_m} [p y(w_m) - c_f - c_w w_m] \quad (\text{Eq. 43})$$

Substituindo-se a função de produção aplicada para w_{ew} e w_m e a equação (4) na equação (43), e resolvendo-se para w_{ew} , obtém-se :

$$w_{ew} = \frac{-b + \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \quad (\text{Eq. 44})$$

em que:

$$a = p r_2 \quad (\text{Eq. 45})$$

$$b = \frac{4 p r_0 r_2 + p r_1^2 - 4 r_2 c_f}{2 r_1} \quad (\text{Eq. 46})$$

$$c = p r_0 - c_f \quad (\text{Eq. 47})$$

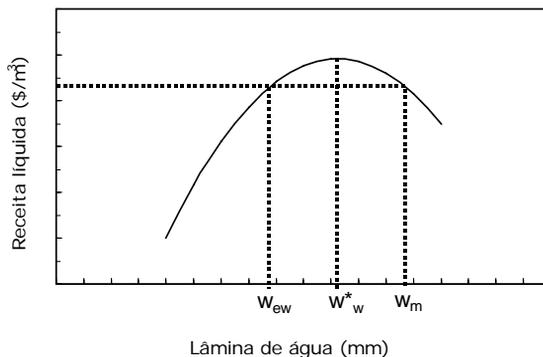


Figura 4. Intervalo para o manejo racional da irrigação com déficit, quando a disponibilidade de água é fator limitante da produção

Aplicação 2: O objetivo é determinar a quantidade ótima de irrigação para a cultura da melancia, irrigada por gotejamento, considerando-se a água como fator limitante da produção. A função de produção água-cultura (Figura 5) foi obtida no campo experimental da Embrapa – Centro de Pesquisa Agropecuária do Meio-Norte, em Parnaíba, PI, cujas condições edafoclimáticas são representativas da região dos Tabuleiros Costeiros do Piauí (Andrade Júnior et al., 2001).

Observa-se que, para a estratégia de irrigação sem déficit, a produtividade máxima é atingida para 356 mm de água, dentro da faixa ideal considerada para a cultura (300 mm a 400 mm), segundo Doorenbos e Kassan (1979).

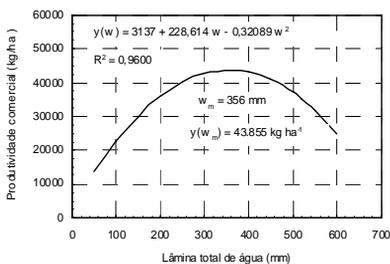


Figura 5. Função de produção a para a melancia, obtida para as condições edafoclimáticas da região dos Tabuleiros Costeiros do Piauí (Andrade Júnior et al., 2001).

Observa-se que, para a estratégia de irrigação sem déficit, a produtividade máxima é atingida para 356 mm de água, dentro da faixa ideal considerada para a cultura (300 mm a 400 mm), segundo Doorenbos e Kassan (1979).

Na Figura 6, são apresentadas as curvas de receita bruta, custos de produção e receita líquida por hectare, para a cultura da melancia, para o preço do produto de US\$ 0,10 kg⁻¹. Para compor o custo total de produção, considerou-se um custo médio de produção de US\$ 1.244 ha⁻¹, excetuando-se o custo diretamente associado à água de irrigação. Já para os custos diretamente dependentes da quantidade de água aplicada, considerou-se US\$ 0,30 mm⁻¹ ha⁻¹. Nessas condições, a máxima receita líquida por hectare foi US\$ 3.035,3, para uma lâmina de água de 350 mm. Mas, na condição de água restrita, a lâmina ótima de irrigação depende do preço do produto e a estratégia de irrigação é maximizar a receita líquida por unidade de volume de água aplicada, o que não corresponde à maximização da receita líquida por unidade de área.

Na Figura 7, verifica-se que a lâmina ótima é 170 mm, o que corresponde a um déficit econômico de água de 186 mm em relação à

lâmina para irrigação sem déficit. Nesse caso, a economia de água é de 52%, podendo ser utilizada para a irrigação de área adicional. A lâmina de água que proporciona uma receita líquida equivalente à irrigação sem déficit é 81 mm, correspondendo a uma economia de água de 77%. O intervalo de manejo da água entre 81 mm e 356 mm define uma região economicamente viável para a irrigação com déficit, sendo 170 mm a quantidade ótima de irrigação.

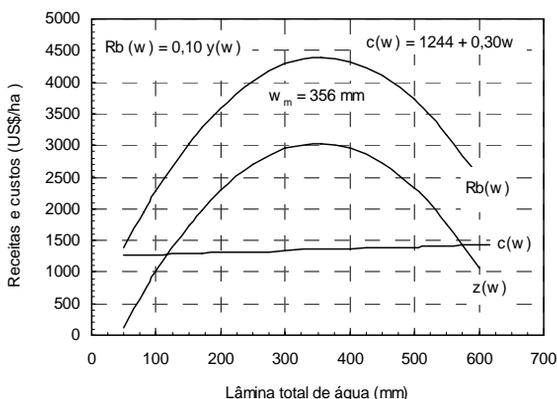


Figura 6. Funções de receita bruta, de custos e de receita líquida para a melancia, em relação à quantidade de água aplicada, para $p = \text{US\$ } 0,10 \text{ kg}^{-1}$, $c_f = \text{US\$ } 1.244 \text{ ha}^{-1}$ e $c_w = \text{US\$ } 0,30 \text{ mm}^{-1} \text{ ha}^{-1}$.

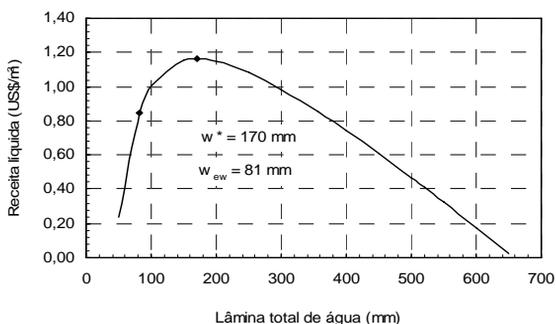


Figura 7. Receita líquida por m^3 de água aplicada, para a cultura da melancia, em relação à lâmina total de água aplicada, para $p = \text{US\$ } 0,10 \text{ kg}^{-1}$, $c_f = \text{US\$ } 1.244 \text{ ha}^{-1}$ e $c_w = \text{US\$ } 0,30 \text{ mm}^{-1} \text{ ha}^{-1}$.

Assumindo, por exemplo, que o volume de água disponível, durante o ciclo da cultura, é 20.000 m³, a irrigação sem déficit (356 mm) permitiria o cultivo de 5,6 ha de melancia e proporcionaria uma receita líquida de US\$ 3.034,70 ha⁻¹, ou US\$ 16.994,30 para a área total. Já a utilização da lâmina ótima (170 mm) possibilitaria aumentar a área irrigada para 11,8 ha, com uma receita líquida de US\$ 1.977,8 ha⁻¹, ou US\$ 23.338,0 para a área total. Também a água economizada poderia ser utilizada para a irrigação de outra cultura.

Na Tabela 2, são apresentadas as estratégias de irrigação e as respectivas receitas líquidas por unidade de volume de água aplicada, considerando-se quatro preços da melancia (US\$ 0,05 kg⁻¹, US\$ 0,10 kg⁻¹, US\$ 0,15 kg⁻¹ e US\$ 0,30 kg⁻¹). Os três últimos valores foram selecionados em função dos preços médios mensais, no período de janeiro de 1994 a dezembro de 1998, no mercado atacadista de Teresina e variaram de US\$ 0,10 kg⁻¹ a US\$ 0,30 kg⁻¹ (ANDRADE JÚNIOR et al, 2001). Para analisar as estratégias de irrigação com um baixo preço do produto utilizou-se o valor US\$ 0,05 kg⁻¹. As receitas líquidas foram calculadas para $cw = \text{US\$ } 0,30 \text{ mm}^{-1} \text{ ha}^{-1}$.

Observa-se que a lâmina ótima de irrigação e a lâmina equivalente diminuem enquanto aumenta o preço do produto (Tabela 2), isto é, o déficit econômico de irrigação é maior para maiores preços do produto. Para um preço do produto de US\$ 0,10 kg⁻¹, a lâmina ótima de irrigação durante o ciclo deverá ser 170 mm, o que corresponde a 52% de déficit. Já a lâmina equivalente é 81 mm, isto é, 77% de déficit. É importante também considerar o volume total de produção. Com a redução no uso da água, uma quantidade adicional de terra poderá ser cultivada, com um conseqüente aumento na produção total.

Na Tabela 2, observa-se que, para $p = \text{US\$ } 0,10 \text{ kg}^{-1}$, se podem dobrar a área cultivada e a produção com o uso da lâmina ótima, relativamente à irrigação sem déficit. Nesse caso, embora a receita líquida por hectare se reduza em aproximadamente 34,8% (US\$ 3034,7 ha⁻¹

para US\$ 1977,8 ha⁻¹), a receita líquida total aumenta 36,2%, em decorrência do aumento da área cultivada.

É importante salientar que, especificamente no caso da melancia, a adoção de elevados déficits de água pode reduzir o peso médio dos frutos, tornando-os não aceitáveis no mercado consumidor. O ideal é conciliar a quantidade a ser produzida e a qualidade dessa produção com a irrigação com déficit, tendo em vista as preferências do mercado consumidor. Dessa forma, mesmo para preços elevados do produto, dificilmente se poderia adotar um déficit elevado. Por exemplo, admitindo-se que, para produzir frutos de boa qualidade sejam necessários pelo menos 200 mm de água durante o ciclo, e que o preço do produto no mercado esteja em US\$ 0,15 kg⁻¹, a lâmina ótima de irrigação de 127 mm não deveria ser utilizada. Nesse caso, utilizar-se-ia a lâmina de 200 mm, porque corresponde ao intervalo de irrigação economicamente viável.

Tabela 2. Estratégias de irrigação da cultura da melancia na região dos Tabuleiros Costeiros do Piauí, considerando-se $c_w = \text{US}\$0,30 \text{ mm}^{-1} \text{ ha}^{-1}$ e quatro preços do produto.

p (US\$ kg ⁻¹)	Uso de água (mm)	Déficit (%)	$y(w)$ (kg ha ⁻¹)	$z(w)$ (US\$ m ⁻³)	Área irrigada (ha)	Produção (kg)
0,05	$w_m = 356$		43.855,3	0,24	1,00	43.855,3
	$w^* = 260$	27	40.884,5	0,27	1,37	56.011,8
	$w_{ew} = 190$	47	34.989,5	0,24	1,87	
0,10	$w_m = 356$		43.855,3	0,85	1,00	43.855,3
	$w^* = 170$	52	32.727,7	1,16	2,09	68.400,9
	$w_{ew} = 81$	77	19.549,4	0,85	4,40	
0,15	$w_m = 356$		43.855,3	1,47	1,00	43.855,3
	$w^* = 127$	64	26.995,3	2,18	2,80	75.474,8
	$w_{ew} = 45$	87	12.774,8	1,47	7,91	
0,30	$w_m = 356$		43.855,3	3,32	1,00	43.855,3
	$w^* = 56$	84	14.933,1	5,74	6,36	94.974,5
	$w_{ew} = 9$	98	5.168,5	3,32	39,55	

4. OTIMIZAÇÃO DA IRRIGAÇÃO PARA MÚLTIPLAS ÁREAS E CULTURAS

O problema de otimização é mais complexo quando múltiplas áreas e culturas devem ser irrigadas com suprimento limitado de água.

A escassez de água implica uma análise de custo de oportunidade e o tomador de decisão deve considerar todas as áreas e culturas e todo o uso alternativo da água simultaneamente, alocando uma quantidade maior de água para culturas mais rentáveis, ou até disponibilizando água para usos externos à propriedade. Análises desses casos levam à utilização de técnicas de programação matemática para a otimização das atividades, possibilitando quantificar, de forma otimizada, o uso dos recursos para satisfazer determinado objetivo, seja a maximização da receita líquida ou a minimização dos custos, sob restrições na disponibilidade dos recursos (Dudley; Howell; Musgravi, 1971; Kumar; Khepar, 1980; Frizzone; Botrel; Arce, 1994; Dantas Neto; Azevedo; Frizzone, 1997; Rodrigues et al., 2000; Gorantiwar; Smout, 2003).

Frizzone et al. (1997) desenvolveram um modelo de programação linear separável, para estudar a alocação de água de irrigação no Projeto Senador Nilo Coelho, localizado em Petrolina – PE, com o objetivo de maximizar a receita líquida. Assumiu-se que as funções de produção água-cultura disponíveis representavam adequadamente as relações água-produção. Tais funções, não lineares, foram incorporadas ao modelo de programação linear, que considera um conjunto de fatores técnicos que influenciam a rentabilidade do projeto de irrigação. As funções não lineares foram aproximadas por funções lineares por partes, possibilitando a utilização do método Simplex para a solução. Explicitaram-se restrições na disponibilidade de água, de área e de mercado. Como resultados, foram obtidos os níveis ótimos de irrigação, o plano ótimo de exploração e o custo de oportunidade dos recursos escassos.

A receita bruta do projeto foi formulada do seguinte modo:

$$Ib = \sum_{i=1}^n p_i x_i y_i(w) \quad (\text{Eq. 48})$$

em que: Ib - receita bruta obtida com n culturas numa área x, em US\$;
 p_i - preço de venda do produto da cultura i, em US\$.ha⁻¹; $y_i(w)$ - pro-

dutividade da cultura i em função da lâmina de irrigação, em $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$; x_i - área plantada e irrigada com a cultura i , em há, e n - um inteiro que define o número de culturas.

Sendo a água o único fator variável, para a cultura i o custo de produção será:

$$c_i = c_{f_i} + c_w w_i \quad (\text{Eq. 49})$$

ou, para o projeto:

$$C = \sum_{i=1}^n c_{f_i} x_i + \sum_{i=1}^n c_w w_i x_i \quad (\text{Eq. 50})$$

sendo, C os custos de produção da unidade econômica.

A função-objetivo para o projeto é formulada como:

$$\text{Maximizar } Z = \sum_{i=1}^n p_i y_i(w) x_i - \sum_{i=1}^n c_{f_i} x_i - \sum_{i=1}^n c_w x_i w_i \quad (\text{Eq. 51})$$

sendo Z a receita líquida do projeto decorrente do cultivo de n culturas com lâmina de irrigação w_i .

As restrições a que está sujeita a função-objetivo são expressas da seguinte forma:

$$\sum_{i=1}^n w_i x_i < Va \quad (\text{Eq. 52})$$

$$\sum_{i=1}^n a_{ij} x_i < A_j, \text{ para } j = 1, 2, \dots, J \quad (\text{Eq. 53})$$

$$x_i > 0 \quad (\text{Eq. 54})$$

em que: Va - volume anual de água disponível, em $\text{mm}\cdot\text{ha}$; a_{ij} - quantidade do insumo j , por unidade de área, necessária à i -ésima cultura e A_j - disponibilidade máxima do insumo j .

O modelo formulado constitui um problema de programação não-linear, uma vez que a função-objetivo contém uma função não linear $[y_i(w)]$. Entretanto, esta função pode ser linearizada através da técnica de linearização por partes e o modelo, tratado como um problema de progra-

mação linear separável (McMillan Jr., 1970).

A seguir, desenvolve-se o modelo de programação linear separável, aproximando-se as funções de produção água-cultura, não-lineares, por funções lineares por partes, possibilitando a utilização do método simplex para a solução. Na Figura 8, apresenta-se uma função de produção água-cultura genérica, linearizada por partes. Tal função foi dividida em k segmentos lineares, sendo k um número inteiro ($k = 1, 2, \dots, s$).

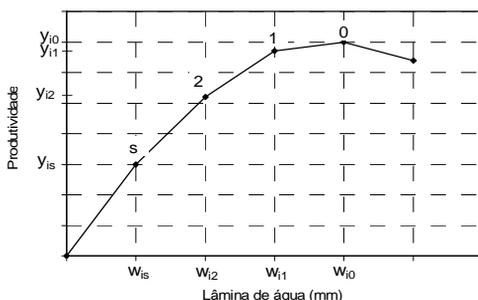


Figura 8. Representação esquemática de uma função de resposta linearizada por partes

Observa-se, na Figura 8, que uma redução na lâmina de irrigação da cultura i de w_{i0} para w_{i1} (w_{i1}) implica uma redução da produtividade de y_{i0} para y_{i1} (Dy_{i1}); uma redução de w_{i1} para w_{i2} (Dw_{i2}) resulta em y_{i1} para y_{i2} (Dy_{i2}) e assim sucessivamente. Generalizando, uma redução na lâmina de irrigação de $w_{i\ k-1}$ para w_{ik} (Dw_{ik}) resulta uma redução na produtividade de $y_{i\ k-1}$ para y_{ik} (Dy_{ik}).

Na função de resposta (Figura 8), são identificados dois pontos de referência:

- (a) y_{i0} , w_{i0} - representa a produtividade máxima e a correspondente lâmina de irrigação;
- (b) y_{is} , w_{is} - representa a produtividade mínima e a correspondente lâmina de irrigação.

A região entre y_{i0} e y_{is} é a região econômica de produção. Ela inicia

onde o produto físico médio é máximo e termina onde o produto físico marginal é zero. A lâmina de irrigação deve ser selecionada em algum ponto entre s e zero, onde a produtividade marginal da água se iguala a seu preço.

O modelo representado pelas equações (51) a (54) pode ser modificado de forma a considerar as funções de respostas lineares por partes, para n culturas. Ao se considerar que as culturas são irrigadas com lâmina para a máxima produtividade (w_{i0}), para uma área x , obtém-se a seguinte função de receita bruta:

$$Ib_0 = \sum_{i=1}^n x_{i0} y_{i0} p_i \quad (\text{Eq. 55})$$

em que, Ib_0 é a receita bruta obtida com n culturas irrigadas com lâmina w_0 , em \$.

A redução da lâmina de irrigação de w_{i0} para w_{i1} (Dw_{i1}) proporciona uma redução da receita bruta da cultura i de Ib_{i0} para Ib_{i1} (DIb_{i1}). Da mesma forma, uma redução da lâmina de w_{i1} para w_{i2} (Dw_{i2}) resulta uma redução da receita bruta de Ib_{i1} para Ib_{i2} (DIb_{i2}), e assim sucessivamente. Para uma cultura i , tem-se que a redução total da receita bruta, até um ponto k , será:

$$\Delta Ib_k = \sum_{i=1}^n \Delta Ib_{ik} \quad (\text{Eq. 56})$$

Considerando-se n culturas e cada uma proporcionando DIb_{ik} , pode-se escrever:

$$\Delta Ib = \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^s \Delta Ib_{ik} \quad (\text{Eq. 57})$$

Assumindo-se que não há variação da área total disponível para cultivo irrigado quando se varia a lâmina de irrigação, e que apenas a produtividade da cultura pode variar, para n culturas, tem-se:

$$\Delta Ib = \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^s x_{ik} \Delta y_{ik} p_i \quad (\text{Eq. 58})$$

A receita bruta da unidade econômica, decorrente de n culturas, utilizando-se uma lâmina de irrigação w_{ik} inferior a w_{i0} , pode ser expressa por:

$$Ib_k = \sum_{i=1}^n x_{i0} y_{i0} P_i - \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^s x_{ik} \Delta y_{ik} P_i \quad (\text{Eq. 59})$$

O custo de produção da cultura i, para uma lâmina de irrigação w_{i0} e área x_{i0} , será:

$$c_{i0} = c_{fi} x_{i0} + c_w x_{i0} w_{i0} \quad (\text{Eq. 60})$$

Por conseguinte, para n culturas, tem-se:

$$C_0 = \sum_{i=1}^n c_{fi} x_{i0} + \sum_{i=0}^n c_w w_{i0} x_{i0} \quad (\text{Eq. 61})$$

A redução na lâmina de irrigação de w_{i0} para w_{i1} (Dw_{i1}) resulta na redução dos custos de c_{i0} para c_{i1} (c_{i1}), e assim por diante, decorrendo a redução nos custos apenas do custo da água. Assim, por unidade de área, têm-se:

$$\Delta c_{i1} = c_w (w_{i0} - w_{i1}) = c_w \Delta w_{i1} \quad (\text{Eq. 62})$$

$$\Delta c_{i2} = c_w (w_{i1} - w_{i2}) = c_w \Delta w_{i2} \quad (\text{Eq. 63})$$

⋮

$$\Delta c_{ik} = c_w (w_{ik-1} - w_{ik}) = c_w \Delta w_{ik} \quad (\text{Eq. 64})$$

Para n culturas e k segmentos na função de produção, o custo de produção, ao se utilizar a lâmina de irrigação w_k , pode ser formulado como:

$$C = \sum_{i=1}^n c_{fi} x_{i0} + \sum_{i=1}^n c_w x_{i0} w_{i0} - \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^s c_w \Delta w_{ik} x_{ik} \quad (\text{Eq. 65})$$

A receita líquida obtida com n culturas na área x e lâmina de água w_k , será:

$$Z = \left(\sum_{i=1}^n x_{i0} y_{i0} - \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^s x_{ik} \Delta y_{ik} \right) P_i - \left(\sum_{i=1}^n c_{fi} x_{i0} + \sum_{i=1}^n c_w x_{i0} w_{i0} - \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^s c_w \Delta w_{ik} x_{ik} \right) \quad (\text{Eq. 66})$$

O objetivo da unidade econômica é maximizar a função de receita líquida (equação 66), sob as seguintes restrições gerais:

(a) o volume de água consumido nas irrigações no nível k não deve exceder o volume máximo disponível:

$$\sum_{i=1}^n x_{i0} w_{i0} - \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^s x_{ik} \Delta w_{ik} \leq Va \quad (\text{Eq. 67})$$

$$\sum_{i=1}^n x_{i0} w_{i0}^* - \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^s x_{ik} \Delta w_{ik}^* \leq Vm \quad (\text{Eq. 68})$$

em que: w_{ik} - lâmina de água aplicada durante o ciclo da cultura i, com nível de irrigação k, em mm; w_{ik}^* - lâmina mensal de água aplicada à cultura i, com nível de irrigação k, em mm; w_{i0}^* - lâmina mensal de água aplicada a cultura i, para máxima produtividade, em mm; Va - volume anual de água disponível, em mm ha⁻¹ e Vm - volume mensal de água disponível, em mm ha⁻¹.

(b) restrição de área cultivada para a cultura i (G_i):

$$x_{i0} \leq ou \geq G_i \quad (\text{Eq. 69})$$

(c) restrição de área total cultivada em cada mês:

$$\sum_{i=1}^n x_{i0} \leq Xm, \text{ para } m = 1, 2, \dots, 12 \quad (\text{Eq. 70})$$

sendo Xm a área total disponível (ha) para cultivo no mês m.

(d) não há acréscimo de área irrigada com o uso da lâmina w_{ik} :

$$x_{ik} - x_{i0} \leq 0, \text{ para } i = 1, 2, \dots, n \quad (\text{Eq. 71})$$

(e) não-negatividade:

$$x_{i0} \geq 0 \quad e \quad x_{ik} \geq 0 \quad (\text{Eq. 72})$$

Frizzone et al (1997) aplicaram esse modelo ao Projeto de irrigação Senador Nilo Coelho, Petrolina (PE), e a solução encontrada representou o padrão ótimo de cultivo. Verificou-se que as lâminas totais ótimas de irrigação foram sempre inferiores às lâminas para a

máxima produtividade. Para este estudo, considerou-se um volume anual de água disponível de 66.644.500 m³, que corresponde à capacidade máxima de oferta de água pelo projeto aos seus usuários. A disponibilidade anual de água constituiu uma restrição efetiva ao sistema de produção, apresentando um preço sombra (custo de oportunidade de se utilizar um determinado volume de água) de US\$ 281,60 por 1000 m³.

Esse valor corresponde à redução esperada na função-objetivo (receita líquida do projeto) caso tal volume se torne mais restritivo em 1000 m³. Da mesma forma, o valor da receita líquida poderá aumentar em US\$281,60 para cada 1000 m³ adicionais de água. O intervalo de disponibilidade de água para o qual esse preço sombra é válido foi 48.579.700 m³ a 82.819.700 m³. Nesse intervalo, as atividades não são alteradas; entretanto podem se modificar os valores das áreas cultivadas.

O preço sombra poderá representar o máximo valor que o usuário estará disposto a pagar, para ter disponível uma unidade adicional de água. Isso porque, em geral, um usuário pagará, no máximo, um valor igual à receita líquida gerada por uma unidade adicional do recurso.

5. UMA VISÃO GERAL DA OTIMIZAÇÃO

Os benefícios da irrigação ótima podem ser maiores para a sociedade como um todo do que para o irrigante individualmente. A sociedade pode estar preocupada com os objetivos mais amplos, assim como com a maximização da renda nacional, com a segurança alimentar ou com a minimização do uso dos recursos escassos ou dos impactos no meio ambiente. O fator mais limitante pode não ser o volume de água disponível, mas a qualidade química, física ou biológica da água que recebe carga de efluentes.

5.1. Segurança Alimentar

O manejo convencional da água para irrigação é definido para

maximizar a produção de alimentos por unidade de área. A maximização da produção total de alimentos pode ser uma preocupação mais importante e, considerando a disponibilidade de água limitada, pode-se representá-la pela seguinte função:

$$\max Y_{total} = y(w) x \quad (\text{Eq. 73})$$

sendo Y_{total} (kg) a produção total de alimentos, a partir de uma determinada quantidade de água, e x representa a área total irrigada, determinada pela disponibilidade total de água e pela lâmina de irrigação. Derivando a equação (73) em relação a w , igualando a zero, e rearranjando os termos, encontra-se a equação de definição da máxima produção total de alimentos:

$$\frac{\partial y(w)}{\partial w} = -\frac{1}{x} y(w) \frac{\partial x}{\partial w} \quad (\text{Eq. 74})$$

sendo:

$$x = \frac{V}{w} \quad (\text{Eq. 75})$$

$$\frac{\partial x}{\partial w} = -\frac{V}{w^2} \quad (\text{Eq. 76})$$

O inverso da área ($1/x$) e a produção [$y(w)$] são positivos e diferentes de zero. Se a disponibilidade de água for restrita e se a economia de água ao se reduzir a lâmina de irrigação (w), é usada para irrigar áreas adicionais, a área x aumentará à medida que w diminui. Uma vez que a derivada de x , em relação a w é negativa e diferente de zero, o lado direito da equação (76) é positivo e diferente de zero. Desse modo, o lado esquerdo dessa equação tem que ser positivo e diferente de zero. Se a derivada de $y(w)$ é positiva, o ponto de

máxima produção total tem que estar na parte ascendente da curva de produção. Em resumo, a produção total ótima de alimentos, com quantidades limitadas de água, implica irrigações com lâminas inferiores à irrigação plena.

Para ilustrar o desenvolvimento de uma estratégia de maximização da produção por unidade de água aplicada, será considerada a produção de feijão carioca (Figura 9). Nessa função, w_R é a lâmina relativa de água, definida como:

$$w_R = \frac{w + chuva}{w_m} \quad (\text{Eq. 77})$$

sendo w a lâmina de irrigação sazonal (mm) e w_m a quantidade de água para a máxima produção (600 mm). Para essa região, a produtividade máxima tangível é 2.431,6 kg ha⁻¹ com um volume de água esperado de 6.000 m³ ha⁻¹.

Das equações (73) e (75) tem-se:

$$Y_{total} = y(w) \frac{V}{w} \quad (\text{Eq. 78})$$

sendo $y(w)$ a produtividade expressa em kg ha⁻¹, V o volume de água disponível (m³) e w a quantidade de água aplicada (m³ ha⁻¹).

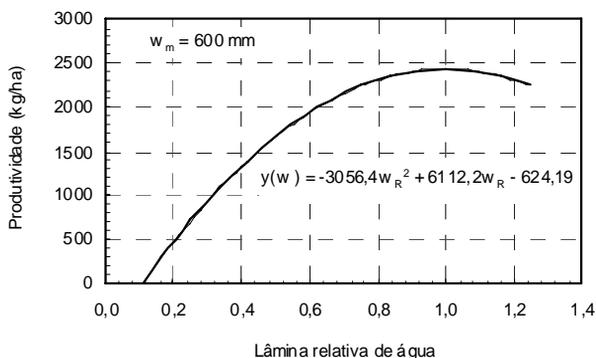


Figura 9. Função de produção água-cultura, para o feijão carioca, obtida na região de Ilha Solteira, SP, adaptada de Frizzone (1986)

Na Figura 10, a produção (kg m^{-3}) está expressa em função da lâmina de água relativa (w_R). Sob a irrigação plena ($w_R = 1$), a produção seria o máximo tangível de $2.431,6 \text{ kg ha}^{-1}$, ou $0,4053 \text{ kg m}^{-3}$. À medida que w_R é reduzida, a produção por m^3 aumenta, alcançando um máximo de $0,5583 \text{ kg m}^{-3}$, quando w_R é $0,4483$ (44,83% da irrigação plena, ou $2.690 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$). No ponto ótimo, a produção por m^3 de água aplicada representa um acréscimo de aproximadamente 37,8%, em relação à produção obtida com a irrigação plena.

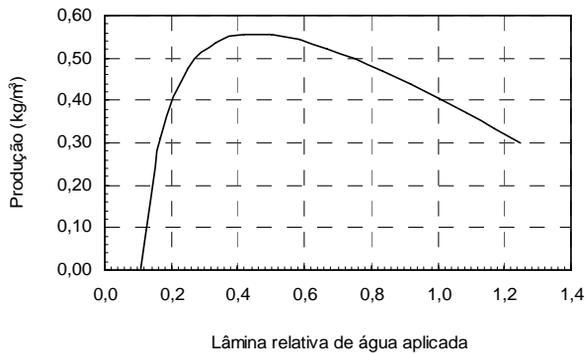


Figura 10. Produção de feijão em kg m^{-3} de água em função da lâmina relativa de água aplicada, na região de Ilha Solteira (SP).

5.2. Questões Regionais e Nacionais

Objetivos regionais e nacionais podem ampliar os problemas de otimização e as restrições para a análise. Por exemplo, o desenvolvimento e a recuperação de projetos de irrigação para aumentar a produção de alimentos, e que envolvem investimentos com fundos do Banco Mundial, estipulando-se que o empréstimo seja pago em moeda forte estrangeira: dada a alta instabilidade da moeda nacional, a moeda forte é um recurso severamente limitado. O critério essencial no planejamento da irrigação é, desse modo, maximizar a produção de alimentos por unidade de moeda forte.

Podem ser citados também os projetos de irrigação planejados para promover o assentamento de colonos, reduzindo a pressão demográfica urbana, para o qual o governo tem subsidiado novas áreas agrícolas, de modo a maximizar as chances de êxito econômico. A otimização, neste caso, envolve maximizar a área total de terras cultivadas, de modo consistente com um aceitável nível de lucratividade, enquanto se minimiza o risco aos produtores individuais, representando, portanto, um complexo conjunto de objetivos.

5.3. Incerteza e Risco

A incerteza adiciona uma nova dimensão ao problema de otimização. Devido aos efeitos imprevisíveis do clima, às doenças, aos solos e a vários outros fatores, as produtividades das culturas que serão alcançadas com uma determinada quantidade de água são incertas.

Na Figura 11, mostra-se a variabilidade nas produtividades de feijão, em experimentos conduzidos durante quatro anos (1988 a 1991), no CPAC-Embrapa (Figuerêdo et al., 1998). A função $y(w)_{\text{esp}}$ representa a função de produção esperada (produção média de todos os anos); $y(w)_{\text{pes}}$ representa a função pessimista (do ano em que ocorreu a menor produtividade) e $y(w)_{\text{otm}}$ representa a função otimista (do ano em que ocorreu a maior produtividade). Observa-se que, para uma mesma lâmina de água aplicada, por exemplo 500 mm, a produtividade variou de 2.184,2 kg ha⁻¹ a 3.121,9 kg ha⁻¹, com valor esperado de 2.765,1 kg ha⁻¹. Essa variabilidade exemplifica a incerteza da função de produção $y(w)$.

Na Tabela 3, apresentam-se estratégias de irrigação, sob condição de restrição de água, para três cenários relativos à função de produção, considerando-se $p = \text{US}\$0,5 \text{ kg}^{-1}$, $c_f = \text{US}\$420 \text{ ha}^{-1}$ e $c_w = \text{US}\$0,74 \text{ mm}^{-1} \text{ ha}^{-1}$. Observa-se que, se ocorrer a função otimista, a lâmina sazonal ótima é 374 mm; se ocorrer a função esperada, é 431 mm e, se ocorrer a condição pessimista, é 488 mm. O intervalo economicamente viável de irrigação também foi calculado para os três cená-

rios, respectivamente: (245 mm a 573 mm), (337 mm a 551 mm) e (416 mm a 572 mm). Fica, assim, ressaltada a complexidade de se tomar decisão quanto à lâmina de irrigação, pela incerteza inerente à função de produção água-cultura.

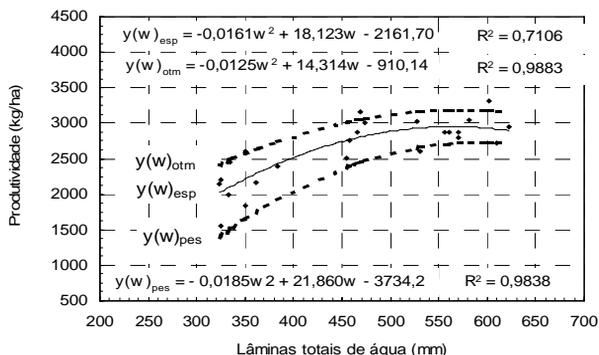


Figura 11. Produtividades do feijoeiro, em função da lâmina de água aplicada durante o ciclo, obtidas em experimentos conduzidos por quatro anos no CPAC-Embrapa (Figueiredo et al., 1998).

Tabela 3. Estratégias de irrigação do feijoeiro sob restrição de água, para os três cenários apresentados ($p=US\$0,5 \text{ kg}^{-1}$, $c_f=US\$420 \text{ ha}^{-1}$ e $c_w = US\$0,74 \text{ mm}^{-1} \text{ ha}^{-1}$)

Uso de água (mm)	Função pessimista		Função esperada		Função otimista	
	kg ha ⁻¹	US\$ m ⁻³	kg ha ⁻¹	US\$ m ⁻³	kg ha ⁻¹	US\$ m ⁻³
$w_m = 572$	2267,4	0,0508				
$w^* = 488$	2154,2	0,0607				
$w_{el} = 416$	1877,4	0,0508				
$w_m = 551$			2810,6	0,1050		
$w^* = 431$			2570,0	0,1267		
$w_{el} = 337$			2045,6	0,1050		
$w_m = 573$					3187,7	0,1310
$w^* = 374$					2694,8	0,1740
$w_{el} = 245$					1846,5	0,1310

Na Figura 12, são apresentadas as curvas da receita líquida por m³ de água aplicada, para os três cenários analisados. Ao se considerar que ocorrerá a função de produção otimista, a decisão de aplicar

uma lâmina de água de 245 mm poderá ser muito arriscada porque se ocorrer a função esperada, a receita líquida poderá ser praticamente nula e, se ocorrer o cenário pessimista, o prejuízo será inevitável. Uma decisão cuidadosa selecionaria uma lâmina de água que, embora não sendo a ótima, poderia satisfazer racionalmente aos três cenários, por exemplo, 416 mm ou um pouco maior, e ainda economizar água.

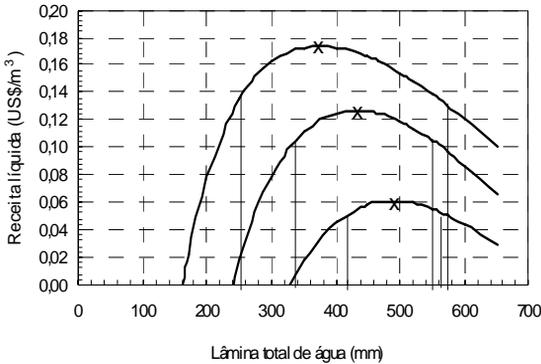


Figura 12. Receitas líquidas para as estratégias de irrigação do feijoeiro, sob restrição de água, para os cenários otimista, esperado e pessimista, considerando-se $p = \text{US}\$0,5 \text{ kg}^{-1}$, $c_f = \text{US}\$420 \text{ ha}^{-1}$ e $c_w = \text{US}\$0,74 \text{ mm}^{-1} \text{ ha}^{-1}$

A complexidade da análise pode ser ainda maior porque, além da produtividade, os custos de produção (c_p), os preços do produto (p) e os custos diretamente associados à água de irrigação (c_w) são igualmente incertos. Uma análise baseada nesses valores seria, portanto, igualmente incerta. A relação entre receita líquida e produtividade, preço do produto e custos de produção continua sendo representada pela equação (17), mas as variáveis envolvidas nessa equação deverão ser tratadas como variáveis aleatórias.

Cada variável deve ser tratada por uma apropriada distribuição de probabilidades e, por simulação, gerar valores aleatórios de $z(w)$ para cada lâmina de irrigação pertencente a um intervalo de soluções economicamente viáveis. Os valores de $z(w)$ deverão ser tratados tam-

bém por uma distribuição de probabilidades e as decisões de irrigação poderão se basear na receita líquida esperada.

Para muitos administradores, a estratégia de irrigação escolhida será aquela que maximiza a receita líquida esperada. Mas o problema de decisão pode ser complicado pelo fato de que os tomadores de decisão têm diferentes aversões ao risco. Estratégias de irrigação que oferecem o maior retorno líquido esperado podem também estar associadas a um maior risco de perda, pois, se o plano ótimo aponta simultaneamente para a redução da lâmina de irrigação e para o aumento da área irrigada, qualquer perda econômica poderá ser ampliada para a área.

Entre optar por uma estratégia de alto risco, com uma elevada expectativa de lucro, e por uma estratégia alternativa, com menor potencial de lucro, mas com menor probabilidade de perda, um produtor que apresenta aversão ao risco pode preferir esta última opção. A significância da aversão ao risco foi demonstrada por Frizzone et al. (2001), que usaram a teoria da árvore de decisão e da função utilidade para estudar a viabilidade da irrigação suplementar da cana-de-açúcar na região norte do estado de São Paulo.

Um caso mais simples de análise de decisão pode ser feita, considerando-se apenas a incerteza na função de produção água-cultura (Figura 11). Utilizaram-se a distribuição triangular e o método de simulação de Monte Carlo para gerar $z(w)$, utilizando-se as funções de produção aplicadas a 100 valores de lâminas de irrigação pertencentes ao intervalo de uso ótimo, apresentado na Tabela 3 (245 mm a 572 mm). Para cada lâmina de irrigação, foram calculadas as receitas líquidas z_1 (valor pessimista), z_2 (valor otimista) e z_m (valor médio) em US\$ m⁻³. Os valores de $z(w)$ foram distribuídos em dez classes de frequências, em que o ponto médio da classe constituía o valor representativo, e aplicou-se a distribuição triangular, obtendo-se a função de distribuição acumulada de $z(w)$. Na Tabela 4, apresenta-se uma amos-

tra da distribuição de frequências, a média $E(z)$ e a variância $Var(z)$.

Ao se observarem os valores de $E(z)$ da Tabela 4, se o critério de seleção da melhor alternativa for o valor máximo esperado, então é preciso decidir pela aplicação da lâmina de 431 mm, com $E(z) = \text{US\$ } 0,11689 \text{ m}^{-3}$. Uma decisão com $E(z)$ muito próximo seria por $w = 416$ mm, porém com um nível de risco - medido pela variância de z - um pouco maior. Embora a máxima $E(z)$ seja um critério usual para a tomada de decisão, os indivíduos têm diferentes graus de aversão ao risco. Assim, para um irrigante com disposição de assumir menor risco, a decisão seria por uma lâmina de 572 mm, com menor $E(z)$.

Na Figura 13, mostram-se $E(z)$ e o risco correspondente medido em termos de desvio padrão, para as diferentes alternativas de irrigação. Observa-se que o uso de lâminas menores que 431 mm não é interessante porque elas proporcionam menores valores de $E(z)$ associados a maiores níveis de risco. As decisões mais racionais deverão ser tomadas por lâminas de irrigação maiores ou iguais a 431 mm.

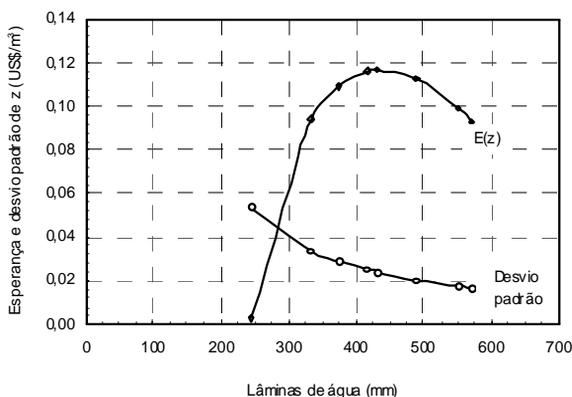


Figura 13. Valores de $E(z)$ e desvio padrão para diferentes decisões de uso de água

Tabela 4. Probabilidades de $z(w)$ para diferentes lâminas de irrigação, considerando-se $p = \text{US}\$0,5 \text{ kg}^{-1}$, $c_f = \text{US}\$420 \text{ ha}^{-1}$ e $c_w = \text{US}\$0,74 \text{ mm}^{-1} \text{ ha}^{-1}$

Lâmina (mm)	z_1 (US\$ m ⁻³)	z_m (US\$ m ⁻³)	z_2 (US\$ m ⁻³)	$z(w)$ (US\$ m ⁻³)	Probabilidade (%)	E(z) (US\$ m ⁻³)	Var(z)
374	0,03289	0,11949	0,17398	0,03994	1,629	0,10879	0,00084
				0,05405	4,888		
				0,06816	8,146		
				0,08227	11,405		
				0,09638	14,663		
				0,11049	17,921		
				0,12460	18,045		
				0,13871	12,946		
				0,15282	7,768		
				0,16693	2,589		
416	0,05070	0,1263	0,17140	0,05674	1,597	0,11613	0,00062
				0,06881	4,789		
				0,09295	7,983		
				0,09295	11,176		
				0,10502	14,369		
				0,11709	17,562		
				0,12916	18,438		
				0,14123	13,381		
				0,15330	8,029		
				0,16537	2,676		
431	0,05464	0,12671	0,16930	0,06037	1,591	0,11689	0,00056
				0,07184	4,773		
				0,08331	7,955		
				0,09477	11,137		
				0,10624	14,319		
				0,11770	17,500		
				0,12917	18,496		
				0,14064	13,461		
				0,15210	8,077		
				0,16357	2,692		
572	0,05077	0,09761	0,13121	0,05479	1,717	0,09320	0,00027
				0,06284	5,152		
				0,07088	8,587		
				0,07892	12,021		
				0,08697	15,456		
				0,09501	18,762		
				0,10306	16,758		
				0,11110	11,970		
				0,11914	7,182		
				0,12719	2,394		

Nesse caso, os irrigantes com maior aversão ao risco tenderão a utilizar lâminas de irrigação maiores. Observe que 572 mm é a lâmina de irrigação a oferecer o menor risco e a menor receita líquida por unidade de volume de água aplicada, porém. Essa lâmina corresponde à irrigação plena para as funções de produção otimista e pessimista e um excesso de água de 21 mm, caso ocorra a função de produção esperada.

6. CONCLUSÕES

É fundamental que ocorra uma mudança de paradigma no manejo da irrigação, revertendo-se o objetivo fisiológico de maximizar a produtividade para um novo objetivo econômico, que é a maximização da receita líquida proporcionada pela irrigação. Em termos simples, isso implica a otimização da irrigação. Esse novo enfoque é motivado pelo estreitamento nas margens de lucro dos agricultores, pela necessidade de minimizar os impactos ambientais oriundos da irrigação e pela competição pela utilização da água que, provavelmente, é a mais forte pressão.

A otimização da irrigação geralmente implica a redução da lâmina de água aplicada e da produção por unidade de área. Como os custos operacionais são reduzidos e a água está sendo disponibilizada para outros usos produtivos, os lucros da propriedade agrícola serão aumentados. Mesmo onde a reutilização da água é praticada, o manejo ótimo pode também beneficiar os produtores e outros usuários, devido ao reduzido custo de produção, pela economia de água e pela redução dos impactos ambientais.

Por uma perspectiva social, a irrigação ótima pode ser definida como a maximização dos benefícios totais, incluindo os benefícios não-monetários, como a proteção da qualidade da água, a segurança alimentar, a geração de empregos, a melhoria das condições sócio-econômicas das comunidades rurais e a fixação do homem no campo.

O enfoque de otimização é um desafio maior do que a irrigação

convencional praticada atualmente. No processo de planejamento da irrigação, necessita-se de incorporar funções de produção água-cultura e funções de custos detalhadas, que não são normalmente utilizadas no planejamento e no manejo convencional. A salinidade será, freqüentemente, um fator complicador na adoção da irrigação ótima, porque menor quantidade de água estará disponível para lixiviar os sais potencialmente danosos e, neste caso, poderá ocorrer um acúmulo de solutos em níveis restritivos à produção das culturas. Não sendo atendidas as necessidades de lixiviação em todos os pontos da área, a salinidade do solo aumentará onde a quantidade de água aplicada for menor que a evapotranspiração mais a demanda para lixiviação.

Por não ser a irrigação completamente uniforme, é preciso decidir-se pela aplicação de uma quantidade suficiente de água para compensar a desuniformidade e garantir a demanda de lixiviação em toda a área ou aceitar a redução na produtividade em parte da área. Avanços no manejo e na tecnologia de irrigação são necessários para enfocar a meta da demanda de lixiviação. A freqüência com que deve ser atendida a demanda de lixiviação é um ponto muito complexo e depende, além da tolerância da cultura à salinidade, da variação dessa tolerância ao longo do ciclo, da salinidade da água de irrigação, da precipitação efetiva e da drenagem do solo. De qualquer forma, a otimização da irrigação é um desafio entre cujos problemas está a salinidade.

No caso mais geral da otimização, os analistas terão que lidar com múltiplos objetivos e uma ampla gama de restrições e de estratégias alternativas, necessitando considerar a incerteza e a possibilidade de um maior risco financeiro. Essas análises são relativamente complexas e demandam modelos físicos sofisticados e ferramentas analíticas do domínio da pesquisa operacional.

Há mais de três décadas, já se desenvolvem modelos teóricos para otimizar a irrigação, mas muito pouco se tem pensado sobre a

aplicação da otimização em nível operacional. Atualmente isso ainda é verdade, pois os princípios de otimização não estão sendo sistematicamente aplicados em condições de campo. Quando a água é limitante, os produtores têm desenvolvido, freqüentemente, estratégias de irrigação intuitivas e limitadas, para maximizar os benefícios pela água, mas têm feito isso sem os benefícios do rigor econômico, da engenharia e das análises científicas.

Regras casuísticas, limitadas e imperfeitas, têm sido adotadas por alguns profissionais da agricultura para melhorar a eficiência econômica da irrigação. Essas regras são limitadas em espaço e inflexíveis para suportar as várias circunstâncias de uma propriedade agrícola, e podem conduzir a estratégias de irrigação que são subótimas. Por exemplo, Keller e Bliesner (1990) sugerem subirrigar 20%, quando a água é limitada. Essa recomendação pode ser apropriada como uma primeira aproximação, mas não considera explicitamente os fatores econômicos e pode, desse modo, errar o nível ótimo por uma ampla margem. Uma confirmação desse fato está no trabalho de English e Raja (1996), que estimaram o nível ótimo de irrigação, em condições de água limitada, como estando entre 30% e 50% da irrigação plena para três conjuntos de circunstâncias muito diferentes (trigo em Columbia Basin, algodão na Califórnia, San Joaquin Valey, e milho no Saara Africano).

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS. Evapotranspiration and irrigation water requirements. New York, 1990. 465p. (Manual and Reports on Engineering Practice, 70).

ANDRADE JÚNIOR, A.S.; FRIZZONE, J.A.; BASTOS, E.A.; CARDOSO, M.J.; RODRIGUES, B.H.N. Estratégias ótimas de irrigação para a cultura da melancia. Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília, v.36, n.2, p.301-305, 2001.

BERNARDO, S. Manual de irrigação. 6.ed. Viçosa: UFV, Imprensa Universitária, 1995. 657p.

BURTON, M.A.; KIVUMBI, D.; EL-ASKARI, K. Opportunities and constraints to improving irrigation water management: Foci for research. *Agricultural Water Management*, Amsterdam, v.40, n.1, p.37-44, 1999.

CALHEIROS, C.B.M.; QUEIROZ, J.E.; FRIZZONE, J.A; PESSOA, P.C.S. Estratégias ótimas de irrigação do feijoeiro: água como fator limitante da produção. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v.31, n.7, p.509-515, 1996.

CUENCA, R.H. Irrigation systems design: an engineering approach. Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1989. 551p.

DANTAS NETO, J.; AZEVEDO, C.A.V.; FRIZZONE, J.A. Uso da programação linear para estimar o padrão de cultura do perímetro irrigado Nilo Coelho. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, v.1, n.1, p.9-12, 1997.

DOORENBOS, J.; KASSAN, A.H. Yield response to water. Rome: FAO, 1979. 193p. (Irrigation and Drainage Paper, 33).

DOORENBOS, J.; PRUITT, W.O. Guidelines for predicting crop water requirements. Rome: FAO, 1977. 179p. (Irrigation and Drainage Paper, 24).

DUDLEY, N.J.; HOWELL, D.T; MUSGRAVE, W.J. Optimal intraseasonal irrigation water allocation. *Water Resource Research*, Washington, v.7, n.5, p.1051-1063, 1971.

ENGLISH, M.J. Deficit irrigation. I: Analytical framework. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, New York, v.116, n.3, p.399-412, 1990.

ENGLISH, M.J.; NAKAMURA, B.C. Effects of deficit irrigation and irrigation frequency on wheat yields. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, New York, v.115, n.2, p.172-184, 1989.

ENGLISH, M.J.; NUSS, G.S. Designing for deficit irrigation. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, New York, v.108, n.2, p.91-106, 1982.

ENGLISH, M.J.; SOLOMON, K.H.; HOFFMAN, G.J. A paradigm shift in irrigation management. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, New York, v.128, n.5, p.267-277, 2002.

ENGLISH, M.J.; RAJA, S.N. Perspectives on deficit irrigation. *Agricultural Water Management*, Amsterdam, v.32, p.1-14, 1996.

FIGUERÊDO, S.F.; FRIZZONE, J.A.; POZZEBON, E.J.; AZEVEDO, J.A.; GUERRA, A.F. Estabelecimento do momento de irrigação com base na tensão de água no solo para a cultura do feijoeiro. *Engenharia Rural*, v.9, n.2, p.35-49, 1998.

FRIZZONE, J.A. Funções de resposta do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L) ao uso de nitrogênio e lâmina de irrigação. 1986. 133p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1986.

FRIZZONE, J.A. Aspectos econômicos da irrigação do feijão. *Preços agrícolas*, Piracicaba, n.105, p.6-7, 1995.

FRIZZONE, J.A. Função de produção. In: Faria, M.A.; Silva, E.L.; Vilella, L.A.A.; Silva, A.M. (Ed.). *Manejo da irrigação*. Lavras: UFLA, Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola, 1998. p.86-116.

FRIZZONE, J.A.; Botrel, T.A.; Arce, R.A.B. Alocação de água e combinação de atividades pela programação linear em um projeto hidroagrícola no município de Guairá (SP). *Scientia Agricola*, Piracicaba, v.51, n.3, p.524-532, 1994.

FRIZZONE, J.A.; Coelho, R.D.; Dourado Neto, D.; Soliani, R. Linear programming model to optimize the water resource use in irrigation projects: an application to the Senador Nilo Coelho Project. *Scientia Agricola*, Piracicaba, v.54, p.136-148, 1997.

FRIZZONE, J.A.; Matioli, C.S.; Rezende, R.; Gonçalves, A.C.A. Viabilidade econômica da irrigação suplementar da cana-de-açúcar,

Saccharum spp., para a região Norte do Estado de São Paulo. Acta Scientiarum, Maringá, v.23, n.5, p.1131-1137, 2001.

FRIZZONE, J.A.; Teodoro, R.E.F.; Pereira, A.S.; Botrel, T.A. Lâminas de água e doses de nitrogênio na produção de forragem de aveia (*Avena sativa* L.). Scientia Agricola, Piracicaba, v.52, n.3; p.578-586, 1995.

GORANTIWAR, S.D.; SMOUT, I.K. Allocation of scarce water resources using deficit irrigation in rotational systems. Journal of Irrigation and Drainage Engineering. New York, v.129, n.3, p.155-163, 2003.

HARGREAVES, G.H.; SAMANI, Z.A. Economics consideration of deficit irrigation. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, New York, v.110, n.3, p.343-358, 1984.

HART, W.E.; NORUM, D.I.; PERI, G. Optimal seasonal applications analysis. Journal of the Irrigation and Drainage Division, New York, v.106, n.3, p.221-235, 1980.

HEINEMANN, A.B.; HOOGENBOOM, G.A.; GEORGIEV, G.A.; FARIA, R.T.; FRIZZONE, J.A. Center pivot irrigation management optimization of dry beans in humid areas. Transactions of the ASAE, St, Joseph, v.43, n.6, p.1507-15-16, 2000.

HEINEMANN, A.B.; SOUSA, S.A.V; FRIZZONE, J.A. Determinação da lâmina ótima de água para a cultura do milho doce na região de Sete Lagoas, MG. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental. Campina Grande, v.5, n1, p.147-151, 2001.

JAMES, L.G. Principles of farm irrigation systems design. New York: John Wiley, 1988. 542p.

KELLER, J.; BLIESNER, R.D. Sprinkle and trickle irrigation. New York: Van Nostrand Reinhold, 1990. 651p.

KUMAR, R.; KHEPAR, S.D. Decision models for optimal cropping patterns in irrigation based on crop water production functions. Agricultural Water Management, Amsterdam, v.3, n.1, p.65-76, 1980.

MATIOLI, C.S. Irrigação suplementar de cana-de-açúcar: modelo de decisão para o estado de São Paulo. 1998, 122p. Tese (Doutorado) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba. 1998.

MARTIN, D.; BROCKLIN, J. VAN.; WILMES, G. Operating rules for deficit irrigation management. Transactions of the ASAE, St. Joseph, v.32, n.4, p.1207-1215, 1989.

McMILLAN JR., C. Mathematical programming: an introduction to the design and application of optimal decision machines. New York: John Wiley, 1970. 495p.

PAZ, V.P.S.; FRIZZONE, J.A.; BOTREL, T.A.; FOLEGATTI, M.V. Otimização do uso da água em sistemas de irrigação por aspersão. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, Campina Grande, v.6, n.3, p.404-408, 2002.

PHENE, C.J. Techniques for computerized irrigation management. Computer and Electronics in Agriculture, New York, v.3, n.3, p.189-208, 1989.

QUEIROZ, J.E.; CALHEIROS, C.B.M.; PESSOA, P.C.S.; FRIZZONE, J.A. Estratégias ótimas de irrigação do feijoeiro: terra como fator limitante da produção. Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília, v.31, n.1, p.55-61, 1996.

RODRIGUES, J.A.L.; COSTA, R.N.T.; FRIZZONE, J.A.; AGUIAR, J.V. Plano ótimo de cultivo no projeto de irrigação Morada Nova, Ceará, utilizando modelo de programação linear. **Irriga**, Botucatu, v.5, n.3, p.199-221, 2000.

SOUSA, S.A.V.; FRIZZONE, J.A.; PERES, F.C. Otimização da irrigação para diferentes déficits nas lâminas de água aplicadas às culturas. Engenharia Rural, Piracicaba, v.9, n.1, p.1-9, 1998.

STEWART, J.I; HAGAN, R.M.; PRUITT, W.O. Functions to predict optimal irrigation programs. Journal of the Irrigation and Drainage

RACIONALIZAÇÃO DO USO DA ÁGUA NA AGRICULTURA IRRIGADA

Antônio Félix Domingues; Cristianny Villela Teixeira Gisler

1. INTRODUÇÃO

O Brasil tem mais de 60 milhões de hectares plantados, produzindo, em condições normais, 130 milhões de toneladas de grãos. Nos últimos 25 anos, a produtividade dobrou, chegando, em alguns anos a 2,5t/ha, fato que se deve, em parte, ao aumento da utilização da irrigação. Estima-se que o Brasil apresente em torno de 3,7 milhões de hectares irrigados, ou seja, tem irrigação em cerca de 6% da área plantada, contra 18% observados mundialmente. A área irrigada responde por mais de 16% do volume total de produção e 35% do valor econômico total da produção, enquanto no mundo, esses números ficam em 44% e 54%, respectivamente (ANA & Cebds, 2006).

Ainda que a participação percentual do setor agrícola no consumo total de água venha caindo com o passar do tempo, prevê-se que,

por volta de 2020, o incremento da área irrigada seja de 58% (MMA, 2006).

A irrigação corresponde a 46% das vazões de captação e 69% das vazões de consumo, conforme apresentada na Tabela 1, que se segue.

Tabela 1- Vazões de captação e de consumo de água para os diversos tipos de usos

Vazões (%)	Tipos de uso				
	Humana urbana	Humana rural	Industrial	Irrigação	Animal
Captadas	26	3	18	46	7
Consumidas	11	2	7	69	11

Fonte: ANA & Cebds, 2006

No Brasil, a referência de dotação unitária média de água para irrigação é 0,39 L/s/ha, considerando operação 24 horas por dia, 365 dias por ano, que equivale à dotação de 12.300m³/ha/ano. Nesse contexto, a demanda média de água para irrigação em nosso país corresponde a pouco mais de 1.290m³/s (Telles & Domingues, 2006).

Sabe-se que significativa demanda de água por unidade de área irrigada pode acarretar conflitos entre irrigantes e da irrigação com outros setores usuários, principalmente nas bacias com baixa relação disponibilidade/demanda.

Nas regiões onde ocorrem conflitos, tem sido fundamental a atuação dos órgãos de gestão ambiental e de recursos hídricos, atuando por intermédio de estratégias de fiscalização e dos instrumentos do licenciamento ambiental e da outorga de direito de uso de recursos hídricos.

A Tabela 2 apresenta a área irrigada e as respectivas estimativas de demandas de água para o ano de 2020, por região hidrográfica do Brasil.

Na Tabela 2 são apresentadas estimativas contidas no Plano Nacional de Recursos Hídricos, no cenário denominado Água para Todos. O referido cenário é caracterizado por influência de um mundo que cresce de maneira integrada e contínua, em que o Brasil adota, gradativamente, um modelo de desenvolvimento que caminha no sen-

tido da redução da pobreza e das desigualdades sociais, graças ao forte índice de crescimento econômico e de políticas sociais consistentes e integradas. Dessa forma, as atividades econômicas expandem-se em todo o país, incluindo a agricultura irrigada.

Tabela 2- Área irrigada e as respectivas estimativas de demandas de água para o ano de 2020, por região hidrográfica do Brasil

Região Hidrográfica	Área irrigada em 2005	Potencial irrigável (1.000 hectares)	Área irrigada em 2020	Área em 2020/Potencial	Incremento (2005/2020)
				%	
Amazônica	92	9.174	300	3	226
Tocantins-Araguaia	134	6.480	500	8	273
Atlântico Nordeste	9	518	100	10	454
Ocidental Paragiba	41	155	50	65	142
Atlântico Nordeste Oriental	443	403	600	149	35
São Francisco	371	1.159	700	60	89
Atlântico Leste	124	579	300	52	142
Atlântico Sudeste	295	1.063	500	47	69
Atlântico Sul	682	2.350	800	34	17
Uruguai	566	783	700	89	24
Paraná	874	5.270	1.200	23	37
Paraguai	32	1.630	50	3	59
TOTAL	3.663	29.564	5.800	20	58

Fonte: MMA, 2006

Existem muitas razões para se implantar um sistema de irrigação em uma propriedade, com destaque para as condições climáticas, as questões agrônômicas e outras, como as de ordem econômica e gerencial.

Dentre as razões de caráter geral, podem ser citadas: produção em regiões que apresentam déficits hídricos significativos, produção na entressafra, redução no risco de quebra de produção e melhoria da qualidade do produto.

Além das razões de caráter geral, são observadas razões específicas para se irrigar algumas culturas.

A irrigação na fruticultura, por exemplo, propicia a alteração de períodos fenológicos, a uniformização de floradas, o fornecimento de fertilizantes via água de irrigação e, até mesmo, a redução de danos às plantas quando da ocorrência de geadas. Na citricultura nacional, o papel da irrigação está crescendo em importância, uma vez que porta-

enxertos resistentes à Morte Súbita dos Citros – MSC, cada vez mais utilizados, são normalmente sensíveis ao déficit hídrico (Pires, 2004).

2. MÉTODOS DE IRRIGAÇÃO E SUAS APLICAÇÕES

Alguns dos aspectos mais importantes na seleção do método de irrigação são: (1) a topografia, (2) as características físico-químicas dos solos, (3) peculiaridades das culturas, (4) aspectos do clima, (5) fonte de água (volume e vazão disponíveis, altura de bombeamento, presença de sólidos suspensos e dissolvidos e de patógenos, custo da água), (6) fatores econômicos (custos fixos, custos operacionais e de manutenção), sociais (geração de emprego, produção local de alimentos) e ambientais (erosão, degradação da qualidade da água e destruição de *habitats* naturais) e (7) fatores humanos (principalmente o nível educacional dos irrigantes, sem desconsiderar hábitos, preferências, tradições, preconceitos e modismo) (Telles & Domingues, 2006).

Na escolha do sistema de irrigação, cada caso deve ser avaliado individualmente, não existindo um método ou sistema capaz de cobrir toda gama de condições normalmente observadas em campo. Contra-indicar um método de irrigação com base apenas em sua eficiência, por exemplo, não é uma medida acertada.

Nas regiões mais secas do Nordeste brasileiro, por exemplo, os totais anuais de precipitação são insuficientes para suprir as necessidades hídricas das plantas, dificultando a implantação de uma agricultura racional sem o emprego de irrigação. Nas Regiões Sudeste e Centro-Oeste, por sua vez, as quantidades de água precipitada são normalmente suficientes para abastecer as plantas em suas exigências, todavia, a irregular distribuição dessa chuva cria períodos de estresse hídrico, o que afeta sensivelmente a produtividade agrícola.

A distribuição da irrigação no Brasil está assim distribuída: 38% na Região Sul; 29% na Região Sudeste; 21% na Região Nordeste; 9%

na Região Centro-Oeste; e 3% na Região Norte (ANA & Cebds, 2006).

Com base nos números apresentados, verifica-se que, no Brasil, uma unidade de área irrigada equivale a 3 unidades de área de sequeiro em termos de volume de produção agrícola, um pouco inferior à média mundial (3,6). No entanto, uma unidade de área irrigada no Brasil equivale a 8,4 unidades de área de sequeiro em termos de valor econômico da produção agrícola, contra 5,3 unidades verificadas mundialmente (ANA & Cebds, 2006).

A irrigação tem como seus principais métodos os por superfície, por aspersão e localizada. O método de irrigação por superfície apresenta-se mais comumente na forma de sistemas por sulcos, faixas e tabuleiros.

Atualmente, observa-se a seguinte distribuição quanto aos métodos de irrigação utilizados no País: irrigação por superfície: 50%; aspersão mecanizada: 21%; aspersão convencional: 19%; e irrigação localizada: 10% (ANA & Cebds, 2006).

O método de irrigação por inundação é, sem sombra de dúvidas, o que mais consome água, mas é utilizado em mais de 50% da área irrigada no País, com absoluta predominância no Estado do Rio Grande do Sul, que apresenta grandes extensões de terras com arroz irrigado. Embora os agricultores sulinos estejam buscando trabalhar com a utilização de menores volumes de água por unidade de área cultivada com arroz sob inundação, as requisições da cultura fazem com que a dotação unitária de água para irrigação na Região Sul ainda seja das maiores do País.

Entre 1950 e 1960, foi verificada uma inércia natural na expansão da área irrigada, uma vez que a indústria da irrigação estava iniciando suas atividades no País e parte considerável dos equipamentos ainda era importada.

Na década de 1960, principalmente a partir de sua metade, é que a oferta de equipamentos nacionais se regulariza, surgindo nos mercados até mesmo equipamentos mecanizados tracionados – os autopropelidos.

Em meados da década de 1970, já eram comercializados no Brasil equipamentos de irrigação localizada e iniciaram-se os prepara-

tivos para instalação de indústrias para fabricação de componentes de sistemas do tipo pivô central.

Em 1982, foi lançado o Programa de Financiamento para a Aquisição de Equipamentos de Irrigação (Profir). A indústria preparou-se, então, para atender ao rápido aumento da demanda por esses equipamentos. Nessa época, foram cadastradas mais de 80 empresas do ramo e havia, pelo menos, dez delas fabricantes de pivôs centrais instaladas no País. Por diversas razões, inclusive econômicas e financeiras, o Profir não pôde ser executado da forma prevista.

3. A EXPANSÃO DA IRRIGAÇÃO NO BRASIL

A agricultura expande-se, particularmente pelo Centro-Oeste (Mato Grosso do Sul, Mato Grosso, Goiás) e em parte do Nordeste (Bahia, Pernambuco, Rio Grande do Norte e Maranhão), ela se expande graças às inovações tecnológicas. Para o restante da Região Nordeste, a expansão depende da construção de grandes obras hidráulicas de iniciativa governamental e de outros arranjos institucionais de apoio à atividade. Pelo Norte (Rondônia, Tocantins e Pará), com relevância para o cultivo de alimentos como cereais e frutas. Também se expande o plantio de cana-de-açúcar para a produção de combustível, de algodão para a indústria têxtil e de flores e plantas ornamentais para a exportação. No Sul e no Sudeste, novos padrões tecnológicos são alcançados, em parte pelas pressões advindas do crescimento do mercado, que agravam as disputas pelos recursos hídricos.

De acordo com o Plano Nacional de Recursos Hídricos (MMA, 2006), para o cenário Água para Todos, a projeção para a agricultura irrigada, para o ano de 2020, tem importantes avanços tecnológicos e decrescentes perdas nos sistemas de distribuição e na aplicação da água, a mesma cresce em todo o país, a uma taxa média anual próxima a 170 mil hectares (o incremento médio anual observado no período

1996-2000 é de 135 mil hectares), sendo expressivo o incremento na maioria das regiões hidrográficas, exceto nas regiões hidrográficas do Nordeste Oriental, Paraná, Paraguai, Atlântico Sul e do Uruguai. Os avanços tecnológicos e de manejo são mais sensíveis nas regiões com maiores superfícies irrigadas, onde os métodos pressurizados ultrapassam, quanto à área irrigada, os métodos por superfície, ensejando maior controle do uso da água e, portanto, maior eficiência de uso.

4. MELHORIA DA EFICIÊNCIA DO USO DA ÁGUA

A eficiência do uso da água é um termo que embute várias acepções. Na irrigação, por exemplo, são passíveis de utilização como indicadores da eficiência no uso da água variáveis tão diferentes quanto: (1) eficiência de aplicação de água em irrigação; (2) a eficiência de irrigação global e na parcela; (3) a demanda de água média por hectare; (4) a produção vegetal; (5) a receita com a produção vegetal; (6) os empregos gerados na produção vegetal.

Os métodos de irrigação do tipo localizada, principalmente o gotejamento e a microaspersão, teoricamente são os de menor consumo unitário de água, pois levam a água para a região do solo logo acima do sistema radicular das plantas, fornecendo a água de maneira controlada.

A literatura técnica traz como referência mais usual as seguintes faixas de eficiência de aplicação dos métodos/sistemas de irrigação: inundação 40% a 60%; sulcos de infiltração 45% a 65%; faixas 60% a 75%; aspersão convencional, autopropelidos e montagens diretas 50% a 75%; pivô central e linear móvel 75% a 85%; microaspersão 80% a 90%; gotejamento 85% a 95%; e tubos perfurados 65% a 80% (Telles & Domingues, 2006).

Embora os sistemas de irrigação por superfície tenham, nas condições normais, faixas de eficiências de aplicação relativamente baixas, a utilização de dispositivos de reciclagem da água podem fazer

com que essas faixas melhorem sensivelmente.

Na Tabela 3, que tem como base dados apresentados em Itaborahy *et al.* 2004, são apresentados, entre outras informações, valores médios de eficiência econômica no uso da água para diferentes culturas exploradas em agricultura irrigada.

Tabela 3 - Produtividade física, valor unitário, consumo médio de água, receita bruta, custo de produção e receita por volume de água aplicado em irrigação, para diferentes culturas

Produto	Prod.	Valor unit.	Cons. médio	Rec. Bruta	Custo	Receita por unidade de H ₂ O
	t/ha	R\$/t	m ³ /ha	R\$/ha/ano	R\$/ha/ano	R\$/m ³
Arroz Sul	5,5	600	12.000	3.300	1.700	0,13
Arroz Nordeste	4	600	18.000	2.400	1.200	0,07
Banana	24	450	20.680	10.800	2.930	0,38
Batata	30	800	7.850	24.000	11.297	1,62
Coco Verde	27.000 un.	0,15 por fruto	12.750	4.050	3.560	0,04
Feijão	1,8	1.440	4.580	2.592	1.108	0,32
Goiaba	19,3	1.820	12.000	35.126	2.900	2,69
Manga	11,5	730	11.500	8.395	3.800	0,40
Melão	15	520	6.500	7.800	2.487	0,82
Maracujá	11,7	1.100	7.000	12.826	3.900	1,28
Tomate de Mesa	88	500	5.250	44.000	25.951	3,44
Uva	26,25	1.260	12.750	33.075	14.800	1,43

Fonte: Telles & Domingues, 2006

Logicamente, os indicadores de demanda e de consumo são importantes no tocante à gestão do uso da água, mas os indicadores ambientais, sociais e econômicos não podem ser desprezados se a avaliação pretende considerar o aspecto da sustentabilidade.

Outra questão que deve ser melhor avaliada refere-se à distinção que deve ser feita entre eficiência no uso da água em nível de parcela e eficiência em nível de bacia.

Na irrigação, por exemplo, é comum associar à irrigação, baixos níveis de eficiência, quando se considera a razão da água derivada e a água consumida pela cultura numa propriedade. Todavia, se as perdas de água em um ponto podem ser recapturadas a jusante, a eficiência do uso da água em nível de bacia deverá ser bem maior do que se imagina. Este fenômeno pode ocorrer em bacias em que se cultiva o arroz irrigado por inundação, onde a derivação de água alcança grandes volumes, mas o consumo, propriamente dito, pode não ser tão alto. Em algumas dessas bacias, a maior preocupação deveria, talvez, ser mais direcionada a aspectos de qualidade que de quantidade de água.

Ainda assim, está ocorrendo uma tendência de redução nas dotações de água para irrigação de arroz no Rio Grande do Sul, e em Santa Catarina pela adequação dos sistemas de cultivo, melhoria na sistematização dos terrenos, manejo da irrigação etc; já existindo regiões onde se reduziu o uso da água de mais de 15 mil m³/ha/ano para menos de 8 mil m³/ha/ano.

Raciocínio análogo pode ser feito com relação ao uso da água em perímetros de irrigação, onde a água que sobra na irrigação de uma parcela mais a montante pode ser usada em outra parcela a jusante.

Não seria o caso, então, de se indagar se não seria mais adequado dar mais importância a aspectos de racionalidade do uso da água, valorizando um pouco menos aspectos de eficiência, uma vez que o primeiro, além da preocupação específica com a eficiência, se

atém a aspectos mais abrangentes com vistas à sustentabilidade?

A Tabela 4 apresenta o histórico da evolução da eficiência do uso da água na produção do arroz no Estado do Rio Grande do Sul.

Tabela 4 - Eficiência do uso da água na produção do arroz no Estado do Rio Grande do Sul

Períodos	m ³ /ha	Produtividade (kg/ha)	Conversão
1960-70	17.000	3.000	5,7:1
1980-90	12.000	5.000	2,4:1
Início séc. XXI	8.000	8.000	1:1

Eliminação de desperdícios – Seja na agricultura irrigada, ou em qualquer outro uso, é possível alcançar reduções consideráveis no consumo de água simplesmente pela eliminação de desperdícios (Telles & Domingues, 2006).

É comum encontrar-se na literatura mundial valores de perdas de água na irrigação da ordem de 50%-60%, principalmente em projetos públicos de irrigação.

Os pontos de perda de água ocorrem desde a captação até a estrutura de disponibilização da água para utilização na parcela de irrigação.

Partindo dos sistemas de bombeamento, não é raro observar vazamentos nas válvulas de pé, nas gaxetas das bombas e nas válvulas de retenção. Na tubulação de adução, vedações danificadas, flanges mal apertadas, engates rápidos mal conectados ou trincas em tubos, podem possibilitar perdas consideráveis antes que a água seja utilizada na irrigação propriamente dita.

Os perímetros de irrigação apresentam grande potencial de perdas de água, pois neles é comum a utilização de grandes estruturas de canais (canais principais e de distribuição) para fornecimento de água aos irrigantes. Os canais são normalmente executados em terra ou em concreto, sendo que, de acordo com o material de construção, eles

ficam suscetíveis, em maior ou menor grau, às fontes de perdas de água em direção ao solo, como se exemplificam:

→ trincas nas paredes ou no fundo dos canais (perdas por *seepage* e percolação profunda);

→ mau manejo de comportas, causando transbordamentos ou escape no final da estrutura (perdas por *runoff* e percolação profunda);

→ roubo de água;

→ buracos de tatus, ratos etc.

Nas parcelas dos perímetros irrigados ou nas propriedades que têm áreas irrigadas, os sistemas de irrigação por superfície são responsáveis por parte importante das perdas de água dentro das parcelas de irrigação, uma vez que perdas consideráveis de água por percolação (na irrigação por sulcos e inundação) e por escoamento superficial no final dos sulcos (na irrigação por sulcos) são características desses métodos.

Por sua vez, quando se utilizam sistemas de irrigação por aspersão e localizada, são comuns vazamentos em tubos e conexões – por problema nas vedações ou por trincas em tubos de PVC ou polietileno. Especificamente na irrigação por aspersão, não raro se observa vazamento em elementos de composição dos aspersores e perdas de água pela ação do vento; no caso da irrigação localizada, não são raras perdas de água no cabeçal de controle, por meio de seus sistemas de filtragem e nas válvulas de alívio, principalmente (ANA, 2004).

Manejo dos sistemas de irrigação – De acordo com o Relatório Manejo da Irrigação, de 2003, produzido pela Fundação de Desenvolvimento Rural, organização sediada no Distrito Federal, o manejo racional da irrigação pode ser conduzido por meio do monitoramento da umidade do solo, da necessidade hídrica da planta, de parâmetros climáticos e das características técnicas e operacionais do sistema de irrigação.

O sucesso da estratégia de manejo vai depender da qualidade

dos dados coletados e da capacidade técnica do profissional que avaliará esses dados para tomar a decisão sobre a condução da irrigação.

Para se determinar quando irrigar e quanto aplicar de água na irrigação, existem muitos métodos que podem ser utilizados isoladamente ou de maneira complementar:

- estimativa da evapotranspiração usando equações empíricas;
- evaporação do tanque Classe A;
- balanço de água no solo ou no sistema solo-planta-atmosfera;
- medição da água no solo;
- medição do *status* da água na planta;
- sensoriamento remoto, dentre outros.

Modernização ou substituição de equipamentos – Em alguns casos, somente a eliminação de desperdícios e a adequação do manejo dos sistemas de irrigação não são suficientes para se obter economia considerável de água. Opta-se, então, para a modernização de partes ou, em casos extremos, de todo o sistema de fornecimento de água às plantas.

Nos sistemas de irrigação por aspersão, os aspersores tipo “canhão” mais modernos estão incorporando difusores e defletores para melhoria das características do jato, bem como apresentando dispositivo de reversão lenta.

Nos sistemas de aspersão mecanizados dos tipos pivô central e linear a melhoria de desempenho tem sido obtida pela combinação de novos modelos de difusores, adequação da altura e pressão dos emissores, utilização de pesos para estabilizar tubos de descida e difusores com ação de rotação fora da vertical, bem como da maneira como a água é aplicada.

Quanto a este último aspecto, uma opção para equipamentos que operam com tubos de descida mais compridos tem sido a utilização de um tipo de meia, no mercado denominada *sock*, no lugar do difusor, para proceder aplicação localizada.

O ajuste da altura às necessidades dos sistemas pivô central e

linear é feito com as metodologias por algumas empresas denominadas Mesa e Lesa, sendo a primeira “Aplicação com *Spray* em Média Elevação” e, a última, “Aplicação com *Spray* em Baixa Elevação”.

Outro melhoramento bastante significativo nesses sistemas ocorreu pela introdução de um emissor denominado Lepa, para “Aplicação de Precisão com Baixa Energia” (Figuras 1 e 2).

Nos sistemas de irrigação localizada, nos anos recentes, foram introduzidas no mercado diversas modificações nos emissores e materiais utilizados, cobrindo as diferentes aplicações desse tipo de sistema.

Os equipamentos de irrigação mais modernos podem também dispor de dispositivos de automatização que permitem, dentre outras utilidades, operar e controlar totalmente a aplicação da água e de fertilizantes – em alguns casos, a distância ou de acordo com reações da própria planta. A maioria deles é acompanhada por bombas injetoras de produtos químicos.

5. CERTIFICAÇÃO DO USO SUSTENTÁVEL DA ÁGUA (EXPERIÊNCIAS E TENDÊNCIAS NO BRASIL)

A Secretaria Estadual de Meio Ambiente – Sema e a Federação da Agricultura do Rio Grande do Sul – Farsul – estudaram a instituição do Prêmio de Sustentabilidade da Água na Lavoura de Arroz, com vistas à conferência de benefícios ou bônus a quem zelar pelas boas práticas de manejo hídrico.

O processo de regulamentação do uso da água já foi iniciado com a Lei Federal nº 9.433/97 e leis estaduais correlatas.

O processo de normalização é realizado no âmbito da ABNT, por meio de comitês especiais em que participam usuários, órgãos oficiais e entes neutros. No processo de informação, faz-se a comunicação e disseminação das leis, normas e resultados alcançados, fechando um círculo de aperfeiçoamento e equilíbrio entre os usuários.

A ABNT tem normas relativas à irrigação, dentre elas, destaca-

mos aquela que define termos empregados em irrigação e drenagem, e que especifica os requisitos gerais e os métodos de ensaio para microaspersores de irrigação; outra, aplicável a microaspersores a serem instalados em redes de tubulações para irrigação e para operação com água de irrigação, e aquela que prescreve método para avaliação de características operacionais de aspersores para irrigação.

A Agência Nacional de Águas bianualmente reconhece o mérito de iniciativas que se destaquem pela excelência de sua contribuição para a gestão e o uso sustentável dos recursos hídricos do Brasil por intermédio do Prêmio ANA. Em 2008, o tema é “Conservação e Uso Racional da Água”, em seis categorias de disputa: imprensa, governo, organizações não-governamentais, organismos de bacia e academia.

6. GESTÃO DA ÁGUA NA MITIGAÇÃO DE CONFLITOS

6.1 Estratégias e Instrumentos de Gestão

Instrumentos: os instrumentos da Lei das Águas que se entendem mais importantes na gestão de recursos hídricos no tocante à irrigação seriam o Plano de Bacia, a outorga e a cobrança.

Os Planos de Bacia devem apresentar avaliações sobre conflitos atuais e indicativos da ocorrência de conflitos no futuro. No entanto, alguns deles não conseguem analisar a temática sob a ótica mais adequada e chegam a resultados pouco satisfatórios.

O Plano Nacional de Recursos Hídricos foi aprovado em janeiro de 2006, por meio da Resolução nº 58 do Conselho Nacional de Recursos Hídricos.

O referido Plano define como objetivos estratégicos a melhoria da disponibilidade hídrica, em quantidade e qualidade, a redução dos conflitos pelo uso da água e a percepção da conservação da água como valor socioambiental relevante. Esses objetivos refletem, por sua vez, grande parte das discussões em nível internacional, configuradas

nos eventos relativos à Década Brasileira e Internacional da Água (2005-2015), ao estabelecimento das Metas do Milênio e à Cúpula Mundial de Johannesburgo para o Desenvolvimento Sustentável (Rio + 10), além de atender às deliberações da I e da II Conferências Nacionais do Meio Ambiente.

Para o alcance desses objetivos, o Plano estabelece um conjunto de macrodiretrizes para a utilização dos recursos hídricos, que se desdobram em programas de âmbito nacional e regionais que contemplam temas da gestão e do planejamento integrado dos recursos hídricos.

Com o Plano Nacional de Recursos Hídricos, o Brasil dá um passo importante no estabelecimento das bases para a construção de um novo modelo sustentável de desenvolvimento no que se refere aos usos da água.

Com a aprovação do Plano pelo Conselho Nacional de Recursos Hídricos, foi delineado um sistema de acompanhamento e avaliação que inclui, dentre as etapas de monitoramento, a publicação sistemática de informes periódicos voltados ao registro da evolução da implementação do Plano e do atendimento de seus objetivos estratégicos.

Os comitês de bacia são a base do Sistema de Gerenciamento de Recursos Hídricos e têm como objetivo a gestão participativa e descentralizada dos recursos hídricos, sendo constituídos por representantes dos poderes públicos, dos usuários das águas e das organizações civis com ações desenvolvidas para a recuperação e conservação do meio ambiente e dos recursos hídricos em uma determinada bacia hidrográfica.

A outorga consiste numa autorização formal de uso de recursos hídricos. Os diferentes usos da água são administrados e autorizados pelos estados, Distrito Federal ou pela União, dependendo do domínio das águas. São de domínio da União as águas de açudes, barragens ou obras construídas com recursos da União, os rios que cruzam divisas estaduais ou servem de divisas entre os Estados e os rios que cruzam as fronteiras do País ou servem de fronteira entre países. Nesses rios

ou açudes, o pedido de outorga deve ser dirigido à ANA. Nos outros casos, incluindo as águas subterrâneas, o pedido de outorga deve ser dirigido aos órgãos de recursos hídricos estaduais.

A outorga deveria, de certa forma, funcionar como uma garantia para o agricultor e os mecanismos fiscalizadores como ferramentas de conservação do direito adquirido por eles. Ou seja, a regularização seria uma segurança, uma garantia de que a quantidade de água necessária para a irrigação estará disponível ao produtor praticamente em todos os anos.

Ferramentas de Apoio: A ANA tem trabalhado para aprimorar a obtenção, a sistematização e a disseminação das informações referentes aos recursos hídricos de várias formas, dentre elas: (1) coordenando as atividades desenvolvidas no âmbito da rede hidrometeorológica nacional, em articulação com os órgãos e entidades públicas e privadas que a integram, ou que dela sejam usuárias; (2) organizando, implementando e administrando o Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos, tratando as informações nas bases de dados da ANA com vistas à divulgação; (3) realizando estudos hidrológicos para subsidiar as ações das áreas finalísticas da ANA; (4) desenvolvendo, adaptando, e utilizando ferramentas de modelagem matemática para a elaboração de estudos hidrológicos e para a análise de sistemas de recursos hídricos.

7. ATUAÇÃO DOS ÓRGÃOS DE GESTÃO E DOS COMITÊS DE BACIA

Os órgãos de gestão de recursos hídricos em nível nacional, dos Estados e do Distrito Federal, têm procurado agir prontamente na mediação de conflitos pelo uso da água, logicamente na medida de suas limitações legais, financeiras e de pessoal. Além desses órgãos, tem sido destacada a atuação dos comitês de bacia e até mesmo do Ministério Público.

Com relação aos recursos hídricos superficiais, destacando-se,

preponderantemente a irrigação, a ANA atuou de maneira importante na mitigação de conflitos como nas Bacias dos Rios Verde Grande, em Minas Gerais; Jaguaribe e Banabuiú, no Ceará; e Piranhas-Açu, na Paraíba e no Rio Grande do Norte. Quanto às águas subterrâneas, esta instituição intermediou entendimentos entre o Ceará e o Rio Grande do Norte visando à exploração racional do aquífero Jandaíra, que se encontra localizado sob terras desses dois estados.

Mitigação de conflitos na bacia dos rios Jaguaribe e Banabuiú

– **CE:** antes da construção do Açude Castanhão, os agricultores dos Vales do Jaguaribe e Banabuiú, no Ceará, dependiam da liberação de água pelos açudes Orós e Banabuiú para manterem suas terras sob irrigação.

Nos períodos mais úmidos, esses dois açudes chegaram a liberar cerca de 25m³/s de água de maneira regularizada. No entanto, uma sucessão de anos muito secos no final do século 20 e início deste século fez com que o volume de água armazenado nos açudes chegasse a níveis críticos, comprometendo a capacidade de atendimento pelo sistema nos anos seguintes.

De 1999 a 2000, o fornecimento de água pelos açudes Orós e Banabuiú foi propositadamente reduzido para 18m³/s, mas ainda assim os conflitos entre usuários eram iminentes. Perante esse cenário, a ANA, nos primeiros momentos de sua implementação, foi chamada a desenvolver, em parceria com a COGERH – Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos do Estado do Ceará – e a Secretaria de Recursos Hídricos do Ceará, um programa de gestão de recursos hídricos para a região que se estabelecesse de forma integrada, efetiva e participativa. Este programa, denominado “Águas do Vale”, foi desenvolvido no âmbito da ANA pela Superintendência de Conservação de Água e Solo – SAS e conseguiu mostrar que, naquela região, era possível inclusive se gerar mais renda na agricultura irrigada, mesmo que se utilizasse menor quantidade de água. Como medida mais expressiva, optou-se pela paralisação de áreas com arroz, cultura com maior

consumo de água que as demais cultivadas na região e que, por ser temporária, apresentava maior facilidade de ter seu plantio interrompido.

As principais metas e ações do programa Águas do Vale foram: limitação da liberação de água para irrigação no sistema a 10 m³/s a partir de 2001, inclusive; acompanhamento, orientação técnica e monitoramento das áreas irrigadas (5 mil produtores); paralisação indenizada da maior parte das áreas com irrigação de arroz (3.548ha) e atendimento, com a água poupada (5,7m³/s), a culturas com menor demanda unitária de água em irrigação; capacitação de 2 mil produtores; incentivo à modernização tecnológica, abrangendo equipamentos de irrigação em 1.250ha.

Os recursos para pagamento de indenização aos produtores que paralisaram o plantio de arroz – R\$ 500 por hectare – tiveram como fonte a cobrança pelo uso de água aos agricultores que tiveram suas outorgas regularizadas. O recebimento da indenização teve como pré-requisito a participação do agricultor em cursos de capacitação em agricultura irrigada.

Com essas ações, conseguiu-se reduzir o consumo de água, em alguns casos, de três litros por segundo para pouco mais de meio litro por segundo, por hectare.

Adaptando-se à nova realidade, 70% dos agricultores passaram a se dedicar à fruticultura irrigada, atividade que normalmente consome menos água que a agricultura irrigada de culturas temporárias, enquanto pequena parte dos agricultores restantes continuou com o arroz irrigado, por inadequação de suas terras para uso com as demais culturas.

Atualmente, com a operação do Açude Castanhão, a disponibilização de água para irrigação no Vale do Jaguaribe encontra-se melhor equacionada. No entanto, o grau de amadurecimento dos agricultores e a melhoria da estrutura e dos instrumentos de gestão de recursos hídricos na bacia já conferem ao vale menor suscetibilidade a conflitos pelo uso da água.

Mitigação de conflitos na bacia do Rio Piranhas-Açu – PB e RN: a bacia tem área de cerca de 45 mil km², abrangendo áreas do Estado da Paraíba (60,95%) e do Rio Grande do Norte (39,05%).

Os principais conflitos no trecho baixo do rio, onde estão localizados o Distrito de Irrigação do Baixo Açu – Diba -, a usina termelétrica Termoaçú, e áreas de fruticultura irrigada da empresa Del Monte. Junto à foz do rio ocorreu rápida expansão da instalação de fazendas de criação de camarões.

A ANA e os Estados da Paraíba e do Rio Grande do Norte firmaram um convênio de integração visando ao estabelecimento de marco regulatório que pactua a gestão de recursos hídricos na bacia e cria o ambiente adequado para implantação do comitê de bacia.

Esse marco foi estabelecido em resolução da ANA de nº 687, de 3 de dezembro de 2004, que “dispõe sobre o Marco Regulatório para a gestão do Sistema Coremas-Açu e estabelece parâmetros e condições para a emissão de outorga preventiva e de direito de uso de recursos hídricos e declaração de uso insignificante”.

Para se ter idéia da importância desse fato, o pacto teve representatividade suficiente para estabelecer, por exemplo, que, com a regularização dos usos, parte significativa da água atualmente utilizada na carcinicultura não ficará à disposição da atividade, uma vez que havia forte desequilíbrio entre a disponibilidade total e a demanda de água para criação de camarões.

Iniciativa para o gerenciamento compartilhado dos aquíferos Jandaíra e Açu, entre os Estados do Rio Grande do Norte e do Ceará: A região da Chapada do Apodi, entre os rios Apodi no Estado do Rio Grande do Norte e Jaguaribe no Estado do Ceará, vem se destacando na produção de frutas e hortaliças irrigadas, produzindo tanto para o mercado internacional como para o interno, cuja fonte de água é a subterrânea, com captações realizadas do aquífero Açu, a partir de poços tubulares com profundidades de 600 a

1000 metros e do Aquífero Jandaíra, com profundidades em torno de 60 a 120 metros. Nessa região, no extremo oeste da Bacia Potiguar, o calcário Jandaíra, tem revelado um excepcional caráter cárstico e água de qualidade adequada à fruticultura irrigada. Essas características atraíram empresários do setor que vêm implantando em ritmo acelerado perímetros irrigados para produção de melão e outros (CASTRO, V. L. L de et al. 2008).

De acordo com os autores, o cadastramento realizado no primeiro semestre de 2003 pela Secretaria de Estado dos Recursos Hídricos, SERHID/RN, constatou a existência de 602 poços tubulares na região de Baraúna/RN. Das investigações realizadas, em ambos os estados, os resultados obtidos traduzem um aumento da descarga atualmente extraída do aquífero Jandaíra, causando rebaixamentos excessivos concentrados na região de Baraúna/RN.

Os excessivos rebaixamentos, ocorridos no ano de 2002, fez com que a SERHID/RN, através de Decreto Governamental, estabelecesse uma área crítica para a conservação dos recursos de água subterrânea, com suspensão temporária da construção de novos poços tubulares, (exceto para abastecimento humano e animal), empreendendo uma intensa campanha de conscientização junto aos usuários, para a regularização dos poços, no que se refere ao requerimento das outorgas do direito de uso e as questões relacionadas ao desperdício.

Tal situação requer um equacionamento das políticas públicas que permita encaminhar soluções que atendam aos interesses sócio-econômicos-ambientais dos dois Estados e nesse sentido os órgãos gestores dos recursos hídricos do Rio Grande do Norte e do Ceará estão formatando um arranjo legal/institucional, uma das etapas, que deverá compor o sistema de gerenciamento compartilhado das águas subterrâneas da Chapada do Apodi.

Além dessa postura, a SERHID/RN empenhou esforços no sentido de realizar o cadastro dos poços tubulares e estabelecer uma

rede de monitoramento, com 90 poços, em parceria com os usuários, tendo estes se comprometido e cumprido quanto à colocação de um cano guia para a efetivação do respectivo monitoramento.

Com uma visão preventiva, antecipando demandas e conflitos, esses Estados estão trabalhando conjuntamente com o objetivo de criar um marco regulatório para a gestão e o uso das águas daquele aquífero transfronteiriço, tendo, para isso, solicitado a colaboração da Agência Nacional de Águas.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BRASIL. Agência Nacional de Águas (ANA). **Água, fatos e tendências**. Brasília: ANA; CEBDS, 2006. 31 p.

BRASIL. Agência Nacional de Águas (ANA). **Demanda média e retorno de água de irrigação na bacia do rio São Francisco até Xingó**. Brasília: ANA. 4p. (Nota Técnica 04/2004/SAS).

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Secretaria de Recursos Hídricos. **Plano Nacional de Recursos Hídricos: águas para o futuro: cenários para 2020**. Brasília: MMA, 2006. 2 v.

CASTRO, V. L. L de et al. Iniciativa para o gerenciamento compartilhado dos aquíferos Jandaíra e Açu, entre os Estados do Rio Grande do Norte e do Ceará. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 15., 2008, Natal. **Anais...** Natal: s.n., 2008.

ITABORAHY, C.R. et al. **Agricultura irrigada e o uso racional da água**. Brasília: ANA. Brasília, 2004.

PIRES, R. C. de M. Conferência: as cadeiras produtivas nos agronegócios: o exemplo da fruticultura irrigada no Rio Grande do Sul, no Sudeste e no Nordeste do Brasil, **Revista Item**, n. 63, p. 31-32, 2004.

TELLES, D. A. Água na agricultura e pecuária. REBOUÇAS, A. da C. ; BRAGA, B.; TUNDISI, J. G. (Coord.) In: **Águas doces no Brasil: capital ecológico, uso e conservação**. 2. ed. ver. ampl. São Paulo: Escrituras. 703 p.

USO DE MODELOS NA PRÁTICA DA DETERMINAÇÃO DAS NECESSIDADES HÍDRICAS DAS CULTURAS

Luis Santos Pereira

1. INTRODUÇÃO: CONCEITOS DE BASE E EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA

A necessidade de água de uma cultura corresponde à procura evapotranspirativa dessa cultura em determinado ambiente e recebendo tratamentos culturais determinados. A evapotranspiração (ET) das culturas pode observar-se através de lisímetros, ser calculada com precisão recorrendo a observações micrometeorológicas ou ser estimada com base em variáveis agro-meteorológicas observadas, solução que é usada na prática, nomeadamente do regadio.

O método prático de cálculo da evapotranspiração das culturas (ET_c) recorre a observações climáticas padrão e utiliza um duplo passo de estima (Allen et al., 1998; 2006b): por um lado, calculando a procu-

ra climática que representa as condições ambientais através da evapotranspiração de referência (ET_o); por outro lado, considerando a especificidade da cultura através de um coeficiente cultural (K_c). Para o efeito, recorre-se a uma dupla padronização: a da cultura de referência para o cálculo da ET_o , e a da cultura em causa, de forma a considerar que a mesma é cultivada em condições favoráveis à obtenção da produção máxima, condições para as quais se define K_c .

Se tais condições óptimas não se verificam, como é corrente na prática de campo, deve recorrer-se a um terceiro passo de estimativa, quer utilizando um coeficiente de stress (K_s), quer ajustando o K_c às condições reais ($K_{c \text{ real}}$).

As necessidades de água para a rega são estimadas através do balanço hídrico do solo cultivado. Para tanto, considera-se que parte das necessidades de água são satisfeitas pela precipitação, pela reserva de água do solo e pela ascensão capilar e que as saídas de água correspondem à ET (transpiração pelas plantas e evaporação a partir do solo), à percolação para além da zona radicular e ao eventual escoamento à superfície do solo. Estas necessidades são posteriormente corrigidas pela eficiência da rega e com a fracção de lavagem, quando haja que controlar a salinidade do solo, para obtenção das necessidades brutas ou totais da cultura na prática de rega.

A evaporação da água exige grandes quantidades de energia. O processo evapotranspirativo é regulado por trocas de energia à superfície dos cobertos vegetais e é limitado pela quantidade de energia disponível. Assim, é possível estimar a taxa de evapotranspiração através do balanço dos fluxos de energia. Os termos principais do balanço de energia, correspondentes a ganhos ou perdas para as superfícies vegetais, são a radiação líquida proveniente da atmosfera (R_n), o calor sensível para o ar ou para a camada limite (H), o calor sensível a partir do (ou para o) solo (G) e a evaporação ou evapotranspiração, expressa

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

como densidade de fluxo de calor latente (IET). O balanço de energia pode ser expresso por:

$$\lambda ET = R_n - H - G \quad (\text{Eq. 1})$$

Todos os termos da equação (1) são expressos em unidades de energia por unidade de área horizontal e por unidade de tempo. Os termos do lado direito da equação do balanço de energia (Eq. 1) podem ser calculados a partir de factores climáticos e de factores relativos à vegetação (factores culturais), medidos ou estimados. Os factores climáticos englobam os fluxos de radiação de curto e longo comprimento de onda, de e para a atmosfera, os efeitos sobre H resultantes do movimento horizontal do ar (velocidade do vento) e das temperaturas do ar e da superfície e os fluxos de calor do solo. Os factores culturais englobam a resistência à difusão de vapor entre o interior e o exterior das folhas e caules e a resistência à difusão de vapor desde as superfícies da vegetação ou a superfície do solo até à atmosfera.

Com objectivos de estimação, os processos de transferência turbulenta no interior e acima dos copados, bem como os efeitos da partição da radiação líquida e da energia no interior dos copados, podem ser representados por simples resistências. Para o efeito pode utilizar-se o modelo linear “big leaf” de Monteith (Monteith, 1965; Monteith e Unsworth, 1990), no qual se consideram duas resistências, de superfície e aerodinâmica, que operam em série entre o interior das folhas e um plano de referência acima da cultura (Figura 1).

A resistência de superfície (r_s), ou resistência do copado, pode ser calculada a partir da resistência à passagem dos fluxos de vapor através das aberturas estomáticas (r_l) tomando em conta a área foliar total da cultura. Porém, engloba também a resistência aos fluxos de vapor relativos à evaporação directa da água do solo e aos fluxos não turbulentos de vapor que ocorrem no interior do copado até este atingir a superfície exterior. A resistência aerodinâmica (r_a) representa a re-

sistência à transferência turbulenta do vapor (r_{aV}) entre o coberto vegetal e um plano de referência, associada à correspondente transferência vertical de calor sensível de ou para a cultura ou vegetação (r_{aH}), como se representa na Fig. 1. Estes assuntos são abundantemente tratados na literatura (e.g. Jensen et al., 1990; Allen et al., 1998; Pereira e Allen, 1999; Pereira et al., 1999).

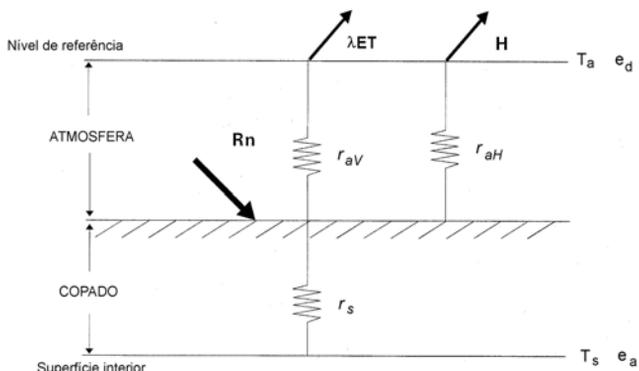


Figura 1. Representação esquemática do modelo de Penman-Monteith com identificação dos termos essenciais do balanço de energia, R_n , IET e H e das resistências aerodinâmicas para o calor e o vapor ($r_{aH} = r_{aV} = r_a$) e da resistência de superfície (r_s)

A equação do balanço de energia pode ser formulada em função de R_n e G e dos parâmetros que comandam H e IET. Assumindo que todos os fluxos são verticais (ausência de advecção), que os coeficientes de transferência relativos à difusão turbilhonar são os mesmos para IET e H e que as diferenças entre coeficientes de transferência relativos à quantidade de movimento e ao calor podem ser quantificadas através de uma simples razão, a equação de Penman-Monteith (Monteith, 1965; Monteith e Unsworth, 1990) toma a forma:

$$\lambda E = \frac{\Delta (R_n - G) + \rho C_p (e_s - e_a) / r_a}{\Delta + \gamma (1 + r_s / r_a)} \quad (\text{Eq. 2})$$

onde $(e_s - e_a)$ é o défice de pressão de vapor (VPD) do ar ao nível do plano de referência (altura das medições meteorológicas) onde a temperatura é T_a e a pressão de vapor é e_a , r é a densidade média do ar, c_p é o calor específico do ar a pressão constante, D é o declive da relação pressão de vapor à saturação - temperatura do ar, g é a constante psicrométrica, r_s é a resistência de superfície e r_a é a resistência aerodinâmica.

A eq. 2 pode ser utilizada directamente para calcular a ET de qualquer coberto vegetal desde que se conheçam os valores dos parâmetros culturais ao longo das várias fases vegetativas. Porém, tais parâmetros não se conhecem para a maioria das culturas. Conhecendo-se, porém, para a relva de climas temperados, torna-se possível assumi-la como cultura padrão e, normalizando a altura da cultura, de que dependem as resistências referidas, é possível dar à eq. 2 uma forma tal que seja apenas dependente do clima, isto é das variáveis climáticas correntemente observadas em estações agrometeorológicas (cf. Allen et al., 1994a, Pereira et al., 1999).

Nestas condições, a evapotranspiração de referência (ET_o) define-se como a taxa de evapotranspiração de uma cultura de referência hipotética, para a qual se assume uma altura de 0.12 m, uma resistência de superfície constante de 70 s m^{-1} e um albedo de 0.23, semelhante à evapotranspiração de um extenso coberto de relva (grama) verde de altura uniforme, em crescimento activo, cobrindo totalmente o solo e bem abastecido de água. Consequentemente, como descrito em Allen *et al.* (1994a e b; 1998; 2006a e b), a eq. 2 toma a forma seguinte, designada como equação FAO-PM para a evapotranspiração de referência:

$$ET_o = \frac{0.408 \Delta (R_n - G) + \gamma \frac{C_n}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + C_d u_2)} \quad (\text{Eq. 3})$$

onde:

ET_o evapotranspiração de referência [mm d^{-1}]; R_n radiação líquida à superfície da cultura [$\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$]; G densidade do fluxo de calor do solo [$\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$]; T média da temperatura do ar a 2 m de altura [$^{\circ}\text{C}$]; U_2 velocidade do vento a 2 m de altura [m s^{-1}]; $(e_s - e_a)$ déficit da pressão de vapor medido a 2 m de altura [kPa]; D declive da curva de pressão de vapor [$\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$]; g constante psicrométrica [$\text{kPa}^{\circ}\text{C}^{-1}$]; C_n coeficiente para a cultura de referência [$\text{kJ}^{-1} \text{kg K}$] resultante da conversão de segundos para dias ou horas e de coeficientes devidos à substituição das variáveis r , c_p e r_a (definidas na eq. 2); C_d coeficiente de vento para a cultura de referência [$\text{kJ}^{-1} \text{kg K}$], resultante da razão r_s/r_a (no denominador da eq. 2)

0,408 valor para $1/l$ com $l=2.45 \text{ MJ kg}^{-1}$

$C_n = 900$ para cálculos diários e $C_n = 37 (H \cdot 900/24)$ para cálculos horários. Assumindo $r_s = 70 \text{ s m}^{-1}$ tem-se $C_d = 0.34$ para cálculos diários. Para cálculos horários é preferível distinguir as horas de noite e de dia, fazendo $r_s = 50 \text{ s m}^{-1}$ durante as horas do dia e $r_s = 200 \text{ s m}^{-1}$ durante as horas de noite (Allen et al., 2006a). Nestas condições tem-se $C_d = 0.24$ para as horas de dia ($R_n > 0$) e $C_d = 0.96$ para as horas de noite ($R_n \leq 0$).

O fluxo de calor sensível para o solo (G) assume-se como nulo para cálculos diários. Para cálculos horários far-se-há $G_{hr} = 0.1 R_n$ durante as horas de dia e $G_{hr} = 0.5 R_n$ durante as horas de noite.

O cálculo dos parâmetros da eq. 3 deve ser padronizado (vd. Allen et al., 1998, 2006b, 2007b; Pereira, 2004). Em caso de falta de observações ou de má qualidade de dados da humidade do ar, da radiação solar ou da duração da insolação, ou da velocidade do vento, pode seguir-se a metodologia de estimação de variáveis em falta indicada por Allen et al. (1998; 2006b), que permite o cálculo da ET_o diária ou mensal recorrendo apenas a observações da temperatura máxima e mínima, como demonstrado por Pereira et al. (2003) e Popova et al. (2006). De referir que foi

possível estimar os valores diários de ET_o a partir de simples previsões meteorológicas com erros aceitáveis, maiores em caso de climas áridos e pequenos em climas húmidos e sub-húmidos (Cai et al., 2007).

De grande importância, porém, é a qualidade das observações e que à estação meteorológica não correspondam condições de aridez já que a eq. 3 foi estabelecida, conforme a definição acima, para condições de pleno abastecimento hídrico da vegetação acima da qual se fazem as observações. Allen et al. (1998; 2006b) propuseram metodologias simples para análise e correção de dados que é conveniente utilizar.

2. EVAPOTRANSPIRAÇÃO DAS CULTURAS

2.1. Coeficientes Culturais

A evapotranspiração cultural, ET_c (mm d^{-1}), é calculada multiplicando a evapotranspiração de referência, ET_o (mm d^{-1}), pelo coeficiente cultural, K_c (adimensional), como vulgarizado por Doorenbos e Pruitt (1975) e adoptado posteriormente (Allen et al., 1998 e 2006b; Pereira, 2004; Pereira e Alves, 2005):

$$ET_c = K_c ET_o \quad (\text{Eq. 4})$$

O coeficiente cultural, conforme bases teóricas analisadas por Pereira et al. (1999), representa a integração dos efeitos de três características que distinguem a evapotranspiração da cultura da de referência:

→ a altura da cultura (h), que afecta a rugosidade e a resistência aerodinâmica;

→ a resistência de superfície relativa ao par cultura - solo, que é afectada pela área foliar (determinando o número de estomas), pela fracção de cobertura do solo pela vegetação, pela idade e condição das folhas, e pelo teor de humidade à superfície do solo;

→ o albedo da superfície cultura-solo, que é influenciado pela

fracção de cobertura do solo, pela vegetação e pelo teor de humidade à superfície do solo e influencia a radiação líquida disponível à superfície, R_n , que é a principal fonte de energia para as trocas de calor e de massa no processo de evaporação.

Durante o período vegetativo, o valor de K_c varia à medida que a cultura cresce e se desenvolve, do mesmo modo que varia com a fracção de cobertura da superfície do solo pela vegetação, e à medida que as plantas envelhecem e atingem a maturação. Por este motivo, tem sido procurado calcular K_c em função do LAI efectivo dado que a transpiração de uma cultura varia ao longo do ciclo vegetativo de forma semelhante ao LAI. No entanto, apenas se tem atingido um sucesso relativo porque a ET da cultura varia também com a evaporação da água do solo, a qual é mais importante na fase inicial da cultura, quando a cobertura do solo é pequena, e se reduz muito em culturas que sombreiam bem o solo quando desenvolvidas.

Os valores de K_c representam a ET para condições de cultivo óptimas, de forma a que as culturas atinjam o seu potencial produtivo, *i.e.*, para culturas submetidas a uma gestão agronómica apropriada às condições de meio e a uma gestão da água que evite stress hídrico. Na prática, porém, a ET real das culturas é frequentemente inferior à ET_c potencial (eq. 4) desde que as condições culturais ou a gestão hídrica sejam menos boas, ou devido à salinidade do solo ou da água. Convém, assim, estabelecer uma diferença clara entre a ET_c , que representa condições potenciais de produção (eq. 4), e a ET relative a condições não óptimas, que designamos por “ $ET_{c \text{ real}}$ ” e se define:

$$ET_{c \text{ real}} = K_{c \text{ real}} ET_o \quad (\text{Eq. } 5)$$

onde $K_{c \text{ real}}$ é o coeficiente cultural “real” incorporando um conjunto de impactes de stress ambiental e cultural. $K_{c \text{ real}}$ é obtido a partir de K_c através de vários processos referidos por Allen et al. (1998, 2006b), nomeadamente por simples comparação entre as densidades de copado ou os LAI

Os coeficientes culturais podem ser aproximados de duas formas: os K_c simples e os K_c duais (Fig. 2). A forma dual dos K_c é a seguinte (Wright, 1982):

$$K_c = K_s K_{cb} + K_e \quad (\text{Eq. 6})$$

onde K_c é o coeficiente cultural (eq. 4), K_{cb} é o coeficiente cultural basal, K_s é o coeficiente de stress e K_e é o coeficiente de evaporação da água do solo. O K_c simples representa a soma dos valores médios de K_{cb} e K_e para cada fase vegetativa da cultura, isto é:

$$K_c = \overline{K_{cb}} + \overline{K_e} \quad (\text{Eq. 7})$$

O coeficiente de base (K_{cb}) é a razão entre a ET_c e a ET_o quando a camada superficial do solo se encontra seca, mas sendo o teor em água do solo na zona radicular adequado para manter a cultura em conforto hídrico. Deste modo, o K_{cb} representa o limite inferior (ou valor de base) do K_c quando se lhe subtraem os efeitos do humedecimento da camada superficial do solo pela rega ou pela precipitação. O coeficiente de stress ou de défice de humidade do solo (K_s) reduz o valor de K_{cb} quando o teor de humidade do solo na zona radicular é insuficiente para manter a plena transpiração das plantas. Por seu lado, o coeficiente de evaporação do solo (K_e) representa a evaporação do solo húmido à superfície, a qual se adiciona à transpiração representada no K_{cb} , para representar a ET_c .

2.2. Coeficientes culturais simples

A aplicação da eq. 6 requiere o cálculo diário do balanço hídrico na camada superficial do solo, como se apresenta em Allen et al. (1998; 2005b), e conduz a resultados mais precisos, nomeadamente quando seja necessário melhor conhecimento da componente evaporação do

solo (cf. Allen et al., 2005c). Para evitar tais cálculos diários, que exigem conhecimento das frações sombreadas pela cultura, molhada pela rega e molhada e exposta à radiação solar ao longo do ciclo vegetativo da cultura, as aplicações correntes fazem-se, para intervalos de tempo relativamente longos, recorrendo aos coeficientes culturais simples (eq. 7).

A curva dos coeficientes culturais caracteriza tipicamente o desenvolvimento de uma cultura anual, desde a sementeira ou plantação até à colheita, sendo que as mudanças na forma da curva acompanham o desenvolvimento e a senescência da cultura (Fig. 3). Naturalmente, são necessárias algumas adaptações quando se trata de culturas multianuais ou perenes.

A curva dos coeficientes culturais (Fig. 3) é construída através dos passos seguintes:

a) Dividir o ciclo vegetativo em quatro períodos de acordo com a fenologia e o desenvolvimento da cultura: (1) período inicial, (2) período de crescimento rápido, (3) período intermédio e (4) período final.

b) Identificar os três valores de K_c que correspondem a $K_{c\text{ ini}}$, $K_{c\text{ mid}}$ e $K_{c\text{ end}}$:

$K_{c\text{ ini}}$: valor de $\overline{K_{cb} + K_e}$ durante o período inicial:

→ *culturas anuais* - da sementeira ou plantação até H' 10 % de cobertura do solo

→ *culturas perenes* - desde que termina a dormência até que se estabelece o crescimento vegetativo.

$K_{c\text{ mid}}$: valor de $\overline{K_{cb} + K_e}$ durante o período intermédio:

→ *culturas anuais* - desde que se estabelece a cobertura total do solo até ao início da maturação ou senescência

→ *culturas perenes* - desde que se atinge o desenvolvimento vegetativo

K_c end: valor de $\overline{K_{cb}} + K_e$ na data de colheita ou do início da dormência.

a) Traçar os segmentos de recta relativos aos quatro períodos de desenvolvimento como indicado na Fig. 3.

As curvas dos coeficientes culturais são fáceis de definir para culturas anuais uma vez que os quatro períodos vegetativos assinalados acima (Fig. 3) são fáceis de identificar, Para culturas perenes é necessário proceder à sua definição por comparação com as fases do ciclo de culturas conhecidas tomando em atenção as indicações acima (Allen et al., 1998, 2006b).

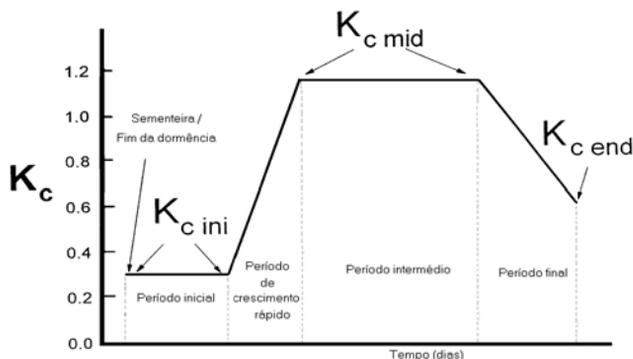


Figura. 3 Curva dos coeficientes culturais e definição dos períodos vegetativos correspondentes (adaptado de Allen et al., 1998)

O traçado das curvas dos coeficientes culturais e os consequentes resultados do cálculo da ET_c são particularmente sensíveis à definição temporal dos períodos vegetativos acima referidos – os erros resultantes são frequentemente maiores dos que os devidos à escolha dos K_c - pelo que os mesmos devem basear-se em observação das culturas. Os valores tabelados por Allen et al. (1998; 2006b) podem afastar-se muito dos reais dado que estes dependem muito das variedades, das datas de sementeira ou plantação, das práticas culturais e das condições ambientais, nomeadamente as que determinam as

taxas de crescimento e a maturação dos produtos finais. É o caso das culturas tropicais, nomeadamente fruteiras, para as quais os conhecimentos existentes são pouco divulgados e insuficientes, o que merece um projecto de cooperação internacional adequado.

Os valores de $K_{c\text{mid}}$ e $K_{c\text{end}}$ apresentados por Allen et al. (1998; 2006b) ou Pereira (2004) correspondem a condições de clima sub-húmido, caracterizadas por humidade relativa mínima diária média $RH_{\text{min}} \gg 45\%$ e velocidade média diária do vento $u_2 \gg 2 \text{ m s}^{-1}$. É absolutamente necessário corrigi-los para as condições climáticas locais, incluindo efeitos advectivos. Tomando como base considerações empíricas e a base teórica analisada por Pereira et al. (1999), tal correcção para o período intermédio faz-se através de

$$K_{c\text{mid}} = K_{c\text{mid tab}} + 0.04(u_2 - 2) - 0.004(RH_{\text{min}} - 45) \left(\frac{h}{3}\right)^{0.3} \quad (\text{Eq. 8})$$

onde o valor coeficiente cultural para o período intermédio, $K_{c\text{mid}}$, se obtém do respectivo valor tabelado, $K_{c\text{mid tab}}$, em função de u_2 , de RH_{min} e da altura média da cultura, h [m], quando o seu desenvolvimento vegetativo é máximo. Esta correcção (eq. 8) aplica-se igualmente ao coeficiente cultural final $K_{c\text{end}}$ se > 0.45 (valores menores correspondem a condições em que a cultura seca ou perdeu as folhas nessa data tornando desnecessário o ajustamento).

Os valores tabelados de $K_{c\text{mid}}$ e $K_{c\text{end}}$ apresentados por Allen et al. (1998; 2006b) e Pereira (2004) cobrem muito insuficientemente as culturas tropicais e, por isso, deverá desenvolver-se estudo adequado que recolha e padronize a informação recolhida em países tropicais e subtropicais para as culturas típicas destas regiões.

No caso de culturas perenes arbustivas e arbóreas, caso de culturas fruteiras, porque não cobrem totalmente o solo e este pode estar nu, coberto por vegetação activa ou coberto com *mulch*, é necessário adaptar os valores tabelados de $K_{c\text{mid}}$ e $K_{c\text{end}}$ apresentados por aque-

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

les autores à densidade de cobertura pela vegetação ou recorrer aos K_{cb} e K_e , como se refere adiante.

Em culturas anuais, a ET_c durante o período inicial é predominantemente devida à evaporação da água do solo na sua camada superficial. Consequentemente, $K_{c\ ini}$ deve ser estimado considerando procura evaporativa da atmosfera (representada pela ET_o), a frequência de humedecimentos da superfície do solo durante o período inicial, tanto pela rega como pela precipitação, as quantidades infiltradas e as características do solo para armazenar água nos 10 a 15 cm superficiais e para ceder água por capilaridade até esta camada evaporativa a partir da camada inferior. Para o seu cálculo pode usar-se um método gráfico ou procedimentos de cálculo numérico como referido por Allen et al. (1998, 2005b; 2006a) e Pereira (2004). Em ambos os casos, os $K_{c\ ini}$ calculados devem ser corrigidos pela fracção de solo humedecida (f_w), que varia entre 1.0 para a chuva e a aspersão e 0.3 a 0.4 para a rega gota a gota: por um lado, a precipitação P é considerada concentrada nessa fracção f_w , sendo portanto P/f_w ; por outro lado, o $K_{c\ ini}$ assim calculado deve ser multiplicado por f_w visto se referir a toda a superfície da parcela.

2.3. Coeficientes Culturais Duais

Para regas de alta-frequência e para culturas com cobertura parcial do solo, assim como para regiões com precipitação frequente, o uso da metodologia dos coeficientes culturais duais (Fig. 4) permite produzir estimativas da evapotranspiração cultural mais exactas (Allen et al., 2005b). De facto, dividir o coeficiente cultural (K_c) nas componentes de evaporação do solo (K_e) e de coeficiente cultural basal (K_{cb}) permite uma melhor percepção das fracções de água, provenientes da precipitação ou da rega, utilizadas pela cultura, assim como avaliar as vantagens de manter uma fracção do solo seca ou a utilização de “mulches” para controlar a evaporação do solo (E).

As primeiras aplicações da metodologia dos coeficientes cultu-

raís duais são relatadas por Allen (2000) para a cultura do algodão e por Liu e Pereira (2000) para as culturas de trigo e milho na China. Outra aplicação à cultura de algodão, cultura de cobertura parcial do solo, é relatada por Howell *et al.* (2004), que confirmaram a exactidão do método e a sua capacidade para comparação da ET_c entre rega deficitária, rega para a produção máxima e sem rega. Outros estudos referem bons resultados na sua utilização em pomares (*e.g.* Paço *et al.*, 2006).

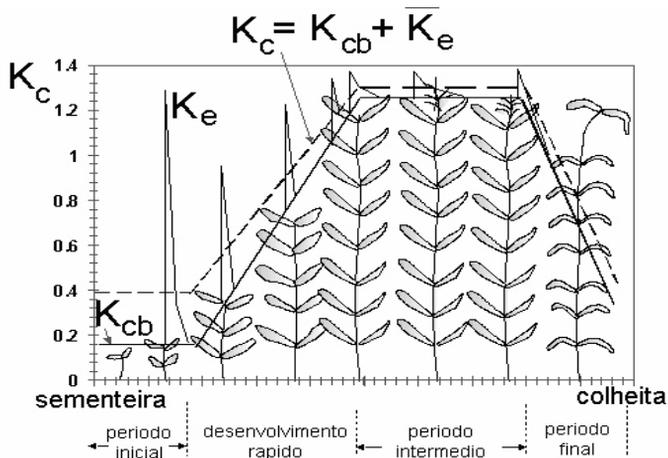


Figura 4. Coeficiente cultural de base K_{cb} relativo à transpiração da cultura e coeficiente de evaporação a partir do solo K_e para as várias fases de uma cultura

As primeiras aplicações da metodologia dos coeficientes culturais duais são relatadas por Allen (2000) para a cultura do algodão e por Liu e Pereira (2000) para as culturas de trigo e milho na China. Outra aplicação à cultura de algodão, cultura de cobertura parcial do solo, é relatada por Howell *et al.* (2004), que confirmaram a exactidão do método e a sua capacidade para comparação da ET_c entre rega deficitária, rega para a produção máxima e sem rega. Outros estudos referem bons resultados na sua utilização em pomares (*e.g.* Paço *et al.*, 2006).

Os valores de K_{cb} para numerosas culturas estão tabelados (Allen

et al., 1998, 2006b) ou podem ser calculados a partir dos K_c simples (Pereira, 2004; Pereira e Alves, 2005) definindo-se uma curva de coeficientes culturais de base em tudo semelhante à dos K_c simples referida acima já que as fases de desenvolvimento das culturas (Fig. 4) são as mesmas. Os valores de K_{cb} devem ser corrigidos para o clima conforme Eq. 8.

O valor máximo para K_e ocorre num período imediatamente a seguir a uma rega ou a chuva (Fig. 4). A evaporação a partir do solo é governada pela quantidade de energia disponível à superfície do solo, a qual depende da porção da energia total que é consumida pela planta na transpiração. O coeficiente K_e decresce depois de cada humedecimento à medida que aumenta a quantidade acumulada de água evaporada a partir da camada superficial do solo. Consequentemente, K_e pode ser calculado como:

$$K_e = K_r (K_{c_{max}} - K_{cb}) \quad (\text{Eq.9})$$

onde K_r é coeficiente de redução da evaporação [0-1], K_{cb} é coeficiente cultural de base, e $K_{c_{max}}$ é valor máximo para K_c imediatamente a seguir a uma chuva ou uma rega. Contudo, K_e é limitado pela fracção de solo humedecido e exposto à luz solar, f_{ew} [0.01 – 1], resultando por isso

$$K_e \leq f_{ew} K_{c_{max}} \quad (\text{Eq. 10})$$

$K_{c_{max}}$ verificar-se-á imediatamente a seguir à chuva ou à rega, podendo calcular-se recorrendo à função “max” (máximo entre) por

$$K_{c_{max}} = \max \left[1.2 + [0.04(U_2 - 2) - 0.004(RH_{min} - 45)] \left(\frac{h}{3} \right)^{0.5}, (K_{cb} + 0.05) \right] \quad (\text{Eq. 11})$$

Esta equação estima a evaporação que ocorre numa superfície cultivada, independentemente do grau de cobertura. No entanto, a evaporação a partir do solo é maior na fracção de solo que não esteja coberta pela cultura e que tenha sido humedecida pela chuva ou pela rega, f_{ew}

[0 - 1]. Nestas condições o fluxo evaporativo concentra-se na fracção de solo humedecido exposta à radiação. Quando se calcula um único $K_{c \max}$, então U_2 , RH_{\min} e h correspondem a valores médios referentes ao período vegetativo intermédio. Quando se realizam cálculos mais detalhados, U_2 e RH_{\min} correspondem a valores médios referentes a períodos curtos (p. ex. 5 ou 10 dias). h pode ser estimado para os mesmos intervalos de tempo; para o período inicial, h pode assumir-se artificialmente igual ao da cultura de referência ($h = 0.12 \text{ m}$).

O método usado para estimar a evaporação a partir do solo é semelhante ao usado para calcular $K_{c \text{ ini}}$, admitindo-se uma evaporação bifásica. Na primeira fase, a taxa de evaporação é máxima enquanto a evaporação acumulada, D_e [mm], não atinge REW. Quando D_e excede REW, o processo evaporativo decorre na segunda fase e a taxa de evaporação decresce proporcionalmente à quantidade de água ainda disponível para evaporar, $TEW - REW$. Deste modo, o coeficiente K_r (Eq. 9) pode calcular-se do modo seguinte (Fig. 5):

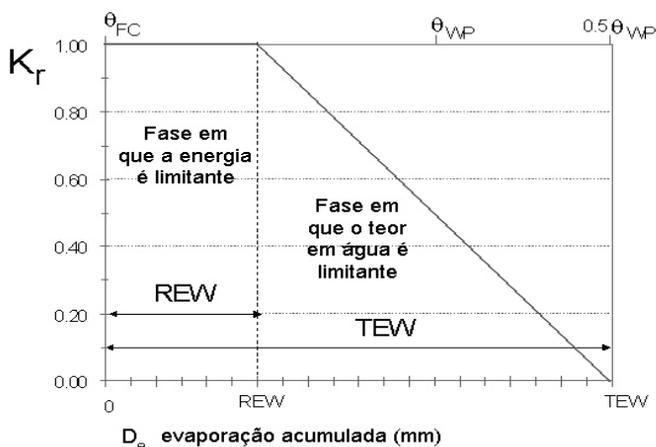


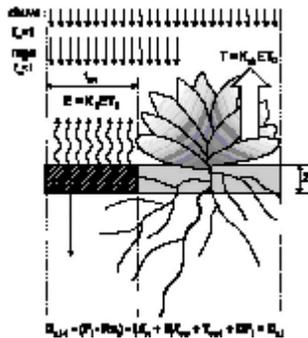
Figura 5. Teoria bifásica da evaporação para estimar a evaporação a partir de um solo com vegetação recorrendo ao coeficiente de decréscimo da evaporação (Allen et al., 2005a e b)

$$K_r = 1 \text{ para } D_e \leq \text{REW} \quad (\text{eq. 12a})$$

$$K_r = \frac{\text{TEW} - D_e}{\text{TEW} - \text{REW}} \text{ para } D_e > \text{REW} \quad (\text{Eq. 12b})$$

onde REW e TEW [mm] correspondem, respectivamente à água facilmente evaporável e à água evaporável total na camada evaporativa do solo e D_e é a evaporação acumulada [mm] originada na fracção f_{ew} de solo humedecido e exposto à radiação solar directa.

D_e calcula-se através de um balanço hídrico diário do solo relativo à camada superior do solo (Fig. 6), com uma espessura Z_e , menor em solos ligeiros (100 mm) e maior em solos pesados (e" 150 mm) referente apenas à fracção f_{ew} de solo húmido e exposto à radiação solar.



.Figura 6. Balanço hídrico da camada evaporativa de um solo cultivado.

A equação do balanço hídrico da camada evaporativa do solo é então:

$$D_{e,j} = D_{e,j-1} - (P_j - RO_j) - \frac{I_j}{f_w} + \frac{E_j}{f_{ew}} + T_{e,j} + DP_{e,j}$$

para

$$[0 \text{ d" } D_{e,j} \text{ d" TEW}] \quad (\text{Eq. 13})$$

onde o índice j identifica o dia para o qual a estimativa é feita, P_j representa a precipitação [mm], RO_j o escoamento [mm], limitado a $[0 \text{ d}'' RO_j \text{ d}'' P_j]$, I_j a lâmina média de rega que se infiltra em toda a parcela regada [mm], E_j a evaporação a partir da fracção f_{ew} de solo humedecido e exposto à radiação solar directa [mm], T_{ej} a transpiração [mm] originada na mesma fracção f_{ew} de solo humedecido e exposto $[0.01 - 1]$, DP_{ej} a percolação a partir da mesma fracção quando o teor de humidade excede a capacidade de campo, e f_w é a fracção de solo humedecido pela rega ou precipitação $[0.3 - 1]$. Os procedimentos para a estimativa destes parâmetros são dados por Allen et al. (2005b; 2006b) e Pereira (2004).

Para culturas sobre as quais não há informação sobre os coeficientes culturais mas de que se conhece a fracção de cobertura do solo pela vegetação (f_c), pode estimar-se $K_{cb \text{ mid}}$ por (Allen *et al.*, 1998, 2006b):

$$K_{cb \text{ mid}} = K_{c \text{ min}} + (K_{cb \text{ full}} - K_{c \text{ min}}) \left\{ \min \left[2f_c, f_{c \text{ ef}} \frac{1}{(1+h)} \right] \right\} \quad (\text{Eq. 14})$$

onde f_c é a fracção de solo coberto pela vegetação, $f_{c \text{ ef}}$ é a fracção efectiva de solo coberta por vegetação, obtida a partir de f_c de forma a considerar o efeito de sombra da vegetação sobre o solo descoberto, $K_{cb \text{ full}}$ é o máximo valor de K_{cb} para culturas que cobrem completamente o solo tendo a mesma altura h , e $K_{c \text{ min}}$ é o valor de K_c para solo seco e nu (0.15 a 0.20 ou, em períodos longos sem chuva ou rega, 0.0). As estimativas de f_c e de $f_{c \text{ eff}}$, tal como de h , são forçosamente realizadas ao caracterizar a vegetação cuja evapotranspiração se pretende estimar. Por seu lado, $K_{cb \text{ h}}$ pode estimar-se por

$$K_{cb \text{ full}} = \min(1.0 + 0.1h, 1.20) + [0.04(u_2 - 2) - 0.004(RH_{\text{min}} - 45)] \left(\frac{h}{3} \right)^{0.3}$$

Quando a vegetação ocorra em tufos isolados, $K_{cb\ h}$ deverá majorar-se para ter em conta efeitos de advecção local. Quando a vegetação possua alto grau de controlo estomático, $K_{cb\ h}$ deve ser corrigido por defeito.

Para o caso de culturas que cobrem o solo apenas parcialmente, é conveniente o recurso ao coeficiente de densidade da vegetação (K_d), cuja equação se baseia na fracção de solo coberto (ou ensombrado ao meio dia) pela vegetação e na altura média das plantas como proposto por Allen et al. (2007b):

$$K_d = \min \left(1, M_L f_{ceff}, f_{ceff}^{\left(\frac{1}{1+h}\right)} \right) \quad (\text{Eq. 16})$$

onde f_{ceff} é a fracção do solo efectivamente coberto ou ensombrado ao meio dia pela vegetação [0 a 1.0], h é a altura média das plantas, [m], e M_L é um multiplicador de f_{ceff} para impôr um limite superior à transpiração relativa por unidade de área [1.2 a 2.0].

Nestas condições, o K_{cb} das culturas cuja densidade das plantas e/ou a área foliar são inferiores à cobertura completa pode estimar-se pela equação

$$K_{cb} = K_{c\ min} + K_d (K_{cb\ full} - K_{c\ min}) \quad (\text{Eq. 17})$$

onde $K_{c\ min}$ é o valor mínimo de K_{cb} representando solo nu, $K_{cb\ full}$ é o K_{cb} que teria a vegetação se ocorressem condições de cobertura total (corrigido para o clima local) e K_d é o factor densidade (eq. 16). $K_{c\ min} \gg 0.0$ durante longos períodos sem chuva ou rega e $K_{c\ min} \gg 0.15$ a 0.20 em períodos em que ocorre rega ou chuva. No caso de fruteiras com solo vegetado (relva ou outra herbácea) a equação 17 toma a forma

$$K_{cb} = K_{cb\ cover} + K_d \left(\max \left[K_{cb\ full} - K_{cb\ cover}, 0 \right] \right) \quad (\text{Eq. 18})$$

onde $K_{cb\ cover}$ é o K_{cb} da cobertura do solo em ausência de folhagem. Na Tabela 1 apresentam-se para várias fruteiras os valores de $K_{cb\ full}$, $K_{c\ min}$ e $K_{cb\ cover}$ para fruteiras relativos aos períodos inicial, intermédio

e final para uso com as equações 16 a 18 (Allen et al., 2007b).

Estas aproximações pelos coeficientes culturais de base podem ser utilizadas para a normalização de valores de K_c para culturas tropicais e sub-tropicais a partir da informação disponível em estudos locais.

2.4. Coeficiente de Espaços Verdes

Um espaço verde é um elemento de paisagem heterogêneo, constituído por diferentes tipos e espécies de plantas, com necessidades hídricas diferenciadas, crescendo em ambientes diversos no que se refere a sombra e microclima, com diferentes densidades, e com a possibilidade de adoptar índices de stress diferenciados, resultando para cada espaço verde que as necessidades de rega são específicas e diferenciadas espacialmente para cada uma das suas zonas (hidrozonas). Os espaços verdes – jardins, parques, campos de golfe – são frequentemente regados e requerem conhecimento adequado das necessidades de água. Para o efeito, desenvolveram-se vários procedimentos (Costello et al., 2000, McCabe, 2005, Snyder e Eching, 2004 e 2005; Allen et al., 2007b).

O coeficiente cultural (K_c) utilizado para o cálculo das necessidades de água das culturas não representa bem as condições de uso da água dos espaços verdes pelo que foi criado o coeficiente de espaços verdes (K_L) que o modifica e adapta a estes cobertos vegetais

$$ET_L = K_L ET_o \quad (\text{Eq. 19})$$

onde ET_L é a ET de um espaço verde [mm d^{-1} , mm mês^{-1} , mm ano^{-1}], ET_o é a ET de referência (eq. 3) e K_L é o coeficiente de espaços verdes. Este é calculado pela equação seguinte:

$$K_{L \text{ act}} = K_v K_d K_{mc} K_s \quad (\text{Eq. 20})$$

onde K_v é o coeficiente de vegetação, que caracteriza a ET_L para um solo totalmente ou quase totalmente coberto por um dado tipo de vegetação, não sujeita a sombreamento nem stress hídrico, e em condições

Tabela 1. Valores de $K_{cb\ full}$, $K_{c\ min}$ e $K_{cb\ cover}$ para fruteiras relativos aos períodos inicial, intermédio e final para uso com as equações 16 a 18 (Allen et al., 2007b)

	$K_{cb\ full}^{[1]}$ -ini	$K_{cb\ full}^{[1]}$ -mid	$K_{cb\ full}^{[1]}$ -end	$K_{c\ min}^{[1]}$	$K_{cb\ cover}^{[1]}$ -ini	$K_{cb\ cover}^{[1]}$ -mid, end
Amêndoas – s/ cobertura do solo ^[2]	0.20	1.00	0.70 ^[3]	0.15	--	--
- solo coberto	0.20	1.00	0.70 ^[3]	0.15	0.75	0.80
Maçãs, cerejas, peras						
- c/ vernalização ^[4]	0.30	1.15	0.80 ^[3]	0.15	0.40	0.80
- s/ vernalização ^[4]	0.30	1.15	0.80 ^[3]	0.15	0.75	0.80
Alperces, pessegos, ameixas,						
- c/ vernalização ^[5]	0.30	1.20	0.80 ^[3]	0.15	0.40	0.80
- s/ vernalização ^[6]	0.30	1.20	0.80 ^[3]	0.15	0.70	0.80
Abacate – s/ cobertura do solo ^[7]	0.30	1.00	0.90	0.15	--	--
- solo coberto	0.30	1.00	0.90	0.15	0.75	0.80
Citrinos ^[8]	0.80	0.80	0.80	0.15	0.75	0.80
Manga – s/ cobertura do solo ^[9]	0.25	0.85	0.70	0.15	--	--
Oliveiras ^[10]	0.60	0.70	0.60	0.15	0.70	0.70
Pistaquios	0.30	1.00	0.70	0.15	0.70	0.70
Nozes ^[12]	0.40	1.10	0.65	0.15	0.75	0.80
Uvas – de mesa ^[13]	0.20	1.15	0.90	0.15	0.70	0.70
- para vinho ^[13]	0.20	0.80	0.60	0.15	0.70	0.70

^[1] Geralmente, o valor de $K_{c\ ini}$ é estimado como $0.10 + K_{cb\ ini}$ dado pela Eq. 18 e $K_{c\ mid}$ e $K_{c\ end}$ são estimados por $0.05 + K_{cb\ mid}$ ou $K_{cb\ end}$ dados pela Eq. 18.

^[2] fazendo $f_c\ eff = 0.4$, $M_L = 1.5$ and $h = 4$ m para K_d na Eq.16, obtêm-se pela Eq. 18 valores de K_{cb} similares aos de FAO-56.

^[3] os $K_{c\ end}$ representam K_c antes da queda das folhas; depois tem-se $K_{c\ end} \approx 0.20$ para solo nu e seco ou vegetação morta e $K_{c\ end} \approx 0.50$ to 0.80 para vegetação em crescimento activo.

^[4] fazendo $f_c\ eff = 0.5$, $M_L = 2$ and $h = 3$ m para K_d na Eq.16, obtêm-se pela Eq. 18 valores de K_{cb} similares aos de FAO-56

^[24] fazendo $f_c\ eff = 0.45$, $M_L = 1.5$ and $h = 3$ m para K_d na Eq.16, obtêm-se pela Eq. 18 valores de K_{cb} similares aos de FAO-56

^[25] fazendo $f_c\ eff = 0.45$, $M_L = 1.5$, $h = 3$ m para K_d na Eq.16, obtêm-se pela Eq. 18 valores de K_{cb} similares aos de FAO-56

^[26] fazendo $f_c\ eff = 0.4$, $M_L = 2$ and $h = 4$ m para K_d na Eq.16, obtêm-se pela Eq. 18 valores de K_{cb} similares aos de FAO-56.

^[27] fazendo $f_c\ eff = 0.2$, 0.5 e 0.7 , $M_L = 1.5$ and $h = 2$, 2.5 e 3 m para K_d na Eq.16, obtêm-se pela Eq. 18 valores de K_{cb} cerca de 15% superiores aos valores indicados no FAO-56 para os mesmos 3 níveis de valores de $f_c\ eff$

^[28] fazendo $f_c\ eff = 0.7$ to 0.85 , $M_L = 1.5$ and $h = 5$ m para K_d na Eq.16, obtêm-se pela Eq. 18 valores de K_{cb} similares aos de Azevedo et al. (2003).

^[29] fazendo $f_c\ eff = 0.7$, $M_L = 1.5$ and $h = 4$ m para K_d na Eq.16, obtêm-se pela Eq. 18 valores de K_{cb} similares aos de FAO-56

^[30] fazendo $f_c\ eff = 0.7$, $M_L = 1.5$ and $h = 5$ m para K_d na Eq.16, obtêm-se pela Eq. 18 valores de K_{cb} similares aos de FAO-56

^[31] fazendo $f_c\ eff = 0.45$, $M_L = 1.5$, $h = 2$ m para K_d na Eq.16, obtêm-se pela Eq. 18 valores de K_{cb} similares aos de FAO-56

^[32] fazendo $f_c\ eff = 0.5$, $M_L = 1.5$ and $h = 2$ m para K_d na Eq.16, obtêm-se pela Eq. 21 valores de K_{cb} similares aos de FAO-56

de máxima ET para a sua espécie; K_d é o coeficiente de densidade de plantação (eq. 16) e serve para adequar ET_L a diferentes densidades das plantas de um dado tipo de vegetação; K_{mc} é o coeficiente de microclima, para tomar em consideração o microclima onde as plantas se desenvolvem no que se refere às condições que favorecem ou limitam a ET da vegetação; e K_{sm} é o coeficiente de stress intencional que traduz a condução da rega, com ou sem stress hídrico. Estes coeficientes estão tabelados pelos autores acima referidos.

2.5. Teledeteção para Obtenção dos Coeficientes Culturais

O uso de imagens de satélite permite o cálculo de diversos índices de vegetação ao combinar a informação relativa à reflexão das ondas de vários comprimentos. O mais utilizado é o NDVI, que se relaciona bem com o estado hídrico das culturas e, por isso, com os Kc ou Kcb (Fig. 7). Para o efeito pode recorrer-se a vários algoritmos e há que realizar calibração cuidadosa para adequada relação entre os NDVI e os Kc ou Kcb (Allen et al., 2007a).

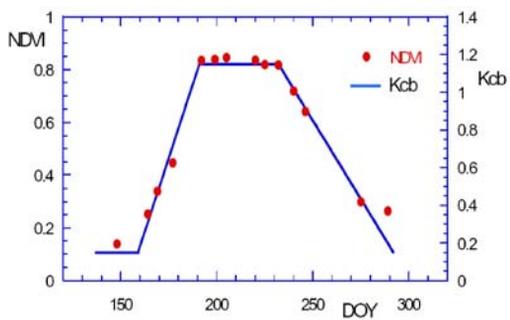


Figura 7. Relações entre a curva dos Kc e a curva dos NDVI para uma cultura de milho em Barrax (Calera et al., 2005)

São já numerosos os trabalhos neste domínio, destacando-se a sua aplicação para apoio a avisos de rega (Calera et al., 2005; Garatuza-Payan e Watts, 2005); para análise regional da ET e para o planeamento de recursos hídricos para a agricultura (Bastiaanssen e Harshadeep, 2005; Allen et al., 2007a).

O uso de informação produzida por teledeteção obriga à utilização de sistemas de informação geográfica (SIG) visto tal informação ser espacializada. Para o uso de tal informação requere-se modelação do balanço hidrológico com bases de dados georeferenciados. Entre tais dados devem mencionar-se as propriedades hidráulicas dos solos – capacidade de campo e ponto de emurchecimento – bem como as propriedades evaporativas do solo – TEW e REW -, necessárias ao cálculo da evaporação diária quando se usam K_c duais. Para tanto há que realizar o mapeamento de solos a partir de observações de campo, do uso de funções de pedo-transfêrência, da análise variogramas relativos às propriedades em estudo, e de métodos de interpolação, nomeadamente o *kriging* (Mateus et al., 2007). Um exemplo de tal mapeamento apresenta-se na Fig. os 9 visando a aplicação dos K_c duais com K_{cb} estimado por teledeteção.

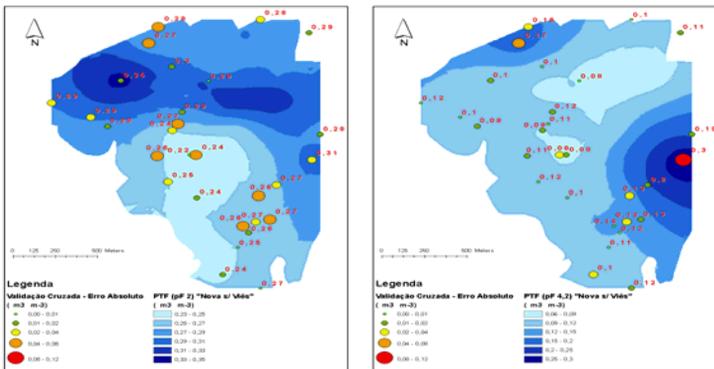


Figura 8. Mapeamento das propriedades hidráulicas dos solos para constituição de bases de dados espacializadas. À esquerda, para pF 2; à direita para pF 4.2

3. NECESSIDADES DE ÁGUA PARA REGA E BALANÇO HÍDRICO DO SOLO

O conhecimento do balanço hídrico do solo na zona explorada pelas raízes é fundamental para uma boa gestão da água em regadio.

Na condução da rega é necessário responder a três questões: quando, quanto e como regar. A resposta dependerá do grau de conhecimento dos processos ligados às transferências hídricas na zona de enraizamento da cultura regada, entre as plantas, o solo e a atmosfera.

As manifestações fisiológicas das plantas devidas à carência hídrica deverão servir como indicadores padrão para determinar quando regar. Estes indicadores podem ter carácter empírico, como cor, viçosidade, turgidez, enrolamento das folhas, ou constituir métodos científicos, como os relativos ao potencial da água nas folhas, à temperatura do copado, ou a variação dos diâmetros de caules e ramos. Por outro lado, poderão servir de padrão para a calibração prática de métodos baseados na medição de processos que ocorrem no meio onde a cultura se desenvolve, - a atmosfera e o solo, caso da medição do fluxo de seiva para estimar a taxa de transpiração da cultura, a utilização de medições de variáveis meteorológicas para estimar a ET cultural (que se analisou acima), a observação da taxa de variação do teor de água no solo por métodos como o gravimétrico, o da sonda de neutrões ou o do TDR, ou do potencial da água no solo com tensiómetros. Em todos os casos, as variáveis observadas permitem otimizar a decisão relativa à oportunidade da rega desde que os métodos estejam calibrados ou validados para a cultura e o ambiente em que esta se desenvolve.

Contudo, estes ou outros métodos não se podem dissociar dos processos de transferência hídrica no solo, pois este constitui o meio onde se efectua o armazenamento e transporte de água até às raízes das plantas. No entanto, o papel do solo é menos importante no caso de rega com pequenas dotações e de alta frequência, já que a dotação tende a ser igual ao consumo (devendo contudo prevenir-se os riscos de salinização da zona de enraizamento). Porém, a dotação de rega não deverá depender apenas do intervalo entre regas ou da extracção da água pelas plantas e evaporação, mas também do teor armazenado no solo e da possibilidade de ocorrerem contribuições a partir da toalha

freática através da ascensão capilar. Por outro lado, pode ocorrer percolação para além da zona radicular se as dotações forem excessivas, com arrastamento de fertilizantes, como pode ter que se aplicar dotações majoradas de uma fracção de lavagem destinada ao controlo da salinidade através da lavagem controlada dos sais da solução do solo. A dotação a aplicar depende porém do método de rega utilizado (Pereira, 1999; Pereira et al., 2002).

A determinação do balanço hídrico do solo na zona de enraizamento, com a respectiva quantificação dos termos que o constituem e a caracterização dos padrões de ocorrência dos processos de transferência hídrica (padrões de extracção radical e de escoamento de água no solo) é uma necessidade determinante para a gestão da rega e para o seu melhoramento e optimização (*vd.* Cameira et al., 2003, 2005)

A equação geral do balanço hídrico na zona de enraizamento de espessura Dz (m) e para um intervalo de tempo Dt (dias)

$$\Delta S = (P + I_n + GW) - (Qr + DP + ET_c) \quad (\text{Eq. } 21)$$

onde DS é a variação do armazenamento de água no solo, P é a precipitação, I_n é a dotação de rega, GW é o fluxo acumulado de ascensão capilar, Qr é o escoamento superficial, DP é o fluxo acumulado de percolação e ET_c é a evapotranspiração da cultura, sendo todos os termos expressos em mm e relativos ao período Dt . A Eq. 21 pode resolver-se em relação a qualquer uma das variáveis, permitindo calcular as necessidades de rega I_n . Qr geralmente despreza-se, P observa-se, a ET_c calcula-se como se referiu atrás, enquanto GW e DP podem estimar-se por vários métodos (Liu et al., 2006). DS pode observar-se ou simular-se em conjunto com I_n , como acontece nos modelos de balanço hídrico (Pereira et al., 1992; 1995; Pereira, 2004).

Para a realização do balanço hídrico, porém, é mais adequado recorrer a limiares relativos aos teores de humidade do solo. Adaptando

o conceito de fracção da água do solo extraível sem afectar a produção (p) pode calcular se a água facilmente disponível (RAW):

$$RAW = p TAW = p 1000 (\theta_{FC} - \theta_{WP}) Z_r \quad (\text{Eq. 22})$$

onde RAW é a água do solo facilmente disponível e TAW é a água disponível total, ambos expressos em mm e referindo-se à profundidade de Z_r da zona explorada pelas raízes [m], p é a fracção da água do solo extraível sem afectar a produção, i.e., a fracção de TAW que pode ser extraída da zona radicular sem que ocorra stress hídrico, enquanto q_{FC} e q_{WP} representam os teores de água do solo à capacidade de campo e no coeficiente de emurchecimento [$m^3 m^{-3}$]. Os valores indicativos da fracção p e da profundidade explorada pelas raízes Z_r para um grande número de culturas são dados por Allen et al. (1998; 2006b) e Pereira (2004) e devem ajustar-se ao clima, nomeadamente em função de ET.

O balanço hídrico do solo visando simular o seu teor de humidade para cada dia i pode escrever-se

$$\theta_i = \theta_{i-1} + \frac{(P_i - Q_{ri}) + I_{ni} - ET_{ci} - DP_i + GW_i}{1000z_{ri}} \quad (\text{Eq. 23})$$

onde q_i e q_{i-1} são os teor de água do solo na zona radicular [$m^3 m^{-3}$] nos dias i e i-1. Esta equação pode resolver-se em ordem a I_n para o dia em que q_i atinge o limiar de rega pretendido. Não se regando com défice, será o correspondente à fracção p definida acima tendo-se:

$$\theta_p = (1-p)(\theta_{FC} - \theta_{WP}) + \theta_{WP} \quad (\text{Eq. 24})$$

Se a fracção extraível for diferente por decisão de gestão do regante, incluindo por carência de água, a variável p será substituída por MAD. A quantidade de água necessária para restabelecer então o teor de água do solo à capacidade de campo é

$$I_{ni} = 1000z_{ri} (\theta_{FC} - \theta_p) \quad (\text{Eq. 25})$$

Uso de modelos na prática da determinação das necessidades hídricas das culturas cujo somatório para todo o ciclo cultural, depois de corrigido para as necessidades de lavagem de sais, corresponde às necessidades líquidas de água para rega, *IWR*:

$$IWR = \frac{ET_c - P - GW + DP + \Delta S}{1 - LR} \quad (\text{Eq. 26})$$

onde *LR* é a fração de lavagem e onde se considerou o termo $Q_r = 0$ na Eq. 21.

As *necessidades brutas ou globais de água de rega, GIWR*, para a cultura em causa dependem do processo de aplicação da água, *i.e.*, do método e sistema de rega, e do sistema de transporte e distribuição da água a partir da sua origem. Para o efeito, considera-se a eficiência global *E_f*, inclusiva da eficiência de aplicação relativa ao sistema de rega utilizado e das eficiências de distribuição e de transporte relativas à rede de rega, ou seja,

$$GIWR = \frac{IWR}{E_f} \quad (\text{Eq. 27})$$

4. MODELOS

4.1. WINISAREG

Bom número de modelos de simulação do balanço hídrico constituem ferramentas preciosas para a determinação das necessidades de rega e para a condução da rega (Pereira et al., 1992; 1995). De entre eles destacamos o modelo ISAREG (Teixeira e Pereira, 1992; Pereira et al., 2003), disponível em Windows – modelo WINISAREG - e capaz de lidar com a ascensão capilar e a percolação através da zona radicular (Liu et al., 2006). A explicação sumária do modelo apresenta-se na Fig. 9. O modelo tem sido utilizado em vários países, incluindo o Brasil (Vitória et al., 2005).

O modelo (Fig. 9 e 10) é composto por um programa para o cálculo da evapotranspiração de referência com o método FAO-PM (Eq. 3), EVAP56, que inclui a estimativa de parâmetros no caso de variáveis meteorológicas em falta, por um programa para parameterizar a cultura, e por um módulo de simulação do balanço hídrico, calculando as necessidades de água e de rega das culturas com diversos passos de tempo e diversas opções de entrada de dados climáticos, de solos e da cultura.

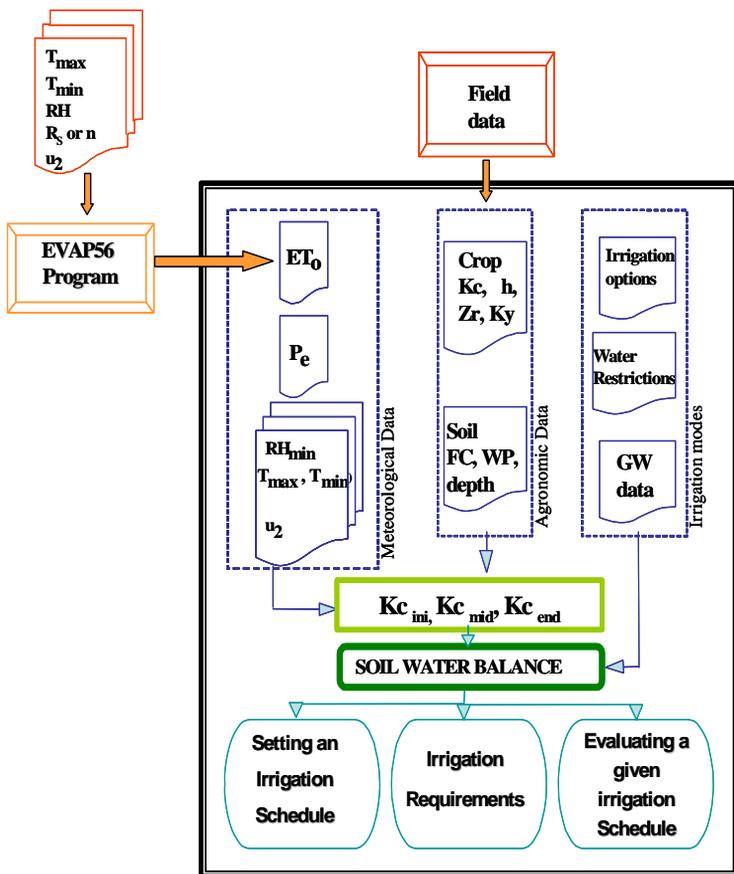


Figura 9. Esquema do modelo ISAREG com indicação dos programas associados, dos dados utilizados, dos procedimentos de cálculo e do tipo de resultados

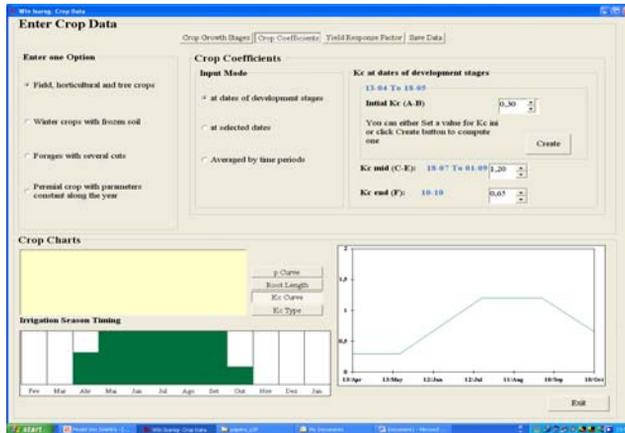


Figura 10. WINISAREG: Menu de entrada de dados de coeficientes culturais, algodão, Fergana, UZ

O modelo foi adaptado para operar em SIG (Fortes et al., 2005) como se mostra na Fig. 12 com alguns resultados do GISAREG.

Para a validação do modelo utilizam-se observações da água do solo ao longo do ciclo vegetativo das culturas e relativas a todo o perfil de solo susceptível de ser explorado pelas raízes (Fig. 11).

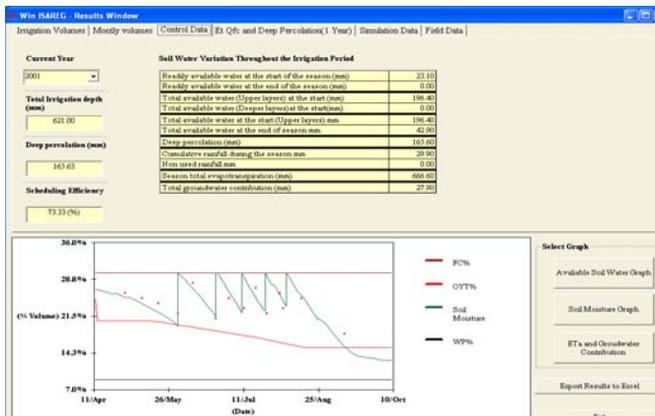


Figura 11. Resultados da simulação da rega do algodão para validação do modelo em Fergana, UZ

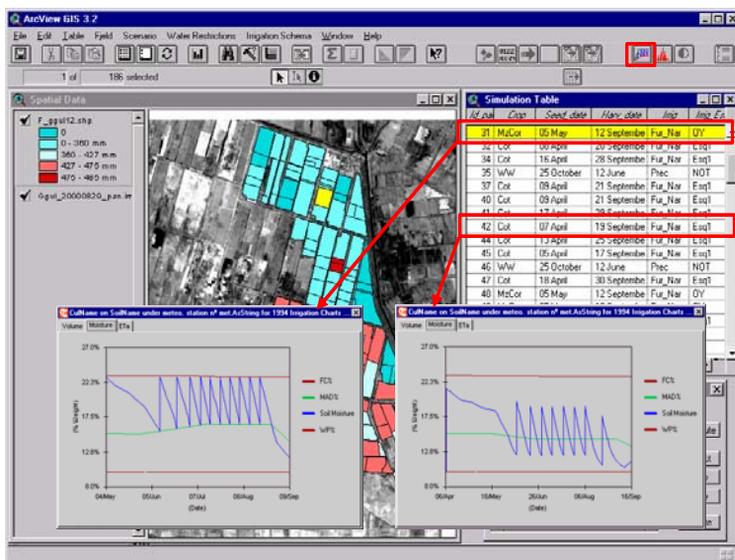


Figura 12. Calendários de rega simulados com o modelo GISAREG

4.2. WEBISAREG

A inovação presentemente em curso é a sua operação através da internet por parte dos agricultores em dois perímetros regados (Branco et al., 2007). Todo o sistema assenta numa arquitectura cliente-servidor. O servidor contém toda a plataforma lógica ou de computação - os modelos, toda a informação armazenada em bases de dados e a informação criada pelo utilizador. Assim, todos os cálculos são efectuados no servidor, originando deste modo nova informação que é transmitida ao cliente através de páginas Web, sob forma de texto, de gráficos, de imagens ou outra. O cliente fica livre de qualquer tarefa de cálculo ou compilação de código, resultando num incremento de velocidade da aplicação. Por outro lado, qualquer alteração ou escrita de novo código é efectuada de modo centralizado, apenas num local, tornando desnecessária a intervenção ponto a ponto relativa a todos os clientes do sistema. A figura 13 ilustra a localização dos componentes do sistema entre servidor e clientes.

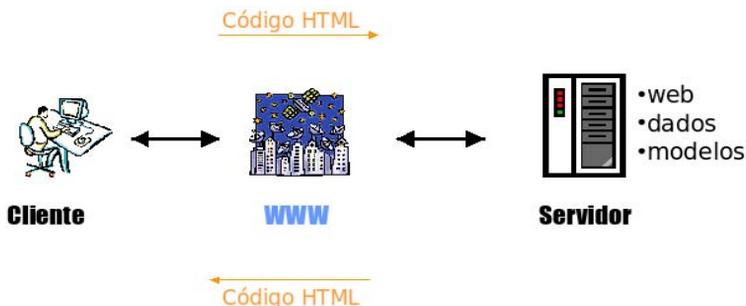


Figura 13. Localização física dos componentes do sistema WebIsareg

A informação utilizada pelos modelos do WebIsareg e por outros é, ou poderá ser a mesma, nela se incluindo os dados dos solos, culturas, clima, cadastro, etc. A aplicação de uma única estrutura de base de dados promove a estabilidade do sistema, bem como a validação da informação entre os vários modelos. A não existência desta centralização em bases de dados únicas, levaria a uma dificuldade acrescida na manutenção da informação e sincronização das diferentes bases de dados dos diversos modelos. O sistema HidroGest, construído para o efeito, garante assim uma ligação entre os modelos e a base de dados central.

O modelo originalmente adaptado e integrado no WebIsareg foi o modelo WinIsareg, referido em 4.1. Este modelo está a ser modificado através da incorporação no cálculo do balanço hídrico do coeficiente cultural dual aliás na sequência do desenvolvimento do modelo SIMDualKc (vd. 4.3).

O funcionamento por parte do utilizador é muito simples e intuitivo. Após o registo feito pelo utilizador, é gerado um perfil do mesmo. Nesta altura é cruzada informação na base de dados previamente construída para o sistema de rega, de modo a individualizar a parcela (unidade) em questão. O utilizador é então convidado a definir o cenário a simular para a elaboração do calendário de rega. Depois de todas as informações de entrada necessárias estarem completas o modelo calcula então o calendário de rega mais adequado face à simulação pretendida. Como saída do modelo podemos observar na Fig. 14 um calendário de rega e

corresponográficos, fornecendo informação diária do teor de água previsto no solo, bem como das regas a efectuar (dias e volumes a aplicar).

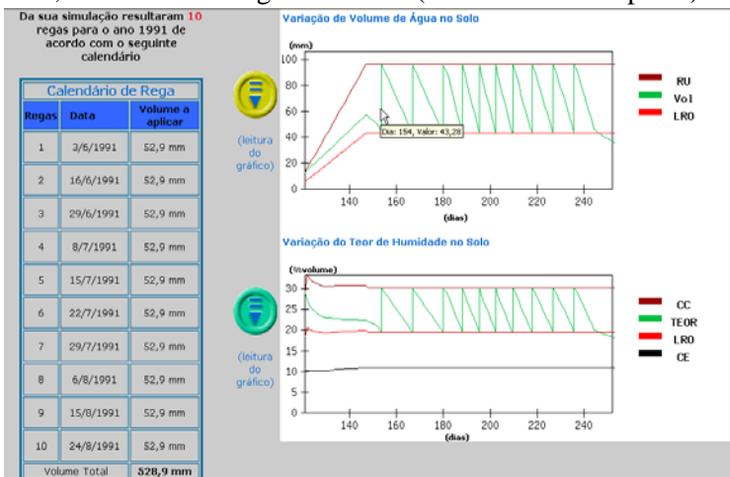


Figura 14. Excerto de um exemplo de saída de resultado de um calendário de rega

Está em desenvolvimento a possibilidade do sistema permitir ainda a “afinação” do calendário de rega através de dados recolhidos no campo durante a campanha de rega, aceitando a introdução destes e seguindo-se um novo cálculo.

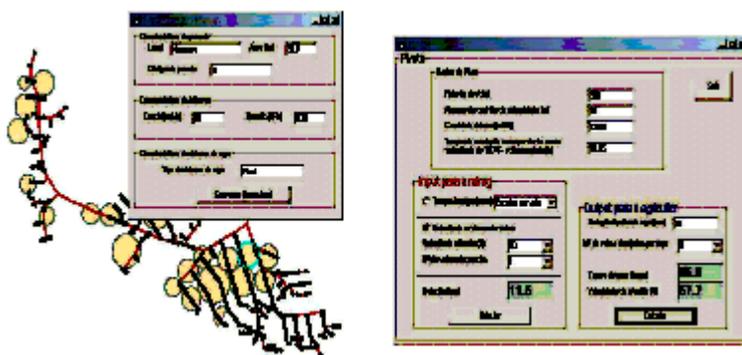


Figura 15. Interfaces do DOTmm/h para selecção da parcela e conversão de altura de água (mm) em tempo de rega (h)

A aplicação DOTmm/h tem como objectivo facilitar a comunicação com o agricultor. Trata-se de um conversor desenvolvido de modo a converter as dotações a aplicar de altura de água (mm) em horas de rega ou velocidade no caso de aspersão móvel, atendendo às características do equipamento. A figura 15 mostra a interface do DOTmm/h em funcionamento isolado.

4.3. SIMDualKc

Um outro modelo de interesse é o SIMDualKc (Rolim *et al.*, 2006; Godinho *et al.*, 2007). O objectivo principal do modelo SIMDualKc é desenvolver opções para a calendarização da rega, nomeadamente para culturas com cobertura parcial do solo, especialmente hortícolas e pomares, e/ou para sistemas com regas de alta-frequência como é o caso da microrrega. A aplicação foi estruturada segundo uma arquitectura de três camadas (Fig. 16), onde existe uma base de dados, o modelo computacional e a interface gráfica (Godinho *et al.*, 2007). A base de dados permite guardar a informação relativa ao solo, cultura, clima, sistema de rega e características da simulação, permitindo construir o campo da simulação.

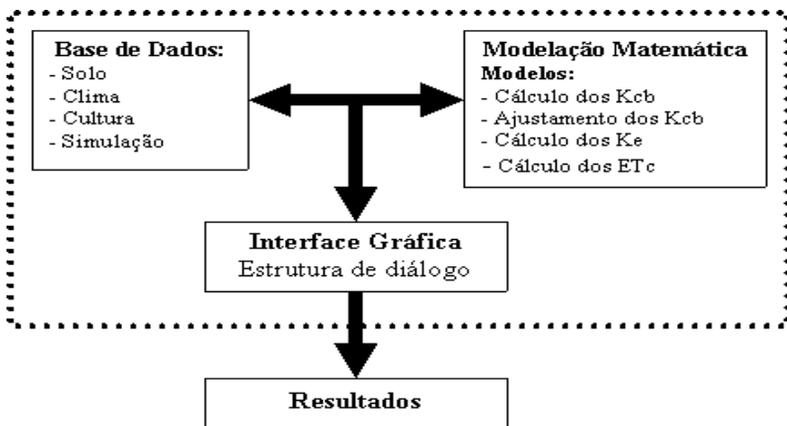


Figura 16. Estrutura do modelo SIMDualKc.

O módulo computacional foi desenvolvido de modo a permitir a integração com os modelos WINISAREG e GISAREG (vd.4.1), por forma a facilitar o uso da metodologia do K_c dual por estes modelos, operando sozinhos ou usando a interface gráfica. Tal processo está em curso e dentro de pouco tempo dispor-se-á de um modelo único com alternativas de aplicação de K_c simples ou dual.

Os dados de base (Fig. 17) são inseridos no modelo, no início da simulação através de uma base de dados em MSAccess e referem-se a:

→ *Dados meteorológicos*: temperaturas mínima, T_{\min} , e máxima, T_{\max} , diárias, [°C]; velocidade do vento, u_2 [$m\ s^{-1}$]; evapotranspiração de referência, $\dot{A}\ddot{O}_0$ [mm]; precipitação efectiva, P_e [mm];

→ *Dados de cultura*: data de plantação, duração dos diferentes estágios culturais, L [dias]; valores tabelados (ou observados) do coeficiente cultural basal, K_{cb} ; comprimento máximo e mínimo da raiz, Z_r [m]; altura da cultura [m]; fracção de solo molhada pela rega, f_w ; fracção de solo coberta, f_c ; fracção de solo molhado que se encontra exposto há radiação solar, f_{ew} ; fracção de esgotamento da água do solo em conforto hídrico, δ , e

→ *Dados de solo*: profundidade da camada evaporativa, d [mm]; água facilmente evaporável, REW [mm]; água totalmente evaporável, TEW [mm]; total de água disponível, TAW [$mm\ m^{-1}$].



Figura 17. Sequência de janelas de inserção de dados do modelo referentes ao clima, cultura, solo e gestão da simulação.

O modelo foi testado para várias culturas, incluindo trigo, milho, algodão e laranja em Portugal, em vários países Mediterrânicos e na Ásia Central (Godinho *et al.*, 2007a). Os resultados são apresentados tanto em forma tabular como gráfica (Fig. 18).

Para facilitar a utilização do modelo, nomeadamente recorrendo a bases de dados especializados, com base na base de dados de propriedades hidráulicas de solos, está em desenvolvimento um processo de mapeamento tanto dos valores de água do solo, TAW e RAW (Fig. 9), como das características evaporativas dos solos, TEW e REW, para posterior utilização de informação por detecção remota para o cálculo da ET_c (Mateus *et al.*, 2007).

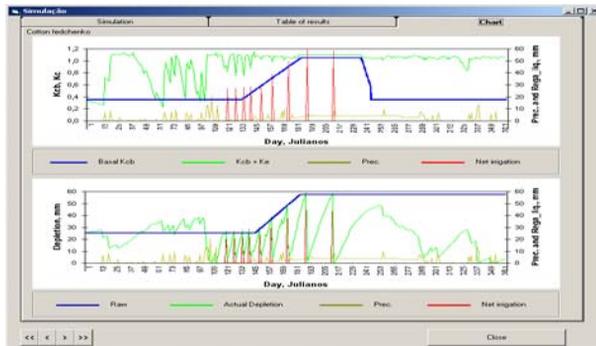


Figura 18. Janela de apresentação gráfica dos resultados do modelo, mostrando os valores de K_c e a variação de teores de água no solo, para a cultura do algodão em Fergana.

5. CONCLUSÕES

Relativamente à determinação das necessidades de água das culturas deve concluir-se que a metodologia proposta pela FAO e aqui resumida, tanto referente à definição da evapotranspiração de referência como aos coeficientes culturais, quer os médios quer os duais, permite boa precisão de cálculo, comprovada para grande variedade de climas e regiões do mundo, desde que utilizados em relação com

observações de campo. Ocorre porém a necessidade de melhorar o conhecimento relativo às culturas tropicais.

A determinação das necessidades de rega e a definição das dotações pode ser facilitada pelo uso de modelos de simulação do balanço hídrico. Requer-se, porém, adequada parameterização no que respeita ao solo e à cultura e, para a condução da rega, que sejam encontradas formas de levar a informação aos agricultores, incluindo o apoio da Web.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALLEN R.G, SMITH M., PERRIER A., PEREIRA L.S. An update for the definition of reference evapotranspiration. *ICID Bulletin*, 43(2): 1-34, 1994a.

ALLEN, R.G, SMITH, M., PEREIRA, L.S., PERRIER, A. An update for the calculation of reference evapotranspiration. *ICID Bulletin*, 43 (2): 35-92, 1994b.

ALLEN, R.G., PEREIRA, L.S., RAES, D., SMITH, M., *Crop Evapotranspiration: Guidelines for Computing Crop Water Requirements*. FAO Irrigation and Drainage Paper 56. Rome, 300 pp, 1998.

ALLEN, R.G, PEREIRA L.S., SMITH, M., RAES, D., WRIGHT, J.L. FAO-56 dual crop coefficient method for estimating evaporation from soil and application extensions. *J. Irrig. Drain. Engng.* 131(1): 2-13, 2005a.

ALLEN, R.G, PRUITT, W.O., RAES, D., SMITH, M., PEREIRA L.S. Estimating evaporation from bare soil and the crop coefficient for the initial period using common soils information. *J. Irrig. Drain. Engng.* 131(1): 14-23, 2005b.

ALLEN, R.G., CLEMMENS, A.J., BURT, C.M., SOLOMON, K., O'HALLORAN, T. Prediction accuracy for projectwide evapotranspiration using crop coefficients and reference evapotranspiration. *J. Irrig. Drain. Engng.* 131(1): 24-36, 2005c.

ALLEN R.G, PRUITT W.O., WRIGHT J.L., HOWELL T.A., VENTURA F., SNYDER R., ITENFISU D., STEDUTO P., BERENGENA

J., YRISARRY J.B., SMITH M., PEREIRA L.S., RAES D., PERRIER A., ALVES I., WALTERI., ELLIOTT R. A recommendation on standardized surface resistance for hourly calculation of reference ETo by the FAO56 Penman-Monteith method. *Agric. Water Manage.* 81:1-22, 2006a.

ALLEN R.G., PEREIRA L.S., RAES D., SMITH M. *Evapotranspiración del Cultivo. Guías para la Determinación de los Requerimientos de Agua de los Cultivos.* , 2006b. Estudio Riego y Drenaje 56, FAO, Roma

ALLEN R.G., TASUMI M., MORSE A., TREZZA R., WRIGHT J.L., BASTIAANSEN W., KRAMBER W., LORITE I., ROBISON C.W. Satellite-based energy balance for mapping evapotranspiration with internalized calibration (METRIC) — Applications. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 133(4): 395–406, 2007a.

ALLEN R.G., WRIGHT J.L., PRUITT W.O., PEREIRA L.S., JENSEN M.E. Water Requirements. In: M.E. Jensen et al., (eds.) *Design and Operation of Farm Irrigation Systems* (2nd Edition), ASABE, St. Joseph, MI, pp. 208-288 (in press), 2007b.

AZEVEDO P.V., SILVA B.B. da, SILVA V.P.R. da,. Water requirements of irrigated mango orchards in northeast Brazil. *Agric. Water Manage.* 58: 241-254, 2003.

BASTIAANSEN W.G.M., HARSHADEEP N.R. Managing scarce water resources in Asia: The nature of the problem and can remote sensing help? *Irrigation and Drainage Systems* 19: 269–284, 2005.

BRANCO, R., TEODORO, P., MATEUS, P., PEREIRA, L.S. Serviços de apoio à gestão da rega visando a eficiência da rega e produtividade da água – WEBISAREG. In: *Agroingeniería 2007* (IV Cong. Nac. y I Cong Ibérico, Albacete), SE AgIng y CREA, Albacete, CD-ROM paper I-882, 2007.

CAI JB, LIU Y, LEI TW, PEREIRA L.S. Estimating reference evapotranspiration with the FAO Penman-Monteith equation using daily weather forecast messages. *Agric. For. Meteol.* 145: 22–35, 2007.

CALERA A., JOCHUM A.M., CUESTA A., MONTORO A., LÓPEZ

P. Irrigation management from space: Towards user-friendly products. *Irrigation and Drainage Systems* 19: 337–353, 2005.

CAMEIRA M.R., FERNANDO R.M., PEREIRA L.S. Monitoring water and NO₃-N in irrigated maize fields in the Sorraia watershed, Portugal. *Agric. Water Manage.* 60: 199-216, 2003.

CAMEIRA M.R., FERNANDO R.M., AHUJA L., PEREIRA L.S. Simulating the fate of water in field soil-crop environment. *Journal of Hydrology* 315: 1-24, 2005.

COSTELLO L.R., MATHENY N.P., CLARK J.R., JONES K.S. *A Guide to Estimating Irrigation Water Needs of Landscape Plantings in California –The Landscape Coefficient Method and WUCOLS III*. University of California Cooperative Extension and California Dep. Water Resources, 2000.

DOORENBOS J. AND PRUITT W.O. *Guidelines for Predicting Crop Water Requirements*, FAO Irrigation and Drainage Paper 24, FAO, Rome, 179 p, 1975.

FERREIRA C., PEREIRA L.S. GardenISA – uma ferramenta de apoio à gestão da rega de espaços verdes. In: *Agroingeniería 2007* (IV Cong. Nac. y I Cong Ibérico, Albacete), SE AgIng y CREA, Albacete, CD-ROM paper I-883, 2007.

FORTES P.S., PLATONOV A.E., PEREIRA L.S. GISAREG - A GIS based irrigation scheduling simulation model to support improved water use. *Agric. Water Manage.* 77: 159-179, 2005.

GARATUZA-PAYAN J., WATTS C.J. The use of remote sensing for estimating ET of irrigated wheat and cotton in Northwest Mexico. *Irrigation and Drainage Systems* 19: 301–320, 2005.

GODINHO P., SEQUEIRA B., PAREDES P., PEREIRA L.S. Simulação das necessidades de água das culturas pela metodologia dos co-

Uso de modelos na prática da determinação das necessidades hídricas das culturas
eficientes culturais duais. Modelo SIMDualKc. In: *Modernización
de Riegos y Uso de Tecnologías de Información* (Red CYTED-
Riegos, La Paz, Bolivia, Set. 2007), CD-ROM, 2007.

HOWELL T.A., EVETT R., TOLK J.A., SCHNEIDER A.D. Evapotranspiration of full-, deficit-irrigated, and dryland cotton on the Northern Texas High Plains, *J Irrig. Drain. Engng.*, 130: 277-285, 2004.

JENSEN M.E., BURMAN R.D., ALLEN R.G. (EDS.). *Evapotranspiration and Irrigation Water Requirements*. Am. Soc. Civ. Eng. Manual No. 70, ASCE, N. York, 332 pp, 1990.

MATEUS P., PEREIRA L.S., HIPÓLITO J. Mapeamento das propriedades hidráulicas e evaporativas do solo aplicando funções de pedotransferência e de geoestatística. In: *Agroingeniería 2007* (IV Cong. Nac. y I Cong Ibérico, Albacete), SE AgIng y CREA, Albacete, CD-ROM paper B-901, 2007.

MCCABE J. (ED.). *Landscape Irrigation Scheduling and Water Management*, Water Management Committee of the Irrigation Association, Arlington, 2005a.

MONTEITH J.L. Evaporation and the environment. In: *The State and Movement of Water in Living Organisms*. In: *XIXth Symposia of the Society for Experimental Biology*. University Press, Swansea, Cambridge, pp. 205–234, 1965.

MONTEITH J.L., UNSWORTH M.H. *Principles of Environmental Physics*. 2nd ed., Edward Arnold, London, 1990.

PEREIRA L. S. Higher performances through combined improvements in irrigation methods and scheduling: a discussion. *Agric. Water Manage.* 40 (2): 153-169, 1999.

PEREIRA L.S. *Necessidades de Água e Métodos de Rega*. Publ. Europa-América, Lisboa, 313 p, 2004.

PEREIRA L.S., ALLEN R.G. Crop water requirements. In: HN van

Lier, LS Pereira, FR Steiner (Eds.) *CIGR Handbook of Agricultural Engineering, Vol. I: Land and Water Engineering*, ASAE, St. Joseph, MI, pp. 213-262, 1999.

PEREIRA L.S., ALVES I. Crop water requirements. In: D. Hillel (ed.) *Encyclopedia of Soils in the Environment*. Elsevier, London and New York, vol. 1, pp. 322-334, 2005.

PEREIRA L.S., PERRIER A., AIT KADI M., KABAT P. (EDS): *Crop Water Models*. ICID Bulletin Special issue 41 (2), 1992.

PEREIRA L.S., VAN DEN BROEK B., KABAT P., ALLEN R.G., Editors. *Crop-Water Simulation Models in Practice*. Wageningen Pers, Wageningen, 1995.

PEREIRA L.S., PERRIER A., ALLEN R.G., ALVES I. Evapotranspiration: concepts and future trends. *J. Irrig. Drain. Engrg.* ASCE 125 (2), 45–51, 1999.

PEREIRA L.S., CORDERY I., IACOVIDES I. *Coping with Water Scarcity*. UNESCO IHP VI, Tech. Doc. Hydrology 58, UNESCO, Paris, (<http://unesdoc.unesco.org/images/0012/001278/127846e.pdf>), 2002a.

PEREIRA L.S., OWEIS T., ZAIRI A. Irrigation management under water scarcity. *Agric. Water Manage.* 57: 175-206, 2002b.

PEREIRA L.S., CAI L.G., HANN M.J. Farm water and soil management for improved water use in the North China Plain. *Irrigation and Drainage* 52 (4): 299-317, 2003.

PEREIRA L.S., TEODORO P.R., RODRIGUES P.N., TEIXEIRA J. L. Irrigation scheduling simulation: the model ISAREG. In: G. Rossi, A. Cancelliere, L. S. Pereira, T. Oweis, M. Shatanawi, A. Zairi (Eds.) *Tools for Drought Mitigation in Mediterranean Regions*. Kluwer, Dordrecht, pp. 161-180, 2003.

POPOVA Z., KERCHEVA M., PEREIRA L.S. Validation of the FAO methodology for computing ETo with missing climatic data. Application

Uso de modelos na prática da determinação das necessidades hídricas das culturas
to South Bulgaria. *Irrigation & Drainage* 55(2): 201-215, 2006.

ROLIM J., GODINHO P., SEQUEIRA B., ROSA R., PAREDES P,
PEREIRA L.S. SIMDualKc, a software tool for water balance
simulation based on dual crop coefficient. In: F. Zazueta, J. Xin, S.
Ninomiya, G. Schiefer (eds.) *Computers in Agriculture and Natural
Resources* (Proc. 4th World Congress, Orlando, FL), pp. 781-786, 2006.

SNYDER R.L., ECHING S. Landscape Irrigation Management
Program—IS005 Quick Answer. Univ. California, Davis.
(biomet.ucdavis.edu/irrigation_scheduling/LIMP/limp.pdf), 2004.

SNYDER, R. L., ECHING S. Urban Landscape Evapotranspiration.
California State Water Plan, vol. 4, 691-693. ([www.waterplan.water.ca.gov/
reference/index.cfm#infrastructure](http://www.waterplan.water.ca.gov/reference/index.cfm#infrastructure)), 2005.

TEIXEIRA J.L., PEREIRA L.S. ISAREG, an irrigation scheduling
model. *ICID Bulletin*, 41: 29-48, 1992.

VITÓRIA F.B., VIEGAS FILHO J.S., PEREIRA L.S., TEIXEIRA
J.L., LANNAA.E. Multi-scale modeling for water resources planning
and management in rural basins. *Agric. Water Manage.* 77: 4-20, 2005.

WRIGHT J.L. New evapotranspiration crop coefficients. *J. Irrig. and
Drain. Div.*, ASCE, 108: 57-74, 1982.

APPLICATION OF THE METHODOLOGIES SEBAL AND METRIC IN IRRIGATED AGRICULTURE

Richard G. Allen; Wim Bastiaanssen; Masahiro Tasumi; Anthony Morse, Ricardo Trezza, James L. Wright, William Kramber, Ignacio Lorite and Clarence W. Robison

ABSTRACT

Recent satellite image processing developments have provided the means to calculate evapotranspiration (ET) using a surface energy balance to produce ET ‘maps’ for relatively large regions. The ET maps that are based on satellite images provide the means to quantify ET on a field by field basis, depending on the resolution of the satellite, and can provide information on ET in terms of both the rate and the spatial distribution. The ET images show a progression of ET during the year or growing season as well as its spatial distribution. The processes SEBALTM (Surface Energy Balance Algorithms for Land) and METRICTM (Mapping Evapotranspiration at high Resolution with Internalized Calibration) are satellite-based image-processing

procedures for calculating ET. METRIC is derived from SEBAL for specialized application in the United States and Europe where high quality, hourly weather data are available. Both SEBAL and METRIC have been applied with high resolution Landsat images in the U.S. and Europe and SEBAL has additionally been applied in South America, Mexico, Africa and Asia. Applications in the United States have included the determination of monthly and seasonal ET for water rights accounting, operation of ground water models, and determination of crop coefficient populations and mean curves for common crops.

Comparisons between ET by METRIC, ET measured by lysimeter and ET predicted using traditional methods have been made on a daily and monthly basis for a variety of crop types and land-uses. Error in estimated growing season ET was 4% for irrigated meadow in the Bear River basin of Idaho and 1% for an irrigated sugar beet crop near Kimberly, Idaho. Standard deviation of error for time periods represented by each satellite image averaged about 20% in both applications. The results indicate that METRIC and SEBAL hold substantial promise as efficient, accurate, and inexpensive procedures to estimate actual evaporation fluxes from irrigated lands throughout growing seasons.

1. INTRODUCTION

Land surface evapotranspiration transfers large volumes of water from soil (evaporation, E) and vegetation (transpiration, T) into the atmosphere. Quantifying the consumption of water over large areas and within irrigated projects is important for water rights management, water resources planning and water regulation, especially in areas of water scarcity. Evapotranspiration (ET) refers to the combined E and T fluxes that show substantial spatial, diurnal and seasonal variation and the operational use of ET over large areas requires non-point source data, whereas traditional point measurements are valid only locally. Satellite data are ideally suited for deriving spatially continuous fields

of ET using energy balance techniques. Traditionally, ET from agricultural fields has been estimated by multiplying the weather-based reference ET by crop coefficients (K_c) determined according to the crop type and the crop growth stage. However, there is typically some question regarding whether the crops grown compare with the conditions represented by the idealized K_c values, especially in water short areas. In addition, it is difficult to predict the correct crop growth stage dates for large populations of crops and fields. Recent developments in satellite remote sensing ET models (Bastiaanssen et al., 2005, Allen et al., 2007a) have provided accurate estimates of ET and K_c for large populations of fields and water users (Tasumi et al., 2005a) and quantified net ground-water pumping in areas where water extraction from underground is not measured (Morse et al., 2004). Bastiaanssen and Harshdeep (2005) have summarized selected SEBAL applications that support integrated water resources and environmental analysis in Asia. The majority of the applications related to groundwater over-exploitation, estimation of surface runoff, crop water productivity, integrated land and water use planning and irrigation water allocation.

Internal calibration of the sensible heat computation within SEBAL and METRIC and the use of the indexed temperature gradient eliminate the need for atmospheric correction of surface temperature (T_s) or reflectance(albedo) measurements using radiative transfer models (Tasumi et al., 2005b). The internal calibration also reduces impact of bias in estimation of aerodynamic stability correction or surface roughness. In fact, sensitivity analyses conducted by Tasumi (2003) showed that one can double or halve surface roughness and even eliminate atmospheric correction with generally less than 5% impact on any pixel. This seemingly lack of sensitivity to roughness and stability correction bias occurs only if all pixels are treated similarly, so that biases caused by this treatment (doubling or halving roughness or elimination of stability correction) are imbedded into the sensible heat

calibration at the hot and cold pixels and then brought back out during application to all image pixels. METRIC is auto-calibrated for each satellite image using ground-based calculation of alfalfa reference ET (ET_r) (based on hourly weather data). Accuracy and dependability of the ET_r estimate has been established by lysimetric and other studies in which we have high confidence (ASCE-EWRI, 2005). The attributes of the internal calibration and substantial compensation for component estimation biases enhance the operational applicability of METRIC and SEBAL for important ET applications related to water rights management, water rights and water transfers, and hydrologic water balances.

Recent SEBAL applications to irrigated agriculture have included estimating real basin water savings in China, evaporative depletion of major river systems in Mexico, a national groundwater abstraction study in the Kingdom of Saudi Arabia and water productivity studies of vineyards in California, Brazil and South Africa.

The Idaho Department of Water Resources and the University of Idaho have developed a variety of METRIC applications. METRIC has been used to monitor water right compliance and aquifer depletion, as a tool for water resource planning, and in hydrologic modeling (Morse et al., 2004). In the Rio Grande Valley of New Mexico, METRIC has been used to map *ET* from riparian vegetation and in the Imperial Valley of California, METRIC *ET* maps have been used to assess irrigation and salinity management. This paper describes the applications of METRIC in Idaho, New Mexico and California, including comparisons with lysimeters using data from the Bear River Basin and from the USDA-ARS Research Laboratory near Kimberly, Idaho.

2.COMPARISONS AGAINST LYSIMETER MEASUREMENTS

Evapotranspiration lysimeters, which are usually constructed as large underground tanks filled with soil and vegetation, represent an

excellent standard against which ET estimates can be compared. Lysimeters can, however, provide biased ET measurements if the vegetation inside and immediately outside the tanks does not have the same height, density, and moisture conditions as the vegetation of the surroundings (Pruitt and Lourence, 1985, Pruitt, 1991, Allen et al., 1991a,b). Therefore, lysimeters and corresponding data sets must be carefully scrutinized to insure that the data are representative of general ET conditions. This has been done with the weighing lysimeter data sets collected by Dr. J.L. Wright, USDA-ARS, Kimberly, which constitute exceptionally high quality ET measurement data (Wright, 1982, 1996) and with drainage lysimeter data sets from Dr. R.W. Hill, Utah State University near Montpellier, Idaho (Hill et al., 1989, Morse et al., 2000). ET data from these two lysimeter data sets have been used to compare against ET estimated by SEBAL and METRIC applications in the two regions.

2.1. Lysimeters at Montpellier, Idaho

In early applications of SEBAL and METRIC in Idaho during 2000, ET maps were generated monthly for a 300 km x 150 km area (comprised of 2 Landsat image scenes) encompassing much of the Bear River basin of Idaho, Utah and Wyoming. Lysimeters near Montpellier, Idaho, just north of Bear Lake, had been near the corner of a large irrigated field planted to an irrigated native sedge forage crop characteristic of the area and local surroundings. The lysimeters had approximately 1 m² surface area and were about 1.2 m deep. ET was derived from weekly measurements of water table depth in the lysimeters and neutron meter readings of the soil profiles (Hill et al., 1989). ET from the three lysimeters was averaged to reduce random error and uncertainty in the ET measurements.

Daily ET on satellite image dates was calculated in these early SEBAL and METRIC applications using the SEBAL based extrapolation of EF from image time to the surrounding 24-hour period,

rather than using the current ETrF technique of METRIC. EF is the evaporation fraction, defined as the ratio of ET to $(R_n - G)$, all expressed in energy units, where R_n is net radiation and G is soil heat flux density. ETrF is the fraction of reference ET, defined as the ratio of calculated ET to ET from the alfalfa reference (ETr), both expressed as depths of evaporated water (Allen et al., 2007a). Following the use of EF to extrapolate from instantaneous ET at satellite image time to ET for the day, a value for ETrF was generated from the daily ET, using 24-h timesteps, and was used to interpolate ETrF between satellite images. ETr is used for interpolation between image days because it accounts for changes in ET caused by weather variation between satellite image dates, including cloudiness. In more recent METRIC applications, ETrF is used for extrapolation from instantaneous to daily ET, in place of EF, as well as for estimating ET for days in between image dates (Allen et al., 2007a).

Results for the four satellite images processed during the 1985 growing season (July 14, Aug. 15, Sept. 16, Oct. 18) are summarized in Figure 1. The average standard deviation among the three lysimeters that were averaged was 0.18 in terms of Kc for the periods of comparison to METRIC. The results from this early U.S. application compared well to lysimeter data for the last three image dates. The earliest date, July 14, compares well when examined in context of the impact of precipitation preceding the image date and rapidly growing vegetation during that period (Morse et al., 2000). The predicted monthly ET derived from the processed images averaged +/- 16% relative to the lysimeter at Montpelier. However, the seasonal difference between METRIC and lysimeters, calculated by summing the ET over the four month period, was only 4% due to impacts of reduction in the random error components present in each estimate, such as random incidences of surface wetting by irrigation and in calculation of R_n , G , the near-surface temperature difference and aerodynamic resistance. In addition, there may have been random error in the lysimeter measurements.

2.2. Lysimeters at Kimberly, Idaho

The comparisons of SEBAL and METRIC with measurements on the Snake River Plain has centered on the use of two precision-weighting lysimeter systems in place near Kimberly, Idaho, from 1968 to 1991. The lysimeter system was installed and operated by Dr. James Wright of the USDA-ARS (Wright, 1982, 1996) and measured ET fluxes continuously for a wide range of weather conditions, surface covers, and crop types.

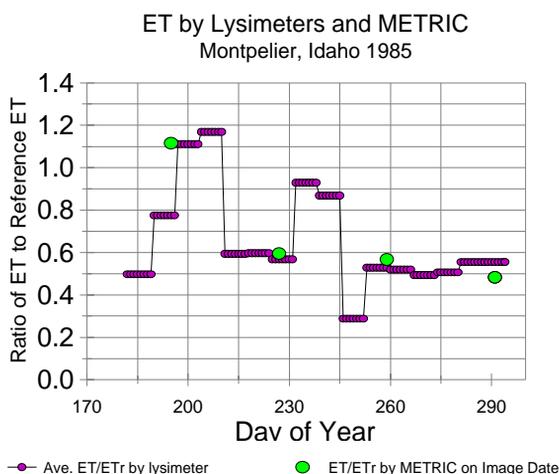


Figure 1. Comparison of ETr fractions (i.e., Kc) derived from 7-day lysimeter measurements near Montpelier, Idaho during 1985 and values from METRIC for four Landsat dates ($ET = \text{crop } ET$ and $ETr = \text{alfalfa reference } ETr$) (adapted from Morse et al. 2000)

Measurements of net radiation, soil heat flux and plant canopy parameters were periodically made near the lysimeter site. The lysimeter data sets provided valuable information to verify SEBAL and METRIC over various conditions of ground cover. The hourly weather data were measured at the lysimeter site over the grassed field containing the USDA lysimeter 1. Weather measurements used to calculate ETr were solar radiation, wind speed, air temperature and vapor pressure

measured by a chilled mirror system.

Nineteen Landsat 5 satellite image dates were processed for Kimberly, Idaho, covering the period between 1986 and 1991. These dates had quality lysimeter and cloud-free micrometeorological data and represent a combination of crop growth stages and times of the year. Eight images from 1989 are discussed here.

ETrF from METRIC vs. lysimeter. Figure 2 shows ETrF (also known as the crop coefficient, K_c) estimated by METRIC compared with ETrF measured by lysimeter as a function of time during the sugar beet growing season for 1989, a year when a significant number (eight) of both lysimeter measurements of ET and Landsat images were available. Small round symbols represent daily ETrF (i.e., K_c) derived from all lysimeter measurements with shading according to whether the day was clear, cloudy or partly cloudy. The relative consistency among measured daily K_c shown in Figure 2 among clear, partly cloudy and cloudy days, especially during midseason when vegetation and soil wetness conditions were more consistent, suggests that ETrF should be expected to be relatively constant between clear and cloudy portions of a day and between clear and cloudy days.

The triangles in Figure 2 represent ETrF derived from lysimeter on the image date and large square symbols represent ETrF by METRIC for the image date. The METRIC ETrF was extracted from processed Landsat images for the lysimeter field by sampling and averaging four 30-m pixels from near the center of the lysimeter field that was planted to the same crop of sugar beets as the lysimeter. In Landsat 5 images, the six short-wave radiation bands have 30-m resolution, however, the single thermal band has only 120-m resolution. The small size of the lysimeter field (110 x 120 m) prevented procurement of Landsat based samples from the field for all image scenes that were free of any influence, in the 120-m thermal band of

Landsat 5, from areas outside the fields. This “thermal contamination” of some sampled pixels from the small lysimeter field created some degree of bias in METRIC estimated ET that were not present in the lysimeter ET measurements, and would not occur for large fields, which are commonly on the order of 800 x 800 m in southern Idaho. These occasions are noted in Figure 2, where large dark squares indicate image dates where the METRIC ETrF image was sampled over the lysimeter field with little thermal contamination from outside the field, and open squares indicate image dates when there was some thermal contamination of sampled pixels.

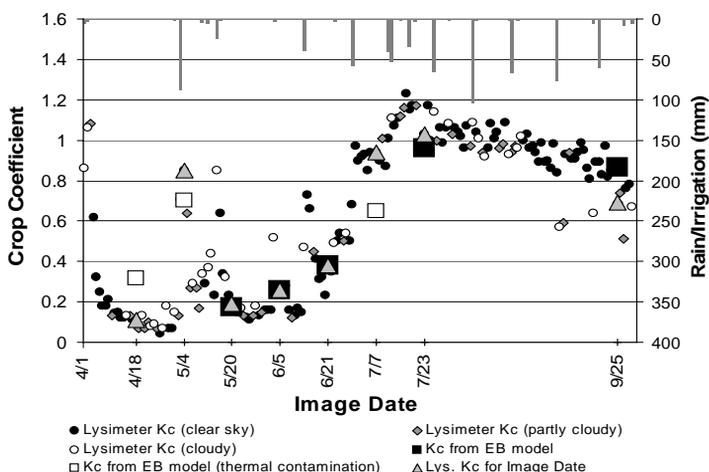


Figure 2. Comparison of ETrF (Kc) by METRIC (EB model) and by lysimeter for sugar beets near Kimberly, Idaho during 1989 (unpublished lysimeter data from Wright, 2000, USDA-ARS, Kimberly, ID) (adapted from Tasumi et al., 2005a).

Absolute differences averaged 30% for the eight image days. When April 18 was omitted, the average absolute difference was only 14%. April 18 was before planting of the sugar beets and represented a period of drying bare soil following precipitation. The field at this time was non-uniform in wetness due to differential drying, and differences

between lysimeter and METRIC computation were only 1 mm. The standard deviation of differences between METRIC and lysimeter over the time periods represented by each satellite image averaged about 20%. The standard deviation of differences from May – September was 13%. In comparison, a commonly quoted standard error for *ET* prediction equations that are based on weather data, for example, Penman or Penman-Monteith-types of equations, is about 10% for daily estimates (Wright and Jensen 1978).

The “hot” and “cold” pixels of METRIC (Allen et al., 2007a) were selected from areas that were 5 km to 30 km distance from the Kimberly lysimeter site and were therefore completely independent of the lysimeter field and conditions. The difference between METRIC (714 mm) and the lysimeter measurement (718 mm) was less than 1% for the growing season *ET* of the sugar beet crop. It appears that many of the differences occurring on individual dates were randomly distributed, and tended to cancel. The random components and reasons for canceling are described in Allen et al. (2005, 2007a).

3. APPLICATIONS FOR WATER RESOURCES

3.1. Idaho applications

Nine separate applications and usage of the METRIC *ET* model and data have been made in Idaho by the Idaho Department of Water Resources (IDWR) and University of Idaho. These applications have been made to: 1) estimate water budgets for hydrologic modeling, 2) monitor compliance with water rights, 3) support water resources planning, 4) estimate aquifer depletion, 5) support ground-water model calibration and operation, 6) estimate water use by irrigated agriculture, 7) estimate historical water use for water rights transfers, 8) develop populations of *Kc* curves and to establish mean *Kc* curves for south-central Idaho, and 9) evaluate relative performance of an irrigation

1) Water Budgets. Water budgets have been made for large portions of the lower Boise Valley in Idaho and the eastern Snake Plain Aquifer in Idaho to improve accuracy of hydrologic models and projections of effects of system management. The U.S. Bureau of Reclamation and IDWR have improved quantification of irrigation diversions from the Boise River and irrigation return flow into the river. The third main component of the water balance, *ET*, has been quantified using monthly and annual *ET* maps derived from METRIC to better calibrate remaining components. The Boise Valley has experienced rapid population growth and changing water consumption and the improved water balance is important for current management and for future planning (Petrich, C.R., 2004a, b; Interim Legislative Committee on Natural Resources, 2004).

2) Water Rights. IDWR has tested and implemented a methodology to identify diversions that do not have a water right by using water right place-of-use polygons and Landsat TM false-color composite data in GIS. However, the technical means to identify someone using water “in excess of the elements or conditions of a water right” is more problematic. IDWR has tested METRIC as an operational regulatory tool for administering water rights to identify those fields onto which water was applied in violation of some aspect of the water right, in this case the maximum rate of diversion. The 2002 test covered part of the Eastern Snake River Plain, an area in Landsat path-row 39/30. The test was a comparison of permitted groundwater pumping rates with *ET* for water-right places-of-use (POU) during the period of peak water demand in July. The comparison was done for 426 water rights in the study area and required comparing the theoretical depth of water applied to each area associated with a POU for the timeframe with the depth of *ET* as determined by METRIC. The test utilized METRIC *ET* from 2 Landsat images taken

16 days apart, where *ET* results were made available to water rights analysts within 14 days of the second overpass. Eighteen potential violations were identified, of which fifteen turned out to be false due to problems with the IDWR water rights file. The enforcement process using METRIC was demonstrated to offer a significant improvement over the present method that uses electrical power records. METRIC data can be processed for analysis during the same irrigation season, which allows enforcement actions to be brought in a timely manner. Analysis of power meter records generally cannot be accomplished during the irrigation season due to the reporting protocols and restrictions on personnel time (T. Morse, 2004, pers. comm.).

3) Aquifer Depletion and 4) Ground-water Modeling. The Idaho Water Resources Research Institute (IWRRI) associated with the University of Idaho has recently recalibrated MODFLOW ground-water models for the eastern Snake River Plain (ESRP) aquifer (Cosgrove et al., 2004) and for the Boise Valley aquifer (Petrich, 2004a,b). Spatial *ET* information derived from METRIC (Morse et al., 2001, Allen et al., 2001, Kramber, 2002) significantly improved accuracy of estimated distribution and quantities of depletions from the aquifers caused by pumping, as well as improving estimates of incidental recharge to the aquifers stemming from irrigation diversions from the Snake and Boise Rivers. The result was more accurately calibrated ground-water flow models that are being used in large-scale mitigative and litigious studies involving conjunctive use of ground water and surface water resources.

5) Water use by irrigated agriculture. Historically, surface water diversions have been closely monitored within Idaho, while ground water diversions were not monitored. There are approximately 300 monitored diversions from the Snake River that irrigate approximately 647,500 ha on the Eastern Snake River Plain. The eastern half of this same area also supports approximately 200,000 ha of ground water irrigation from approximately 5,000 wells. From a logistical point alone, monitoring ground-

water use is a large endeavor, and the majority of these wells are not equipped with flow-measurement devices, so that electrical power consumption records must be utilized to estimate water use.

To assess relative uncertainty in the quantification of depletions by pumping, IDWR evaluated correlations between METRIC *ET* and ground-water use estimated using electric power consumption factors (*PCF*). An estimated 98% of ground water is pumped from the region of interest using electrical power. The *PCF* values are unique to each farm irrigation system and are developed using single or periodic measurement of farm irrigation system discharge and associated electrical power consumption. Seasonal volumes of ground water pumped by farms are then estimated by summing power consumption over the season and multiplying by the farm *PCF*'s. The analysis evaluated *ET* from the field or fields covered by individual water rights as integrated from METRIC products and as estimated from power consumption for identified places of use (POU) in water rights. Ground-water pumping estimates for 184 POUs vs. *ET* from METRIC, less estimated effective precipitation (*P_{eff}*) during the growing season, are shown in Figure 3. While the r^2 for the relationship is only 0.14, some relation is evident ($p=0.70$). The relationship would shift upward for some POU's if adjusted for consideration of pre- and post season irrigation by farmers to build soil moisture that was not included in seasonal power consumption totals. Points showing zero or nearly zero pumping but substantial *ET* reflect underreporting of power consumption data or use of some alternative water supply. Discussions within IDWR have placed more confidence in the METRIC results than in the pumping records for use in estimating net aquifer depletion due to questions concerning repeatability and consistency of power consumption factors, since these change with system management changes by farmers and with ground-water surface drawdown during the growing season, whereas a constant *PCF* is assumed by IDWR.

IDWR has estimated a 5:1 cost advantage of using METRIC and Landsat coverage to estimate ground-water depletions as compared to the current usage of *PCF* that require occasional pump discharge measurements and system audits and reporting (T. Morse, 2003, personal communication).

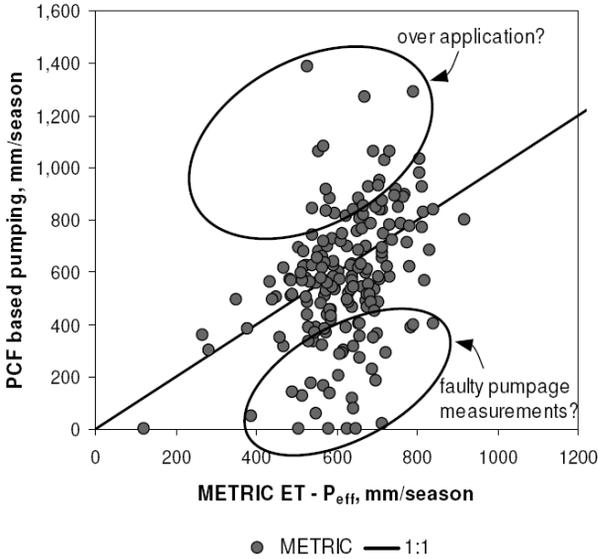


Figure 3. Ground-water pumpage determined from power consumption records vs. ET derived from METRIC for the period April-October 2000. (adapted from Allen et al., 2007b).

6) Historical water use for water rights transfers. Seasonal METRIC *ET* maps for southern Idaho have been integrated over irrigation project areas by IDWR to quantify historical water use by irrigation projects. The historical water use has been used during negotiated retirements or transfers of water rights and associated dry-up of some high-lift irrigation projects along the Snake River to release consumptive use components to downstream endangered species mitigation. Consumptive components are utilized in buyout and assessments since non-consumed components already return back hydrologically to the Snake

River. ET integrated from METRIC, less ET from natural rainfall, has been compared to historical pumping records by farmers and with traditional crop coefficient based estimates during negotiations to resolve differences in estimates of consumed volumes for purchase.

7) Populations of crop coefficients and mean Kc curves.

Satellite image scale maps of ET and $ETrF$ have enabled us to investigate statistical behavior of ET and Kc for large populations of fields. A study by Tasumi et al., (2005a) evaluated distributions of Kc by specific crop type over space and time for large numbers of fields in southern Idaho using ET maps created by METRIC. Crop types were determined from a series of satellite-derived vegetation indices ($NDVI$) using combination of supervised and unsupervised classification based on a population of ground-truthed crop types. The distribution of Kc had a strong relation to $NDVI$. However, variation in Kc was found to be substantially larger than the variation in $NDVI$ because of the impacts of random wetting events, especially during initial and development growth stages that are not reflected in $NDVI$. The large variation in Kc is illustrated in Figure 4 a-c for crops of potatoes, sugar beets and winter grain (wheat and barley). Each individual point in the figures represents $ETrF$ (i.e., Kc) sampled from an individual field on a particular image date. Twelve Landsat images were processed during 2000 and were used to define seasonal Kc curves. The heavy lines and symbols in Figure 4a-c represent Kc averaged over all sampled fields and approximate average, actual Kc for the specific crop for the southcentral Idaho region for year 2000.

Bell-shaped curves in Figures 4a-c plotted vertically on each image date are smoothed probability density functions representing the distribution of individual Kc values. Distributions were wider and more skewed during initial and late portions of growing seasons when evaporation from soil is a dominant factor. During midseason periods with nearly complete or full ground cover, effects of wet soil surfaces

are largely suppressed and the distributions of K_c are more tightly grouped and with less skewness. Impact of pre-season precipitation on soil evaporation in mid-March (first image date) is visible for all crops, and especially for winter grain, which exhibited higher K_c in March due to vegetation growth prior to winter dormancy. Residual evaporation following harvest of the winter grain crop is expressed as positive values for K_c during August and September (days 230 on). Effects of typically four harvests (cuttings) of alfalfa during the growing season are evident in the seasonal patterns in K_c observed for alfalfa.

8) Relative performance of irrigation projects.

Quantification of evapotranspiration over large areas is valuable for monitoring relative performance of irrigation projects, where total ET from a project can be compared against total diversions. The following illustrates a monitoring process for the 106,000 ha (261,000 acre) Twin Falls Canal Company project in northern Twin Falls County of Idaho. Irrigation water is diverted by the Company from the Snake River and is transported via three primary gravity canals. Within the 106,000 ha tract, approximately 4,300 ha are classified as city or town and 7,200 ha are identified as canyon/riparian, leaving approximately 93,500 ha classified as potentially irrigated agricultural lands (Allen and Robison, 2004). Of these 93,500 ha, gravity delivery is possible to 81,700 ha (202,000 acres). The primary farm irrigation method is furrow irrigation on silt loam soils and major crops are alfalfa, sugar beets, winter and spring grain, corn, beans, peas and potatoes. This particular analysis for Twin Falls Canal Company was done at the request of the company to help them identify constraints to delivery of water during specific months and to assess the impacts of drought and reduced divertable river supplies in 2003 on project ET .

Landsat images were processed for the Twin Falls regions for the 2000 and 2003 growing seasons and ET for these years was compared against net diversions by the project. In 2003, with the demise

of usable images from the Landsat 7 satellite (launched in 1998 and damaged in May 2003), only Landsat 5 images were available, and no cloud-free Landsat 5 images were taken during September – October. Therefore, only the April – August period of 2003 was evaluated. For the entire 2000 irrigation season, March through October, the canal company diverted approximately 1440 million m³ (1,165,000 acre feet) compared with 722 million m³ (585,000 acre-feet) of *ET* from the entire tract, determined by integrating seasonal *ET* maps from METRIC over the canal coverage area. The seasonal *ET* volume totaled 50 percent of diversions. For 2003, the April through August diversion was 1015 million m³ with an associated integrated *ET* from all zones of 562 million m³, or 55 percent of diversions.

The monthly distribution of ratios of *ET* to diversions (plus precipitation) for Twin Falls tract is shown in Figure 5. Diversions were higher in 2000 than during 2003, in contrast with the overall *ET* volumes during corresponding April – August periods, which were lower in 2000. The percentage of *ET* relative to total water supply increased by 9% for 2003 as compared with 2000 for April – August. When rainfall during the April – August period were considered by adding rainfall volumes to diversions, ratios of *ET* to diversions was 40 and 46% for 2000 and 2003. These values are within 6% of each other because of higher rainfall volumes in 2003. The fractions of diversions plus precipitation that is evaporated are considered to be reasonable given surface irrigation methods and long lengths of canals. The non-evaporated fractions of diversions are stored in soil, contribute to ground water recharge, or return to the Snake River via surface and subsurface flows.

3.2. Applications in the Imperial Valley

Evapotranspiration maps have been created for much of Imperial Valley, California using METRIC and Landsat 7 images for the January-March periods of 2002 and 2003 (Allen et al., 2003).

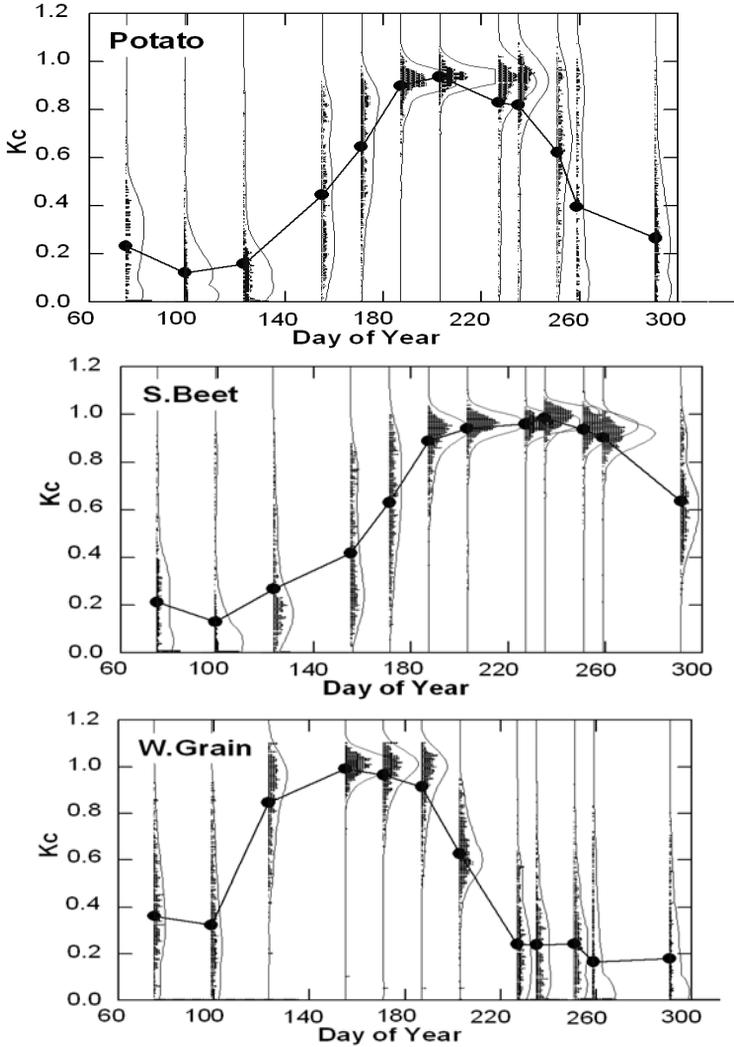


Figure 4. Values of K_c sampled from hundreds of fields (small dots) derived using METRIC images for 12 satellite image dates during 2000 in south-central Idaho (Twin Falls) and averages over all fields (large dots) for a) potatoes, b) sugar beets and c) winter grain (adapted from Tasumi et al. 2005a).

One use of the high resolution maps from Landsat was to compare *ET* from “lower” ends of surface irrigated fields in Imperial Irrigation District with *ET* from “higher” ends of the same fields to assess whether *ET* from lower ends of surface irrigated fields suffered due to low irrigation uniformity or from effects of salinity and inadequate leaching of salts. More than 4000 fields were sampled after buffering in 75 m from field boundaries to avoid sampling Landsat *ET* pixels that may have suffered from some thermal contamination from areas outside the field. Results are shown in Figure 6 for the January – March 2003 period, where vegetation amounts, as represented by the *NDVI* index are plotted for the low quarters of fields vs. *NDVI* for high quarters of fields and *ETrF* for low quarters of fields are plotted vs. *ETrF* for high quarters of fields. As shown in Figure 6, no significant differences were found between *NDVI* nor *ETrF* between high quarters of fields and low quarters, indicating that water salinity, coupled with irrigation uniformity was not causing reduction in crop growth and *ET*.

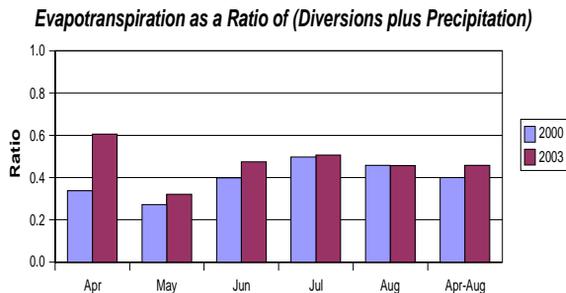


Figure 5. Monthly ratios of *ET* to diversions by the Twin Falls tract and precipitation during 2000 and 2003 (from Allen and Robison 2004).

However, because the lowest and highest 75 m of each field were not included in the sampling and analysis, some impacts typically displayed at the extreme ends of fields might have gone undetected. Other uses of METRIC in Imperial Valley were to quantify *ET* from riparian systems and from city land uses to improve *ET* estimates used in project water balances.

3.3. Applications along the Middle Rio Grande

METRIC was applied with Landsat 5 and 7 images during 2002 to spatially and temporally quantify *ET* from irrigated crops and riparian vegetation (native and invasive tree species and wetlands) along the Middle Rio Grande river of northern and central New Mexico. The high resolution of Landsat was extremely valuable for assessing *ET* on a field-by-field basis and for estimating *ET* from riparian (tree) systems that were often less than 100 m in width. One outcome of the application was the assessment of amounts of evaporation occurring from abandoned agricultural fields along the Middle Rio Grande valley having high water table conditions. The high water tables have precluded farming operations and supply water to the surface for nonbeneficial evaporation. Figure 7 shows monthly evaporation (*ET*) from identified waterlogged fields along the Middle Rio Grande River of New Mexico as determined by METRIC along with monthly precipitation. The evaporation from the high water table soils exceeded precipitation during all months, especially those during springtime. Reducing these evaporation losses by lowering water tables would constitute a real conservation of water in the valley.

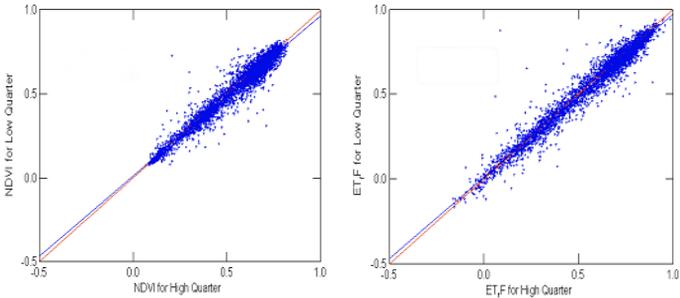


Figure 6. NDVI index for the low quarters of fields vs. NDVI for high quarters of fields (left) and ETrF for low quarters of fields vs. ETrF for high quarters of fields (right) for the January – March 2003 period for 4000 fields within Imperial Irrigation District of California (adapted from Allen et al., 2003).

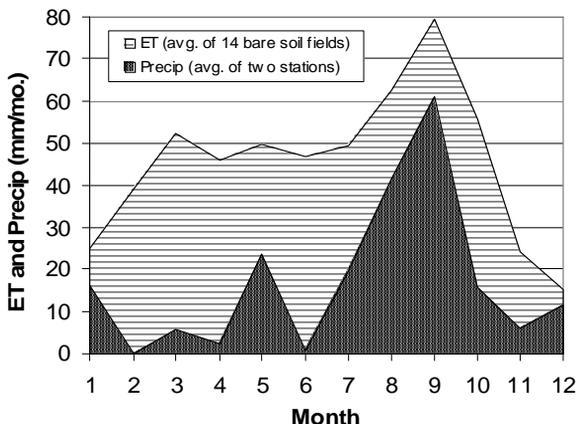


Figure 7. Monthly evaporation (ET) from waterlogged fields along the Middle Rio Grande River of New Mexico as determined by METRIC vs. monthly precipitation.

4. SUMMARY AND CONCLUSIONS

METRICTM and SEBALTM use digital image data collected by Landsat and other remote-sensing satellites that record thermal infrared, visible and near-infrared radiation from the earth's surface. *ET* is computed on a pixel-by-pixel basis for the instantaneous time of the satellite image. The process is based on a complete energy balance for each pixel, where *ET* is predicted from the residual amount of energy remaining from the classical energy balance, where $ET = \text{net radiation} - \text{sensible heat to the soil} - \text{sensible heat to the air}$.

In comparisons with evapotranspiration lysimeters in the Bear River basin and near Kimberly, ID, differences between METRIC and the lysimeters for growing seasons were less than 4%. These comparisons represent a small sample, but are probably typical. Errors as high as 10 to 20%, if distributed randomly, could probably be tolerated by state water resources departments and other water management entities. Comparisons of METRIC *ET* with weighing lysimeter data at

Kimberly, Idaho from the 1980's and early 1990's provided valuable information on the conditions required to obtain maximum accuracy with METRIC and best procedures for obtaining ET monthly and annually. ET was calculated for the entire Snake River Plain of SE Idaho and has improved the calibration of ground-water models by providing better information on ground-water recharge as a component of water balances. Ground-water pumpage from over 5,000 wells has been estimated using ET from METRIC through correlations between ET and pump discharge at measured wells and then extrapolating over large areas using ET maps from METRIC.

Reasons why METRICTM and SEBALTM are attractive to water resources management and irrigated agriculture are:

- METRICTM and SEBALTM calculate *actual* ET rather than *potential* ET and does not require knowledge of crop type (no satellite-based crop classification is needed).
- METRICTM and SEBALTM rely heavily on theoretical and physical relationships, but provides for the introduction and automated calibration of empirical coefficients and relationships to make the process operational and accurate.
- The use of reference ET_r in calibration of METRIC and the use of $ET_r F$ in extrapolation to 24-h ET provides general equivalency and congruency with ET as estimated using the traditional $K_c ET_r$ approach, where ET_r is alfalfa reference ET calculated using the ASCE-EWRI standardized Penman-Monteith equation (ASCE-EWRI, 2005). This congruency is valuable for using ET maps generated by METRIC water rights management where water rights are based on previous $K_c ET_r$ calculations.
- METRIC is auto-calibrated internally for each image using ground-based calculations of ET_r (made using weather data)

where accuracy of the ET_r estimate has been established by lysimetric and other studies in which we have high confidence.

ET maps created using METRICTM, SEBALTM and similar remote-sensing based processing systems may some day be routinely used as input to daily and monthly operational and planning models for reservoir operations, ground-water management, irrigation water supply planning, water rights regulation, and hydrologic studies.

5. ACKNOWLEDGEMENTS

The authors acknowledge long term lysimeter data collection by Dr. James L. Wright, USDA-ARS, Kimberly, Idaho and Dr. Robert W. Hill, Utah State University, that provided the means for comparing ET measurements with ET estimated by METRIC. Funding for the various applications and development came from NASA, Raytheon, U.S. Department of Agriculture, Idaho Dept. Water Resources, U.S. Bureau of Reclamation, Metropolitan Water District of Southern California, U.S. Dept. of Justice, Keller-Bliesner Engineering, Idaho Agricultural Experiment Station, Idaho Engineering Experiment Station and Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria of Spain. The authors acknowledge the helpful comments and suggestions by reviewers to improve clarity of this manuscript.

6. REFERENCES

- ALLEN, R.G and ROBISON, C.W. (2004). Comparison of ET by METRIC with Canal System Diversions. unpublished internal report, University of Idaho Kimberly Research and Extension Center, Kimberly, ID (14 p).
- ALLEN, R.G., PRUITT, W.O. and JENSEN, M.E. (1991a). Environmental Requirements of Lysimeters. In: R.G Allen et al. (ed) *Lysimeters for Evapotranspiration and Environmental*

Measurements, ASCE, Reston, VA, ISBN 0-87262-813-2, pp. 170-181.

ALLEN, R.G., HOWELL, T.A., PRUITT, W.O., WALTER, I.A. and JENSEN, M.E. (1991b). (Editors). *Lysimeters for Evapotranspiration and Environmental Measurements*, Proceedings ASCE International Symposium on Lysimetry, Honolulu, HA, July 23-25, 1991. ISBN 0-87262-813-2, 444 p., ASCE, Reston, VA.

ALLEN, R.G., TASUMI, M., TREZZA, R., WRIGHT, J.L., MORSE, A. and KRAMBER, W.J. (2001). Application of the SEBAL Methodology for Estimating Evapotranspiration and Consumptive Use of Water Through Remote Sensing, Part II: Details on Validation with Lysimeters and Application to the Eastern Snake River Plain of Idaho. Submitted to The Raytheon Systems Company Earth Observation System Data and Information System Project, West Marlboro, MD. 89 pages.

ALLEN, R.G., TASUMI, M. and LORITE-TORRES, I. (2003). High Resolution Quantification of Evapotranspiration from Imperial Irrigation District. Research Completion report (phase I) submitted to MWD, December 2003. Univ. Idaho, Kimberly, ID. 130 p.

ALLEN, R.G., TASUMI, M., MORSE, A. and TREZZA, R. (2005.) A Landsat-based Energy Balance and Evapotranspiration Model in Western US Water Rights Regulation and Planning. *J. of Irrig. and Drain. Sys.* 19:251-268.

ALLEN, R.G., TASUMI, M. and TREZZA, R. (2007a). Satellite-based energy balance for mapping evapotranspiration with internalized calibration (METRIC) – model. *ASCE J. Irrig. and Drain. Engrg.* 133(4):380-394.

ALLEN, R.G., M. TASUMI, A.T. MORSE, R. TREZZA, W. KRAMBER, I. LORITE and C.W. ROBISON. 2007b. Satellite-based energy balance for mapping evapotranspiration with internalized calibration (METRIC) – Applications. *ASCE J. Irrig. and Drain. Engrg.* 133(4):395-406.

ASCE – EWRI. (2005). The ASCE Standardized reference evapotranspiration equation. ASCE-EWRI Standardization of Reference Evapotranspiration Task Comm. Report, ASCE Bookstore, Reston, VA, ISBN 078440805, Stock Number 40805, 216 pages.

BASTIAANSEN W.G.M. (1995). *Regionalization of surface flux densities and moisture indicators in composite terrain: A remote sensing approach under clear skies in Mediterranean climates*. Ph.D. Diss., CIP Data Koninklijke Bibliotheek, Den Haag, the Netherlands. 273 p.

BASTIAANSEN, W.G.M., MENENTI, M., FEDDES, R.A. and HOLTSLAG, A.A.M. (1998a). A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL): 1. Formulation. *J. Hydrology*, 212-213:198-212.

BASTIAANSEN, W.G.M., PELGRUM, H., WANG, J., MA, Y., MORENO, J., ROERINK G.J. and VAN DER WAL, T. (1998b) The Surface Energy Balance Algorithm for Land (SEBAL): Part 2 validation, *J. Hydrology*, 212-213:213-229

BASTIAANSEN, W.G.M. (2000). SEBAL-based sensible and latent heat fluxes in the irrigated Gediz Basin, Turkey. *J. Hydrology*, 229:87-100.

BASTIAANSEN, W.G.M., M.D. AHMAD and Y. CHEMIN (2002). Satellite surveillance of evaporative depletion across the Indus Basin, *Water Resources Research*, vol. 38(12): 1273-1283

BASTIAANSEN, W.G.M., NOORDMAN, E.J.M., PELGRUM, H., DAVIDS, G., THORESON, B.P. and ALLEN, R.G. (2005). SEBAL Model with Remotely Sensed Data to Improve Water-Resources Management under Actual Field Conditions. *ASCE J. Irrig. and Drain. Engineering* 131(1):85-93.

BASTIAANSEN, W.G.M. and N. RAO HARSHADEEP, 2005. Managing scarce water resources in Asia: the nature of the problem and can remote sensing help?, *Irrigation and Drainage Systems* 19:

COSGROVE, D.M., CONTOR, B.A., WYLIE, A., RINEHART, N. and JOHNSON, G.S. (2004). Snake River Plain aquifer model scenario: hydrologic effects of continued 1980-2002 water supply and use conditions: “base case scenario” report by Idaho Water Resources Research Institute, University of Idaho, Moscow, ID., submitted to the Idaho Department of Water Resources. 19 pages. <http://www.if.uidaho.edu/~johnson/ifiwri/projects.html#model> (last visited Feb. 5, 2007).

HILL, R.W., ALLEN, L.N., BROCKWAY, C.E., ROBISON, C.W., ALLEN, R.G. and BURMAN, R.D. (1989) Duty of Water Under the Bear River Compact: Field Verification of Empirical Methods for Estimating Depletion. Research report 125. *Utah Agricultural Experiment Station*, Utah State University, Logan, Utah.

INTERIM LEGISLATIVE COMMITTEE ON NATURAL RESOURCES. (2004). Treasure Valley working group final report. Idaho Legislature, Statehouse, Boise, Idaho, 15 pages.

KRAMBER, W.J. (2002). Developing evapotranspiration data for Idaho’s Treasure Valley using Surface Energy Balance Algorithm for Land (SEBAL), Idaho Department of Water Resources, Boise, Idaho. 12 p.

MORSE, A., TASUMI, M., ALLEN, R.G. and KRAMBER, W.J. (2000). Application of the SEBAL Methodology for Estimating Consumptive Use of Water and Streamflow Depletion in the Bear River Basin of Idaho through Remote Sensing. Synergy Phase 1 Final Report, IDWR, Boise, ID, 108 p.

MORSE, A., ALLEN, R.G., TASUMI, M., KRAMBER, W.J. and WRIGHT, J.L. (2001). Application of the SEBAL Methodology for

Estimating Evapotranspiration and Consumptive Use of Water Through Remote Sensing, Part I: Summary Report. Submitted to The Raytheon Systems Company Earth Observation System Data and Information System Project. West Marlboro, MD. 45 pages.

MORSE, A., KRAMBER, W.J., ALLEN, R.G. and TASUMI, M. (2004). Use of the METRIC Evapotranspiration Model to Compute Water Use by Irrigated Agriculture in Idaho. Proceedings of the 2004 Int. Geoscience and Remote Sensing Symposium, Anchorage, AK.

PETRICH, C.R. (2004a). Simulation of Ground Water Flow in the Lower Boise River Basin, Idaho Water Resources Research Institute, Boise, ID. Research Report IWRRI-2004-02.

PETRICH, C.R. (2004b). Treasure Valley hydrologic project executive summary. Idaho Water Resources Research Institute, Boise, ID. Research Report IWRRI-2004-04. 38 p. http://idahoenergystar.com/hydrologic/info/pubs/misc/tvhp/TVHP_ExecSummary-final.pdf

PRUITT, W.O. and LOURENCE, F.J. (1985). Experiences in lysimetry for ET and surface-drag measurements. In: *Advances in Evapotranspiration*, ASAE, Public No. 14-85, St. Joseph, MI. p. 51-69.

PRUITT, W.O. (1991). Development of crop coefficients using lysimeters. In: R.G. Allen et al. (ed) *Lysimeters for Evapotranspiration and Environmental Measurements*, ASCE, Reston, VA. ISBN 0-87262-813-2, pp. 182-190.

TASUMI, M. 2003. Progress in operational estimation of regional evapotranspiration using satellite imagery. Ph.D. dissertation, Univ. of Idaho, Moscow, ID 357 pp.

TASUMI, M., ALLEN, R.G, TREZZA, R. and WRIGHT, J.L. (2005a) Satellite-based energy balance to assess within-population variance of crop coefficient curves.. *ASCE J. Irrig. and Drain. Engineering*. 131(1):94-109.

Tasumi, M., Trezza, R., Allen, R.G. and Wright, J.L. (2005b). Operational aspects of satellite-based energy balance models for irrigated crops in the semi-arid U.S., *Irrig. and Drain. Sys.* 19:355-376. WATERWATCH. (2006). "SEBAL2004 version announced." December 2003 news release. <http://www.waterwatch.nl/> (last visited: April 20, 2006).

WRIGHT, J.L. (1982). New Evapotranspiration Crop Coefficients. *J. of Irrig. and Drain. Div. (ASCE)*, 108:57-74.

WRIGHT, J.L. (1996). Derivation of Alfalfa and Grass Reference Evapotranspiration. In *Evapotranspiration and Irrigation Scheduling*, C.R. Camp, E.J. Sadler, and R.E. Yoder (ed.). Proc. Int. Conf., ASAE, St. Joseph, MI. p. 133-140.

WRIGHT, J.L. and JENSEN, M.E. (1978). Development and evaluation of evapotranspiration models for irrigation scheduling. *Trans. ASAE* 21(1):88-96.

TENSIÔMETRO: CARACTERÍSTICAS, INOVAÇÕES E APLICAÇÕES

Tadeu Miranda de Queiroz; Tarlei Arriel Botrel

1. INTRODUÇÃO

A água é um recurso natural indispensável para a vida na Terra e cada vez mais escasso e caro. As atividades agrícolas são responsáveis por cerca de 80% do consumo mundial de água e a irrigação, neste contexto, tem sido o principal alvo de críticas. Portanto, a preocupação com o manejo, para a utilização racional do recurso hídrico é primordial.

Os critérios de manejo de água normalmente utilizados são, na maioria dos casos, baseados em medidas no solo, na planta e na atmosfera. Os que se baseiam em medidas no solo, se fundamentam na determinação direta ou indireta do teor de água presente no substrato, enquanto os que são baseados em medidas na planta se estabelecem no monitoramento do potencial hídrico, na resistência estomática, na temperatura da folha por meio de termômetro

infravermelho e outros; já os que têm como base o clima variam desde simples medidas de evaporação de água em tanque, como o Classe “A”, até complexas equações para estimativa da evapotranspiração. A grande limitação dessas equações encontra-se na precisão das estimativas, que dependem diretamente da acurácia das variáveis e da precisão dos modelos utilizados, os quais vêm sendo implementados em condições climáticas e agrônômicas muito diferentes daquelas em que foram concebidas (Rocha; Guerra; Azevedo, 2003).

Para medida indireta do teor de água do solo o tensiômetro é um dos instrumentos mais utilizados. Este instrumento mantém muitas de suas características originais ficando as inovações restritas aos elementos utilizados para a medição da tensão, que neste caso tem apresentado a tendência de ser feita de forma eletrônica para atender às necessidades de automação da agricultura moderna.

2. O TENSIÔMETRO

É um instrumento que serve para a determinação do momento oportuno de irrigação, através da medida indireta da umidade do solo e tem sido utilizado para esse fim por ser um aparelho simples e de fácil utilização, apresentar baixo custo, não requerer calibração ou qualquer fonte de potência e fornecer leituras instantâneas, desde que devidamente instalados e manejados (Faria & Costa, 1987; Assis Júnior, 1995).

Seu nome advém do fato de se utilizar, também, a palavra tensão para designar o potencial matricial da água no solo. A diferença é que o termo tensão já inclui em seu significado o valor numérico negativo de potencial mátrico (Saad & Libardi, 1992b).

Constitui-se basicamente de um tubo, geralmente de PVC, mas pode também ser de acrílico, uma cápsula de cerâmica porosa, elemento vedante (rolha de borracha, cap, etc) e um elemento sensível (Manômetro) indicador da tensão existente dentro do mesmo. Seu princípio de funcionamento é bastante simples: a cápsula é ligada a

um manômetro por um tubo num sistema, cheio de água, hermeticamente fechado. Quando a cápsula porosa do tensiômetro é colocada em contato com o solo não-saturado, este succiona a água provocando uma queda de pressão ou tensão dentro do sistema. Essa tensão pode ser medida por um manômetro, obtendo-se, dessa forma, o potencial matricial da água no solo e, indiretamente, através da curva de retenção, o teor de água. O processo inverso, ou seja, o rebaixamento da tensão com o aumento da umidade do solo também ocorre e é válido. Verifica-se, porém, o efeito da histerese quando se comparam os ciclos de secagem e umedecimento do solo.

Segundo FARIA & COSTA (1987), o tensiômetro tem sido estudado desde a introdução do conceito de potencial matricial feito por Buckingham em 1907, seguido pelo início do seu desenvolvimento por Gardner et al. em 1922 e por aperfeiçoamentos realizados por Richards em 1928, Heck em 1934 e Rogers em 1935. Embora modificações tenham sido feitas no sentido de aumentar a confiabilidade de suas respostas, simplificar as observações e facilitar a instalação e o manejo, as características externas do tensiômetro pouco mudaram ao longo do tempo o que o tornou uma ferramenta barata de pesquisa. De acordo com os mesmos autores, este aparelho tem ampla utilização em áreas irrigadas, havendo, porém, a necessidade de divulgação e adaptação desta técnica em locais onde se iniciam práticas de irrigação.

3. TIPOS DE TENSIOMETROS

Os agricultores brasileiros têm à sua disposição, atualmente, diferentes modelos e marcas de tensiômetros nacionais e importados. Mas, por se tratar de um instrumento simples é de fácil construção e pode fabricado pelo próprio irrigante, a um custo menor. Trabalhos realizados no Brasil (JUNQUEIRA; OLIVEIRA e VALADÃO 1998; OLITA, 1976) mostram que a construção de tensiômetros

artesanalmente e leva a um bom resultado com a redução de até 60 % no custo do mesmo. Junqueira; Oliveira & Valadão (1998) avaliaram o desempenho de cápsulas e vacuômetros nacionais e verificaram que o funcionamento destes foi adequado sendo recomendados para a construção artesanal de tensiômetros.

Os tensiômetros podem ser classificados quanto ao material utilizado na fabricação, quanto ao comprimento útil, quanto ao tipo de elemento sensor utilizado para indicar a tensão, etc. Quanto ao elemento sensor se classifica em: Mercúrio, Vacuômetro, Tensímetro e Eletrônico (Figura 1).

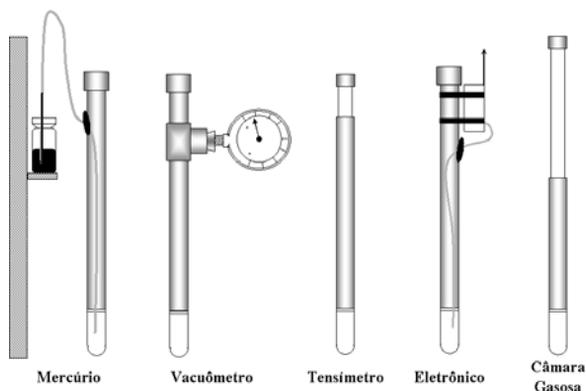


Figura 1 – Tipos de tensiômetros definidos pelos elementos sensores utilizados para leitura da tensão.

3.1. Tensiômetro de Mercúrio

Existem muitos modelos de manômetros empregados na fabricação de tensiômetros. O manômetro de coluna de mercúrio é o mais antigo. Heck (1934), um dos primeiros usuários deste aparelho, mostra em seu trabalho uma foto do tensiômetro utilizado, o qual, era instrumentado por um manômetro de coluna de mercúrio do tipo tubo em “U”.

O manômetro de mercúrio é considerado o mais preciso e, por-

tanto, indicado para aplicações em trabalhos de pesquisa (padrão) e é ainda utilizado em larga escala (Bergamaschi et al., 2004; Bianchi, 2004; Angelotti Netto & Fernandes, 2005).

Na Figura 2 é mostrado o esquema de instalação e cálculo da tensão para o tensiômetro de mercúrio.

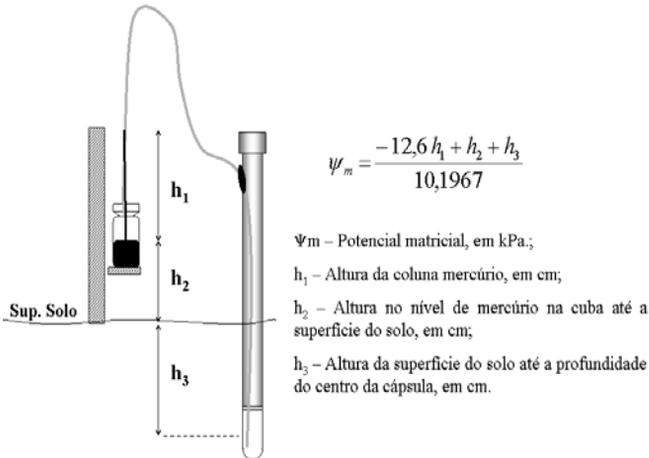


Figura 2 – Esquema de instalação e equação para o cálculo da tensão em tensiômetros com manômetro de mercúrio.

A constante 10,1967 que aparece na equação é devido à conversão de cm.c.a. para kPa. Em aplicações práticas o valor dessa constante pode ser arredondado para 10 sem prejuízo, tanto é, que muitos livros e manuais já a mostram dessa forma.

O diâmetro do recipiente onde se coloca o mercúrio, popularmente chamado de cuba, e o diâmetro do microtubo tem ligeira influência no cálculo da tensão, haja vista que na medida em que o mercúrio sobe pela coluna (microtubo) o seu nível abaixa mudando a referência de medida e alterando h_1 para mais e h_2 para menos. Observa-se, pela Figura 1, que h_1 é multiplicado por 12,6. Entretanto, o

rebaixamento é proporcional à altura da coluna de mercúrio. Fazendo-se uma relação entre os diâmetros do microtubo e da cuba pode-se deduzir facilmente uma equação para considerar este efeito (Eq. 1). Maiores detalhes podem ser obtidos em Libardi (2004).

$$h_c = h_c^* - \left(\frac{d^2}{D^2 - d^2} \right) h_1^* \quad (\text{eq. 1})$$

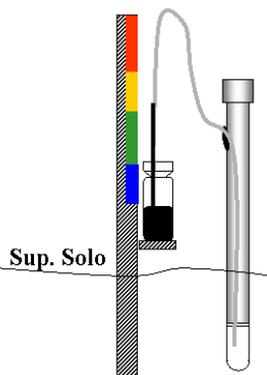
em que: h_c - altura do nível do mercúrio na cuba até a cápsula porosa ($h_1 + h_2$), após o rebaixamento do nível do mercúrio na cuba, devido ao aumento da tensão, em cm; h_c^* - altura do nível do mercúrio na cuba até a cápsula porosa ($h_1 + h_2$), antes do rebaixamento do nível do mercúrio na cuba, devido ao aumento da tensão, em cm; h_1^* - altura da coluna de mercúrio medida a partir da referência adotada antes do rebaixamento do mercúrio na cuba, em cm; D - diâmetro da cuba de mercúrio, em cm; d - diâmetro do microtubo, em cm.

Libardi (2004) apresenta também outras formas de instalação de tensiômetros de mercúrio.

Ao longo do tempo, desde a criação do tensiômetro, o mesmo sofreu adaptações. Como exemplo, cita-se Saad & Libardi (1992b) que introduziram o conceito de tensiômetros de faixas (Figura 3) para auxiliar o irrigante na tomada de decisão. O método proposto por estes autores consiste em dividir a coluna de mercúrio representativa dos 80 % da Capacidade de Água Disponível (CAD) em 4 fixas coloridas (azul, verde, amarela e vermelha) que indicam o estado de umidade do solo. Deste modo não há necessidade do irrigante efetuar leituras e calcular a umidade do solo. A decisão do momento de irrigar é tomada com base na cor que indica o momento da irrigação.

Segundo os autores, a metodologia foi bem aceita pelos irrigantes que realizaram, no município de Guairá-SP, o manejo da irrigação na cultura do feijoeiro, em pivô central, de forma satisfatória. Esse tipo de tensiômetro já foi utilizado para manejo da irrigação em aproximadamente

3.000 ha irrigadas por pivô central, o que confirma a sua eficácia.



Azul – O topo da coluna indica que o solo está na capacidade de campo.
Verde – O topo da coluna indica que o solo está com 50% da água disponível.
Amarelo – O topo da coluna indica que o solo está com 30% da água disponível.
Vermelho – O topo da coluna indica que o solo está com apenas 20% da água disponível.

Figura 3 – Esquema ilustrativo do tensiômetro de faixas.

Medici (1997), outro exemplo, idealizou um equipamento denominado “acionador automático de sistemas de irrigação”, o qual é constituído de um tensiômetro de coluna de mercúrio contendo contatos elétricos posicionados na região de trânsito (microtubo) do mercúrio. O sistema proposto foi avaliado por Carvalho et al. (2001) que concluíram que o sistema mostrou-se eficiente necessitando de pouca manutenção a fim de garantir o contato elétrico e o acionamento automático. Medici (1997), recomenda a utilização do sistema desenvolvido para controle da irrigação de jardins e casa de vegetação.

O sistema de automação da irrigação proposto por Medici (1997) representa uma enorme contribuição, principalmente quando se pensa no baixo custo. Entretanto, deixa a desejar na representatividade, pois utiliza apenas um sensor (tensiômetro) para o acionamento da irrigação; além de não permitir o correto controle do volume de água aplicado.

Queiroz et al. (2002) observando a dificuldade de manejo da irrigação em experimentos conduzidos em vasos na Universidade Federal de Lavras (UFLA), em Lavras – MG, idealizaram e construíram um controlador de irrigação baseado no princípio de Medici (1997), mas

que implementava um controle digital fundamentado na álgebra Booleana para melhor representatividade das leituras dos tensiômetros.



Fonte: QUEIROZ (2004).

Figura 4 – Ilustração da adaptação feita por Medici (1997).

O circuito foi projetado para operar ligado a três tensiômetros e iniciar a irrigação sempre que pelo menos dois destes estivessem indicando o momento da irrigação. Os autores preocupados com o controle preciso da lâmina aplicada adicionaram ao sistema temporizadores para limitar o volume aplicado, conseguindo excelente desempenho.

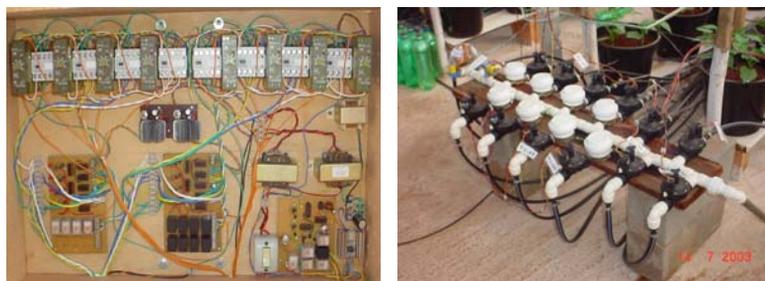


Figura 5 – Detalhe do circuito de controle desenvolvido por Queiroz (2005)

Queiroz et al. (2005) avaliaram o circuito proposto cultivando o feijoeiro comum em vasos, dentro de casa de vegetação, durante um ciclo completo da cultura, obtendo resultados satisfatórios.

3.2. Tensiômetro de Vacuômetro

Depois da coluna de mercúrio o manômetro mais conhecido e utilizado é o tipo Bourdon, também chamado, erroneamente, de

vacuômetro metálico (o mercúrio líquido também é um metal, por definição). Este apresenta, em relação ao mercúrio, a vantagem de possibilitar a leitura da tensão diretamente na escala do mostrador indicado por um ponteiro sem a necessidade da utilização de equações de conversão, necessitando apenas da correção devido à coluna de água dentro do aparelho.

Admite-se que $h_1 + h_2$ é igual ao comprimento do tensiômetro considerando-se que o mesmo está sempre cheio de água. Todavia, na prática, isso não ocorre, mas devido à dificuldade de se determinar a altura de água dentro do aparelho considera-se tal aproximação, sem prejuízo porque o erro cometido é pequeno. Neste sentido, os tensiômetros construídos com tubos de acrílico são mais vantajosos por permitir a visualização do nível d'água, mas por sua vez são bem mais caros.

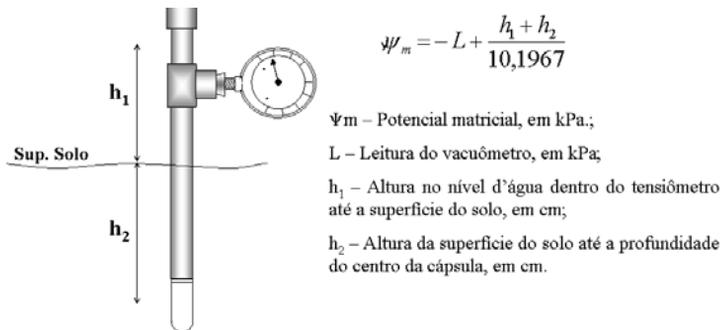


Figura 6 - Esquema de instalação e equação para cálculo da tensão em tensiômetros com vacuômetro do tipo Bourdon

Brasil et al. (2003) avaliaram o desempenho de vacuômetros de Bourdon utilizados em tensiômetros no manejo da irrigação. Os resultados encontrados pelos autores demonstraram que estes vacuômetros são precisos, com alto grau de exatidão e que possuem resolução equivalente ao tensiômetro de mercúrio, principalmente no intervalo de medidas utilizadas para o manejo da irrigação. Já

Assis Júnior (1995), cita que a utilização de tensiômetros equipados com medidores de pressão do tipo Bourdon, quando usado em grande quantidade, é alto, além de danificar-se com facilidade e requerer cuidadosa manutenção.

3.3. Tensiômetro de Punção Digital

Outros dispositivos, que não a coluna de mercúrio e o manômetro de Bordon, são utilizados como indicadores manométricos. Thiel et al. (1963) construíram um transdutor de pressão para medir pressões hidrostáticas em meio poroso. Marthaler et al. (1983) construíram e utilizaram um sistema tensiômetro/transdutor, o qual consiste de um transdutor de pressão conectado ao tensiômetro através de uma agulha de seringa, tendo um registrador digital – display de cristal líquido (LCD). A agulha, quando introduzida através de uma rolha (tampa) de borracha, presente na extremidade superior do tensiômetro, conecta uma pequena câmara deixada abaixo da tampa de borracha ao elemento sensor do transdutor. A pressão no interior da câmara equilibra-se com a pressão da água no interior do tensiômetro, a qual é mostrada em um registrador digital. Para os autores, o uso desse tipo de transdutor permite uma manutenção mais rápida e mais fácil do instrumento do que quando se usa manômetro de mercúrio, além de diminuir a influência da temperatura e a chance de danos mecânicos. O aparelho desenvolvido por Marthaler et al. (1983) hoje é conhecido, no Brasil, por tensímetro digital de punção ou simplesmente tensímetro.

Atualmente com o fácil acesso aos componentes eletrônicos e sensores, pode-se montar artesanalmente um tensímetro a um custo inferior a R\$200,00. Valor este que é pelo menos 5 vezes menor do que o de um tensímetro comercial. Experiências feitas pelos professores Dr. Luiz Artur (DEG/UFLA) e Tarlei Botrel (LER/ESALQ/USP) confirmaram o bom funcionamento deste aparelho construído

Tensiômetro: características, inovações e aplicações
 artesanalmente. Planilha de custo dos materiais necessários para cons-
 trução de um tensiômetro é apresenta em anexo.

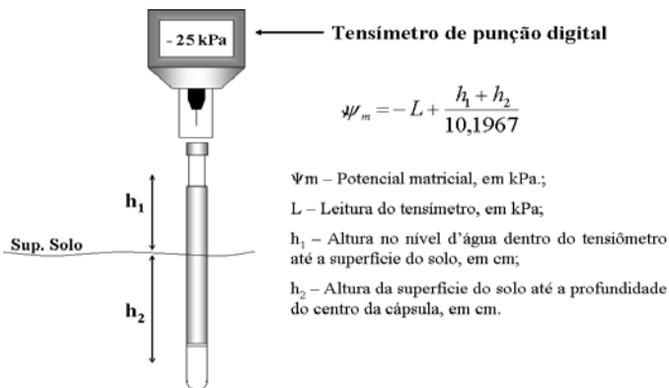


Figura 7 – Esquema de instalação e equação para cálculo da tensão em tensiômetros com tensiômetro de punção digital.

3.4. Tensiômetro Eletrônico

O tensiômetro em si não tem suas características alteradas e as modificações são feitas no sentido de automatizar as leituras. Para isso, dispositivos eletrônicos, como transdutores e microcontroladores, são adicionados ao mesmo. A última novidade é a utilização de sistemas de transmissão de dados via rádio frequência (“wireless”).

Teixeira & Coelho (2005) desenvolveram e calibraram um tensiômetro eletrônico de leitura automática utilizando para isso transdutores de pressão. Diferentemente do aparelho de Marthaler et al. (1983) que consiste de uma unidade de leitura portátil acoplável ao tensiômetro, Teixeira & Coelho (2005) propuseram a utilização de um sistema de medição da tensão para cada tensiômetro, o que permite a aquisição de dados oriundos de vários pontos ao mesmo tempo com a vantagem de poder fazê-lo via acesso remoto (“wireless”).

Para instrumentação de tensiômetros o sensor mais utilizado é o transdutor de pressão MPX5100DP fabricado pela Motorola CO (Figura 8). Este transdutor cobre uma faixa que vai de 0 a 100 kPa, contemplando perfeitamente o limite recomendado para utilização do tensiômetro, que segundo Faria & Costa (1987) e Bernardo; Soares & Mantovani (2006) é de 0 a 75 kPa. Outras vantagens são a resposta linear, a baixa histerese e o custo que, no mercado brasileiro é de aproximadamente U\$20,00, considerado baixo.

Este transdutor tem duas entradas, sendo uma para vácuo (V) e outra para pressão (M); trabalhando com as duas ao mesmo tempo obtém-se um manômetro diferencial. Seus pinos são numerados de 1 a 6, sendo o pino 1, identificado pela marca em forma de semi-circunferência, o pino de saída de sinal do transdutor. Os pinos 2 e 3 são o terra (GND) e o +Vcc (5 Vcc), respectivamente.

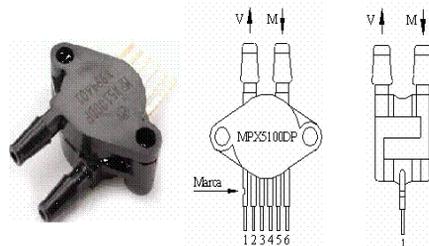


Figura 8 – Transdutor MPX5100DP e detalhe da identificação dos pinos e das entradas de acesso à câmara sensitiva.

Na Figura 9 é mostrada a curva de calibração, realizada em Piracicaba-SP, para o sensor MPX5100DP. Foram utilizados 18 sensores de um lote de 21. A curva foi construída com dados médios dos 18 sensores. Na Figura count é o valor de leitura do A/D retornado pelo microcontrolador.

A calibração do sensor pode ser feita com manômetro de ‘Peso Morto’, mas este tipo de manômetro geralmente se presta para faixas maiores de pressão. Portanto, para maior precisão, a

utilização de um manômetro de mercúrio é recomendada. Para maior segurança e confiabilidade o valor da massa específica do mercúrio pode ser corrigido pela temperatura (ver anexo).

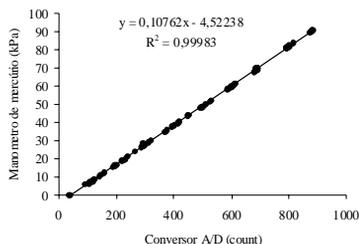


Figura 9 – Curva de calibração para o sensor MPX5100DP, feita em Piracicaba-SP.

Na Figura 10, é mostrada, esquematicamente, uma bancada que pode ser utilizada para a calibração do sensor de pressão.

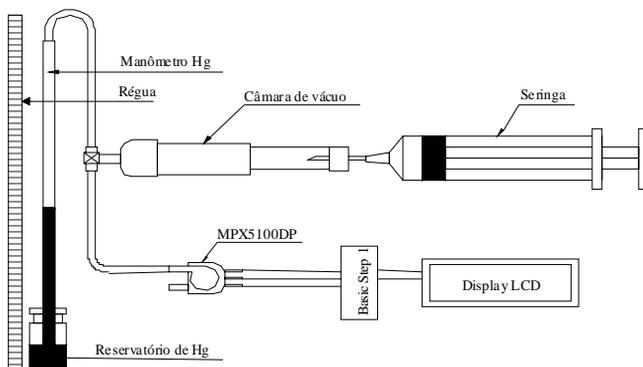


Figura 10 – Esquema de bancada utilizada para calibração do sensor MPX5100DP.

Para leitura deste sensor estão sendo utilizados, atualmente, segundo a literatura específica, microcontroladores PIC (Teixeira & Coelho, 2005) e microcontroladores Basic Step (Queiroz, 2007). A escolha é feita em função da linguagem de programação de domínio do usuário. O PIC pode ser programado em C, Bascon, etc, já o

Basic Step é programado em PBasic, que é uma linguagem mais simples e portanto, mais acessível para iniciantes. O conversor Analógico/Digital (A/D) pode ser ter resolução de 8 ou 10 “bits”, sendo o de 10 “bits” mais preciso. Neste sentido o Basic Step leva vantagem, por ter disponível no mesmo “chip” um conversor A/D de 10 “bits” com 5 canais de entrada.

Com o objetivo de verificar a eficácia do sistema de leitura eletrônica de tensiômetros utilizando o transdutor MPX5100DP e um microcontrolador Basic Step, Queiroz (2007) comparou as medidas feitas eletronicamente, com as medidas obtidas por um manômetro de mercúrio. Para isso, um tensiômetro foi montado em bancada similar à mostrada na Figura 10. A tensão foi variada de 0 a 92 kPa, por meio de uma seringa e a leitura, em vários pontos da escala, foi obtida ao mesmo tempo no manômetro de mercúrio e no Display de Cristal Líquido ligado ao microcontrolador. Utilizou-se a equação da curva de calibração do sensor mostrada na Figura 9. A Figura 11 mostra o resultado obtido, onde se observa que o sistema de leitura eletrônica é equivalente ao manômetro de mercúrio. O teste *t*, a 5% de probabilidade, mostrou que o coeficiente angular não difere de 1 e o linear não difere de 0, ou seja, os métodos de medida são estatisticamente iguais.

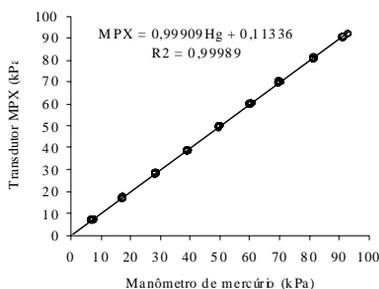


Figura 11 – Comparação das leituras realizadas pelo transdutor de pressão (MPX5100DP) e do manômetro de mercúrio.

Queiroz; Botrel & Armindo (2007) desenvolveram um tensiômetro eletrônico com transmissão de dados “wireless”. O protótipo foi testado em laboratório onde os resultados obtidos indicaram funcionamento satisfatório, havendo ainda a necessidade de se aumentar a distância de comunicação entre transmissor e receptor. Os autores obtiveram um alcance máximo de 50 m.

3.5. Tensiômetro de Câmara Gasosa

Outra maneira de estimar a tensão em tensiômetros foi descoberta por Camargo; Crohman & Camargo (1982) quando verificaram a existência de uma relação entre o tamanho da câmara gasosa no alto da coluna de líquido no interior do tensiômetro e a tensão da água no solo. Os autores mediram, ao mesmo tempo, a tensão da água no solo através de manômetros de mercúrio e a altura da câmara de ar que se formava. Foi encontrada uma relação hiperbólica entre a altura da câmara de ar e a tensão (Eq. 2).

$$\psi_m = \frac{A \cdot (h + C)}{B \cdot (h + C)} \cdot \frac{1}{10,1967} \quad (\text{eq. 2})$$

em que: ψ_m – tensão, em kPa; h – altura da câmara de ar, em cm; A, B e C – constantes obtidas na regressão, adimensionais.

Villa Nova et al. (1989) fez uma análise teórica do método de desenvolvido por Camargo; Crohman & Camargo (1982) considerando o efeito da temperatura. Foi proposto um modelo matemático para o cálculo do potencial mátrico a partir da altura da câmara no momento da leitura, levando em conta a câmara deixada inicialmente no tensiômetro.

Na Figura 12 é mostrado o esquema de instalação do tensiômetro e a equação utilizada para obtenção da tensão. A dedução da referida equação pode ser observada em Assis Júnior (1995).

Villa Nova et al. (1992) compararam o tensiômetro de câmara de ar com manômetro de mercúrio em dois tipos de solos, no

laboratório, e observaram equivalência entre os resultados dos dois tipos de tensiômetros.

Camargo; Crohman & Camargo (1982), quando do desenvolvimento, utilizaram tubos plásticos transparentes para a determinação da altura da câmara gasosa, mas o tensiômetro feito para leituras com o tensímetro de punção digital pode ser utilizado para o mesmo fim, bastando para isso, aumentar o comprimento do tubo de acrílico transparente na parte superior do tensiômetro.

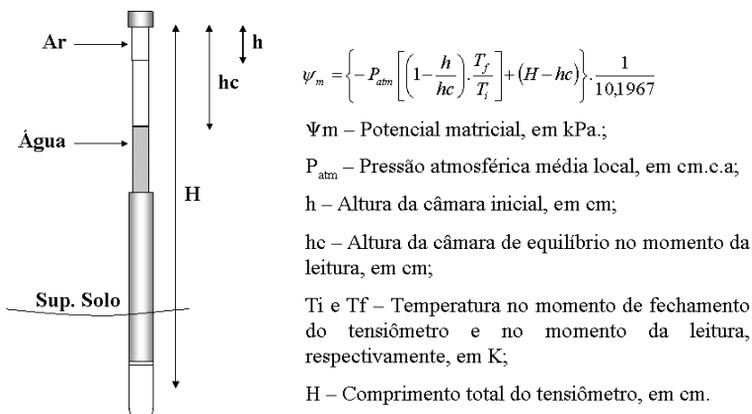


Figura 12 – Esquema de instalação e equação para cálculo da tensão em tensiômetros de câmara gasosa.

4 - CURVA CARACTERÍSTICA DE RETENÇÃO DE ÁGUA NO SOLO

Não se pode falar de tensiômetro sem falar da curva de retenção da água no solo, porque esta é fundamental quando se deseja saber o valor da umidade do solo. Neste sentido Miranda; Gonçalves & Carvalho (2001) citam o tensiômetro como instrumento para a determinação da umidade do solo e comentam que este aparelho associado à curva de retenção é fundamental no manejo de irrigação. Também

Bernardo; Soares & Mantovani (2006) sugerem o tensiômetro como instrumento para a medida da umidade do solo e relatam que este tem uma precisão relativamente boa.

A idéia de quantificar a capacidade de retenção de água no solo é do início do século XX (Alway & Mcdole, 1917 apud Reichardt, 1988). As principais contribuições neste sentido são as de Veihmeyer e Hendrickson que a partir de estudos feitos entre 1931 e 1949 introduziram definitivamente os conceitos de capacidade de campo e ponto de murcha permanente.

A curva característica é uma maneira de representar e quantificar o conteúdo de água que pode ser retido em um solo submetido a um determinado potencial mátrico. Curva característica é o nome que se dá ao resultado gráfico da variação do conteúdo de água do solo em função do potencial mátrico. A palavra curva vem do formato da linha representativa da variação da umidade em relação à tensão que é curva, já a palavra característica advém do fato de ser este um comportamento característico de cada solo.

No passado, quando do início da tensiometria, os gráficos montados com dados de umidade versus potencial mátrico eram utilizados como ábacos. Os trabalhos de Richards (1928) e Heck (1934) mostram estes ábacos. Porém, atualmente, com o desenvolvimento da matemática computacional a curva característica é mais comumente associada a uma equação do tipo potencial e para isso o modelo mais utilizado é aquele proposto por Van Genuchten (1980) que permite o ajuste de uma equação para a faixa de tensão que vai de 0 a 1500 kPa.

Uma grande vantagem da curva característica de um solo é que, uma vez conhecida, pode-se a partir da mesma, estimar a umidade (q) conhecendo o potencial mátrico (Y) ou vice versa. Esta peculiaridade permite utilizar o tensiômetro para o manejo da irrigação, pois, ele é um instrumento para medida do potencial mátrico e

uma vez conhecido este potencial, pode-se através da curva característica, conhecer a umidade do solo.

No intervalo de 0 a 1500 kPa está contida toda a água de interesse para a agricultura, em especial para o manejo da irrigação. Neste intervalo destacam-se cinco pontos importantes:

a) Umidade de saturação (q_s) – valor associado à tensão de 0 kPa que representa o volume máximo de água possível de ser armazenado no solo. Neste ponto considera-se que todos os poros estão preenchidos com água não havendo espaço para o ar no solo.

b) Umidade atual (q_a) – representa a condição de umidade do solo no momento da medição. Este valor é utilizado para verificar a variação do conteúdo de água do solo e quando q_a foi igual a q_{cr} a irrigação deve ser iniciada.

c) Umidade crítica (q_{cr}) – representa o esgotamento máximo da água no solo para que não haja danos à cultura. É com base neste valor que se define o momento da irrigação e a quantidade de água a ser aplicada.

d) Umidade na capacidade de campo (q_{cc}) – segundo Bernardo (1995), o termo “capacidade de campo” descreve a condição de movimento da água livre no solo sob a ação da gravidade, com sentido vertical para baixo e intensidade muito lenta ou nula, o que equivale a dizer, segundo Carvalho; Sampaio & Silva (1996), que não há variação da umidade (q) com o tempo (T), ou seja, $q/T = 0$. Na literatura é comum se encontrar recomendações de valores de tensão para a estimativa da capacidade de campo como, por exemplo, Bernardo (1995) que cita a tensão de 10 kPa equivalente à capacidade de campo (C_c) para solos de textura grossa (arenosa) e de 33 kPa para solos de textura fina (argilosa). Neste sentido Reichardt (1988) esclarece que cada escolha leva a um valor diferente de capacidade de campo, não havendo nada de errado nisso desde que se compreenda que se trata de um processo dinâmico. Assim, a pro-

cura de um valor de tensão que corresponde à capacidade de campo não tem respaldo teórico. Entretanto, é aceito que os poros do solo são divididos em macroporos, mesoporos e microporos e que são os microporos os responsáveis pela retenção (armazenamento) da água no solo. É aceito também que a tensão de 60 cm.c.a. (aproximadamente 6 kPa) separa os mesoporos dos microporos, sendo a umidade volumétrica de um solo a esta tensão associado ao volume de microporos. Portanto, a tensão de 6 kPa pode ser um bom indicativo da condição de capacidade de campo de qualquer solo.

e) Umidade no ponto de murcha permanente (q_{pmp}) – está associada à tensão de 1500 kPa e representa o teor de água do solo abaixo do qual a planta sofre uma murcha, não recuperando a turgescência das folhas, quando colocada em ambiente de atmosfera saturada de umidade. Este é o conceito atribuído à umidade de murchamento, por Veihmeyer & Hendrickson (1949). Ao contrário da capacidade de campo, estes autores consideram a umidade de murchamento como uma constante, afirmando ser ela uma característica do solo e independente da condição de desenvolvimento da planta.

Neste sentido, Arruda; Zullo & Oliveira (1987) sugerem equações para a estimativa da umidade na capacidade de campo e do ponto de murcha permanente a partir dos teores de silte e argila. O método é prático, pois, a análise granulométrica do solo é relativamente simples e barata, sendo feita em qualquer laboratório de análise física do solo, ao passo que a determinação através do extrator de Richards ou Haines é ainda pouco disponível, estando presente, principalmente, em universidades e centros de pesquisa.

5. LIMITAÇÕES DE USO DO TENSIOMETRO

O tensiômetro é um equipamento composto de uma câmara hermeticamente fechada que contém água e ar. Para as medidas do potencial admite-se que não há variação da temperatura da câmara

ao longo do dia. Entretanto, muitos trabalhos (Nyhan; Drennon, 1990; Hubbell; Sisson, 1998; entre outros) mostram que há considerável variação da tensão em função da temperatura.

Para tensiômetros de leitura manual, recomenda-se que as leituras sejam feitas preferencialmente pela manhã ou sempre no mesmo horário. Mas, com o advento da automação da aquisição de dados de tensiômetros no campo em tempo real, pode se fazer, também, um monitoramento da temperatura (Hubbell; Sisson, 1998; Teixeira; Coelho, 2005).

Camargo; Crohman e Camargo (1982), adotando dois horários de leituras (9 e 16 horas), verificaram que os dados de tensão foram ligeiramente afetados. Observaram que às 16 horas as tensões se apresentaram, em geral, inferiores às verificadas às 9 horas. Apenas no início das determinações, enquanto as tensões se achavam bastante baixas, não se observaram redução das tensões nas leituras da tarde. As curvas de regressão apresentam pequena, mas consistente, subestimativa das tensões. Comparando-se as leituras das 16 horas com as das 9 horas, houve variações de até 2,5 kPa.

Para reduzir as influências da temperatura na cápsula e da hora de leitura, é recomendável o uso de tubo de baixa condutividade térmica, como é o caso do plástico. Embora a influência na hora da leitura sobre os dados de tensão possa ser considerada pequena, quase desprezível, é recomendável fazer as leituras aproximadamente na mesma hora (Camargo; Crohman E Camargo, 1982; Assis Junior, 1995).

Outra limitação atribuída ao tensiômetro é o limite de leitura, principalmente para solos argilosos. Bernardo (1995) recomenda valores de tensão para a faixa de trabalho do tensiômetro de 0 a 75 kPa e cita que, neste patamar o tensiômetro cobre 70 % da água disponível em solos arenosos e 40 % em solos argilosos. Valores semelhantes para a faixa de trabalho são recomendados por Faria e

Costa (1987). Estes valores correspondem à faixa ótima para desenvolvimento da maioria das culturas, cobrindo de 25 a 75 % da água disponível no solo, dependendo da sua textura e estrutura.

Admite-se que o tensiômetro funcione cheio de água, sem a presença de bolhas de ar e de câmara gasosa no alto do tubo, mas, segundo Calbo & Silva (2003), o embolismo ou a entrada de ar dentro do tensiômetro, tem limitado o uso dos mesmos à tensões entre 0 e 100 kPa. Para evitar ou reduzir os efeitos deste fenômeno recomenda-se a verificação da estanqueidade do aparelho, principalmente no mecanismo de fechamento do mesmo.

Outro problema observado é a formação de bolhas de ar devido à evaporação da água no interior do tensiômetro com a diminuição da pressão interna. Reichardt & Timm (2004), recomendam a utilização de água desaerada para o enchimento dos tensiômetro e a fluxagem periódica dos mesmos. No campo, torna-se praticamente impossível a utilização de água com a característica citada. Na prática pode-se utilizar qualquer água, desde que esta esteja limpa e livre de partículas em suspensão. Uma boa recomendação é a utilização de água potável.

Camargo; Crohman & Camargo (1982), quando trabalharam com o tensiômetro de leitura direta, verificaram que o emprego de água fervida, para expelir o ar dissolvido e evitar a formação indesejável de câmara de ar no alto do tubo pode ser considerada desnecessária. Segundo os autores, a água comum de torneira pode ser usada sem problemas.

Todas as recomendações de utilização de água fervida, destilada ou desaerada, tem origem no tensiômetro de coluna de mercúrio, pois, este é drasticamente afetado pela formação de bolhas de ar, principalmente quando estas se acumulam no tubo do manômetro acarretando a interrupção da coluna líquida e impossibilitando a leitura. Todavia, com o advento de tensiômetros eletrônicos, como o de punção de digital, por exemplo, este efeito é anulado conforme

constatação de Camargo; Crohman & Camargo (1982).

Um outro cuidado a ser tomado, é com relação à área de contato da cápsula com o solo a qual pode afetar o perfeito funcionamento do tensiômetro, sendo também, uma limitação. Neste caso, o tamanho da cápsula tem influência direta. Hendrickx; Nieber & Siccana (1994) avaliaram o efeito do tamanho da cápsula porosa do tensiômetro sobre a variabilidade dos valores de potencial mátrico medidos, utilizando três tamanhos de cápsula (4,8; 42,3 e 88,3 cm²) de área superficial externa. O aumento no tamanho da cápsula reduziu a variabilidade nos valores de potencial, sugerindo que a cápsula de tamanho intermediário (a mais usada na prática) ainda é muito pequena, causando variabilidade relativamente alta, devendo ser substituída por cápsulas maiores.

A umidade do solo na condição de equilíbrio a uma dada tensão é maior na curva de “secamento” do que na curva de “molhamento”. Esta diferença é devido à histerese e traz sérios problemas para a descrição matemática do fluxo de água no solo. Segundo Reichardt (1975) o problema pode ser contornado parcialmente utilizando a curva de molhamento quando se descreve fenômenos de molhamento como, por exemplo, infiltração e curva de secamento em fenômenos de secamento, como no caso de evaporação. Quando os dois fenômenos ocorrem simultaneamente, como é o caso do uso do tensiômetro, para manejo da irrigação, o problema torna-se sério. Devido à dificuldade de medição na maioria das vezes a histerese precisa ser desconsiderada.

6. NÚMERO DE TENSIOMETROS E LOCAL DE INSTALAÇÃO

Pacheco et al. (1994) trabalharam em terra roxa estruturada em Piracicaba/SP com o objetivo de melhorar a caracterização das variabilidades temporal e espacial do potencial mátrico da água no solo. Os autores utilizaram tensiômetros de coluna de mercúrio para a determinação desse potencial e concluíram que, para obter um

valor médio dentro de 10% do valor esperado, cinco pontos de medição são suficientes.

Xavier et al. (2004) desenvolveu um modelo para cálculo de lâminas de irrigação em pastagem irrigada sob pivô central. Na parcela de controle, a lâmina a ser irrigada foi obtida com auxílio de dados de tensão da água no solo, coletados através de baterias de tensiômetros a diferentes profundidades. Não foi comentada a profundidade de instalação dos instrumentos nem o número deles por bateria, mas foram adotados 5 pontos de medida da tensão.

Segundo Faria & Costa (1987), para o sistema pivô central deve-se instalar uma bateria no ponto inicial de rotação, outra a 180° de giro e uma terceira um pouco antes da posição final de giro. Os aparelhos devem ser localizados entre a segunda e a terceira torre externa. Para isso, deve-se escolher um local vegetado com a cultura, de fácil acesso e representativo da área. Instalar pelo menos uma bateria (de preferência duas) em cada área que diferir nas características do solo, tipo de cultura, declividade ou outro tipo de variação das condições locais. Para plantas com sistema radicular de até 40 cm, utiliza-se apenas um tensiômetro na metade da profundidade das raízes. Para plantas com raízes mais profundas (0,50 a 1,30 m), recomenda-se instalar um aparelho a $\frac{1}{4}$ da profundidade efetiva das raízes e outro a $\frac{3}{4}$ deste valor. A leitura obtida no primeiro tensiômetro indica o momento da irrigação e a do mais profundo indica as condições de penetração de água.

O fabricante do tensímetro digital Water Control S/C recomenda a utilização de pelo menos 15 tensiômetros em cada área de irrigação homogênea em termos de solo, variedade, idade e manejo da água (5 pontos de amostragem em 3 profundidades) não importando o tamanho da área.

Por outro lado, Silveira & Stone (2001) recomendam a ins-

talação de apenas três baterias de tensiômetros na área irrigada. Para o sistema pivô central recomenda-se que as baterias sejam instaladas a $\frac{4}{10}$, $\frac{7}{10}$ e $\frac{9}{10}$ do raio do pivô central, em linha reta a partir da base (torre), escolhendo pontos representativos da área. Já Saad (1991) recomenda uma bateria de tensiômetros instalada dentro do último quarto do raio do pivô, no ponto onde a lâmina da água coletada seja igual à lâmina média, o que parece mais adequado.

7. TENSIOMETRIA NO MANEJO DA IRRIGAÇÃO

Existem pesquisadores que criticam a utilização da tensiometria para manejo da irrigação. Por exemplo, Marouelli & Silva (2005) citam que o uso da tensiometria para fins de manejo de água envolve custos com a aquisição de sensores de umidade e uso de mão-de-obra para a leitura dos mesmos, além da adoção de frequência de irrigação variável, o que desagrada à maioria dos agricultores. Para o usuário, segundo estes autores, é altamente desejável adotar turnos de rega fixos, visto que as práticas culturais e outras atividades, realizadas na propriedade, podem ser previamente planejadas.

Segundo Guerra & Silva (1998 apud Rocha 2003), atualmente os produtores irrigantes da região do Cerrado contam com apenas uma tecnologia, já estabelecida, para o manejo das irrigações, sendo ela a medição da tensão da água no solo por meio de tensiômetros. Essa metodologia, segundo Rocha; Guerra & Azevedo (2003), apesar de ter demonstrado alto potencial de uso, não tem sido amplamente adotada pelos produtores, por necessitar de um número expressivo de instrumentos para representar cada área irrigada. Este problema é agravado pela necessidade constante de cuidados com os tensiômetros o que muitas vezes os produtores não têm condição de satisfazer. Por essas razões a utilização de modelos de estimativa de evapotranspiração tem-se mostrado bastante aplicável à realidade dos cerrados. Entretanto, o uso desses modelos sem uma prévia avaliação

pode resultar na obtenção de estimativas imprecisas, o que poderia desacreditar a tecnologia junto aos produtores.

Entretanto, na literatura especializada encontram-se recomendações de uso de tensiômetros para o manejo da irrigação. Miranda; Gonçalves & Carvalho (2001) citam o tensiômetro como instrumento para a determinação da umidade do solo e comentam que este aparelho associado à curva de retenção é fundamental no manejo de irrigação.

Também Figueredo et al. (1998), adotaram tensiômetros para o manejo da irrigação, instalados nas profundidades de 0,10, 0,20, 0,30 e 0,40 m. O momento da irrigação foi determinado pelo tensiômetro localizado a 0,10 m e a lâmina a ser aplicada foi calculada com base na indicação de tensão de todos os tensiômetros até a profundidade de 0,40 m. Saad e Libardi (1992^a) nomearam este tensiômetro mais superficial de tensiômetro de decisão, pois é com base nele que os autores recomendam a determinação do momento da aplicação de água.

Pavani et al. (2003) avaliaram dois tipos de manejo da irrigação (tensiometria e balanço hídrico simplificado) na cultura do feijoeiro irrigado por pivô central, em plantio direto e convencional. Os autores verificaram que ambos os métodos são possíveis de serem adotados por irrigantes ou técnicos com nível médio de tecnologia e conhecimento, embora o de tensiometria ofereça, se adequadamente conduzida, um melhor entendimento das reais condições hídricas do solo na região do sistema radicular da cultura. O manejo por tensiometria causou maiores variações na água disponível consumida do que o tanque Classe A e resultou em relação a este, uma economia de 15 % na água de irrigação aplicada, sem afetar a produtividade de grãos.

A variabilidade no arranjo poroso de solos leva a diferentes condições de retenção de água e, conseqüentemente à variações da tensão (PACHECO et al., 1994). Há na literatura alguns trabalhos

onde os autores comentam sobre essa característica.

Villagra et al. (1988), trabalhando com tensiômetros instalados na zona arável do solo sob pivô central, apresentaram resultados detalhados sobre esta variabilidade e concluíram que ela é fator importante, não podendo ser desprezada tanto em experimentação científica como em seu uso para manejo dos solos.

Da mesma forma Pacheco et al. (1994), estudando a variabilidade espacial e temporal do potencial mátrico da água em terra roxa estruturada na região de Piracicaba, com o uso de tensiômetros, concluíram que a medida do potencial matricial, neste tipo de solo, feita com tensiômetros, em camadas profundas do solo, tem coeficientes de variação da ordem de 5 a 12 %, sendo tanto menor quanto mais seco o solo.

Silva et al. (2003) compararam o manejo da irrigação feito com lisímetro poroso e tensiometria na produção do melão rendilhado. Os autores verificaram ao final do experimento que o lisímetro pososo com carga hidráulica de 0,3 m.c.a. promoveu uma condição de elevada umidade do solo, afetando a produção. Já o manejo com tensiômetro (30 kPa) proporcionou boa produção de melão rendilhado.

9. REFERÊNCIAS

AMARAL, L.G.H.; RIGHES, A.A. Estruturas automáticas para controle de água nos canais em lavoura de arroz irrigado. **Revista Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.25, n.1, p.272-281, 2005.

ANGELOTTI NETTO, A.; FERNANDES E.J. Condutividade hidráulica de um Latossolo Vermelho em pousio e cultivo intensivo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.40, n.8, p.797-802, 2005.

ANGNES, D.L. **Introdução ao microcontrolador BASIC STEP**. 2003. 45p. Disponível em: <<http://www.tato.ind.br/download.htm>>. Acesso em: 16 mar. 2006.

ARRUDA, F.B.; ZULLO JR, J.; OLIVEIRA, J.B. Parâmetros de solo para o cálculo da água disponível com base na textura do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.11, n.1, p.11-15, 1987.

ASSIS JUNIOR, R.N. **Análise de desempenho do tensiômetro de câmara de ar na avaliação do potencial mátrico da água**. 1995. 75p. (Doutorado em Solos e Nutrição Mineral de Plantas) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1995.

AZEVEDO, E.B. **Viabilidade do uso do inversor de frequência em sistema de irrigação do tipo pivô central**. 2003. 75p. (Mestrado em Irrigação e Drenagem) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2003.

BELTRÃO, N.E.M. **O agronegócio do algodão no Brasil**. Brasília: EMBRAPA, 1999. v.2 p.507-1023.

BERGAMASCHI, H.; DALMAGO, G.A.; BERGONCI, J.I.; BIANCHI, C.A.M.; MÜLLER, A.G.; COMIRAN, F.; HECKLER, B.M.M. Distribuição hídrica no período crítico do milho e produção de grãos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.39, n.9, p.831-839, set. 2004.

BERNARDO, S. **Manual de irrigação**. 4. ed. Viçosa: UFV. Imprensa Universitária, 1995. 657p.

BERNARDO, S.; SOARES, A.A.; MANTOVANI, E.C. **Manual de irrigação**. 8. ed. Viçosa: UFV, 2006. 625p.

BIANCHINI, A.; MAIA, J.C.S.; MAGALHÃES, P.S.G.; CAPPELI, N. ; UMEZU, C.K. Pentetrografo eletrônico automático. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.6, n.2, p.332-336, 2002.

BRASIL, R.P.C.; CASARINI, E.; FOLEGATTI, M.V.; VASQUEZ,

M.A.N. Avaliação de vacuômetros de Bourdon utilizados em tensiômetros no manejo da irrigação. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 32., 2003, Goiania. **Anais...** Goiania: SBEA, 2003. 1 CD-ROM.

CALBO A.G.; SILVA W.L.C. Novo tensiômetro - Rápido, contínuo e opera em tensões superiores a 100 kPa. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 32., 2003, Goiania. **Anais...** Goiania: SBEA, 2003. 1 CD-ROM.

CAMARGO, A.P.; CROHMAN, F.; CAMARGO, M.B.P. Tensiômetro simples de leitura direta. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.17, n.12, p.1736-1772, 1982.

CANSADO, J.C.A. **Instrumentos inteligentes aplicados a automação agrícola**: Temperatura. São Paulo, 2000. 30p.

CARVALHO L.G.; SAMPAIO, S.C.; SILVA M.A. Determinação da umidade na capacidade de campo "In situ" de um Latossolo Roxo Distrófico. **Engenharia Rural**, Piracicaba, v.7, p.1-97, dez. 1996.

CARVALHO, D.F.; SILVA, W.A.; MEDICI, L.O.; PEREIRA, M.G. Avaliação de um sistema automático de baixo custo para manejo da irrigação. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 30., 2001. Foz do Iguaçu. **Anais...** Foz do Iguaçu: SBEA, 2001. 1 CD-ROM.

CHRISTOFIDIS, D. Irrigação, a fronteira hídrica na produção de alimentos. **ITEM – Irrigação & Tecnologia Moderna**, Brasília, n.54, p.46-55, mar. 2002.

CONCEIÇÃO, F.C. **Controle automático de temperatura de aquecedor de água**. Lavras: UFLA, 2002. 51p.

DELICATO, F.; PIRES, P.F.; LAGES, A.; REZENDE, J.F.; PIRMEZ, L. Middleware orientado a serviços para redes de sensores sem fio. In:

SIMPÓSIO BRASILEIRO DE REDES DE COMPUTADORES, 22., 2004. Gramado. **Anais...** Gramado 2004. p.75-86.

EINSFELDT, G.J.; WISINTAINER, M. Automação da coleta de níveis fluviais. In: SEMINCO 2002. SEMINÁRIO DE COMPUTAÇÃO, 11., **Anais...** Blumenau: FURB, 2002. p.269-281.

FARIA, M.A.; VIEIRA, J. Irrigação por aspersão: sistemas mais usados no Brasil. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v.12, n.139, p.27-39, jul. 1986.

FARIA, R.T.; COSTA, C.S. da. **Tensiômetro**: construção, instalação e utilização; um aparelho simples para se determinar quando irrigar. Londrina: IAPAR, 1987. p. 24. (IAPAR. Circular Técnica, 56).

FAVETTA, G.M. **Estudo econômico do sistema de adução em equipamentos de irrigação do tipo pivô central**. 1998. 110p. Tese (Doutorado em Irrigação) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1998.

FIGUEREDO JÚNIOR, L. G.; SILVA, G.O.; ALVES JÚNIOR, J. Sistemas de automação na irrigação localizada. **Engenharia Rural**, Piracicaba, v.15, p.31-36, 2004.

FIGUEREDO, S.F.; FRIZZONE, J.A.; POZZEBON, E.J.; AZEVEDO, J.A.; GUERRA, A.F. Estabelecimento do momento de irrigação com base na tensão da água no solo para a cultura do feijoeiro. **Engenharia Rural**, Piracicaba, v.9, n.1, p.35-49, 1998.

GARCIA, R.F.; QUEIROZ, D.M.; MIYAGAKI, O.H.; PINTO, F.A.D. Programa computacional para aquisição de dados para avaliação de máquinas agrícolas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.7, n.2, p.375-381, 2003.

GARZELLA, T.C.; BOTREL, T.A. Automação da leitura de um medidor de umidade tipo speedy com o uso de um computador e

utilização em programa de manejo da irrigação. In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL De INICIAÇÃO CIENTÍFICA Da USP; REUNIÃO PAULISTA DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA EM CIÊNCIAS AGRÁRIAS; CONGRESSO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DA ESALQ, 2004. Piracicaba. **Anais...** São Paulo: USP, 2004. p.558.

GERVÁSIO, E.S.; FRIZZONE, J.A.; AMARAL, F.R.; OLIVEIRA, A.S. Sistema de irrigação automatizado para experimentação em viveiros de mudas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 32., 2003, Goiânia. **Anais...** Goiania: SBEA, 2003. 1 CD-ROM.

GERVÁSIO, E.S.; VILELA, L.A.A.; BOTREL, T.A.; FRIZZONE, J.A.; AMARAL, J.R. Controlador de irrigação via PC. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 30., 2001, Foz do Iguaçu. **Anais...** Foz do Iguaçu: SBEA, 2001. 1 CD-ROM.

GOMIDE, R. Monitoramento para manejo da irrigação: instrumentação, automação e métodos. In: FARIA, M.A.; SILVA, E.L.; VILELA, L.A.A.; PEREIRA, G. M. **Manejo de irrigação**. Poços de Caldas: SBEA/UFLA/DEG, 1998. p.133-238.

HECK, A.F. A soil Hygrometer for irrigated cane lands of Hawaii. **Journal of the American Society of Agronomy**, Washington, v.26, p.274-278, 1934.

HENDRICKX, J.M.H.; NIEBER, J.L.; SICCANNA, P.D. Effect of tensiometer cup size on field soil water tension variability. **Soil Science Society American Journal**, Madson, v.58, n.2, p.309-315, 1994.

HUBBELL, J.M.; SISSON, J. B. Advanced tensiometer for shallow or deep soil water potential measurements. **Soil Science Society American Journal**, Washington, v.163, n.4, p.271-277. Apr. 1998.

IBARS, R.A.F. **Desenvolvimento e avaliação de tubos venturi**

para medição de vazão. 2004. 61p. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2004.

JUNQUEIRA, A.M.R.; OLIVEIRA, C.A.S.; VALADÃO, L.T. Fabricação “caseira” de tensiômetros de boa qualidade. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 27., 1998, Poços de Caldas. **Anais...** Poços de Caldas: SBEA, 1998, v.1. p.253-255.

LEIB, B.G; MATTEWS, G; KROEGER, M. **Monitoring irrigation system “on-time” with micro-loggers** St. Joseph: ASAE, 1999. 1v. (Paper n. PNW99101).

LONGO, L.A. **Uniformidade de distribuição e eficiência, em potencial, de aplicação de água de um pivô central, equipado com tubos de subida.** 1991. 63p. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem). Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1991.

LOWERY, B.; DATIRI, B.C.; ANDRASKI, B.J. An electrical read-out system for tensiometers. **Soil Science Society American Journal**, Madison, v.50, p.494-496, 1986.

MANTOVANI, E.C.; QUEIROZ, D.M.; DIAS, G.P. Máquinas e operações utilizadas na agricultura de precisão. In: SILVA, F. M. (Ed.). **Mecanização e agricultura de precisão.** Poços de Caldas: SBEA, 1998. p.109-157.

MAROUELLI, W.A.; SILVA, W.L.C. Freqüência de irrigação por gotejamento durante o estágio vegetativo do tomateiro para processamento industrial. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.40, n.7, p.661-666, 2005.

MARTHALER, H.P.; VOGELSANGER, W.; RICHARD, F.; WIERENGA, P.J. A pressure transducer for field tensiometers. **Soil Science Society American Journal**, Madison, v.47, n.4, p.624-627, 1983.

MEDICI, L.O. Acionador automático de sistemas de irrigação. **Revista da Propriedade Industrial**, Rio de Janeiro, n.1399, 1997,

MESSIAS, A.R. **LptWireless – Controlando 8 dispositivos vai RF (RR3 e RT4)**. Disponível em: <<http://rogercom.com/pparalela/LptWireless.htm>>. Acesso em 3 jun. 2005.

MIRANDA, J.H.; GONÇALVES, A.C.; CARVALHO, D.F. Água e Solo. In: MIRANDA, J.H; PIRES, R.C.M. **Irrigação**. Piracicaba: FUNEP, 2001., p.1-62.

NUMAJIRI, D.A. **Desenvolvimento de um sistema de controle de dispositivos via acesso remoto**. Lavras: UFLA, 2003. 86p.

NYHAN, J.W.; DRENNON, B.J. Tensiometer data acquisition system for hydrologic studies requiring high temporal resolution. **Soil Science Society American Journal**, Madison, v.54, n.1, p.293-296, 1990.

OLITTA, A.F. Construção de tensiômetros para controle da irrigação. **O Solo**, Piracicaba, v.68, n.2, p.16-20, 1976.

PACHECO, F.B.P.; REICHARDT, K.; TUON, R.L.; BACCHI, O.O.S.; VILLAGRA, M.M. Variabilidade espacial e temporal do potencial mátrico da água em terra Roxa Estruturada. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v.51, n.2, p.321-326, 1994.

PAVANI, L.C.; LOPES, A.S.; ZANINI, R.R.; CORÁ, J.E.; GALBEIRO, R.B. Manejo da irrigação (tensiometria e balanço hídrico simplificado) na cultura do feijoeiro irrigado por pivô central, em plantio direto e convencional: primeiro ano. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 32., 2003, Goiania. **Anais...** Goiania: SBEA, 2003. 1 CD-ROM.

QUEIROZ, T.M. **Avaliação de sistema alternativo de automação da irrigação na cultura do Feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.)**. 2004. 120p. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) -

QUEIROZ, T.M.; GIACOMIN, J.C.; RABELO, G.F.; BRAGA JUNIOR, R.A. Circuito eletrônico para controle automático, em malha fechada, de sistemas de irrigação, através de tensiômetros. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 31., 2002, Salvador. **Anais...** Salvador: SBEA, 2002. 1 CD-ROM.

QUEIROZ, T.M.; CARVALHO, J.A.; RABELO, G.F.; ANDRANDE, M.J.B. Avaliação de sistema alternativo de automação da irrigação do feijoeiro em casa de vegetação. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.25, n.3, p. 632-641, 2005.

REBELLO JUNIOR, C.J. **Sistema de aquisição de dados agrometeorológicos baseado no microcontrolador “Basic Step”**. Lavras: UFLA, 2004. 53p. (Monografia).

REICHARDT, K. **Processos de transferencia no Sistema Solo-Planta-Atmosfera**. 3. ed. Piracicaba: CENA, 1975. 286p.

REICHARDT, K. **A água na produção agrícola**. São Paulo, Mac Grow-Hill, 1978. 119p.

REICHARDT, K. Capacidade de campo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.12, n. 2, p. 211-216, maio/ago. 1988.

REICHARDT, K; TIMM, L.C. **Solo, Planta e Atmosfera**: conceitos, processos e aplicações. Barueri: Manole, 2004. 478p.

ROCHA, O.C.; GUERRA, A.F.; AZEVEDO, H.M. Ajuste do modelo de Chistiansen-Hargreaves para estimativa da evapotranspiração do feijão no cerrado. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.7, n.2, p.263-268, 2003.

RODELA, A.A., **LQI-800 Métodos instrumentais de análise**: texto auxiliar para aulas teóricas, 2003. Disponível em: http://members.tripod.com/quimica_esalq/textunic.doc. Acesso em: 20 out. 2003.

RODRIGUES, L.N. Modelo para dimensionamento e avaliação de sistemas de irrigação por pivô central. 1999. 145p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola)-Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1999.

ROEL, J.O.; KUO-PENG, P.; SADOWDKI, N.; BATISTELA, N.J.; BASTOS, J.P.A. Acoplamento de conversores estáticos com malha de controle e dispositivos eletromagnéticos não-lineares. **Revista Controle & Automação**, Florianópolis, v.13, n.1, p.77-83, 2002.

RUEDA, T.C. Controle automático do nível de poeira baseado em microcontrolador. Lavras: UFLA, 2005. 42 p.

SAAD, A. M. **Uso do tensiômetro no controle da irrigação por pivô central em cultura do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.).** 1991. 144p. Dissertação (Mestrado em Irrigação) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1991.

SAAD A.M.; LIBARDI P.L. Aferição do controle da irrigação feito pelos agricultores utilizando tensiômetros de faixas. In: ENCONTRO NACIONAL DE PRODUTORES IRRIGANTES, 5., 1994. São Paulo. **Anais...** São Paulo: IPT, 1992^a, p.27.

SAAD, A.M.; LIBARDI, P.L. Uso prático do tensiômetro pelo agricultor irrigante. In: ENCONTRO NACIONAL DE PRODUTORES IRRIGANTES, 4., 1992, Guará. (Publicação IPT, 2002), 1992^b, p.1-27.

SCHUCH, L.; RECH, C. PINHEIRO, J.R. Estágio de entrada de uma UPS on-line de alta eficiência controlado por um único DSP. **Revista Controle & Automação**, Florianópolis, v.16, n.2, p.211-220, 2005.

SILVA, T.J.A.; MACHADO, C.C.; BOMFIN, E.M.S.; COELHO, R.D. Manejo da irrigação com lisímetro poroso e tensiômetro na produção de melão rendilhado. In: CONGRESSO BRASILEIRO

De ENGENHARIA AGRÍCOLA, 32., 2003. Goiania. **Anais...** Goiania: SBEA, 2003. 1 CD-ROM.

SOUSA, V.F.; FOLEGATTI, M.V.; FRIZZONE, J.A.; CORRÊA, R.A.L.; ELOI, W.M. Produtividade do maracujazeiro amarelo sob diferentes níveis de irrigação e doses de potássio via fertirrigação. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.39, n.4, p.497-504, 2003.

STEIDLE NETO, A. J.; ZOLNIER, S. Avaliação de circuito eletrônico para medição de temperatura em instalações agrícolas por meio da porta paralela de um computador. **Revista Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.26, n.2, p.335-343, mai/ago. 2006.

TEIXEIRA, C.F.A.; MORAES, S.O.; DAMÉ, R.C.F.; SIMONETE, M.A. Utilização de sistemas de proteção em equipamento para monitoramento automático da água no solo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 32., 2003, Goiânia. **Anais...** Goiania: SBEA, 2003. 1 CD-ROM.

TEIXEIRA, S.A.; COELHO, S.L. Desenvolvimento e calibração de um tensiômetro eletrônico de leitura automática. **Revista Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.25, n.2, p.367-376, maio/ago. 2005.

THIEL, T.J.; FOUSS, F.L.; LEECH, A.P. Electrical water pressure transducers for field and laboratory use. **Soil Science Society of America Proceedings**, Madison, v.27, n.5, p.601-602, 1963.

TOMAZELA, C. **Desempenho hidráulico de um pivô central de baixa pressão em terreno com topografia variável**. 1991. 58p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1991.

VEIHMEYER, F.J.; HENDRICKSON, A.H. Methods of measuring field capacity and permanent wilting percentage of soils. **Soil Science**, Baltimore, n.68, p.75-94, 1949.

VILELA, C.B. **Curso básico de eletrônica**. 4.ed. São Paulo: Editora Saber, 2001. p.65-79.

VILELA, E.D.D. Acesso à porta paralela do PC. **Revista Saber Eletrônica**, São Paulo, n.319, p.42-43, 1999.

VILELA, L.A.A. **Metodologia para dimensionamento de um sistema de pulverização acoplável a pivô central**. 2002. 127p. Tese (Doutorado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2002.

VILELA, L.A.A.; CARVALHO, H.P.; PRADO, G.; BOTREL, T.A. Construção e calibração de um manômetro digital microprocessado. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 32., 2003. Goiânia. **Anais...** Goiania: SBEA, 2003. 1 CD-ROM.

VILLA NOVA, N.A.; REICHARDT, K.; LIBARDI, P.L.; MORAES, S.O. Direct reading “air-pocket” tensiometer. **Soil Technology**, Crenlingen, v.2, p.403-407, 1989.

VILLA NOVA, M.S.; VILLA NOVA, N.A.; OLIVEIRA, A.S.; REICHARDT, K. Performance and test of a direct reading “air-pocket” tensiometer. **Short Communication**, Cremlinger, v.5, p.283-287, 1992.

VILLAGRA, M.M.; MATSUMOTO, O.M.; BACCHI, O.O.S.; MORAES, S.O.; LIBARDI, P.L. REICHARDT, K. Tensiometria e variabilidade espacial em terra roxa estruturada. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.12, p.205-210, 1988.

XAVIER A.C.; COELHO, R.D.; LOURENÇO, L.F.; MACHADO, R.E. Manejo da irrigação em pastagem irrigada por pivô central. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.8, n.2/3, p.233-239, 2004.

ZEREZUELA. R.; OKI, N. Desenvolvimento de um sistema de transmissão de dados e de software para aquisição de dados de estações

meteorológicas em tempo real. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 32., 2003. Goiânia - GO. **Anais...** Goiania: SBEA, 2003. CD-ROM.

BERNARDO, S.; SOARES, A.A.; MANTOVANI, E.C. **Manual de irrigação**. 8. ed. Viçosa: UFV, 2006. 625p.

EINSFELDT, G.J.; WISINTAINER, M. Automação da coleta de níveis fluviais. In: SEMINCO 2002. SEMINÁRIO DE COMPUTAÇÃO, 11, **Anais...** Blumenau: FURB, 2002. p.269-281.

MEDICI, L.O. Acionador automático de sistemas de irrigação. **Revista da Propriedade Industrial**. Rio de Janeiro:, n.1399, 1997,

MESSIAS, A.R. LptWireless – Controlando 8 dispositivos via RF (RR3 e RT4). **Disponível em:** <<http://rogercom.com/pparalela/LptWireless.htm>>. Acesso em 3 jun. 2005.

MIRANDA, J.H.; GONÇALVES, A.C.; CARVALHO, D.F. **Água e Solo**. In: MIRANDA, J.H; PIRES, R.C.M. Irrigação. Piracicaba: FUNEP, 2001., p.1-62.

QUEIROZ, T.M.; GIACOMIN, J.C.; RABELO, G.F.; BRAGA JUNIOR, R.A. Circuito eletrônico para controle automático, em malha fechada, de sistemas de irrigação, através de tensiômetros. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 31., 2002, Salvador. **Anais...** Salvador: SBEA, 2002. 1 CD-ROM.

QUEIROZ, T.M.; CARVALHO, J.A.; RABELO, G.F.; ANDRANDE, M.J.B. Avaliação de sistema alternativo de automação da irrigação do feijoeiro em casa de vegetação. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.25, n.3, p. 632-641, 2005.

TEIXEIRA, S.A.; COELHO, S.L. Desenvolvimento e calibração de um tensiômetro eletrônico de leitura automática. **Revista Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.25, n.2, p.367-376, maio/ago. 2005.

GENUTCHEN, M. T. v. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science American Journal**, Washington, v.44, p.892-898. 1980.

ZEREZUELA. R.; OKI, N. Desenvolvimento de um sistema de transmissão de dados e de software para aquisição de dados de estações meteorológicas em tempo real. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 32., 2003. Goiânia - GO. **Anais...** Goiania: SBEA, 2003. CD-ROM.

ANEXO

Tabela 1 – Preços médios dos componentes necessários para a construção de um tensímetro.

Descrição	Unidade	Quantidade	R\$ Unitário	R\$ Total
Microcontrolador*	un	1	59,00	59,00
Sensor de pressão*	un	1	45,00	45,00
Display de Cristal Líquido*	un	1	40,00	40,00
Bateria 9 Vcc*	un	1	11,50	11,50
Regulador de tensão*	un	1	1,50	1,50
Chave liga/desliga*	un	1	2,00	2,00
Fusível	un	1	0,50	0,50
Porta fusível	un	1	1,50	1,50
LED 3 mm	un	1	0,50	0,50
Porta LED 3 mm	un	1	0,75	0,75
Placa fenolite 5 x 10 cm ² *	un	1	2,25	2,25
Agulha*	un	1	1,50	1,50
Tubo de acrílico ½" – 5 cm*	un	1	8,00	8,00
Caixa plástica para circuito	un	1	3,20	3,20
Cabo flexível 0,5 mm ²	m	2	0,25	0,50
Despesas com SEDEX	-	1	15,00	15,00
			Total (R\$)	192,70

*Itens indispensáveis.

RACIONALIZAÇÃO DO USO DA ÁGUA NA AGRICULTURA IRRIGADA

Bruno Molle

1. INTRODUCTION

The complicated issue of innovation and modernisation in irrigated agriculture.

An innovation can be defined as the creation of a new object, which can be combined or not in a new mode of use. Innovations differ from inventions or discoveries, because it suppose a process of application resulting in an actual use, which is not always the case of inventions.

The modernization corresponds to the application of an innovation, or to a break with previous or traditional practices. It supposes a change in practices and/or techniques.

In agriculture modernization will result essentially in an increase of investment in equipments with an objective of maximizing productivity

per unit area. It is also resulting in a reduction of work painfulness, in workforce need and a better user-friendliness for the farmers. As a consequence the financial risk becomes more important what can raise a problem for small holders employing his family. In irrigation modernization is referred to as a means to reduce pressure on water resources, it is not always the case except when a policy of reduction of water allocation is operated.

Modernization is mostly resulting in investments in more expensive production systems, the farmer will thus try to reduce the risk on production factors (inputs). A reduction of water consumptions will intervene only if it does not increase the risk factors or if water allocation is limited.

Industry role and attitude toward innovation and modernisation

Innovation is mostly performed by the industry, which puts into practice promising inventions. It remains concentrated above all on equipments (what is visible) and on what can be profitable to the company. The current tendency is to innovate in the field of integration of new functionality or new processes in “intelligent” pilots to go towards turn-key systems. The user becomes then more dependent on the industry than in more traditional systems.

Modernization is more coming from the extension side, possibly at instigation of the industry, although there is a commercial stake. This one concerns first methods and sometimes result in industrial applications.

Innovation is not resulting necessarily in an improvement of performances, but more in the arrival of a novelty, modernization is not necessarily associated to a decline of pressure on the resources but to a better productivity (Playan, Mateos, 2006). We should rather speak about optimization of inputs (a bigger production per unit of inputs) than about a reduction of inputs, reducing the financial risk. At a larger

scale it will result in an increase of the ETP thus in the net consumption of water, because we reduce the losses (beneficial losses) which would have been able to benefit to downstream users.

2. THE ISSUE OF CHARACTERISATION AND VALIDATION OF AN INNOVATION

An innovation proposed by a manufacturer will be presented always under a favorable light, in passing under silence new constraints which can appear.

The role of laboratories is to separate the commercial speech from the technical speech. They must know how to estimate the innovations proposed on recognized scientific bases with reliable technical means. It supposes that laboratories preserve their independence towards industry, and that the competence of their staffs is recognized. Laboratories also have to keep relationships with extension staff, to stay informed of the evolution of equipment under real operating conditions. A participation in a network of irrigation extension staff will both allow to make pass information about laboratory activities or findings on various equipments, and to have a return from the field. At the same time extension staffs have to contribute to develop the policy of the laboratory.

Examples:

- Use of hose reel machine towing a boom:
 - reduces pressure requirements, reduces droplet sizes and instantaneous intensity, improves uniformity of distribution including under sandy conditions;
 - cost is twice standard reel machines towing a gun, so it is for displacement time, only adapted to short crops, to be reserved for high value crops, average application intensity is higher than gun's one.

- Pressure Compensating drippers:
 - Increases possible lateral length, no matter of slopes, better potential application uniformity;
 - Higher cost, higher sensitivity to clogging resulting in fast decrease in application uniformity, durability not always achieved.
- PAM (soil conditioners): sold as fertilisers or for soils in which such additives are useless.

3. MODERNISATION AS THE ADAPTATION OF INNOVATION TO EXISTING SITUATIONS AND PRACTICES.

(the need for independent references, dissemination of information, supporting tools and their known effects)

The application of an innovation, concerns as well equipment as methods using traditional material provided that a technical support exists in the area. The role of manufacturers is small compared with that of users who have to acquire new competence, manage a new and more difficult process, with higher failure risks.

Les industriels préfèrent substituer la compétence par un matériel d'asservissement ou de programmation plus cher, donnant lieu parfois à des erreurs d'interprétation.

The manufacturers prefer to substitute the competence by more expensive control or programming systems, with large place for errors of interpretation.

Example: programmeurs d'arrosage, interfaces de commande des secteurs, affichage des durées de fonctionnement et des volumes délivrés, mais ne disposent d'aucune info terrain donc aucune validation ni vérification de fonctionnement donc les consommations affichées peuvent être fantaisistes puisque les systèmes de distribution sont fréquemment mis à jour ou modifiés, très répandus en parcs et jardins.

Example: irrigation controllers programming interface allow setting irrigation duration for each sector, but doesn't get any return from the field. Thus the water consumptions displayed can be fanciful because the distribution heads are frequently modified or nozzles changed without modifying controller database.

To solve these problems, in Morocco, the implementation of a program of subsidies for modernizing plot irrigation systems, was associated to program of tests of equipments allowing or not these equipment to be subsidized. Tests are performed by a public independent laboratory. This pre-testing of equipment in the laboratory resulted in an improvement of drippers manufacturing CV of more than 3 points during the first 2 years of the program.

Laboratories have to play a role of referent in modernization policies. To exert this role the laboratory have to be identified and recognized, by irrigation professionals (users, dealers, manufacturers, importers, extensionists and administration) and their place clearly identified in the policies of subsidy. Systematic testing programs for new equipment to be subsidized shall be associated with a random verification process from samples of equipments taken from the retailers.

In parallel the referent laboratory shall be involved in international networks within which they can benchmark each other.

Dans le monde globalisé que nous connaissons, un des principaux enjeux du succès d'une politique de modernisation est le maintien de la petite agriculture familiale au côté d'une agriculture plus industrielle. La composante technologique de la modernisation de l'activité agricole joue un rôle central, elle ne doit pas être un frein mais un moteur de l'amélioration de la vie dans les campagnes.

One of the main stakes in the success of a modernization policy is the preservation of small domestic agriculture in the side of a more industrial agriculture. The technological constituent of agricultural activity

modernization plays a central role, it shall not refrain but be an engine for the improvement of life in rural areas.

4. WHAT REFRAIN MODERNISATION IN IRRIGATED AGRICULTURE

Main brake in the modernization process is the technical skills of users and the weight of traditions in rather conservative and little informed rural societies. The presence of a close technical support, and its accessibility facilitate the adoption of modernized practices and techniques. In particular the possibility for farmers of observing in demonstration sites first then at in farmers field the updated systems and practices is certainly a factor to ease adoption of modernization. In Morocco numerous exchanges between groups of farmers were organized within the framework of the European program Wademed (www.wademed.net) and with others stakeholders. In Portugal, within the framework of the European program Aquastress, we framed a benchmarking of production process of irrigated olives and vineyards. The information was supplied directly by the farmers, then made anonymous in order to cross compare technical and economical results between farmers. Farmer are warmly welcoming such activity that help their own decision process from a large panel of information.

The second brake, is the quality of equipments and design available on the market which can hamper the process of modernization on mid term. Indeed the durability of plot irrigation systems is a concern for farmer that increases with their investment effort. The quality requirements of raw materials and the minimum technical characteristics of design are a key factor to improve the confidence of farmers in a new concept. Finally the design options have to result from a compromise between the investment cost, the level of competence of farmers, the adaptation to local pedoclimate and the search for a system durability that stay compatible with farm cost return capacities. This applies specially as the examples of waste water

re-use in agriculture are in constant increase. In such situations the design of the distribution system must aim at minimizing the environmental impacts and maximize the system's life cycle.

It often happens that brakes in the modernization process are not technical, farms structure and in particular land ownership often linked with access to water and credit or subsidies can prevent an update in production means. So, in Syria more of 2/3 of the wells are not declared because the transmission of land property was never recorded by the administration, to avoid taxes. It becomes then very difficult to launch a modernization policy even if it goes along with subsidies and consequently to manage the levels of water tables!

5. HOW LABORATORIES CAN SUPPORT MODERNIZATION

One of the main bottlenecks in the modernization of irrigated farms relates to equipments: their quality, their performance and their durability. Indeed if modernization successes are delayed it is identified immediately by farmers and prevents them to try it. Drippers which get blocked because of bad filtration will question the whole system and not the design. It is necessary to have available means to assure that equipments are of good quality and that they are incorporated into an adapted system.

Besides in numerous countries the public technical structures being weak, the users are advised by commercial agents, some are excellent but they cannot forget their seller first role. It is thus necessary to find means to improve systems technical level, the first stage is the implementation of a verification policy of equipments characteristics. Only independent laboratories can conduct such verification policy, provided they are recognized by users, dealers, importers and manufacturers. A method can be the implementation of an ISO certification, guaranteeing measurement procedures consistency (sensors calibration, installation, standardized protocols and procedures).

Unfortunately such process is definitely too expensive for the irrigation market, even if water resources are under pressure. It is one of the objectives of the INITL, to move towards cross recognition of laboratories within each others, to allow a cross certification of laboratories in front of world level manufacturers.

It is one of objective of the cross testing launched by the network. The first one focused on sprinklers, aiming at comparing the performance of measuring tools and evaluation protocols in use. We were able to note serious differences between protocols followed by the 11 participating laboratories, while staying in the perimeter of the standard ISO 7749. This work resulted in the proposal of an amendment to this standard, decreasing the degrees of freedom of the protocol to make it more standard.

The second cross testing operation concerns microirrigation drippers. Even there some differences appear between laboratories, in particular related to the method of measurement of the flowrate delivered by drippers.

Some measure a flowrate (volume per unit of time), while others measure a volume on a predetermined duration. We have noticed significant variations on flowrate, while these do not appear on the volumes. This point will soon be discussed in meeting of the ISO.

6. HOW INNOVATION AND MODERNIZATION WILL RESULT IN WATER SAVINGS?

Contrary to what is generally evoked to justify a modernization policy for irrigated agriculture, the first result is not saving water. Indeed when a farmer modernizes his systems, first of all it results in improving its production without decreasing its consumption. So, it is the productivity of the water that considerably increases. We usually speak in the Mediterranean countries of productivity multiplied by 2 even about 3 after conversion of surface irrigation to the microirrigation.

The modernization of plot irrigation systems can finally result by a water scarcity. Indeed if the productivity of the water increases, it is because the agricultural production increases, as a consequence crop evapotranspiration will increase too. The net consumption of water of the irrigated plot is going to grow canceling all or any of the beneficial losses which the former system could create. It follows that the users situated downstream to the modernized area will have less water at their provision.

From these observations one should not especially end that the modernization of irrigated farms is to avoid, but that this one must be necessarily accompanied with a significant decrease and with a stricter control of the volumes allocated to the farmers. It is the unique solution to preserve the equity of distribution on the scale of a hydrological unity.

LABORATÓRIO DE ENSAIOS EM EQUIPAMENTOS DE IRRIGAÇÃO: DESENVOLVIMENTO E ACREDITAÇÃO

Silvio Carlos Ribeiro Vieira Lima; Manoel Valnir Júnior;
Raimundo Rodrigues Gomes Filho

1. APRESENTAÇÃO

É cada vez maior o crescimento das indústrias ligadas ao setor de materiais de irrigação, colocando à disposição dos engenheiros agrônomos, produtores rurais e projetistas em geral, a mais variada gama de modelos de equipamentos como aspersores, microaspersores, gotejadores, filtros, injetor de fertilizantes entre outros, ficando o comprador desses produtos com grande opção de escolha, porém com muitas dúvidas, pois não possui a certeza de que o material que ele está adquirindo possui as especificações informadas no catálogo do fabricante, sendo às vezes informadas apenas pelo próprio vendedor no balcão.

Esse fator tem contribuído para uso ineficiente da água e energia e conseqüentemente no aumento das perdas de produtividade, visto que as

informações, mormente contidas em catálogos, não se traduzem em realidade quando os sistemas são implantados no campo.

Segundo Frizzone & Botrel (1996), equipamentos de irrigação devem ser avaliados em laboratório para se obter qualidade na irrigação, pois os equipamentos fabricados e comercializados no país não possuem qualquer tipo de avaliação da conformidade, o que contribuiria muito para a qualidade da indústria e principalmente para o uso correto destes, economizando água e garantindo maior produtividade às culturas.

De acordo com Lima (2001) o Brasil é carente em ensaios de equipamentos de irrigação, pois o grande entrave para esta situação é a deficiência de laboratórios específicos e corpo técnico qualificado a realizar estes ensaios. Uma carência que a indústria da irrigação brasileira possui, pois além da dificuldade em exportação, estas indústrias necessitam de um suporte metrológico neste setor. Quando falamos de ensaios em laboratórios, devemos nos preocupar com a confiabilidade dos dados, com a metodologia utilizada e, principalmente, com as inovações tecnológicas.

A Metrologia é a ciência que abrange todos os aspectos teóricos e práticos relativos às medições, qualquer que seja a incerteza em qualquer campo da ciência ou tecnologia. Nesse sentido a Metrologia Científica e Industrial é uma ferramenta fundamental no crescimento e inovação tecnológica, promovendo a competitividade e criando um ambiente favorável ao desenvolvimento científico e industrial em todo e qualquer país (INMETRO, 2005).

O desenvolvimento e a consolidação da metrologia vêm se constituindo em uma estratégia permanente das organizações, uma vez que resulta em ganhos de produtividade, qualidade dos produtos e serviços, redução de custos e eliminação de desperdícios.

Laboratórios de ensaios são responsáveis pela avaliação da conformidade de um produto. De acordo com INMETRO (2005), entre as vantagens da acreditação de laboratórios, podemos citar que ela refor-

ça a coerência, a confiança do público nos serviços prestados, fomenta os esquemas confiáveis de auto-regulação do próprio mercado, incrementando-se a competência e a inovação. Para os usuários ela possibilita a tomada de decisões acertadas, diminuindo o risco de avaliações incorretas, garante a aceitação internacional dos produtos sem a necessidade de repetições e finalmente para os consumidores finais ela inspira confiança no provedor ao garantir que o produto tem sido avaliado por um organismo independente e competente, além de aumentar a liberdade de escolha em um mercado livre, porém confiável.

Propõe-se com a implantação e funcionamento do Laboratório de Ensaio em Equipamentos de Irrigação – LEEI, que este realize serviços de qualidade as empresas do setor de irrigação, além de pesquisa e inovação e que implante todos os requisitos técnicos e de qualidade laboratorial, condizentes com as prerrogativas de acreditação do Instituto Nacional de Metrologia Normalização e Qualidade Industrial – INMETRO pelo LEEI, para que este, como pioneiro no país nesta categoria, contribua significativamente para a melhoria da qualidade dos equipamentos de irrigação, condicionando a indústria poder ofertar aos técnicos e irrigantes produtos eficientes e ambientalmente corretos.

2. DESENVOLVIMENTO DO LEEI

Para dotar a região Norte e Nordeste do Brasil, de um laboratório de ensaios de excelência, contribuindo de forma decisiva para avaliação e padronização de equipamentos de irrigação para todo o país era necessário equipar este laboratório com o mínimo de equipamentos específicos.

Utilizou-se para abrigar o LEEI, um velho galpão abandonado e nele instalou-se a estrutura inicial de uma cisterna com capacidade para 16m³, nove bombas hidráulicas de variadas potências e quatro bancadas de ensaios em gotejadores, micro-aspersores, aspersores e perda de carga em tubulações e localizadas (Figura 1). O LEEI se

propõe a realizar todos os ensaios pertinentes a equipamentos de irrigação, mas solicitou a acreditação para o primeiro momento, de apenas três escopos: ensaios em gotejadores, microaspersores e aspersores rotativos. Para isso foi necessário montar uma estrutura composta por bancadas onde pudessem ser realizados os ensaios solicitados por ABNT (1991), ABNT (2000a e 2000b) e ABNT (2004a).

Estas bancadas foram construídas e testadas durante todo o ano de 2005. São bancadas sem automação específica, apenas com o manuseio de uma equipe treinada e equipamentos como balança, manômetros e medidores de vazão calibrados por laboratórios filiados a Rede Brasileira de Calibração - RBC. A automação ficou para uma fase posterior à acreditação já que para esta seria necessária a calibração de sensores e células de carga, o que iria dispensar mais tempo. Foram testados aspersores na bancada específica (Figura 2), como teste inicial e também foram realizados testes cruzados de gotejadores, com os laboratórios da International Network of Irrigation Test Laboratory - INITL, que é a rede mundial de laboratórios de ensaios em equipamentos de irrigação, dentre eles destacam-se os do Centro Nacional de Tecnologia de Regadíos – Madrid/Espanha e o do Cemagref – Aix-em-provence/França, pois era fundamental realizar ensaios de proficiência em equipamentos de irrigação.



Figura 1. Vista geral do LEEI antes da construção em 2002 e após a conclusão em 2005.



Figura 2. Foto do circuito de aspersores.

3. ACREDITAÇÃO NO INMETRO

Para iniciar um processo de acreditação são necessários também outros fatores como:

1) Corpo técnico competente montado sobre um organograma onde envolvesse os setores técnicos e de qualidade.

2) Base documental solicitada pelo órgão acreditador, no caso o INMETRO, baseado em ABNT (2004b).

Para o corpo técnico, um dos requisitos era que este fosse constituído de pelo menos um gerente técnico, um gerente da qualidade, dois técnicos de ensaios e um técnico da qualidade, requisitos mínimos para o escopo a que se propôs o LEEI. Procurou-se inserir um caráter também de pesquisa e criou-se, para esse fim, um gerente de pesquisa e desenvolvimento tecnológico (Figura 3). Finalmente, para a parte documental eram necessários os documentos citados no Manual da Qualidade do LEEI, referente ao Sistema de Gestão da Qualidade, tendo por base a ABNT (2004a). Nele estão apresentados as responsabilidades, os procedimentos, os processos e os recursos para a gestão da qualidade do laboratório. A solicitação de acreditação foi emitida em 20 de janeiro de 2005 e durante todo este ano foram mantidos contatos entre a gerência do LEEI e o INMETRO. Foram também realizados treinamentos da equipe executora em ensaios específicos, hidráulica e gestão laboratorial. Em 25 de janeiro de 2006, ou seja, 01 ano após a solicitação, foi realizada a primei-

ra visita de acreditação, após os avaliadores concluírem que o LEEI estava preparado.

Após três dias de visita, onde um avaliador líder e um avaliador da área de mecânica observaram a equipe do LEEI realizar os ensaios em gotejadores, microaspersores e aspersores, conforme descrito no procedimento técnico de ensaio enviado ao INMETRO foi elaborado o Relatório de Avaliação do Laboratório – RAV, documento este que define se o laboratório avaliado possui ou não condições de participar da Rede Brasileira de Laboratório de Ensaios – RBLE.



Figura 3. Organograma funcional do LEEI

Os avaliadores então recomendaram a acreditação, mas somente depois de realizadas a correções expostas no RAV, onde foram identificadas dezenove não conformidades, sendo a maioria, itens relativos à documentação.

Durante o ano de 2006, a equipe tratou de corrigir as não conformidades. Os principais itens que demandaram um maior tempo para correção foi o de calibração de medidores de vazão, por somente poderem ser calibrados por laboratórios ligados a RBC e muitos deles ficarem em regiões distante da base do LEEI. Ocorreram calibrações também de termômetro, termo-higrômetro e cronômetro. Os manômetros utilizados nas três bancadas já estavam calibrados pela

RBC, mas devido ao tempo de nova análise, novas calibrações tiveram que ser feitas. Após a posse de todos os certificados de calibração destes equipamentos, foi elaborado o cálculo de incerteza da medição, que é um procedimento indispensável para a acreditação de laboratórios na RBLE. Todos os documentos restantes foram enviados ao INMETRO e aguardou-se a conclusão do processo de acreditação, quando então foi emitido o certificado.

O Símbolo de acreditação foi emitido em 29 de maio de 2007, com o código CRL 0256 (Figura 4).



Figura 4. Símbolo de Acreditação do LEEI

O LEEI está acreditado para realizar os seguintes ensaios:

GOTEJADOR - NBR/ISO 9261

Uniformidade de vazão, vazão em função da pressão de entrada (não-compensante), vazão em função da pressão de entrada (auto-compensante), determinação de expoente de unidade.

MICROASPERSOR - NBR 15084

Uniformidade de vazão, vazão em função da pressão de entrada (não-compensante), vazão em função da pressão de entrada (auto-compensante), perfil de distribuição, durabilidade.

ASPERSOR - NBR/ISO 7749-1 e NBR/ISO 7749-2

Característica de distribuição, diâmetro efetivo de cobertura, requisitos de desempenho (pressão efetiva), uniformidade de velocidade de rotação, uniformidade de vazão.

Todos estes ensaios fazem parte do escopo acreditado pelo INMETRO e em breve o LEEI pretende ampliar este escopo para outros equipamentos.

No Brasil, existem laboratórios de universidades públicas, onde foram até realizados maiores investimentos em equipamentos do que no LEEI, mas não houve investimento em pessoal exclusivo para este fim, muito menos em treinamento para os profissionais existentes. Voltou-se mais para o lado acadêmico e o de pesquisa, o que resultou em grande produção científica, mas deixando uma grande distância entre o setor público e o setor privado, principalmente dos fabricantes de equipamentos.

Ressaltamos que uma das grandes dificuldades encontradas no LEEI, foi a de ter um corpo técnico específico para o laboratório, o que coincide com o mesmo problema enfrentado nas Universidades e Instituições que pesquisam irrigação e que desejam ter em sua estrutura um laboratório que venha poder realizar ensaios para indústrias, gerando receita e desenvolvimento tecnológico.

Devem ser pensadas possíveis parcerias público-privadas que possam incentivar iniciativas como estas onde ganham os setores: privado, pois terá um serviço de qualidade e confiabilidade e, o setor público, que desenvolverá pesquisas e inovações tecnológicas.

Face ao exposto acreditamos ser o LEEI um equipamento de pesquisa, de inovação e de desenvolvimento tecnológico de grande importância à indústria de equipamentos de irrigação e a comunidade técnica científica como um todo, contribuindo para melhoria dos produtos de irrigação comercializados, bem como, criar bases para desenvolver novos produtos, gerando segurança e confiabilidade entre os vários seguimentos que compõem a cadeia da irrigação no país.

4. AGRADECIMENTOS

À FINEP, ao CNPq, ao Instituto CENTEC, a Prefeitura Municipal de Sobral, instituições que financiaram o LEEI e a Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, pelo apoio científico.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. NBR/ISO 9261. **Equipamentos de irrigação agrícola - Emissores e tubos emissores - Especificação e métodos de ensaio** São Paulo, 1991.13p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. NBR/ISO 7749-1. **Equipamentos de irrigação agrícola - Aspersores rotativos - Parte 1: Requisitos para projetos e operação.** São Paulo, 2000a.10p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. NBR 7749-2. **Equipamentos de irrigação agrícola - Aspersores rotativos - Parte 2: Uniformidade de distribuição e métodos de ensaio.** São Paulo, 2000b.06p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. NBR 15084. **Microaspersores: requisitos gerais e métodos de ensaios.** São Paulo, 2004a.14p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. NBR/ISO/IEC 17025 . **Requisitos gerais para competência de laboratórios de ensaio e calibração** São Paulo, 2004b.11p.

FRIZZONE, J.A.; BOTREL, T.A. **Ensaio & Certificação de sistemas e equipamentos de irrigação.** In: MIALHE, L.G. Máquinas Agrícolas: Ensaio & Certificação. Piracicaba: Fundação de Estudos Agrários Luiz de Queiroz, 1996. 722p.

INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA NORMALIZAÇÃO E QUALIDADE INDUSTRIAL – INMETRO. **Informações sobre acreditação de laboratórios.** Rio de Janeiro. 2005. 08p.

LIMA, S. C. R. V. **Avaliação Hidráulica de Válvulas Reguladoras de Pressão Novas e com Diferentes Tempos de Utilização.** Dissertação de Mestrado. Fortaleza. Universidade Federal do Ceará, 2001.83p.

IMPACTOS AMBIENTAIS CAUSADOS COMA IRRIGAÇÃO

Vera Lúcia Antunes de Lima; Maria Sallydelândia Sobral
de Farias; José Dantas Neto

1. INTRODUÇÃO

A técnica de irrigação é utilizada em 17% das áreas aráveis do planeta, sendo responsável por 40% da produção mundial de alimentos. A irrigação usa aproximadamente 70% das águas retiradas do sistema global de rios, lagos e mananciais subterrâneos, os outros 30% são destinados a outros usos, tais como, industrial, doméstico, geração de energia, recreação, etc. Estimativas indicam que até o ano 2025, a irrigação deverá expandir entre 20 a 30% para atender a crescente demanda de alimentos. Assumindo que o padrão de alimentação irá melhorar em vários países, cogita-se que haverá um aumento de 40% na quantidade de grãos necessário a população mundial. Segundo Rebouças (1999), as projeções de áreas irrigadas no Brasil para 2020 são de aproximadamente de 4,4 a 4,8 milhões de hectares.

O uso da irrigação tem contribuído, significativamente, para o aumento da produtividade agrícola, promovendo desenvolvimento econômico, além da incorporação, ao sistema produtivo, de áreas cujo potencial para exploração da agricultura é limitado, em razão de seus regimes pluviais. Por outro lado, a irrigação tem causado alguns problemas ao meio ambiente. Dentre eles, destaca-se a degradação dos recursos naturais, principalmente no que se refere aos recursos hídricos.

A agricultura irrigada depende inteiramente da disponibilidade ou alocação específica de recursos hídricos. Identifica-se como um problema do setor o grande desperdício de água pelos sistemas de irrigação de baixa eficiência que tradicionalmente são utilizados em regiões com grande disponibilidade hídrica. Em regiões onde a irrigação é prática intensiva e a disponibilidade de água é restrita, normalmente são observados sérios conflitos entre irrigantes. Além disso, a demanda de água no planeta utilizada na irrigação tem sido considerada como contribuinte importante na escassez de água.

O Brasil, por ser detentor de aproximadamente 15% das águas doces do planeta, dos quais 70% estão na Bacia Amazônica, é percebido como o país da abundância dos recursos hídricos e as consequências desta percepção são refletidas no mau uso e desperdício de água, mesmo nos locais em que ela é mais escassa, como é o caso da região Nordeste, na qual de acordo com Rodrigues e Irias (2004), a degradação dos recursos hídricos tende a atingir patamares alarmantes face a demanda crescente, para atender ao crescimento populacional, industrial e agrícola e a falta de comprometimento em todos os níveis de atividades quanto à conservação desse recurso. Outrossim, países com alto potencial de produtividade agrícola, como o Brasil, tendem a aumentar o uso extensivo do solo para fazer frente ao crescimento das demandas de alimento no mundo, adotando tecnologias para maximização da produtividade, destacando-se o uso da irrigação, ficando cada vez mais evidente a necessidade do desenvolvimento de

programas que tenham como foco a racionalização do uso da água.

Setores que lidam com a agricultura irrigada atentos a estes cenários e a possibilidade iminente de cobrança pela captação e consumo de água nos processos produtivos, têm sido motivados para a pesquisa e desenvolvimento de tecnologia para a redução do uso da água. Além do controle das perdas de água dos sistemas de irrigação outra via para economia de água está relacionada ao uso de águas servidas, especialmente, oriundas de esgoto doméstico e de atividades agropecuárias. Para uso destes efluentes deve-se atentar para os riscos de contaminação não só das águas superficiais como também das águas subterrâneas, dos produtos, do solo e dos usuários.

Além do elevado consumo de água, a agricultura irrigada esteia diversos impactos ao meio ambiente como o uso de agrotóxicos, perda de biodiversidade, degradação de recursos naturais e outros.

A avaliação de impacto ambiental, embora tenha sido introduzido no Brasil em 1980, pela Lei n. 6803, vinculado aos sistemas de licenciamento de atividades poluidoras ou modificadoras do meio ambiente como instrumento da Política Nacional de Meio Ambiente, instituída em 1981, pela lei . 6.938, somente teve seu uso regulamentado em 1986, pela Resolução CONAMA 01/86. Para efeito desta Resolução, considera-se impacto ambiental qualquer alteração das propriedades físicas, químicas e biológicas do meio ambiente, causada por qualquer forma de matéria ou energia resultante das atividades humanas que, direta ou indiretamente, afetam:

- I - a saúde, a segurança e o bem-estar da população;
- II - as atividades sociais e econômicas;
- III - a biota;
- IV - as condições estéticas e sanitárias do meio ambiente;
- V - a qualidade dos recursos ambientais.

A mesma Resolução, em seu Artigo 2º, explicita uma lista de atividades, dentre elas os Projetos de Irrigação e Drenagem, cujo licenciamento dependerá de elaboração de Estudo de Impacto Ambiental e respectivo Relatório de Impacto Ambiental – RIMA, a serem submetidos à aprovação do órgão estadual competente, e da SEMA em caráter supletivo.

A Constituição da República Federativa do Brasil, aprovada em 1988, impõe ao poder público, em seu artigo 225 inciso IV, a incumbência de: exigir, na forma da lei, para instalação de obra ou atividade potencialmente causadora de significativa degradação do meio ambiente, estudo prévio de impacto ambiental, a que se dará publicidade.

2. IMPACTOS AMBIENTAIS CAUSADOS PELA IRRIGAÇÃO

A avaliação dos impactos ambientais é essencial para a compreensão dos efeitos da irrigação, enquanto atividade econômica, sobre os recursos ambientais, de modo a orientar as alternativas tecnológicas mais adequadas para cada empreendimento proposto, considerando as preocupações e expectativa da população envolvida.

Metodologias para se determinar os impactos ambientais têm sido desenvolvidas, desde o início dos anos 70. Dentre elas mencionase, por seu maior emprego, os métodos *ad-hoc*; as *chec-lists* ou listas de controle; as matrizes; matriz de Leopolds; redes sequenciais de impactos; sobreposição de cartas temáticas; sistemas de informações geográficas, entre outros.

O método *ad-hoc* consiste em declarações feitas por especialistas sobre o tipo e a intensidade de um impacto; as listas de controle, variação do método anterior, adotam uma lista de parâmetros pré-definidos os quais serão examinados durante a avaliação. As matrizes usam informações bidimensionais por meio das quais avalia as atividades do projeto e os elementos específico do ambiente. A matriz de

Leopold permite integrar 100 atividades com 88 características e condições do meio biofísico e sócio-econômico e estabelece uma estimativa da magnitude do impacto numa escala de 0 a 10. As redes sequenciais de impactos são ampliações das matrizes. O método da sobreposição de cartas consiste na elaboração de diferentes cartas temáticas sobre os fatores ambientais e sobre os diferentes impactos para em seguida sobrepô-las, para obtenção de uma caracterização regional do ambiente, uma variação deste método.

3. LISTA DE CONTROLE PARA AVALIAÇÃO DE IMPACTOS DE PROJETOS DE IRRIGAÇÃO

Os Impactos ambientais, em áreas irrigadas, variam segundo as características do solo (permeabilidade, capacidade de elevação do lençol freático, etc.), as práticas agronômicas (preparo do solo, modo de aplicação de agroquímicos, rotação de culturas, etc.), o método de irrigação e a sua utilização; infraestrutura disponível, entre outros. Tomando como base esses impactos Rodrigues e Irias (2004) desenvolveram uma lista de controle, apresentada na Tabela 1, para avaliação de projetos de irrigação e critérios para avaliação.

Os primeiro fator a ser considerado na avaliação do impacto da agricultura irrigada refere-se ao regime hídrico, seguido pelo manejo do solo, sistema de produção, pragas, infra-estrutura, relações trabalhistas, base econômica e sustentabilidade dos sistemas.

4. MODIFICAÇÕES NO REGIME HÍDRICO

Em termos de quantidade e de qualidade, a água tem se tornado um motivador de discussões políticas, científicas e acadêmicas, e o uso inadequado dos recursos hídricos na região do Semi-Árido nordestino pressupõe uma crescente e séria ameaça à saúde e ao bem estar da população das cidades circunvizinhas às barragens, açudes e rios e à produção segura de alimentos. O desenvolvimento agro-industrial, a

Tabela 1. Lista de controle para avaliação de projetos de irrigação e critérios para avaliação

FATOR	CRITÉRIO PARA AVALIAÇÃO
1. Modificação do regime hídrico a. Qualidade da água b. Quantidade e disponibilidade	<ul style="list-style-type: none"> • Interferência da irrigação sobre os usos múltiplos, presentes ou potenciais, do recurso hídrico (consideração do volume a ser consumido e conservação da qualidade).
2. Modificação do Manejo do solo	<ul style="list-style-type: none"> • Efeitos da aplicação da água na conservação de nutrientes (lixiviação de salinização) e do solo (erosão, compactação).
3. Modificação do sistema de produção	<ul style="list-style-type: none"> • Tendências de introdução de culturas e cultivares, rotação, manejo da matéria orgânica.
4. Modificação do comportamento de pragas e doenças	<ul style="list-style-type: none"> • Avaliação da progressão de níveis de dano econômico, seleção de pesticidas, manejo integrado de pragas, métodos de aplicação de pesticidas.
5. Modificação da infra-estrutura	<ul style="list-style-type: none"> • Capacidade de armazenamento e escoamento da produção.
6. Modificação das relações trabalhistas	<ul style="list-style-type: none"> • Disponibilidade de mão-de-obra
7. Modificação da base econômica	<ul style="list-style-type: none"> • Valor da terra, capacidade de investimento, diversificação.
8. Sustentabilidade do sistema	<ul style="list-style-type: none"> • Conservação da base de recursos, existência e abertura de mercados, agroindustrialização.

agricultura irrigada e os agrossistemas, que dependem de suprimentos de água de qualidade, também se encontram comprometidos, resultando na aceleração das desigualdades sócio-econômicas, evidenciando-se já alguns processos de degradação dos recursos naturais, pois os resíduos originados dessas atividades apresentam as seguintes categorias de contaminação: metais pesados, óleos, agrotóxicos, detergentes, objetos sólidos e processos afins, atividades microbianas, fertilizantes químicos e insumos. Estas categorias de contaminação causam efeitos negativos aos recursos naturais, à saúde humana, impedimentos para a exploração da agricultura

A agricultura irrigada é agente potencial de degradação de águas superficiais e subterrâneas, através da erosão e carreamento de agroquímicos e fertilizantes via escoamento superficial e lixiviação profunda. A destinação das embalagens de agroquímicos utilizadas apresenta papel fundamental neste aspecto. O carreamento de solo no processo erosão pode ser causado por uma irrigação mal dimensionada, através de lâmina de irrigação superior à capacidade de infiltração do solo, agravada pela não observação da topografia da área onde se pretende irrigar. O processo erosivo acarreta assoreamento de rios e de outros mananciais, bem como aumento da turbidez da água e conseqüente redução da luminosidade e desequilíbrio do ecossistema aquático.

A maior parte das nossas águas correntes está sujeita a múltiplos usos antropogênicos e exigências ecológicas, daí ser imprescindível a descrição da situação da qualidade das águas, tanto em rios em condições naturais, como também para águas correntes de uso intensivo para atender ao planejamento do gerenciamento dos recursos hídricos e à proteção da natureza. As águas representam sistemas complexos nos quais aparecem os mais diferentes efeitos isolados e estes devem ser avaliados por meio da análise por si só ou como resultante, pois efeitos de ação recíproca e sinérgica assim como antagônicas, muitas vezes tem maior importância do que a grandeza absoluta de uma substância isolada, bem como a dissimulação de substâncias, em determinadas condições, não devem ser menosprezadas (Fundação do Meio Ambiente de Santa Catarina, 1999 citado por OLIVEIRA, 2001).

Estudos apresentados pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (US-EPA, 1994) identificaram a agricultura como a principal causa da deterioração da qualidade da água dos rios e lagos nos Estados Unidos e a terceira, em importância para a poluição dos estuários. Os sedimentos, os nutrientes e os pesticidas ocupam lugar entre as

quatro categorias e estão significativamente associados à agricultura.

Nos perímetros irrigados com manejo deficiente verifica-se o desperdício de água aplicada pelos diferentes sistemas. Irrigações excessivas causam perdas de águas e nutrientes devido à drenagem para camadas mais profundas do solo, fora do alcance do sistema radicular das plantas, ocasionando desperdício de recursos e riscos de contaminação ambiental.

Os projetos de irrigação de grande porte demandam, a construção de reservatórios de acumulação, lagos, unidades de bombeamento, canais, tubulações, sistemas de irrigação, sistemas de distribuição d'água nas parcelas irrigadas e sistemas de drenagem. Esses empreendimentos, apesar dos inegáveis benefícios proporcionados, podem acarretar sérios impactos nos meios físico, biótico e antrópico.

A construção de reservatórios representa significativa interferência antropogênica e provoca grandes impactos sociais, o avanço da urbanização, a incidência maior de doenças de veiculação hídrica e o reassentamento da população. No meio biofísico, esses projetos provocam impactos basicamente na temperatura do ar, umidade do ar, e nos ecossistemas, acarretados pela flutuação do nível d'água e estratificação térmica dos lagos. Nas áreas a jusante, os efeitos podem ser sentidos no amortecimento de cheias, na garantia do fluxo mínimo, na redução dos sedimentos em suspensão (menos nutrientes para os peixes), e no rebaixamento do lençol freático.

A retificação de rios, a regularização do seu curso e a construção de diques de proteção e vertedores aceleram ou desaceleram o escoamento superficial, causando, sem dúvida, impactos nos ecossistemas fluviais.

Deve-se considerar que mesmo quando há água em quantidade suficiente, pode haver restrição de disponibilidade, devido a usos projetados ou antecipados. Surge, então, a necessidade de criar alternativas para preservar em quantidade e qualidade os recursos hídricos

destinados a irrigação, para tanto destaca-se o reúso de águas de efluentes, geralmente, de esgoto doméstico.

5. REUSO DE ÁGUA NA IRRIGAÇÃO

A aplicação de esgotos no solo é uma forma efetiva de controle da poluição e uma alternativa viável para aumentar a disponibilidade hídrica em regiões áridas e semi-áridas. Os maiores benefícios dessa forma de reúso são os associados aos aspectos econômicos, ambientais e de saúde pública.

a) Efeitos Positivos

Estudos efetuados em diversos países demonstraram que a produtividade agrícola aumenta significativamente em sistemas de irrigação com esgotos adequadamente administrados. Um exemplo de recuperação econômica, associada à disponibilidade de esgotos para irrigação, é o caso do Vale do Mesquital, no México, onde a renda agrícola aumentou de quase zero no início do século passado, quando os esgotos da Cidade do México foram postos à disposição da região, até aproximadamente 4 milhões de dólares por hectare, em 1990.

Sistemas de reúso de água para fins agrícolas adequadamente planejados e administrados, proporcionam melhorias ambientais e melhorias de condições de saúde, entre as quais destacam-se:

- Minimização das descargas de esgotos em corpos de água;
- Preservação dos recursos subterrâneos, principalmente em áreas onde a utilização excessiva de aquíferos provoca intrusão de cunha salina ou subsidência de terrenos;
- Conservação do solo, pela acumulação de húmus, e aumento da resistência à erosão;
- Aumento da concentração de matéria orgânica do solo, possibilitando maior retenção de água;

→ Aumento da produção de alimentos, principalmente em áreas carentes, elevando, desta forma, os níveis de saúde, qualidade de vida e condições sociais de populações associadas aos esquemas de reúso.

Figueiredo (2004) trabalhou com duas cultivares fibra colorida do algodoeiro herbáceo, BRS 200 – Marrom e bulk Verde - CNPA 7H, irrigados com água residuária tratada e verificou-se que a água residuária pode ser boa fonte de nutrientes pode ser utilizada como fonte de adubação orgânica, em substituição a adubação mineral no que se refere a produção das cultivares do algodão colorido estudadas.

Nascimento et al (2005) avaliou as propriedades químicas de um solo cultivado com mamona, irrigados com água residuária tratada e água de abastecimento. Foram analisado os teores de fósforo total, potássio, sódio, cálcio, magnésio, hidrogênio e alumínio (trocaíveis), carbono, matéria orgânica e nitrogênio total; além dos micronutrientes boro, cobre, ferro, manganês e zinco. O solo dos tratamentos irrigados com água residuária apresentaras um bom incremento de matéria orgânica, nitrogênio e fósforo, nutrientes essenciais ao crescimento e desenvolvimento da planta.

b) Efeitos Negativos

Às águas residuárias, se não adequadamente tratadas, podem transmitir diversas doenças ao homem, tais como: disenterias e diarreias bacterianas, febre tifóide, cólera, hepatite, amebíase, giardíase e leptospirose, entre outras, portanto a aplicação das águas residuárias na agricultura, quando não monitorada adequadamente, pode provocar efeitos danosos tanto para o ambiente quanto para os usuários. Do ponto de vista do usuário os grupos mais expostos são:

- a) consumidores de vegetais contaminados;
- b) consumidores de produtos de animais que pastam em áreas irrigadas com efluentes;
- c) trabalhadores rurais que lidam com o sistema produtivo; e

d) público residente nas proximidades de áreas irrigadas com efluentes.

No Brasil, pouco ou quase nada se tem registrado sobre reuso de efluentes, tratados ou não. O que não quer dizer, que não ocorra de forma indiscriminada e sem controle, sendo prática corrente o reuso indireto, pois somente 10% do volume total de esgotos coletados no país são submetidos a algum tipo de tratamento (ABES,1994) e o restante é lançado diretamente nos curso d'água.Existem muitas informações sobre os efeitos dos recursos hídricos superficiais e subterrâneos deteriorados sobre a saúde humana. Há diversas doenças de veiculação hídrica que são conseqüências de organismos que tem um ciclo de vida de alguma forma relacionado com águas estagnadas, rios, represas, estuários ou lagos. Estas doenças, em Continentes como América Latina, África e no Sudoeste da Ásia, matam mais pessoas que todas as outras doenças em conjunto (GUERRANT,1996).

Além da poluição direta, por lançamento de esgotos, falta de sistemas de tratamento de efluentes e saneamento, há a chamada poluição difusa, que ocorre com o arrasto de lixo, resíduos e diversos tipos de materiais sólidos que são levados aos rios com a enxurrada. Ao “lavar a atmosfera”, a chuva também traz poeira e gases aos corpos d'água. Nas zonas rurais, os maiores vilões da água são os agrotóxicos utilizados nas lavouras, seguidos do lixo que é jogado nas águas e margens de rios e lagos, além das atividades pecuárias como a suinocultura, esterqueiras e currais, construídos próximos aos corpos d'água.

Em relação ao meio ambiente os problemas de maior repercussão são aqueles relacionados a contaminação das águas, como a eutrofização das águas superficiais e a poluição por nitratos nos aquíferos subterrâneos utilizados para abastecimento de água.

O processo de eutrofização decorre da acumulação de Nitrogênio, Fósforo e outros fertilizantes, presentes no esgoto, nos corpos de

água. Em um meio eutrofizado, se produz a proliferação de como algas que cobrem a superfície, trazendo em consequência um elevado consumo de oxigênio causando sua redução meio aquático, além de dificultar a incidência da radiação solar embaixo da superfície. Este fenômeno produz uma diminuição da capacidade autodepuradora do meio e uma menor capacidade fotossintética dos organismos aquáticos (García, 2001).

O acúmulo de contaminantes químicos no solo é outro efeito negativo que pode ocorrer. Dependendo das características dos esgotos, a prática da irrigação por longos períodos pode levar à acumulação de compostos tóxicos, orgânicos e inorgânicos e ao aumento significativo da salinidade do solo.

A fim de evitar efeitos indesejáveis, a irrigação deve ser efetuada com esgotos tratados, de origem, preferencialmente, doméstica. A necessidade de um sistema adequado de drenagem também deve ser considerada, visando minimizar o processo de salinização de solos irrigados com esgotos. Deve-se atentar para o fato de que, a aplicação de esgotos por períodos muito longos pode levar à criação de *habitats* propícios à proliferação de vetores transmissores de doenças, tais como mosquitos e algumas espécies de caramujos. Neste caso, devem ser empregadas técnicas integradas de controle de vetores, para proteger os grupos de risco correspondentes.

A Agenda 21 dedicou importância especial ao reuso, recomendando aos países participantes da ECO, a implementação de políticas de gestão dirigidas para o uso e reciclagem de efluentes, integrando proteção da saúde pública de grupos de risco, com práticas ambientais adequadas.

No Capítulo 21- “Gestão ambientalmente adequada de resíduos líquidos e sólidos”, Área Programática B - “Maximizando o reuso e a reciclagem ambientalmente adequadas”, estabeleceu, como objetivos básicos: “vitalizar e ampliar os sistemas nacionais de reuso e reciclagem de resíduos”, e “tornar disponível informações, tecnologia e instrumen-

tos de gestão apropriados para encorajar e tornar operacional, sistemas de reciclagem e uso de águas residuárias”.

No Brasil, a utilização de águas residuárias na irrigação, como forma de disposição e tratamento de efluentes ou uma maneira de se aproveitar os nutrientes contidos nesses efluentes, tem cada vez mais ocorrido. São vários os estudos sobre a qualidade de águas de irrigação ou de hortaliças comercializadas em diversas regiões do país, reforçando os indícios da prática disseminada de irrigação com esgotos, ao menos de forma indireta; e o enorme déficit de tratamento de esgotos no país exigirá um esforço planejado para a superação deste quadro de sérios danos ambientais e de riscos de saúde pública (Bastos, 1999).

A utilização de águas residuárias na irrigação, como forma de disposição e tratamento de efluentes ou uma maneira de se aproveitar os nutrientes contidos nesses efluentes, tem cada vez mais ocorrido, na região do Seridó, no Rio Grande do Norte, têm destaque na prática do reuso, como a aplicação sistemática de efluentes, que recebem tratamento primário, para irrigação de capineiras nas vizinhanças da área urbana, com maior destaque às sedes municipais de Santa Cruz, Campo Redondo, Caicó, Currais Novos, Goianinha, Eduardo Gomes e Parelhas.

Para utilização de águas servidas na irrigação devem ser consideradas as limitações: restrição de solo e de cultura, dimensionamento do sistema de irrigação, demanda volumétrica de água, possível interferências para os múltiplos usos, potenciais dos recursos hídricos locais da microbacia, desde a conservação da vida silvestre até abastecimento público e as recomendações da legislação brasileira.

Independente da relação de adsorção de sódio, o teor absoluto de sais de uma água é um fator limitante de seu uso na agricultura, tendo em vista a variação de tolerância a sais por parte da cultura. Os níveis de salinidade da água de irrigação gera impactos no solo, sobre as plantas, interferindo em seu processo osmótico. Alguns constituin-

tes isolados, como o Boro, são tóxicos, mesmo em pequenos teores. Teores elevados de salinidade comprometem a vida útil dos equipamentos de irrigação, acarretando impactos econômicos.

A contaminação dos solos pelo uso de água com presença de metais pesados é uma preocupação específica: alumínio, arsênio, berilo, cromo, cádmio, mercúrio, níquel, antimônio e estanho. Outros elementos são de importância ecotoxicológica e são nutrientes da planta, são eles: boro, cobalto, cobre ferro, manganês, molibdênio e zinco.

Outro problema com a lixiviação dos nitratos em direção ao subsolo, é que estes podem contaminar os aquíferos subterrâneos, criando graves problemas à saúde se houver consumo da água rica em nitratos, devido a sua transformação em nitritos, que pode provoca doenças que afetam o estômago e o fígado.

São vários os estudos sobre a qualidade de águas de irrigação ou de hortaliças comercializadas em diversas regiões do país, reforçando os indícios da prática disseminada de irrigação com esgotos, ao menos de forma indireta; e o enorme déficit de tratamento de esgotos no país exigirá um esforço planejado para a superação deste quadro de sérios danos ambientais e de riscos de saúde pública (BASTOS, 1999).

São dimensões relevantes para se avaliar os impactos ambientais: as ações de captação de água, disponibilidade, distribuição e uso e a sua descarga. Um dos instrumentos dos mais importantes para minimizar os impactos nos recursos naturais na área irrigada é o gerenciamento da bacia hidrográfica com unidade básica de planejamento ambiental, de forma a desenvolver, implementar, atingir, analisar criticamente e manter uma política de irrigação ambientalmente viável.

6. MODIFICAÇÃO DO MANEJO DO SOLO

Os impactos da irrigação mais acentuados na degradação do solo referem-se a salinização, lixiviação de nutrientes e erosão. Freire

Filho (2002) estudando o impacto da irrigação localizada, no solo, na região de Petrolina-PE, no período de 1998 a 2001, constatou que, nas áreas irrigadas por microaspersão, na camada mais superficial ocorreu uma diminuição significativa nos teores médio do pH do solo de 5,96 para 4,73, passando de mediamente ácido para fortemente ácido e manteve-se constante na camada mais profunda 6,50 e 6,44, permanecendo-se mediamente ácido. Este impacto no pH do solo, pode ter sido ocasionada pela irrigação que afeta o pH do solo, ou seja a água passando pelo solo, lixivia os nutrientes básicos, como o cálcio e o magnésio, na água de drenagem, estes são substituídos por elementos acidificantes como o hidrogênio, o manganês e o alumínio, logo nos solos onde há irrigação há uma probabilidade de ocorrer acidificação dos mesmos.

A degradação do solo é um grave problema, particularmente nas regiões tropicais e subtropicais. Nas áreas irrigadas, o início do processo degradativo do solo não é percebido pelos agricultores, porque ocorre de forma gradual, por meio da erosão laminar. Nas áreas de produção, em que o solo encontra-se sem vegetação ou sem cultura de cobertura, podem ocorrer às erosões. A erosão compromete a produtividade, principalmente pela degradação da estrutura do solo, pela redução na capacidade de retenção de água e pela perda de nutrientes e matéria orgânica.

Além disso, muitos agricultores utilizam doses elevadas de corretivo e de fertilizantes, principalmente os nitrogenados, para obter altas produtividades e garantir retorno financeiro, sem as devidas orientações de técnicos. Esses fertilizantes, além de serem recursos não-renováveis, devido à sua alta solubilidade, podem ser facilmente lixiviados e carregados para corpos d'água (superficiais e subterrâneos), onde se comportam como poluentes.

A falta de manejo adequado nos projetos de irrigação, é uma das principais causas de desertificação, devido a salinização do solo: a água é trazida de fora, muitas vezes, em grandes quantidades, dissolvendo

os sais presentes no solo e fazendo com que eles venham para a superfície; devido ao clima seco, a água facilmente evapora e resta somente o sal.

A salinização dos solos é causada, principalmente, pela drenagem inadequada e a irrigação excessiva. Com a evaporação, os sais se concentram na zona superficial do solo. O impacto da salinização é medido em termos de redução percentual da produtividade potencial, em função do aumento da condutividade elétrica do extrato de saturação do solo. O excesso de sais no perfil também provoca dispersão das argilas e conseqüente desestruturação do solo, aumentando o potencial de compactação, redução da infiltração e incremento do escoamento superficial, é causa decisiva no processo de desertificação.

Em áreas onde o solo já está salinizado, a recuperação é um processo muito caro e raramente viável e para aproveitamento dessas áreas se faz necessário o desenvolvimento de genótipos mais tolerantes à salinidade, o que viabiliza sua exploração em solo salino (Araújo, 1994). O acúmulo de sais no solo também pode ser um processo natural, observado principalmente quando há deficiência de drenagem no solo.

Diversas pesquisas demonstraram os efeitos negativos da salinidade sobre diversas culturas de importância econômica (Dantas et al., 2002; Broetto et al., 1995; Amorim et al., 2002; Carmo et al., 2003), comprovando a perda de produtividade causada por este fator. O aumento da salinidade diminuiu o potencial osmótico da solução do solo e dificultam a absorção de água pelas raízes ao mesmo tempo em que íons Na^+ e Cl^- se acumulam nas folhas e afetam os processos fisiológicos da planta. A tolerância à salinidade também pode variar entre genótipos de uma mesma espécie e o estágio de desenvolvimento da planta (Gheyi, 1997).

Áreas onde o lençol freático é elevado são difíceis de ser manejadas, dificulta a lixiviação dos sais e a aeração do solo. A implantação de um sistema de drenagem pode minimizar estes impactos, no entanto, o rebaixamento do lençol freático deve ser realizado levando em

consideração, os diversos usos de água subterrânea na bacia hidrográfica

O princípio básico para se evitar a salinização de um solo é manter o equilíbrio entre a quantidade de sais que é fornecida ao solo, através da irrigação, com a quantidade de sais que é retirada através da drenagem. Em climas áridos, ou com velocidade do vento elevada, a evaporação da água enriquece o solo com os solutos, potencializando o perigo da salinização. Da mesma forma, solos pouco permeáveis tendem a concentrar sais.

A escolha do método de irrigação a ser usado em cada área, deve ser baseada na viabilidade técnica, econômica do projeto e nos impactos sociais ocasionados ao meio sócio ambiental local. Deve se considerar o tipo de solo da área a ser irrigada. Solos com baixa capacidade de retenção de água exigem irrigações leves e frequentes, as quais são de difícil manejo na irrigação por superfície e de fácil manejo na irrigação por aspersão e gotejamento. A quantidade, qualidade e o custo da água também influem na escolha do método de irrigação a uma tendência atual da utilização de métodos de menor consumo de água.

Águas com concentrações mais elevadas de cloreto de sódio, quando usadas na irrigação, devem ser utilizadas pelo método de superfície ou em alguns casos por gotejamento, mas nunca por aspersão, isto porque haverá corrosão das tubulações, diminuindo sua vida útil, e queima da parte aérea dos vegetais, (Bernardo, 1995).

A acumulação de sais nos solos pode causar danos irreversíveis para sua estrutura, que é essencial para irrigação e produção de culturas. Os efeitos são mais intensos em solos argilosos onde a presença de sódio pode modificar a estrutura do solo. Isto contribui para o empobrecimento do mesmo, tornando-o difícil de trabalhar e impedindo a lixiviação por técnicas padrões. O gesso contido na água de irrigação ou incorporado ao solo antes da irrigação é uma prática que é utilizada para reduzir o teor de sódio de solos sódicos.

Lima (1997) observando a salinidade do solo, resultantes da apli-

cação da água com condutividade elétrica igual a $2,6 \text{ dS m}^{-1}$, verificou, para o ciclo da cultura do feijão, uma evolução da salinidade, da ordem de 1,53 vezes o valor de salinidade inicial, para quatro os níveis de fração de lixiviação aplicados. Deste resultado, pode-se inferir que a lixiviação não foi tão eficaz, no controle da salinidade do solo, quando a água, teve uma condutividade elétrica elevada.

7. MODIFICAÇÃO DO SISTEMA DE PRODUÇÃO

Outro fator a ser considerado na agricultura irrigada é a modificação no sistema de produção que ocorre com a introdução de novas culturas, bem como modificações no regime de ocupação do solo, com destaque para a monocultura. O uso da terra exaustivamente para cultivar um único tipo de alimento sabidamente degrada o solo, que perdem nutrientes e fertilidade, este fator e o desmatamento de vegetação nativa - para promover pastos e plantações - estão entre os principais responsáveis pela taxa de decréscimo médio anual de 1,8% na produtividade agrícola das regiões afetadas no país. Estas, por sua vez, somam mais de 665 mil km^2 , atingindo 42% da população nordestina e mais de 10% da população brasileira, segundo dados da Fundação Esquel. Ou seja, são mais de 15 milhões de pessoas vivendo em áreas cuja situação é considerada moderada, grave ou muito grave. No mundo, as regiões semi-áridas - portanto, suscetíveis ao processo - representam quase um terço da superfície do planeta e abrigam mais de 1 bilhão de pessoas. Atualmente, calcula-se que 100 países já apresentem terras em processo de desertificação.

A expansão de grandes áreas e modernização da agricultura em geral originaram impactos de ordem socioambiental nas diferentes áreas ocupadas pelo cultivo de soja, colocando em cheque a sustentabilidade destas áreas. Políticas agrícolas que considerem a totalidade e a biodiversidade do ambiente agrícola do país, baseadas no conhecimento amplo dos recursos naturais, das condições agroecológicas, da pro-

dução nos espaços geográficos e dos padrões de ocupação são bastante pertinentes (Medeiros, 1998).

Pesquisa realizada por (Freire Filho 2002) no sub-médio do Vale do São Francisco, identificou impacto ambiental no uso da fertirrigação, em solos irrigados na cultura da uva fina de mesa, concluiu-se que: as áreas devem ser monitoradas regularmente, uma vez que foi verificado elevado percentual de aumento dos níveis de metais pesados em três anos de observação; apesar do aumento dos teores médios de matéria orgânica, recomenda-se que a propriedade faça o uso de compostos orgânicos como: esterco animal (bovino, caprino etc), pois estes melhoram a estrutura física, química e biológica do solo, e em consequência a vidas da planta; os níveis de pH tanto da solução do solo como da água devem se acompanhados, para que sejam feitas as correções necessárias, pois este interfere muito na vida das plantas, dos microrganismos e do solo.

O manejo eficiente das áreas irrigadas deve reduzir a exposição do solo descoberto, utilizar a rotação de culturas e plantio direto para culturas anuais, manutenção de cordões de vegetação permanente e quebra-ventos, e cuidados técnicos gerais com os equipamentos e sistemas complementares de controle da aplicação, drenagem e tratamento da água. Todo o sistema de carreadores, estradas, diques, e reservatórios devem ser planejados considerando técnicas de conservação do solo e água desde a fase de implantação.

8. MODIFICAÇÃO DO COMPORTAMENTO DE PRAGAS E DOENÇAS

Com a introdução de novas culturas ocorre o surgimento de pragas e doenças de várias natureza, para combatê-las, o método mais comum tem sido a aplicação de agroquímicos.

A exposição continuada, por período longo, a níveis relativamente baixos de agrotóxicos pode afetar a saúde humana, levando a casos

crônicos, mal definidos, às vezes extremamente graves. Casos de intoxicações por agrotóxicos são frequentemente observados e relatados, pelos trabalhadores. O uso desordenado e excessivo desses produtos acarreta também impacto econômico negativo nos agricultores, com nítidas repercussões sociais.

A ação neurotóxica retardada provocada por inseticidas do grupo dos organofosforados foi comprovada em trabalho realizado no município de Vitória de Santo Antão-PE, pelas fonoaudiólogas (Teixeira e Brandão, 1996) onde dos 98 aplicadores de agrotóxicos pesquisados, 56 apresentaram perda auditiva e 42 foram classificados dentro do padrão de normalidade.

É importante ressaltar que embora a legislação brasileira exija que o uso de agrotóxico seja feito com base no Receituário Agrônômico, na prática isto não ocorre, trazendo riscos direto e indireto para os agricultores, formuladores, comerciantes e consumidores, os agrotóxicos estão presentes na mesa do brasileiro nas mais variadas formas e quantidades.

Os agrotóxicos, embora desenvolvidos para terem ação biocida, são potencialmente danosos para todos os organismos vivos, todavia, sua toxicidade e comportamento no ambiente variam muito. Esses efeitos podem ser crônicos quando interferem na expectativa de vida, crescimento, fisiologia, comportamento e reprodução dos organismos e/ou ecológicos quando interferem na disponibilidade de alimentos, no habitat e na biodiversidade, incluindo os efeitos sobre os inimigos naturais das pragas e a resistência induzida aos próprios agrotóxicos.

9. MODIFICAÇÃO DAS RELAÇÕES TRABALHISTAS

Os projetos de irrigação favorecem a quase totalidade da ocupação do solo praticamente durante todo o ano, favorecendo a geração de empregos, exercendo forte impacto na disponibilidade de mão-de-obra e outros aspectos trabalhistas.

Fatores como a geração de emprego, a produção local de alimentos e a utilização de equipamentos produzidos localmente têm implicações na economia local e regional, que poderão promover tanto impactos positivos como, alterações no valor da terra, elevação da base econômica local e da capacidade de investimento e de poupança, por outro lado, podem propiciar o surgimento de conflitos de posse da terra e a possível desestruturação da base comunitária local, quando projetos inadequadamente dimensionados são impostos sobre uma base socialmente não preparada (Rodrigues & Irias, 2004)

10. MITIGAÇÃO DOS IMPACTOS DA AGRICULTURA IRRIGADA

As medidas de prevenção e atenuação dos impactos (medidas preventivas e mitigadoras) são aquelas que podem ser aplicadas aos princípios de concepção, de construção e de controle, de modo a prevenir, reduzir ou eliminar os eventuais efeitos do projeto e, se possível, melhorar a qualidade do meio ambiente (Ribeiro, 2004).

A mitigação de impactos indicadas para áreas irrigadas podem ser agrupadas em relação à sua inserção em três níveis de complexidade, o meio abiótico, referente ao ambiente físicoquímico, ao meio biótico, referente às interações entre os organismos e o ambiente, e o meio socioeconômico e cultural.

O Quadro 1, Adaptado de (Dougherty & Hall, 1995), apresenta uma síntese dos principais problemas verificados em projetos de irrigação e drenagem e medidas mitigadoras recomendadas para cada situação.

11. MONITORAMENTO

O monitoramento, por meio da coleta de dados e da sua avaliação, tem como objetivo registrar a dinâmica do projeto de irrigação, verificando a eficiência das medidas mitigadoras, identificando impactos não previs-

tos e buscando estabelecer compensação pelos efeitos adversos.

Quadro 1. Principais problemas verificados em projetos de irrigação e drenagem e medidas mitigadoras.

Impactos ambientais	Medidas de mitigação
Degradação das áreas irrigadas	- Melhorar a operação da irrigação e drenagem para o adequado uso da água "quanto e quando" - Prever a descarga da água de drenagem, em lagoas de evaporação ou diretamente para o mar, evitando contaminação das águas do rio através da água de drenagem.
Salinização	- Manutenção dos canais para prevenir vazamentos, e reduzir ineficiências resultantes de sedimentação e ervas daninhas. Manter o acesso aos canais conforme projeto.
Alcalinização	- Calcular a lâmina de lixiviação como uma operação específica.
Lençol freático	- Arranjo ou ajuste no manejo da irrigação para assegurar renda suficiente para manutenção dos sistemas de irrigação e drenagem.
Acidificação do solo	- Fazer análise de solos e proporcionar mudanças administrativas de modo que problemas potenciais possam ser monitorados.
Condições sócio-econômicas Reduzidas	- Monitoramento da irrigação e drenagem para prevenir disseminação de doenças. - Instruções sobre as causas de doenças. - Melhorar as condições de saúde.
Aumento da incidência de doenças através da água	- Disponibilizar tempo e dinheiro suficiente para uma extensiva participação pública para assegurar que o planejamento será otimizado, todos os setores da sociedade afetados e/ou envolvidos na agricultura irrigada, particularmente no que se refere aos direitos de terra e água.
Aumento das injustiças sociais	- Avaliar o mercado, os serviços financeiros e extensão agrícola associadas às mudanças propostas pela irrigação e drenagem.
Infra-estrutura comunitária Deficiente	- Assegurar que a intensificação das atividades agrícolas não impede o desenvolvimento de outra atividade econômica ou de subsistência, como plantio de hortas para utilização doméstica, forragens ou - Fornecer a curto prazo suporte e/ou habilidades alternativas de subsistência se a irrigação tornar desfavorável o sustento existente.
Baixa qualidade da água: Redução na qualidade da água de irrigação	- Definir e administrar os níveis da qualidade da água escoada (incluindo monitoramento).
Problemas na qualidade de água dos usuários a jusante causada pelo escoamento da água de Irrigação	- Controle do desenvolvimento industrial. - Escolher um local para armazenar água salina, e construção de canais para condução da água salina. - Alertar para os perigos de contaminação por pesticidas ou esgoto. - Monitorar a qualidade da água de irrigação.
Degradação ecológica: Redução da biodiversidade em área de projeto	- Estabelecer as exigências ecológicas. - Monitorar as represas para atender as necessidades à jusante e proporcionar o desenvolvimento da vida selvagem as margens dos reservatórios.
Prejuízos causados aos ecossistemas a jusante devido a escassez da água tanto em qualidade como em quantidade	- Planejamento das terras (de acordo com a lei e apoio das instituições de proteção) para áreas de inundação; várzeas; bacias; reservatórios para a água de drenagem; córrego de rios.
Depleção da água no solo para consumos e poços para irrigação	- Determinar e fazer cumprir os regulamentos do uso indevido. - Monitorar os níveis de água no solo.
Intrusão salina pela água do mar Redução de fluxo/várzeas	- Ajustar os custos do uso indevido da água.

Adaptado de (Dougherty & Hall, 1995)

12. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo procurou-se sintetizar informações sobre Impactos ambientais causados com a irrigação. Alguns empreendedores entendem o estudo de impacto ambiental como um entrave a aprovação de projetos que trariam contribuição para o desenvolvimento econômico do local de sua implantação. Na nossa visão trata-se de um instrumento de gestão que pode ajudar a evitar erros e danos que teriam custos ambientais e econômicos significativos. Além disso, o estudo de impactos ambientais torna transparente o processo de licenciamento ambiental, possibilitado a intervenção e envolvimento dos diferentes agentes sociais nos projetos de irrigação e, conseqüentemente, nos processos de desenvolvimento de sua região.

13. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMORIM, J. R. A.; FERNANDES, P. D.; GHEYI, H. R. Efeito da salinidade e modo de aplicação da água de irrigação no crescimento e produção de alho. Pesquisa Agropecuária Brasileira, v. 37, n. 2, p.167-176, 2002.

ARAÚJO, C. A. S. Avaliação de feijoeiros quanto à tolerância à salinidade em solução nutritiva. Viçosa: UFV, 1994. 87p. Dissertação Mestrado.

BASTOS, R.K.X. Utilização Agrícola de Esgotos Sanitários. Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental - ABES. Recife. 1999. 116p

BROETTO, F.; LIMA, G. P. P.; BRASIL, O. G. Tolerância à salinidade em feijão (*Phaseolus vulgaris* L). Scientia Agrícola, v. 52, n. 1, p.164-166, 1995.

CARMO, G. A.; MEDEIROS, J. F.; TAVARES, J. C. Crescimento de bananeiras sob diferentes níveis de salinidade da água de irrigação. Revista Brasileira de Fruticultura, v. 25, n. 3, p. 513-518, 2003.

CATÁLOGO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL. ABES – Associação Brasileira de Engenharia Sanitária

DANTAS, J. P.; MARINHO, F. J. L., FERREIRA, M. M. M. Avaliação de genótipos de caupi sob salinidade. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 6, n. 3, p. 425- 430, 2002.

DOUGHERTY, T. C; HALL, A. W. Environmental impact assessment of irrigation and drainage projects. *Irrigation and Drainage Paper N° 53*, FAO, 1995. Rome, Italy. 85p.

EMBRAPA-CNPMA. Monitoramento da qualidade das águas para o desenvolvimento do semi-árido brasileiro - Ecoágua. Jaguariúna: EMBRAPA-CNPMA, 1999a (Projeto 11.0.99.240).

FIGUEIREDO, I. C. M. Água Residuária e Biossólido no Cultivo do Algodão Colorido. Dissertação de Mestrado. 2003. UFCG.

MEDEIROS, S. A. F. Agricultura moderna e demandas ambientais: o caso da sustentabilidade da soja nos cerrados. DUARTE, L. M. G. & SANTANA, M. L. (orgs.) *Tristes cerrados. Sociedade e biodiversidade*. Brasília: Paralelo 15, pp.127-145, 1998.

NASCIMENTO, M. B. H.; LIMA, V. L. A; SOUZA, A. P. ; AZEVEDO, C.A.V. Propriedades químicas dos solos cultivos com mamona, irrigados com água residuária e adubados com biossólidos.

REBOUÇAS, A. C. Água Doce no Mundo e no Brasil, In: REBOUÇAS, A. C., BRAGA, B., TUNDISI, J. G., (Org.), *Águas Doces no Brasil: Capital Ecológico, Uso e Conservação*, São Paulo – SP, Editora Escrituras. 1999.

RODRIGUES, G. S. e IRIAS, L. J. M.; Considerações sobre os Impactos Ambientais da Agricultura Irrigada. Jaguariúna : Embrapa Meio Ambiente, 2004. 7p. (Embrapa Meio Ambiente. Circular Técnico 7).

TEIXEIRA, C. F; BRANDÃO, M. F. Efeitos dos Agrotóxicos no sistema auditivo dos trabalhadores rurais, Recife – PE. 1996.

ASPECTOS MICROBIOLÓGICOS DA ÁGUA DE REÚSO DESTINADA À IRRIGAÇÃO

Beatriz Susana Ovruski de Ceballos

1. IMPORTÂNCIA DO REÚSO

O aumento da demanda de água de boa qualidade para usos múltiplos unido ao descaso com a gestão dos recursos hídricos e com a preservação ambiental levou à situação generalizada de escassez de água e conflitos pelo uso, seja em regiões áridas, semi-áridas ou com ofertas significativas de água (Tundisi, 2003).

Nos últimos anos buscam-se fontes alternativas de água, pelo menos para usos menos exigentes em relação aos aspectos qualitativos (Florêncio e col., 2006). O reúso com águas residuais, provenientes de esgotos domésticos tratados é cada vez mais um grande atrativo e uma realidade no Brasil, na busca de satisfazer as demandas crescentes para usos diversos e de preservar as águas de melhor qualidade

para usos mais exigentes.

São numerosas as modalidades de reúso praticadas em diversos países, na zona urbana e na rural, para usos paisagísticos, irrigação de campos de esportes, parques, jardins, canteiros públicos, descargas de vasos sanitários, lavado das ruas, combate a incêndios, recarga de aquíferos, aquícultura e irrigação de culturas agrícolas. Cada uma dessas possíveis aplicações apresenta riscos diferentes à saúde pública, dependendo do grau de tratamento dos esgotos sanitários que são reusados.

As modalidades do reúso são classificadas em duas categorias: reúso irrestrito e reúso restrito. O fator determinante do grau de restrição dessas águas é o nível de tratamento aplicado aos esgotos domésticos, do qual depende a qualidade da água efluente da ETE a ser reusada e, em particular, de sua qualidade microbiológica.

Dentre as aplicações das águas de reúso, a agricultura se destaca por ser a atividade que mais consome água (quase 70% do total usado pelo homem). Aplicado à agricultura, a diferenciação do reúso restrito e irrestrito é feita pelo grau de restrição do acesso do público. É importante o controle do grau de exposição humana à área irrigada, se definem as técnicas de irrigação que podem ser aplicadas (sulcos, inundação, aspersão – não recomendada para águas com níveis mais altos de contaminação), se escolhem as culturas que podem ser irrigadas (vegetais que crescem rentes ao solo ou não, que serão consumidos crus ou não) e se estabelecem as técnicas de manejo na produção agrícola – plantio e safra manual ou mecanizada, entre outros critérios.

A aplicação da água de esgotos sanitários tratados na agricultura significa (Hespanhol, 2003; Sousa e col.2001):

- menor demanda de água dos mananciais para usos múltiplos;
- diminuição dos esgotos despejados no ambiente (em particular nos corpos de água);
- menor contaminação ambiental e menor eutrofização;

- maior extensão das áreas irrigadas;
- reciclagem dos nutrientes presentes nos esgotos e, portanto, menos gastos em fertilizantes;
- conservação e melhoramento dos solos pela acumulação de húmus,
- aumento da matéria orgânica e maior retenção de água e aumento da resistência à erosão;
- recuperação de áreas degradadas ou não produtivas;
- preservação das águas subterrâneas ao diminuir sua exploração e proteção contra a subsidência dos terrenos;
- aumento na produção de alimentos, contribuindo com melhorias na saúde da população, na qualidade de vida e nas condições sócio-econômicas da população associada ao esquema de reúso.

A proposta predominante no Brasil é o reúso planejado na agricultura, de águas de esgotos tratados até atingir a qualidade adequada para satisfazer a irrigação das culturas escolhidas, com práticas de irrigação e de coleta bem definidas. Nesse sentido, o PROSAB recomenda o termo “reúso controlado”, com o qual se refere ao reúso seguro desde o ponto de vista sanitário, sustentável desde o ponto de vista ambiental e viável desde o ponto de vista da produção (Florêncio, e col., 2006).

Usado de forma controlada e planejada, o reúso torna-se estratégico para o desenvolvimento sustentável de diversas regiões do globo. Constitui-se num instrumento moderno e eficaz para garantir a sustentabilidade da gestão dos recursos hídricos nacionais, tanto para as regiões áridas e semi-áridas como para aquelas onde a oferta de água se tornou antieconômica, como nos grandes conglomerados urbanos (Hespanhol, 2003).

Especial atenção deve ser dada aos aspectos de saúde pública associada ao reúso de esgotos sanitários tratados, havendo necessidade de se discutir e estabelecer critérios, diretrizes e padrões com base em proces-

nos e estudos técnico-científicos e em evidências epidemiológicas, respeitando-se as práticas culturais de cada região.

2. RISCOS DO REÚSO À SAÚDE PÚBLICA

Numa população, os indivíduos infetados apresentam no seu intestino bactérias, vírus, protozoários ou helmintos patogênicos transmissores de doenças de veiculação hídrica. Em conseqüência, os esgotos sanitários transportam, junto com as excreta, esses microrganismos em números elevados. Muitos desses microrganismos podem sobreviver no ambiente e até se multiplicarem.

Nas fezes, a densidade média de coliformes termotolerantes varia entre 10⁹ - 10¹¹ *E.coli*/grama. A cólera, a febre tifóide, a giardíase, a ascaridíase, a hepatite e a poliomielite, entre muitas outras, são doenças conhecidas e associadas com as águas contaminadas. Pessoas infetadas excretam, em média, por grama de fezes: 10⁹ *V.cholerae*, 10¹⁰ *S.typhi*, 10⁵⁻⁹ *Shigella* spp, 1,5x10⁸ cistos de *Entamoeba histolytica*, 10⁶ cistos de *Giardia lamblia*.

Nas doenças que tem a rota oral-fecal, o contágio ocorre pela boca da pessoa sadia, pela ingestão de águas ou alimentos contaminados com material fecal ou com esgotos. Mãos sujas, falta de higiene doméstica e alimentos contaminados são as principais vias de transmissão. Alguns microrganismos patogênicos podem penetrar pelo sistema respiratório, por inalação de pó ambiental ou de ar contaminado com aerossóis. Esse mecanismo ocorre mais frequentemente com vírus e com fungos, que provocam alergias e infecções pulmonares. Outros penetram diretamente pela pele, através de escoriações ou de pequenas feridas, como *Leptospira* spp e *Schistosoma mansoni*.

O subministro de água microbiologicamente segura é um dos princípios propósitos do saneamento básico, assim como preservar da contaminação fecal e da poluição os mananciais, estabelecendo bar-

reiras múltiplas de proteção. Formam parte das barreiras múltiplas o tratamento da água e o tratamento dos esgotos. O tratamento das águas residuárias transforma a matéria orgânica em material estabilizado, com diminuição da DBO₅ e reduz os microorganismos patogênicos de veiculação hídrica. Por tanto, esgotos submetidos a diferentes graus de tratamento oferecem diferentes níveis de riscos.

Considerando que as doses infectantes médias dos microrganismos patogênicos (quantidade média de microrganismos necessária para causar a infecção) variam entre 10⁶- 10⁸ bactérias para *V.cholerae*, 10³- 10⁵ para *S.typhi*, 10⁴ para *Shigella* spp, 25 - 100 citos para *Glamblia*, 10 - 100 para *E.histolytica*, e 1 para *A.lumbricoides* (Pereira Neves e col, 1995; Wachsmuth e col, 1994), as chances de se contrair uma infecção, em contato com os esgotos parece elevada. Aparentemente, há alto **risco potencial** com a prática do reúso na irrigação. Em conseqüência, o reúso de águas residuárias colocaria, potencialmente, em risco grupos populacionais distintos, desde o agricultor até o consumidor final.

Desprende-se das considerações anteriores que os esgotos tratados destinados ao reúso em agricultura deverão satisfazer padrões estritos de qualidade microbiológica, para minimizar os riscos de transmissão de doenças.

Risco potencial associa-se com **perigo**, que é intrínseco de uma situação e pode causar efeitos adversos à saúde. O risco pode ser quantificado e identificado, caracterizado e relacionado, considerando tempo de exposição a um determinado agente e os potenciais danos de tal exposição à saúde humana. Pode-se obter um valor numérico de risco que indique uma probabilidade de ocorrência ou uma previsão de ocorrência de um evento determinado relacionado com a saúde da população exposta.

Nesse contexto, pode-se fazer a seguinte consideração: o reúso de águas de esgotos tratados na irrigação constitui um **risco potencial** ou um **perigo** de transmissão de doenças infecciosas de veiculação

hídrica. Para que exista um **risco real deve haver ocorrência de casos da doença ou agravos na saúde da população exposta.**

O **risco real** ou aparecimento de novos casos de doenças (ou de agravos) depende de um conjunto de fatores que se iniciam desde o momento que o microrganismo patogênico é excretado. A simples presença de microrganismos patogênico em águas residuárias, em solos ou em culturas que foram irrigadas com esgotos não indica que haverá, necessariamente, transmissão da doença. Para que os microrganismos patogênicos possam atingir um novo hospedeiro e causar enfermidade, deve ocorrer um conjunto de fatores, que dependem (Feachem e col, 1983; Blumenthal e col, 2000):

- 1) das características do próprio microrganismo;
 - i) latência (período necessário para que depois de excretado o microrganismo se torne infetante - por exemplo, o ovo de *Ascaris lumbricoides* precisa passar alguns dias no solo, em condições de umidade e sombra para desenvolver a larva com capacidade de infetar o novo hospedeiro e que será liberada dentro do trato gastrointestinal);
 - ii) persistência no meio externo (tempo de sobrevivência das formas infetantes);
 - iii) capacidade de multiplicação no meio ambiente;
 - iv) existência, no meio externo, do hospedeiro intermediário específico, se for o caso. São exemplos: o caramujo (*Biomphalaria glabrata*) do *Schistosoma*, ou de gado para a *Taenia saginata* ou de porco para a *T. solium*;
 - v) resistência aos sistemas de tratamento dos esgotos; vi) doses infectantes (DI), patogenicidade, virulência.

As doses infetantes podem ser baixas (10^2 células ou menos), médias (10^3 a 10^4 células) ou altas (10^5 – 10^6 células). Quanto menor,

maior a possibilidade de causar infecção. As parasitas em geral, têm doses infetantes baixas. Um ovo de *A.lumbricoides* pode causar a infecção em um hospedeiro suscetível. As bactérias têm DI media (*Shigella* spp) e alta (*V.cholerae*, *Salmonella* spp).

2) das características ambientais que dificultam ou favorecem sua propagação (luz solar, umidade, dessecação, pH, presença de matéria orgânica e nutrientes, predadores, etc.).

3) do tempo de exposição ao agente e da intensidade da exposição;

4) das condições das populações expostas (ou dos novos hospedeiros), tais como idade, raça, estado imunológico;

Ou seja, que os microrganismos patogênicos deverão ultrapassar barreiras ambientais (luz solar, dessecação, predadores) e tecnológicas (os tratamentos), se manter virulentos e em números suficientes para constituir uma dose infectante e encontrar um indivíduo suscetível que possa ser infetado (imunidade reduzida), favorecido pelo tempo e o tipo de exposição ao patógeno.

Ainda, a infecção deve resultar em doença, com transmissão posterior. O risco real é assim bem inferior que o risco potencial, ou **perigo**, que é dado pela simples presença de um microrganismo patogênico nos esgotos (Hespanhol, 2003). As primeiras diretrizes aplicadas ao reúso de águas de esgotos na agricultura tinham como referencia o risco potencial e se basearam no conceito de risco zero, ausência de bactérias indicadoras de contaminação fecal, ou seja, ausência de coliformes. Essa condição atribui às águas de reúso, qualidade sanitária semelhante à água potável.

Desde 1933, no estado de Califórnia/EEUU (California State Board of Health) foram estabelecidas padrões estritos de qualidade microbiológica para o reúso com esgotos tratados, na irrigação de vegetais que são consumidos crus: d" 2 coliformes 100 mL⁻¹. Não houve uma base ci-

entífica nessa decisão, somente o propósito de se usar na irrigação de verduras, uma água segura e semelhante à água de beber. Esses padrões foram e são ainda usados por vários países ao redor do mundo.

Na Tabela 1 se apresentam as normas de qualidade de água para reúso em irrigação do estado de Califórnia, EEUU (Strauss e Blumenthal, 1989).

Tabela 1. Qualidade sanitária da água para reúso em irrigação no Estado de Califórnia (USA) e nível de tratamento dos esgotos

Reúso em Irrigação	Tratam. Primário ⁽¹⁾	Tratam. Secund. e desinfec.	Tratam. Secundário, Coagulação, filtração e cloração ⁽²⁾	Concentração de coliformes ⁽³⁾
Forageiras	X	-	-	Sem restrições
Grãos	X	-	-	Sem restrições
Vegetais a serem ingeridos cru				
Irrigação Superficial	-	X	--	2,2
Irrigação por aspersión	-	-	X	2,2
Produtos processados antes ingeridos				Sem restrições
Irrigação superficial	X	-	-	
Irrigação por aspersión	-	X	-	2,3
Parques e Jardins	-	X	-	2,3
Uso em recreação restricto ⁽⁴⁾	-	X	-	2,2
Uso em recreação sem restrição	-	-	X	2,2

Fonte: Ongerth e Ongerth (1982) citado por Strauss e Blumenthal, 1989; (1) Sólidos sedimentáveis d" 1,0 mL L⁻¹ h⁻¹; (2) Turbidez d" 1,0 UNT; (3) NMP 100mL⁻¹ Número Mais Provável de bactérias indicadoras avaliado em amostragens **diárias**; (4) Uso não permitido para natación e outros esportes onde o corpo fica mergulhado na água.

Nos países subdesenvolvidos, esses níveis de tratamento dos esgotos não são alcançados, pelo alto custo, e menos ainda quando o país em questão não tem condições de tratar e fornecer água potável de qualidade segura à maioria da população. Nesses países ocorre o reúso clandestino: se reúsa na irrigação, de forma indireta, esgotos sem tratamento despejados em rios e lagos, resultando em riscos altos para a saúde pública, ou ainda, se usa esgoto bruto diretamente.

Normas extremas de qualidade para águas de reúso são difíceis de atingir, são caras e não são necessárias ao considerar o conceito de risco real.

A partir de 1982, e ao longo de vários anos, o Banco Mundial e a Organização Mundial da Saúde estimularam pesquisas que forneceram bases para o estabelecimento de padrões ou de guias microbiológicas para o reúso que fossem menos restritivas embora dentro de margens permissíveis de riscos (Feachem et al, 1983; Strauss and Blumenthal, 1989). Os resultados forneceram as primeiras bases epidemiológicas de risco para aplicação em reúso, e o Comitê de Expertos, reunidos em Engelberg, Suíça (WHO, 1989), redigiram as guias para o reúso da OMS, usadas até ao ano passado (Tabela 2).

Os indicadores usados foram coliformes termotolerantes (coliformes fecais) e ovos de helmintos; não foram feitas referências a vírus nem a protozoários.

Os grupos de risco considerados foram, para reúso em irrigação irrestrita, agricultores, consumidores e público, e, para o reúso restrito, apenas os agricultores. O reúso restrito foi concentrado numa única categoria, denominada A e o reúso restrito, em duas, B e C. As concentrações limites para o reúso irrestrito (categoria A) para coliformes fecais, de $10^3/100\text{ml}$ e de <1 ovo de helminto/L, foram considerados viáveis de serem atendidas com o tratamento dos esgotos sanitários por lagoas de estabilização (Mara, 2004). Nas lagoas, ovos de helmintos e cistos de protozoários são removidos por sedimentação e as bacté-

as patogênicas e os vírus são destruídos pela ação sinérgica de fatores ambientais desfavoráveis que são criados nas lagoas durante as horas de luz, pela interação algas-bactérias-luz solar-oxigênio fotossintético (Von Sperling *et al.*, 2004; Curtis *et al.*, 1992; Pearson *et al.*, 1995).

As guias WHO 1989 foram adotadas no mundo, por diversas organizações, como a FAO e o Banco Mundial e diversos países, entre eles Brasil, França e México. Outros, como Austrália, EEUU e Israel e mais recentemente Espanha, optaram por guias mais exigentes para o reúso na irrigação irrestrita.

Tabela 2. Guias de saúde para o reúso de esgotos sanitários na agricultura e na aquicultura (WHO 1989).

Categoria	Condições de reúso	Grupos de risco	Nematóides intestinais humanos (nº de ovos L ⁻¹) ⁽¹⁾	Coliformes fecais (UFC 100 mL ⁻¹) ⁽²⁾	Tratamento adequado para atingir a qualidade microbiológica
A	Culturas ingeridas cruas, campos esportivos, parques públicos.	Operários, consumidores, público.	≤ 1	≤ 1000	Lagoas de estabilização em série ou tratamento equivalente para remoção de patógenos.
B	Irrigação de cereais, culturas industriais, forragem, pastos e árvores. ⁽³⁾	Operários	≤ 1	NR ⁽⁴⁾	Retenção em lagoas de estabilização (8 - 10 dias) ou remoção equivalente de helmintos e colif. fecais
C	Irrigação localizada de culturas da categoria B, não havendo exposição de trabalhadores e do público.	Nenhum	NA ⁽⁵⁾	NA ⁽⁵⁾	Pré-tratamento requerido pela técnica de irrigação, não menos que tratam. primário

⁽¹⁾ Nematóides intestinais humanos: *Ascaris*, *Trichuris*, *Ancylostoma*; média aritmética ao longo do período de irrigação. ⁽²⁾ Média geométrica ao longo do período de irrigação. ⁽³⁾ Para árvores frutíferas, a irrigação deverá ser suspensa 2 semanas antes da colheita e não se deverá coletar nenhum fruto do chão; não se deve usar irrigação por aspersão. ⁽⁴⁾ NR: nenhuma recomendação – revisão posterior sugere 10⁴-10⁵ coliformes fecais 100mL⁻¹. ⁽⁵⁾ Não se aplica.

Em 1992, a USEPA - United States Environmental Protection e USAID - United States Agency for International Development, estabeleceu como normas, com base em estudos técnicos e econômicos, embora sem embasamento epidemiológico o valor de <2 coliformes fecais/100ml, cloro residual 1mg/L e turbidez £ 2 UT. Israel e Austrália toleram entre 1 e 10 *E.coli*/100ml.

Esses padrões exigem para o reúso água de qualidade microbiológica que não existe na natureza: é muito raro encontrar, nos EE.UU. e na Europa, rios usados para irrigar culturas agrícolas ou águas doces destinadas à balneabilidade com concentrações de coliformes fecais ou *E.coli* < 10³/100ml, sendo mais freqüentes valores >10³/100ml £ 10⁵/100ml. Entretanto, não se aplicam para essas águas a restrição bacteriológica imposta às águas de reúso. Na Tabela 3 se apresentam os critérios da USEPA (2004^a). Estes critérios são orientadores e não substituem a legislação de cada estado. Ao todo, 40 estados dos Estados Unidos possuem normas para reúso de água na irrigação.

Em ambas as tabelas observam-se os níveis extremos de exigência em relação aos padrões sanitários: ausência de coliformes e de patogênicos, turbidez extremamente baixa (£ 2UT) e cloro residual 1mg/l. Portanto, se deve aplicar aos esgotos, tratamento compatível para obter um efluente com qualidade de água potável. Os valores de turbidez e de cloro residual são medidas complementares que buscam assegurar a eliminação de protozoários.

Como comparação, a legislação brasileira para água potável (Portaria 518/MS-2004), no artigo Nº11, inciso 8, diz: “Recomenda-se a pesquisa de organismos patogênicos com o objetivo de atingir como meta, um padrão de ausência, de entre outros, de enterovirus, cistos de *Giárdia* e oocistos de *Cryptosporidium*”. No art. Nº12, se diz que, para a garantia da qualidade microbiológica, em complementação às exigências relativas aos indicadores microbiológicos, o padrão de turbidez

Tabela 3. Diretrizes da USEPA (2004), para uso agrícola de esgotos sanitários.

Tipo de irrigação e cultura	Processo de tratamento	Qualidade do efluente
Cultura alimentícia não processada comercialmente (1). Irrigação superficial ou por aspersão de qualquer cultura, incluindo culturas a serem consumidas cruas.	Secundários+filtração+desinfecção ⁽²⁾⁽³⁾	pH=6-9; DBO5 ≤10mg/L Turbidez ≤ 2 UT ⁽⁴⁾ CRT >1mg/L ⁽⁵⁾⁽⁶⁾ CTerm.= ND ⁽⁷⁾ Patogênicos=ND
Culturas alimentícias processadas comercialmente (1). Irrigação superficial d epomares e vinhedos. Silvicultura e irrigação de áreas com acesso restrito ao público.	Secundário+desinfecção ⁽²⁾	pH=6-9; DBO5 ≤30mg/L ⁽⁸⁾ SST ≤30mg/L CRT>1mg/L ⁽⁵⁾ CTerm,=200/100ml ⁽⁹⁾
Culturas não alimentícias. Pastagem para rebanhos de leite. Forrageiras, cereais, fibras e grãos.	Secundário+desinfecção ⁽²⁾	pH=6-9; DBO5 ≤30mg/L SST ≤30mg/L ⁽⁸⁾ CRT>1mg/L ⁽⁵⁾ CTerm,=200/100ml ⁽⁹⁾

ND: não detectável; Cterm.: coliformes termotolerantes; CRT:cloro residual total; (1) culturas alimenticias processadas comercialmente: recebem processamento fisico ou químico prévio à comercialização, para destruir patógenos. (2) Tratamento secundário deve ser capaz de produzir efluentes com DBO e SST ,= 30 mg/L; (3) A coagulação química préfiltração pode ser útil para atender a qualidade recomendada do efluente. (4) Turbidez prédesinfecção com média diária: nenhuma amostra >5NTU (ou 0,5 mg/L SST).CRT, após tempo mínimo de contato de 30', (6); Residuais ou tempos de contato mais elevados podem ser necessários para garantir inativação de vírus e parasitas; (7) Média móvel de 7 dias: nenhuma amostra >800Cterm/100ml; (8) Padrão mais exigente pode ser necessário se a irrigação é por aspersão.(9) Lagoas de estabilização podem atingir o critério de qualidade sem necessidade de desinfecção. (10) O consumo das culturas irrigadas não deve ser permitido antes de 15dias apos da irrigação. Pra irrigação mais duradeira, se deve fazer uma desinfecção mais rigorosa (≤ 14Cterm/100ml), se operido de 15 dias não for observado.

Fonte: Adaptado de WHO, 2006^a, por Bastos e Bevilacqua (2006)

deve ser de 1,0UT (VMP) em 95% das amostras mensais se for usada filtração rápida com tratamento completo ou filtração direta. Caso for por filtração lenta, a turbidez deve ser de 2 UT em 95% das amostras mensais. Ainda, no inciso 2 desse mesmo artigo se diz: “Com vistas a assegurar a adequada eficiência de remoção de enterovírus, cistos de *Giardia* e oocistos de *Cryptosporidium* recomenda-se para filtração rápida meta de turbidez $< 0,5$ UT em 95% das amostras mensais e nunca >5 UT”

.Embora o Brasil não possua ainda uma legislação específica sobre a qualidade da água para reúso, pode-se fazer uma comparação com a Resolução CONAMA No. 357/2005, que dispõe sobre a classificação dos corpos de água e de seus usos. Esta resolução estabelece para irrigação irrestrita, um limite de 200 coliformes termotolerantes/100ml, o qual corresponde a águas classe 1. Para irrigação de hortaliças, plantas frutíferas, parques, jardins, campos de esportes e de lazer, com os quais o público possa vir a ter contato, o limite é de 10^3 coliformes termotolerantes/100ml, o que corresponde à qualidade das águas classe 2. Para irrigação de culturas arbóreas, cerealíferas e forrageiras se aceita até 10^4 coliformes termotolerantes/100ml. Portanto são padrões mais restritivos que os sugeridos pela OMS.

Estudos sobre o risco de contrair hepatite ao ingerir vegetais irrigados com esgoto bruto indicaram valores de 10^{-2} - 10^{-3} , ou seja, um de cada 100 ou 1.000 indivíduos/ano. Os mesmos cálculos para esgotos tratados, contendo 10^3 *E.coli*/100ml mostraram que o risco é bem menor: 10^{-6} – 10^{-7} pessoa/ano (Bastos e Bevilacqua, 2006) Nos Estados Unidos (USEPA), o risco anual aceitável é de 10^{-4} para água potável, considerando a ingestão diária de 2 litros: em um ano, se aceita que fique doente uma entre 10.000 pessoas que consomem 2 litros por dia de água tratada com qualidade dentro dos padrões de potabilidade.

As guias atuais aplicam o conceito de risco atribuível à utilização de esgotos pela população exposta. Procura-se evidências

epidemiológicas entre a aplicação do reúso e a ocorrência de agravos/doenças na população e se quantifica essa associação através de medidas de risco (risco relativo, risco atribuível proporcional, razão de chances, odd ratio).

Uma abordagem interessante consiste na aplicação das metodologias de avaliação quantitativa de risco e a definição de riscos aceitáveis – estimativa da concentração de patógenos no efluente correspondente ao nível de risco que pode ser aceito para uma população determinada: **Avaliação Quantitativa do Risco Microbiológico (AQRM)** (Shuval e col 1997, Blumenthal e col., 2000; Sleight & Mara, 2003) que é uma adaptação da **Avaliação Quantitativa do Risco Químico (AQRQ)**.

A **AQRM** aplicada ao reúso de águas apresenta várias etapas, modificadas da avaliação do risco químico e levam em consideração as seguintes questões: Petterson e Ashbolt (2002) apud Bastos e Bevilacqua, (2006). a) as concentrações dos microrganismos indicadores e patogênicos em amostras ambientais podem aumentar ou diminuir segundo a adaptação e/ou resistência dos microrganismos às condições externas; b) não ocorre distribuição homogênea de microrganismos no ambiente; c) as doenças infecciosas são transmissíveis (aumenta o número de infectados, diferente das intoxicações por substâncias químicas, que ficam restritas às pessoas intoxicadas); d) há variação à susceptibilidade: existem pessoas mais susceptíveis que outras segundo as variações das condições de imunidade, sendo mais susceptíveis idosos, crianças, recém nascidos, gestantes, imunocomprometidos por doenças específicas, como AIDS.

As etapas são: 1) formulação do problema; 2) análises do problema, 2.1) caracterização dos efeitos sobre a saúde: a - caracterização do hospedeiro, b - efeitos à saúde, c - análises dose-resposta, d - caracterização do risco. Os dados experimentais necessários são: a concentração de um organismo específico na água e o volume estimado do líquido contaminado a ser ingerido.

Os modelos experimentais estimam os riscos de uma única “exposição” ou “ingestão”, expressada como probabilidade de infecção, após da ingestão de um volume estimado de líquido contaminado com um número médio conhecido de microrganismos. Com ele se calcula a probabilidade do risco anual de infecção, ou risco anual aceitável. Estabelecido o risco aceitável ou tolerável, se calcula a concentração admissível de organismos patogênicos no efluente tratado e se define o tipo de tratamento a ser aplicado para atingir a qualidade almejada da água de reúso, segundo o tipo de reúso desejado e o tipo de cultura a ser irrigada.

Tabela 4. Riscos de infecção sob diferentes condições de exposição pela irrigação com esgotos sanitários.

Irrigação irrestrita: riscos de infecção ingestão involuntária de partículas de solo⁽¹⁾			
<i>E.coli</i> /100g	Rotavirus	<i>Campylobacter</i>	<i>Cryptosporidium</i>
$10^7 - 10^8$	0,99	0,50	$1,4 \times 10^{-2}$
$10^4 - 10^5$	$2,0 \times 10^{-2}$	7×10^{-4}	$1,3 \times 10^{-5}$
$10^2 - 10^3$	$1,4 \times 10^{-4}$	$5,6 \times 10^{-6}$	$1,4 \times 10^{-7}$
Irrigação irrestrita: riscos de infecção por consumo de alface⁽²⁾			
<i>E.coli</i> /100g	Rotavirus	<i>Campylobacter</i>	<i>Cryptosporidium</i>
$10^7 - 10^8$	0,99	0,28	0,50
$10^4 - 10^5$	$9,6 \times 10^{-3}$	$2,6 \times 10^{-4}$	$6,8 \times 10^{-4}$
$10^2 - 10^3$	$8,6 \times 10^{-5}$	$3,1 \times 10^{-6}$	$6,4 \times 10^{-6}$
Irrigação irrestrita: riscos de infecção por consumo de cebola⁽³⁾			
<i>E.coli</i> /100g	Rotavirus	<i>Campylobacter</i>	<i>Cryptosporidium</i>
$10^7 - 10^8$	1,0	0,99	$3,6 \times 10^{-2}$
$10^4 - 10^5$	0,43	$1,6 \times 10^{-2}$	$3,7 \times 10^{-5}$
$10^2 - 10^3$	$5,6 \times 10^{-3}$	$1,0 \times 10^{-4}$	$3,0 \times 10^{-7}$

⁽¹⁾ 10 a 100 g solo ingeridos/dia; exposição 300 dias/ano; 0,1 – 1 rotavírus e *Campylobacter* e 0,001 - 0,1 *Cryptosporidium* por 10^5 *E.coli*; ⁽²⁾ Consumo de 100g de alface a cada dois dias; 10-15ml de esgotos em 100g de alface irrigada; 0,1-1,0 rotavírus e *Campylobacter* e 0,01-0,1 *Cryptosporidium* entre a colheita e consumo. ⁽³⁾ consumo de 100g de cebola/pessoa/semana; 1-5 ml de esgoto em 100g de cebola irrigada; 1-10 rotavírus e *Campylobacter* e de 0,01 – 0,1 *Cryptosporidium* entre colheita e consumo. ^{(1), (2) e (3)}: rotavírus: DI50=6,17+-25%; $\alpha=0,253+-25\%$; *Campylobacter*:DI50= 896+- 25%; $\alpha=0,14$ 5+-25% (modelo β -Poisson). *Cryptosporidium*: $r=0,0042+-25\%$ (modelo exponencial).

O **RISCO ACEITÁVEL** é um valor que se define e que: a) está embaixo de um limite escolhido arbitrariamente; b) é inferior a um nível já tolerado; c) é inferior a uma fração definida da carga total de doenças de uma comunidade; d) o custo de redução do risco é superior

ao valor economizado; e) o custo de oportunidades de prevenção do risco seria mais bem usado em outras ações de promoção da saúde pública; f) os profissionais de saúde dizem que é aceitável; g) o público em geral diz que é aceitável ou não diz que é inaceitável.

Bastos e Bevilacqua (2006) citam estudos onde foi avaliado o risco real de infecção ao consumir hortaliças irrigadas com esgotos tratados e de praticar esportes em campos irrigados com águas de reúso. Esses estudos sugerem que o consumo de hortaliças irrigadas com efluente de ETE contendo 1 a 40 vírus/40 L de água de irrigação teria um risco anual de 10^{-9} a 10^{-4} (Asano e Sakaji, 1990; Asano e col, 1992). Shuval e col (1997) atribuem a um efluente de ETE com 10^3 coliformes termotolerantes/100ml, usado na irrigação de hortaliças, um risco anual de infecções virais de 10^{-5} a 10^{-7} e de 10^{-9} de cólera. Para avaliar os riscos de jogadores de golfe em campos irrigados com águas de reúso (contendo 1 a 100 vírus/100ml de água de irrigação), foi considerada a frequência de duas vezes por semana durante um ano (Asano e col, 1992). Os resultados mostraram risco na ordem de 10^{-2} a 10^{-5} . Para essas pesquisas, foi estimado, para a irrigação das hortaliças com águas de reúso, um consumo diário de 10 mL dessa água e nos estudos em campos de golfe, um consumo diário de 10mL.

Outros pesquisadores (Sleight e Mara, 2003; WHO, 2006 a) indicam que aplicando irrigação restrita ou irrestrita, os riscos de infecções virais usando efluentes com 10^3 *E.coli*/100ml, não seria maior daquela aceita para consumo de água tratada nos EEUU (10^{-4} por ano). Na Tabela 4 apresentam-se os riscos de infecção sob diferentes condições de exposição.

Uma outra definição importante e também obtida da **AQRQ** é a **Ingestão Diária Aceitável (IDA) ou Ingestão Diária Tolerável (IDT - segundo a WHO)**. IDA é a dose abaixo da qual os indivíduos podem estar expostos sem que ocorram danos à saúde. IDA avalia a quantidade de uma determinada substância sob as diferentes formas

de exposição do indivíduo (na água, no ar, nos alimentos, no solo, por exemplo) e que ele pode ingerir diariamente durante toda sua vida sem que represente um risco importante para a sua saúde. Esse número calculado fornece a estimativa da **Ingestão Total Diária (ITD)** e se expressa em mg kg^{-1} de peso corporal por dia. Quando ITD é superior a IDA, a substância é tóxica. Quando ITD é inferior a IDA, a substância está em concentrações toleráveis.

A caracterização do risco requer estabelecer os **Limites Máximos de Resíduos (LMR)** ou o **Valor Máximo Permissível (VMP)** para os diferentes fatores de risco, como usado na legislação brasileira. Para substâncias tóxicas não cancerígenas, se usa o IDA para um peso corporal médio de 60 kg nos adultos, a fração da IDA na água de consumo em %, e o consumo diário de água (2 litros). Caso a substância for carcinogênica, o VMP se estabelece definindo-se um determinado risco de câncer, limite superior do intervalo de confiança de 95% da curva dose-resposta quando se aproxima da dose zero - de não exposição. Em geral, o risco que se estabelece é de 10^{-5} , um caso de câncer dentre 100.000 indivíduos que consomem $2\text{L água}^{-1}\text{ dia}^{-1}$, durante 70 anos.

Para o reúso com águas de esgotos sanitários, a Organização Mundial da Saúde (WHO, 2006a), considera, para os contaminantes químicos, a Contaminação Máxima Permitida do Contaminante no Solo (mg kg^{-1} de solo), a ingestão diária aceitável (IDA), o peso corporal médio de 60 kg para um adulto, uma fração de 0,5 de IDA proveniente dos alimentos, o consumo médio diário de alimentos (kg dia^{-1}), a fração da dieta proveniente dos alimentos irrigados com esgotos (100%), um fator de transferência da contaminação do solo para as plantas (mg kg^{-1} de alimento dividido em mg kg^{-1} de solo), os vários tipos de alimentos que são ingeridos (vegetais, grãos, cereais, tubérculos, frutas, etc.) (Bastos e Bevilacqua, 2006). Para os microrganismos, devem-se considerar as características de cada microrganismo, os efeitos adversos produzidos, as peculiaridades do hospedeiro e as diferentes formas de exposição, entre outros fatores.

Um novo indicador, que permite comparar os impactos de agentes de diferente natureza é o DALY (Disability Adjusted Life Years – Anos de Vida Ajustados para a Incapacidade). Estimar a carga de doença numa população considera a prevalência ou numero de casos e agravos de uma doença numa população e adicionam-se os desfechos de maior ou de menor gravidade (óbitos ou efeitos adversos agudos ou crônicos), que podem estar associados a uma determinada condição patológica. Para construção desse indicador se transforma a “incapacidade vivenciada”, por exemplo, 3 dias com diarreia ou óbitos por diarreia, em “anos de vida saudável perdidos”. DALY quantifica a saúde no tempo.

$$DALY = N * D * S *$$

Onde N= numero de pessoas afetadas (óbitos – de registros médicos, de estudos epidemiológicos, de sistemas de notificação de agravos ou estimativas usando-se modelos dose-resposta).

Quando o efeito adverso avaliado é óbito, a medida usada é “anos de vida útil perdidos pelo óbito prematuro” ou YYL (Years of Life Lost); se for avaliada a doença, ou seqüelas desta, se usa a medida de “anos vividos em incapacidade”, ou YLD (Years Lived with Disability). YYL e YLD podem ser usadas juntas (Bastos e Bevilacqua, 2006).

3. CRITÉRIOS SANITÁRIOS DA ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DA SAÚDE PARA O REÚSO AGRÍCOLA

Com a publicação das guias de 1989, a OMS (WHO, 1989) estava aceitou que concentrações de coliformes d” 10^3 UFC/100ml garantem a remoção ou inativação de enterobactérias patogênicas. Também, que <1 ovo de helminto/L indicava a eliminação de outros microrganismos resistentes (ovos de outros helmintos e cistos de protozoários), com capacidade de sedimentação ao longo do sistema de tratamento.

Os critérios da OMS receberam criticas (Blumenthal e col, 2000):

referentes à: a) necessidade de validar a concentração de 10^3 coliformes termotolerantes em 100 ml para irrigação irrestrita; b) importância de avaliar a permissibilidade bacteriológica (ausência de padrões bacteriológicos) para reúso restrito (categorias B e C) e estabelecer valores limites orientativos de bactérias coliformes fecais para proteger o principal grupo de risco (agricultores). Esse limite depende do método de irrigação a ser aplicado, da faixa etária das pessoas expostas, do estado imunológico a, etc. Os valores propostos variam entre 10^4 e $10^5/100\text{ml}$ para essas categorias; c) considerar que a sobrevivência dos ovos de helmintos é elevada sob algumas condições ambientais, e o limite de < 1 ovo/L pode ser inadequado; d) estabelecer padrões parasitológicos mais estritos quando houver crianças menores de 15 anos expostas ao reúso, sendo sugerido $< 0,1$ ovo/L; e) interesse em diferenciar ovos viáveis (podem causar infecção), dos não viáveis; f) necessidade de definir padrões para vírus e para protozoários. Na Espanha, por exemplo, o VMP para irrigação irrestrita, ovos de helmintos devem ser $< 0,1$ ovo/L. Considera-se que os ovos de helmintos constituem o maior risco à saúde, por sua alta resistência às condições ambientais e pela baixa DI.

A Tabela 5 resume as sugestões de Blumenthal e col (2000).

Após vários anos de pesquisas e consultas a expertos da Organização Mundial da Saúde foram publicadas as novas guias da OMS para reúso (WHO, 2006): “*Guidelines for the safe use of wastewater, excreta and greywater*”.

Estas guias (Tabela 6) têm como base a **Avaliação Quantitativa do Risco Microbiológico (AQRM)**. O **AQRM** pode estimar os riscos para diferentes tipos de exposições frente a diferentes microrganismos patogênicos. Esses riscos são difíceis de avaliar com investigações epidemiológicas, porque se precisam populações relativamente grandes e longos espaços de tempo.

Tabela 5. Guias para o reúso de esgotos na agricultura e na aquíicultura: revisão recomendada com base em novas

Categ.	Finalidades do reúso	Grupo exposto	Técnica de irrigação	Nematóides intestinais humanos ^(b) (média arit. N ^o de ovos/L) ^(c)	Coliformes fecais (média geométrica N ^o em 100ml) ^(d)	Tratamento para atingir o padrão microbiológico
A	Irrigação sem restrições A1: vegetais consumidos crus; campos esportes; parques públicos ^(e) .	Trabalhadores agrícolas; consumidores; público em geral.	Aspersão ^(a)	≤ 0,1 ^(f)	≤ 10 ³	Lagoas estabilização em série (LED) bem projetadas, “Tanques de Trat. e Armaz. de Águas Residuais em Série” (TTAARC), ou tratam. equivalente (tratam. secund. convencional complementado com lagoas polimento/filtração/desinfecção). Série LED com lagoa de maturação; TTAARC, ou trat. equivalente (tratam. secundário conv. + comp. com lagoas de polimento/filtração).
		B1		≤ 1	≤ 10 ⁵	
B	Irrig. com restrições: cereais, culturas industriais, forragem, pastos, árvores ^(g) .	B2 = B1	Sulcos ou Inundação ^(b)	≤ 1	≤ 10 ³	Igual à categoria A
		Trabalhadores, crianças ≤15 anos, comunid. próxima	Qualquer	≤ 0,1	≤ 10 ³	Igual à categoria A
C	Irrigação localizada p/ culturas categ. B, sem exposição de agricultores e público	Nenhum	Gotejamento	Não aplicável	Não aplicável	Pré-tratamento requerido pela tecnologia de irrigação e nunca menos do que sedimentação primária.

(a) Fatores epidemiológicos, sociais e ambientais locais devem ser considerados.

(b) *Ascaris*, *Tricuris*, *Ancylostoma*

(c) Ao longo do período de irrigação, se os esgotos forem tratados em LED ou TTAARC projetados para alcançar quantidades desejadas de ovos, não é necessário monitoramento de rotina no efluente.

(d) Ao longo do período de irrigação, quantificação de coliformes fecais semanal ou com frequência mínima mensal.

(e) Limite mais restrito, ≤ 200 coliformes fecais/ 100ml, apropriada para gramados públicos (praças, parques, hotéis), onde o público tem contato direto.

(f) Pode aumentar para ≤ 1 ovo/L se: (i) condições ambientais de alta temperatura e baixa umidade, superfície de irrigação não utilizada, ou (ii) se houver campanhas antihelmínticas na população próxima das áreas de reúso.

(g) Para árvores frutíferas: suspensão da irrigação duas semanas antes da colheita, não recolher nenhuma fruta do solo. Não usar irrigação por aspersão.

Fonte: Blumenthal *et al* (2000).

Tabela 6. Guias da Organização Mundial da Saúde para o Uso Seguro de Esgotos, Excretas e Águas Cinzas.

Categoria de irrigação	Opção ⁽¹⁾	Tratamento de esgotos e remoção de patógenos (log ₁₀) ⁽²⁾	Qualidade do efluente	
			<i>E.coli</i> 100 mL ⁻¹ ⁽³⁾	Ovos de helmintos L ⁻¹
Irrestrita	A	4	≤ 10 ³	≤ 1 ⁽⁴⁾⁽⁵⁾
	B	3	≤ 10 ⁴	
	C	2	≤ 10 ⁵	
	D	4	≤ 10 ³	
	E	6 ou 7	≤ 10 ¹ ou 10 ⁰	
Restrita	F	4	≤ 10 ⁴	
	G	3	≤ 10 ⁵	
	H	<1	≤ 10 ⁶	

Fonte: Bastos e Bevilacqua (2006).

⁽¹⁾Combinação de medidas de proteção à saúde - A: culturas de raízes e tubérculos; B: cultivos folhosos; C: irrigação localizada de vegetais com desenvolvimento distante do solo; D: irrigação localizada; E: qualidade do efluente atingida com tratamento secundário +coagulação+filtração+desinfecção (qualidade avaliada também com: turbidez, SST, cloro residual); F: agricultura de baixo nível de tecnologia e intensiva mão de obra; G: agricultura de alto nível de tecnologia e altamente mecanizada; H:técnicas de tratamento escassa capacidade de redução de patógenos, como tanques sépticos e UASB, associada ao emprego de técnicas de irrigação com escassa exposição do público (irrigação sub-superficial). ⁽²⁾ Remoção de vírus+outras medidas de proteção à saúde: carga de doenças virais toleráveis £ 10⁻⁶ DALY ppa e riscos menores de infecções bacterianas e por protozoários. ⁽³⁾ Qualidade efluente com remoção de patógenos = (2). ⁽⁴⁾ Caso houver exposição de crianças < 15 anos: medidas de controle mais exigentes £ 0,1 ovo/l, uso de equipamento individual de proteção, quimioterapia. Caso de houver garantia de remoção de mais uma unidade log na higiene dos alimentos, pode-se admitir < 10 ovos/L. ⁽⁵⁾ Média aritmética em pelo menos 90% do tempo com irrigação. A remoção necessária de ovos de helmintos depende da presente no esgoto bruto. Usando-se lagoas de estabilização, o tempo de detenção hidráulica pode ser indicador de remoção de helmintos. Caso de uso de técnicas de tratamento complexas (opção E) outros indicadores (turbidez £ 2UT) pode dispensar a detecção de ovos de helmintos. Com irrigação localizada, sem contato com a planta e sem risco para os agricultores, (opção A), o padrão de ovos de helmintos poderia ser dispensado.

As guias da WHO (2006) também se basearam em altos níveis de proteção à saúde: d''10⁶ DALY/pessoa.ano. Considerando uma concentração média de 10⁷ *E.coli*/100ml nos esgotos domésticos não tratados, e usando como modelo alface irrigada, foi observado que é necessária a redução de 10⁶ unidades log da concentração inicial de bactérias indicadoras, para atingir o índice de d''10⁶ DALY/

.pessoa.ano; essa redução deverá ser de 10^7 para vegetais de raízes, como cebolas. Para calcular a concentração de *E.coli*/100ml que pode ter o efluente tratado, as guias da OMS consideram, além da redução que ocorre no tratamento dos esgotos, a redução que segue à irrigação: morte de microrganismos na água que fica no solo e nas superfícies das folhas provocadas pelo ambiente hostil (altas temperaturas, intensa luz solar, etc.), que podem ser duas unidades log e mais uma unidade log com o lavado das folhas, com o jato de água potável, antes do consumo. Ou seja, 3 unidades log. são reduzidas após do tratamento, assim, seria suficiente que o sistema de tratamento consiga reduzir em média 4 unidades log, para se obter uma água apta para reuso irrestrito ($\leq 10^3$ *E.coli*/100ml). Portanto, o valor considerado nas guias da WHO (1989), é validado com esta nova abordagem. Para irrigação por aspersão, a redução deve ser mais uma unidade log.

As novas guias da OMS constituem um grande avanço quanto às considerações epidemiológicas para reduzir os riscos reais de infecção com a prática do reuso, consideram os diferentes tipos de tratamento, os tipos de exposição às águas de reuso e são mais restritivas frente à exposição de crianças. Para tratamentos avançados, permite substituir indicadores microbiológicos por turbidez, por exemplo.

4. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASANO, T.; LEONG, L.Y.C. RIGBY, M.G.; SAKAJI, R.H. Evaluation of the Califórnia Wastewater Reclamation Criteria Using Enteric Viruses Monitoring Data. In: WATER SCIENCE AND TECHNOLOGY. V26, No 7, p:1615-1623, 1992.

ASANO T.; SAKAJI, R.H. Vírus Risk Analysis in Wastewater Reclamation and Reuse. In: HAHN, H.H.; KLUTE, R (EDT). Chemical Water and Wastewater Treatment. Berlin/Heidelberg; Springer-Verlag 1990.p: 483-496.

BASTOS, R.K.X.; BEVILACQUA, P.D. Normas e Critérios de Qualidade para Reúso de Água. In: FLORENCIO DOS SANTOS, M.L.; BASTOS, R.K.X.; AISSE, M.M. (Coord.). Tratamento e utilização de esgotos sanitários. PROSAB 4 – Tema 2. Esgoto. Rio de Janeiro ABES, 2006. p.17-67.

BLUMENTHAL, U. J.; MARA, D. D.; PEASEY, A.; PALACIOS, G. R.; STOOT, R. (2000). Guidelines for the microbiological quality of treated wastewater used in agriculture: recommendations for revising who guidelines. Bulletin of the health Organization, 2000.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução CONAMA N°357, de 17 de março de 2005. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para seu enquadramento bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes e dá outras providencias. Diário Oficial da União, Brasília, 18 de março de 2005a.

BRASIL. Conselho Nacional de Recursos Hídricos. Resolução N°54 de 28 de novembro de 2005. Estabelece modalidades, diretrizes para a prática de reúso direto não potável de água e dá outras providencias. Diário oficial da União, Brasília, 9 de março de 2006.

CURTIS, T. P., MARA D. D. ; SILVA S. A. (1992). Influence of pH, oxygen and humic substances on ability of sunlight to damage fecal coliforms in waste stabilization ponds. APPL. ENVIRON. MICROBIOL., 58, 1335–1343.

FEACHEM, R.G; BRADLEY, G.J.; GARELIK, H.; MARA, D.D. Sanitation and Disease: Health Aspects of Excreta and Waste Water Management. John Wiley and Sons, Chichester, 1983. 501p.

FLORENCIO, M.L.; AISSE, M.M.; BASTOS, R.X.K.; IVELLI, R.P. Utilização de Esgotos Sanitários - Marcos Conceituais e Regulatórios. In: FLORENCIO DOS SANTOS, M.L.; BASTOS, R.K.X.; AISSE, M.M. (Coord.). Tratamento e utilização de esgotos sanitários. PROSAB 4 – Tema 2. Esgoto. Rio de Janeiro ABES, 2006. p.1-15.

SHUVAL, H.I.; LAMPERT, Y.; FATTAL, B. Development of a risk assessment approach for evaluating wastewater reuse standards for agriculture. WATER SCIENCE AND TECHNOLOGY, v 35, n 11-12, p: 15-20, 1997.

STRAUSS, M.E.; BLUMENTHAL, U.J. Human Waste Use in Agriculture and Aquaculture. Utilization Practices and Health Perspectives. IRDC Report, No 08/89, 1989. 250p.

TUNDISI, J.G. ÁGUA NO SÉCULO XXI: ENFRENTADO A ESCASSEZ. Ed. RiMa – IIE, 2006, 247p.

IBGE, 2002. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br>. Acesso em 28 jun. 2007.

HESPANHOL, I. Potencial de Reúso de Água no Brasil: Agricultura, Indústria, Município e Recarga de Aquíferos. In: MANCUSO, P.C.; SANTOS, A.F. (Ed.). REÚSO DE ÁGUAS. Ed. Manole, 2003. p.37-95.

HESPANHOL, I. Saúde pública e reuso agrícola de esgotos e biossólidos. In: MANCUSO P. C. S., SANTOS, H. F. (Ed). Reúso de água. Barueri, SP: Ed. Manole, 2003.

MARA, D.D.; CAIRNCROSS, S. Guidelines for the safe use of wastewater and excreta in agriculture and aquaculture. Geneva. WHO, 1989. 187 p.

MINISTÉRIO DE MEDIO AMBIENTE (MMA). Proyecto de Real Decreto por el que se establecen las condiciones básicas para la reutilización de las aguas depuradas y se modifica parcialmente el reglamento del Dominio Público Hidráulico aprobado por Real Decreto 849/1986, de 11 de Abril, 2006.

PEARSON, H.W., MARA D.D.; ARRIDGE, H.A. The influence of pond geometry and configuration on facultative and maturation waste stabilisation pond performance and efficiency. WATER SCIENCE TECHNOLOGY, v 31, n.12, p.129-139. 1995.

PEREIRA NEVES, D.; MELO, A.L.; ODAIR, G.; LINARDI, P.M.

SHUVAL, H.I., LAMPERT, Y.; FATTAL, B. Development of a risk assessment approach for evaluating wastewater reuse standards for agriculture. WATER SCI. AND TECH. v25. p.15-20. 1997.

SHUVAL, H.I., ADIN A., FATTA B., RAWITZ E.; YEKUTIEL P. Wastewater Irrigation in Developing Countries: Health Effects and Technical Solutions. World Bank Technical Paper No. 51. World Bank, Washington, D.C. 1986.

SLEIGHT, PA, MARA, DD. Monte Carlo Program for estimating disease risks in wastewater reuse. Leeds, University of Leeds, Water and Environmental Engineering Research Group, Tropical Public Health Engineering, 2003. (<http://www.efm.leeds.ac.uk/CIVE/MCARLO>).

SOUSA, J. T., LEITE, V. D., LUNA, J. G., Desempenho da cultura do arroz irrigado com esgotos sanitários previamente tratados. REVISTA BRASILEIRA DE ENGENHARIA AGRÍCOLA E AMBIENTAL, v. 5, n. 1, p.107-110, 2001.

STRAUSS, M.E.; BLUMENTHAL, U.J. Human Waste Use in Agriculture and Aquaculture. Utilization Practices and Health Perspectives. IRDC Report, N° 08/89, 1989. 250p.

USEPA – UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. Guidelines for water reuse. Washington D. Wash. Technical Report N° 81, September 1992. 252 pp.

VON SPERLING, M.; BASTOS R.K.X.; KATO, M.T. Removal of *E. coli* and helminth eggs in UASB—polishing pond systems. WATER SCIENCE TECHNOLOGY, v.51. n.12, p.91–97. 2004.

WACHSMUTH, I.K.; BLAKE, P.A.; OLSVIK, O. *Vibrio cholerae* and cholera. Molecular to global perspectives. ASM PRESS, Washington, DC. 1994.

WORLD HEALTH ORGANIZATION - WHO. Health guidelines for the use of wastewater in agriculture and aquaculture. Report of a WHO Scientific Group-Chairman H. Shuval, Technical Report Series 778, WHO Geneva, 1989. 74 p.

UTILIZAÇÃO DE ÁGUA DE QUALIDADE INFERIOR NA IRRIGAÇÃO: ÁGUAS SALINAS

Hans Raj Gheyi; Marcelo Tavares Gurgel

1. INTRODUÇÃO

Essencial à vida, a água é uma substância necessária a diversas atividades humanas, além de constituir componente fundamental da biosfera e ser solvente universal. Recurso de valor inestimável, ela tem utilidades múltiplas, como geração de energia elétrica, abastecimento doméstico e industrial, irrigação, navegação, recreação, turismo, aqüicultura, pesca e, ainda, assimilação e condução de despejos municipais, industriais e agropecuários (Lima *et al.*, 1999).

Do total de água existente no planeta, 97,5% correspondem as águas salgadas e somente 2,5% são águas doces. Todavia, as maiores parte das águas doces (69,56%) se encontra indisponível para uso, por estar em estado sólido e em regiões de difícil acesso, formando as calotas polares, geleiras e solos congelados. Da parte restante, 30,44%

são encontrados no estado líquido e gasoso, sendo que das águas do estado líquido 30,06% são representadas pela água subterrâneas (que na maioria dos casos se localizam a uma profundidade superior a 800m, não estando prontamente disponíveis), 0,05% representado pela umidade do solo e 0,27% pelas águas superficiais que estão prontamente disponíveis para uso em rios e lagos (Shiklomanov, 1997). A distribuição irregular de água doce e sua conseqüente escassez em certas regiões no mundo, agravada por poluição, crescimento demográfico e uso desordenado dos recursos naturais, fazem dela um bem cada dia mais importante para a sobrevivências do homem na terra (Hespanhol, 2003).

Segundo a UNEP (2001), aproximadamente um terço da população mundial vive em países que sofrem com escassez hídrica em grau moderado a alto, cujo consumo de água é superior a 10% dos recursos renováveis. Cerca de 80 países que abrigam 40% da população mundial sofriam de grave escassez de água em meados da década de 1990 e se estima que em menos de vinte cinco anos, dois terço da população global estarão vivendo em países com escassa hídrica.

O Brasil, apesar de sua disponibilidade elevada de recursos hídricos, cerca de $168.790 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ (produção no próprio território), aproximadamente 12% da água do planeta, tem sua distribuição desigual, geograficamente, 81% do volume total de águas superficiais se concentram na região Norte, 8% na região Centro-Oeste, enquanto o restante do País detém apenas 11% das águas superficiais, onde residem mais de 86% da população. Segundo Christofidis (2001), dos nove estados do Nordeste, cinco (Rio Grande do Norte, Paraíba, Pernambuco, Alagoas e Sergipe) já sinalizam escassez hídrica por apresentarem disponibilidade menor que 1.700 m^3 por ano.

Além dos recursos hídricos convencionais há os recursos não convencionais que também são fontes complementares de água que contribuem para aliviar parcialmente a falta de água nas regiões onde estes recursos são extremamente escassos. Dentre estes recursos estão

os oriundos das atividades agropecuárias e de outros processos mais especializados tais como a dessalinização da água do mar e de águas naturais altamente salinas. Estratégias de manejo apropriadas para o solo, água e as culturas irrigadas devem ser realizadas ao se empregar esses recursos (Oweis *et al.*, 2004; Qadir & Oster, 2004).

A agricultura é o maior consumidor de água, mais de 75% da água potável do mundo está sendo usado atualmente para a irrigação. Em alguns países, a irrigação consome 90% da quantidade total de água disponível (FAO, 2003, 2005). A produtividade da água na agricultura continua baixa e as melhorias estão sendo feitas lentamente, sendo a água de boa qualidade um componente integral da produção de alimento, e que quantidades enormes de água serão necessárias para atender as demandas futuras da população mundial. Além disso, a população urbana vem aumentando em países com escassez em água de boa qualidade. Isto resulta na competição entre diferentes setores pelo uso dessa água, e a maior parcela estar sendo alocada para as atividades agropecuária.

Um grande desafio para os pesquisa seria contribuir para a solução da escassez de água para consumo humano e para o desenvolvimento de sistemas sustentáveis de produção com águas salinas para a produção de forragens e de culturas alimentares. A possibilidade de utilização de águas de qualidade marginal liberará água doce para beber e a identificação e obtenção de genótipos tolerantes a sais abrirão perspectivas para produção de alimentos vegetais para consumo direto da população e para alimentação animal, gerando proteínas para uso humano

Nesse contexto do crescente processo de escassez de água, cabe salientar que o preço desse bem finito tende a ficar cada vez mais alto. A água de qualidade inferior, utilizada para diversos fins, como a agropecuária, tende a apresentar preço mais baixo, reduzindo assim os custos de produção.

2. RECURSOS HÍDRICOS DE QUALIDADES INFERIORES

A demanda por águas de qualidade inferiores aumentará tendo em vista que a disponibilidade das fontes de água de boa qualidade tende diminuir, principalmente nos países com regiões onde há escassez de água. Dentre estes recursos hídricos de qualidades inferiores estão as águas salinas.

Conforme a Figura 1, nota-se que as águas salinas depois de tratadas podem ser aproveitadas na agricultura e aquíicultura conforme a sua origem (rejeito de dessalinizadores, naturais e de drenagem agrícola).

2.1. Águas Salinas

2.1.1. Naturais

Muitas áreas contêm aquíferos de água com qualidade inferior, tais como aqueles que contêm águas salinas e/ou sódicas. As águas salinas contêm níveis elevados de sais, enquanto a água sódica contém níveis elevados de Na^+ comparado aos outros cátions. Tais águas marginais ao serem empregadas resultam em reações com as camadas solo. Os aquíferos salinos também podem ocorrer em áreas próximas ao mar (região litoral). A qualidade de muitos corpos de água natural foi afetada pela água da drenagem das áreas agrícolas (Böhlke, 2002).

A necessidade de produzir mais sob circunstâncias de escassez de água, quantidades maiores de água naturais salinas são bombeadas para a irrigação em diversos países. O uso de águas naturais de qualidade marginal sem estratégias apropriadas no manejo da irrigação pode gerar prejuízos consideráveis ao solo e as culturas em decorrência da salinidade, sodicidade, toxicidade por íons específicos e desequilíbrios nutrientes nos solos (Sharma & Minhas, 2005). Estas atividades reduzem a produtividade das culturas e a escolha de plantas e o desenvolvimento das mesmas. Entretanto, opções estão disponíveis para o usar

águas naturais salinas ou sódicas com o desenvolvimento de métodos de aplicação destas águas (Tyagi & Sharma, 2000; Qadir & Oster, 2004).

Diferentes métodos de irrigação foram usados com águas naturais salinas e sódicas (Sharma & Minhas, 2005). Em comparação com a irrigação de superfície, os métodos de irrigação pressurizados (tais como gotejamento) foram mais eficientes, pois o volume de água salina a ser aplicada pode ser adequadamente controlado. O sistema de irrigação por gotejamento também evita danos às folhas das plantas (Tingu *et al.*, 2003). Estes autores verificaram que o rendimento e a qualidade das melancias foram melhores nos tratamentos irrigados com águas salinas (CE 3.3 - 6.3 dS m⁻¹) usando irrigação por gotejamento quando comparado com tratamento controle. Entretanto, os sais acumulados na zona da raiz podem gerar danos às plantas, havendo a necessidade de lixiviação dos sais.

Em áreas com solos propícios a salinidade ou em áreas altamente degradadas em decorrência de aquíferos salinos e/ou sódicos não são propícias a culturas de alto valor econômico.

A melhor aproximação para cultivos nestas circunstâncias foi o uso de vegetação permanente (Tomar *et al.*, 2002). Nestas áreas podem ser empregadas espécies de árvores como *Tamarix aphylla* (L.), H. Karst., *Prosopis juliflora* (Sw) DC, *Acacia nilotica* (L.) Delile, *Acacia farnesiana* (L.) Willd, *Acacia tortilis* (Forssk.) Hayne (Tomar *et al.*, 2002; Sharma & Minhas, 2005). Diversas espécies de halofíticas, forrageiras, hortaliças também podem ser empregadas na chamada agricultura bio-salina.

Diversas práticas aplicadas de maneira integradas podem ser empregadas de modo a assegurar uma agricultura sustentável (Sharma & Minhas, 2005) ao se usa água salinas ou sódicas. De acordo com Loucks (2000) há necessidade de algumas práticas como monitoramento da quantidade e da qualidade da água gerando bases de dados acessí-

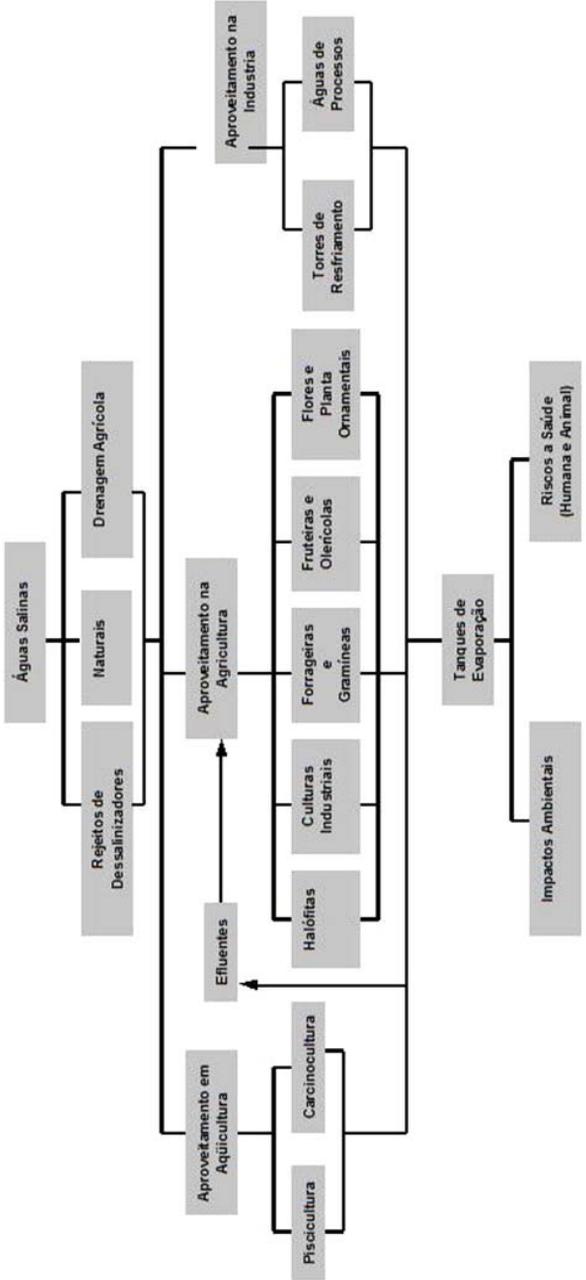


Figura 1. Estrutura de possíveis formas de aproveitamento das águas salinas.

veis; adaptação do modo de aplicação da água; o uso conjunto de água de várias qualidades; uso de sistemas de irrigação mais eficientes como por gotejamento; tornando os produtores mais informados sobre os potenciais das plantas e do solo, visando colheitas mais rentáveis e uso de sistema de gerência adaptável que responda às mudanças ambientais e sócio-econômica.

2.1.2. Drenagem agrícola

A drenagem adequada é um pré-requisito para agricultura irrigada ser sustentável, particularmente quando os sais presentes na água ou o no solo a níveis elevados podem danificar as culturas. Uma fração da água usada para a produção de culturas resulta na água da drenagem, que contém sais e resíduos dos agro-químicos tais como pesticidas, fertilizantes. Para manter os sais em quantidades apropriadas na camada superior do solo deve haver um balanço na zona radicular, ou seja, a salinidade da água de drenagem que drena abaixo da zona da raiz deve ser mais elevada do que a salinidade da água aplicada na irrigação. Ao passo que os recursos de água de boa qualidade estão se tornando cada vez mais escassos, reusar a água de drenagem da agricultura tornou-se uma fonte importante para irrigação. Dependendo dos níveis e dos tipos de sais e do uso de práticas de manejo apropriadas da irrigação e do solo as águas da drenagem agrícola podem ser usadas em diferentes sistemas de produção agrícolas (Rhoades, 1999; Oster & Grattan, 2002).

Dois tipos de sistemas de drenagem (drenagem subsuperficial e drenagem subterrânea) são praticados nas grandes áreas que sofrem com problemas de salinização. Além dos sistemas de drenagem convencionais usados para controlar a salinização são empregadas outras técnicas como a bio-drenagem - o uso da vegetação no controle de fluxos da água é usada em algumas áreas. Árvores com raízes profundas são as melhores espécies de planta para uso como ferramentas da bio-drainagem. Uma combinação da bio-drenagem e de sistemas de drenagem convencionais pode também ser considerada, dependendo

das circunstâncias específicas do local (Tanji & Kielen, 2002).

Existem duas práticas essenciais que podem ser usadas para melhorar e manter sustentável a produção agrícola em um ambiente com risco de salinização: (1) modificando o ambiente para servir a planta, e (2) modificando a planta para servir o ambiente. Estas podem ser usadas de forma única ou combinadas (Tyagi & Sharma, 2000). Entretanto, a primeira aproximação é mais usada porque permite as plantas responder melhor não somente à água usada mas também às outros tratos culturais envolvidos na produção. Estas estratégias fornecem um ambiente com níveis favoráveis a produção agrícola sem deixar de levar em consideração as características da água e do solo e a finalidade da cultura escolhida (Tyagi & Sharma, 2000; Qadir *et al.*, 2003; Oster & Birkle, 2004).

Grattan & Rhoades (1990) propuseram critérios para selecionar culturas que poderiam ser cultivadas com uso da água de drenagem da agricultura. Oster & Birkle (2004) forneceram informação sobre os hábitos do crescimento, características de tolerância a salinidade, salinidade média da zona da raiz para o rendimento de 70%, com exigência de lixiviação de diversas forrageiras quando irrigada com água salina-sódica (CE de 10 dSm⁻¹ e RAS de 15). Qureshi & Barrett-Lennard (1998) forneceram informação útil a respeito de técnicas de preparação da terra durante o semeio de 18 espécies de árvores que melhoraram o potencial de crescimento destas em terra degradada e em condições propícias a salinização decorrente da água. Além serem usadas em sistemas convencionais, a água da drenagem pode também ser reutilizada em sistemas agro-silviflorestais.

Há ainda duas opções disponíveis para o uso conjunto da água salina com a de boa qualidade: uso de mistura e o cíclico. A opção cíclica envolve o uso da água salina e da água não salina da irrigação nas rotações de cultivos que incluem culturas moderadamente sensível, sensível e tolerantes. Geralmente a água não salina é usada também antes do semeio e durante os estágios iniciais do crescimento de

culturas tolerantes, sendo a água salina usada geralmente após o estabelecimento da mesma. Mistura consiste em misturar fontes de água não salina e salina antes ou durante a irrigação. Essa prática tem boas perspectivas nas áreas onde águas de boa qualidade são disponíveis em quantidades inadequadas para atender a demanda. Entretanto, o uso cíclico é mais comum e oferece diversas vantagens sobre a mistura (Rhoades, 1999).

Além das práticas de uso cíclico e de mistura, a água da drenagem pode ser usada em um sistema seqüencial (Grattan & Rhoades, 1990; Grattan *et al.*, 2004; Grieve *et al.*, 2004), a água de qualidade relativamente melhor é aplicada durante as fases de menor tolerância da cultura à salinidade. O método mais simples de gerenciamento é usar a água de drenagem nas áreas com baixa declividade e sejam próximas de onde a água de drenagem é coletada. Uso da água de drenagem depende de sua salinidade ou da sodicidade, das concentrações de íons tóxicos, do volume da água disponível, e do valor econômico e rendimento aceitável da cultura.

A água proveniente da segunda drenagem poderia ser reaproveitadas em outras áreas em cultivos tolerantes a salinidade ou em sistemas agro-silviflorestais e as descargas finais podem ser dispostas em lagoas de evaporação. O ideal é que haja uma participação coletiva entre todos os grupos de usuário no gerenciamento das águas de drenagem.

2.1.3. Produzidas por dessalinizadores

A dessalinização é um processo que converte água do mar ou águas naturais altamente salinas em águas de boa qualidade, e vem sendo praticada há mais de 50 anos. A falta de água vem forçando o uso dessa prática em regiões áridas e semi-áridas e nos países que fazem limites com mares ou lagos com águas salinas. Os países que mais realizam a prática de dessalinização da água do mar são os do oriente médio, incluindo a Arábia Saudita (que produz um décimo da água dessalinizada do mundo), os Emirados, o Kuwait, o Barem, o

Qatar e Oman. Entretanto, outros países têm uma necessidade de realizar essa atividade de dessalinizar a água do mar e naturais altamente salinas para produzir alimentos. Estes países não estão todos situados nas áreas áridas e semi-áridas, alguns têm concentrações densas de população e níveis elevados de industrialização e turismo, tendo portanto os recursos de água de consumo locais insuficientes ou que estão se tornando inadequados para o consumo. Atualmente, a prática da dessalinização é praticada em mais de 120 países (Voutchkov, 2004). As estimativas mostram que a dessalinização diária em todo o mundo produz aproximadamente $30 \times 10^6 \text{m}^3$ de água potável: aproximadamente $20 \times 10^6 \text{m}^3$ da água do mar e o restante de águas naturais altamente salinas (Pearce, 2004). Isto sugere que a quantidade total de água potável produzida por dessalinização por ano é em torno de $11 \times 10^6 \text{m}^3$.

Os custos de dessalinização e distribuição da água dessalinizada são altos, sendo realizada principalmente em países produtores de petróleo. Tendo os custos de outros recursos de água convencionais e não convencionais, que poderiam ser usados para a agricultura, o uso de água dessalinizada para sistemas de produção agrícola tradicionais é uma opção cara, embora a água dessalinizada esteja sendo usada em uma escala pequena para a agricultura de baixo e alto valor como em áreas da Espanha. (Latorre, 2002).

A dessalinização tem implicações ambientais, porque os efluentes produzidos pelo dessalinizadores contêm água altamente concentrada. Um exemplo é a dessalinização da água do mar, o efluente da salmoura tem uma concentração de sais perto de duas vezes daquela da água do mar. O concentrado contém também produtos químicos usados durante o pré-tratamento da água de alimentação. Quando estas águas altamente concentradas são produzidas e lançadas no solo, como ocorre na dessalinização de águas naturais altamente salinas, a eliminação em lagos pode fazer com que a salmoura escoe para os aquíferos, aumentando a salinidade das águas e do solo (Semiat, 2000). Para

dessalinização da água do mar, a solução é devolver geralmente em mar aberto. Mais estudos deve ser realizado para desenvolverem mais e melhores sistemas da eliminação da salmoura. Estudos estão sendo desenvolvidos em alguns países em sistemas ambientais aceitáveis e eficientes de eliminação da salmoura (Latorre, 2002). É importante que se desenvolvam regulamentos, políticas práticas adequadas para impedir que os rejeitos da dessalinização gerem impactos negativos em áreas adjacentes e em ambientes mais afastados.

3. USO DE ÁGUAS SALINAS NA PRODUÇÃO AGRÍCOLA

3.1. Fruteiras

Os sais da água de irrigação ou aqueles já existentes no solo podem exercer efeitos prejudiciais às plantas nas suas distintas fases. Há espécies que são mais sensíveis durante o processo de germinação e, após este período, vão se ajustando paulatinamente ao estresse salino. Há aquelas que toleram maior nível de salinidade até a emergência das plântulas e são menos tolerantes durante a fase de crescimento. Há também as que são mais fortemente afetadas durante a floração e frutificação que por ocasião do processo germinativo e crescimento inicial (Ayers & Westcot, 1991).

As frutíferas, como a maioria das plantas cultivadas, sofrem os efeitos depressivos dos sais tanto em função da concentração como da espécie iônica. Isto significa que a germinação das sementes, crescimento e desenvolvimento, rendimento biológico e produtivo das plantas podem ser diferenciadamente afetados tanto pelos níveis salinos de uma mesma fonte como pelo mesmo índice de diferentes tipos de sais (Santos, 1999)

Com o propósito de se avaliar os efeitos da salinidade da água de irrigação (CEa: 0,5; 1,5; 2,5; 3,5; 4,5 e 5,5 dS m⁻¹) no crescimento e produção de mudas, conduziram-se experimentos no viveiro do Campo Experimental de Pacajus, pertencente à Embrapa Agroindústria

Tropical, no Estado do Ceará com cajueiro Anão Precoce (Bezerra *et al.*, 2002), gravioleira (Nobre *et al.*, 2003) e aceroleira (Gurgel *et al.*, 2007) e goiabeira (Gurgel *et al.*, 2007). Na cultura do cajueiro com exceção de percentagem de germinação, as demais variáveis foram afetadas negativamente pela salinidade da água de irrigação; entre os clones, o crescimento de CCP1001 foi mais prejudicado. Para a gravioleira (*Annona muricata* L.) a porcentagem de germinação não foi afetada pelo estresse salino, porém a velocidade de emergência e o acúmulo de fitomassa foram reduzidos com aumento da salinidade da água de irrigação. Pode-se usar água com até $1,5 \text{ dS m}^{-1}$ de condutividade elétrica na formação de mudas de graviola. Em aceroleira a água com condutividade elétrica de até $5,5 \text{ dS m}^{-1}$ não afetou a adequabilidade do porta-enxerto a enxertia, nem o pegamento do enxerto na época do transplante. Finalmente na cultura da goiabeira o incremento da salinidade da água afetou o crescimento das cultivares em número de folhas, diâmetro de caule e altura de planta, tendo esta última variável sido mais afetada na cultivar Ogawa. No nível mais alto de salinidade ($4,5 \text{ dS m}^{-1}$) ocorreu redução relativa de 63,5% na fitomassa seca total da cv. Rica, sendo maior o decréscimo (77,4%) na cv. Ogawa; sobre a área foliar o efeito foi linear, com redução de 17,2% e 18,4% por aumento unitário da CEa, respectivamente, para as cultivares. Na cv. Rica o sistema radicular foi mais afetado negativamente e na Ogawa foi a parte aérea.

Conhecendo-se os prejuízos causados pela salinidade da água de irrigação na estrutura e fisiologia das plantas, Costa *et al.* (2005) realizaram um estudo onde se objetivou estudar os efeitos de 4 tipos de sais (cloreto de sódio, cloreto de cálcio, nitrato de sódio e nitrato de cálcio) na água de irrigação, com 5 níveis de condutividade elétrica (CEa: 0, 2, 4, 6 e 8 dS m^{-1}) sobre o crescimento inicial do maracujazeiro amarelo. As variáveis analisadas foram altura de planta, número de folhas, comprimento de raiz e produção de fitomassa, aos 21 e 27 dias após semeadura. As variá-

veis estudadas foram influenciadas pela salinidade da água de irrigação e pelos tipos de sais, havendo efeito interativo desses fatores. Os íons de nitrato foram mais prejudiciais ao crescimento inicial da cultura.

No Brasil, o Estado do Rio Grande do Norte é o maior produtor de melão para exportação, sendo utilizadas águas de diferentes níveis de salinidade. Gurgel *et al.* (2005) realizaram uma análise econômica ao se cultivar duas cultivares de meloeiro (Orange Flesh e Goldex), irrigadas com água de alta salinidade e sob diferentes doses de K_2O . O trabalho foi desenvolvido em dois experimentos, nos anos 2003 e 2004, no município de Mossoró, RN, em que no primeiro experimento se utilizou água de CE de $3,02 \text{ dS m}^{-1}$, com dose fixa de 273 kg ha^{-1} de K_2O , tendo como testemunha água de baixa salinidade ($0,80 \text{ dS m}^{-1}$); no segundo experimento, aplicou-se água com CE de $2,41 \text{ dS m}^{-1}$ combinada com diferentes doses de K (218, 273, 328, 383 e 438 kg ha^{-1} de K_2O) na cultivar Goldex, irrigando-se as plantas da testemunha com água de $0,52 \text{ dS m}^{-1}$. Ao contrário da cultivar Goldex, foi viável, economicamente, o uso de água salina (CE= $3,02 \text{ dS m}^{-1}$) na irrigação da cultivar Orange Flesh. Com a cultivar Goldex, irrigada com água salina (CE= $2,41 \text{ dS m}^{-1}$), a produção só foi econômica quando se aplicaram as maiores doses de potássio.

Sabendo-se que os efeitos da salinidade variam entre espécies, entre variedades de uma mesma espécie e entre estádios de desenvolvimento de um mesmo genótipo, realizaram-se dois experimentos de campo (Alves *et al.*, 2005), com as variedades Prata Anã e Grand Naine irrigadas com águas de diferentes salinidades ($0,31$ e $1,66 \text{ dS m}^{-1}$), para se avaliar o crescimento e desenvolvimento das plantas durante o primeiro ciclo de produção. As avaliações foram realizadas em intervalos de 45 dias. O crescimento das plantas variou entre as variedades e ao longo do tempo, excetuando-se a área foliar total, o diâmetro do pseudocaule e a fitomassa seca da folha quando foi utilizada água de baixa salinidade. A Prata Anã foi mais tolerante à salinidade que a Grand Naine.

Marinho *et al.* (2005) conduziram quatro experimentos com o

objetivo de se estudar a viabilidade do uso de águas salinas na irrigação do coqueiro, cv. Anão-verde, em diferentes fases de cultivo. O primeiro experimento (Exp I) constou da avaliação dos efeitos da irrigação com águas salinas ($CEa = 2,2, 5,0, 10,0, 15,0, \text{ e } 20,0 \text{ dS m}^{-1}$) sobre a germinação e o crescimento inicial de plântulas, até 120 dias após sementeira; em continuidade (Exp II), avaliou-se o comportamento das plântulas produzidas sob condição de estresse salino (Exp I), após serem transplantadas para viveiro e passaram a ser irrigadas com água de condutividade elétrica de $2,2 \text{ dS m}^{-1}$, durante 120 dias; no terceiro experimento (Exp III), estudou-se o crescimento de mudas de coco, em condições de viveiro, cujas sementes foram germinadas com água de baixa salinidade, passando a receber, durante 120 dias, águas salinizadas nos mesmos níveis do primeiro ensaio (Exp I). Já o Experimento IV, foi realizado para se estudar os efeitos da condutividade elétrica da água de irrigação ($CEa = 0,1, 5,0, 10,0 \text{ e } 15 \text{ dS m}^{-1}$) em coqueiros em início de produção. A salinidade prolongou o período de germinação e reduziu o crescimento inicial das plantas. A produção de frutos não foi afetada pela salinidade, no entanto, resultou em frutos com menor peso e volume de água ($1,67 \text{ e } 2,84 \text{ dS m}^{-1}$ por incremento unitário da CEa) e maior °Brix da água de coco. O coqueiro é uma planta tolerante ao uso de água salina nas fases de germinação, formação de mudas e início de produção.

3.2. Forrageiras

O cultivo de gramíneas forrageiras tolerantes aos ambientes adversos de salinidade, pode funcionar como fonte de forragem, através da formação de capineiras.

Glenn *et al.* (1998) relatam experiências conduzidas em Puerto Peñasco, no Golfo da Califórnia, com uso de águas (40 ppm de sais) para irrigar halófitas, sendo obtidas produções de biomassa seca de até 2 kg m^{-2} , aproximadamente igual à produção de alfafa irrigada com

água doce. As espécies mais produtivas foram dos gêneros *Salicornia* ('glasswort'), *Suaeda* ('sea blite') e *Atriplex* (erva-sal), todos da família *Chenopodiaceae* que abrange cerca de 20% das espécies halófitas. Foram também altamente produtivos capins, como *Distichlis* spp (família *Poaceae*) e *Batis* spp (família *Batidaceae*).

Azevedo Neto & Tabosa (2000) avaliaram em casa de vegetação o efeito do estresse salino sobre o crescimento de cultivares de milho com tolerância diferenciada à salinidade. Foram utilizadas duas cultivares de milho (P-3051 e BR-5011) e cinco níveis de cloreto de sódio na solução nutritiva (0, 25, 50, 75 e 100 mol m⁻³). Avaliaram-se a matéria seca (MS) da parte aérea e raízes, razão parte aérea/raiz, área foliar (AF), taxas de crescimento absoluto (TCA), relativo (TCR) e de assimilação líquida (TAL) e razão de área foliar (RAF). Excetuando-se a RAF, o estresse salino afetou as demais variáveis estudadas. A MS da parte aérea e raízes, AF, TCA e TCR, sobressaíram-se como os indicadores que melhor representaram o efeito do estresse salino sobre as plantas. Por outro lado, a razão parte aérea/raiz, TAL e RAF foram as variáveis que melhor expressaram os caracteres de tolerância e sensibilidade nas cultivares analisadas.

Com o objetivo de se reduzir os impactos causados pela dessalinização de água salobra proveniente do cristalino no trópico semi-árido brasileiro, a erva-sal (*Atriplex nummularia*) foi cultivada durante um ano, nos campos da Estação Experimental da Embrapa Semi-Árido (Porto *et al.*, 2001). As plantas foram irrigadas com rejeito do processo de dessalinização, com concentração salina média de 11,38 dS m⁻¹, e cada uma recebeu 75 L de água por semana, durante 48 semanas. A salinidade média do perfil de solo, da camada de 0 a 90 cm, era de 0,64 dS m⁻¹ antes de se iniciar a irrigação das plantas; depois da colheita das plantas, a salinidade do mesmo perfil de solo foi de 12,74 dS m⁻¹, enquanto a produtividade da erva-sal foi de 6.537,0 kg ha⁻¹ de matéria seca, com teor de proteína bruta de 18,40% nas folhas.

A Atriplex apresentou grande potencial de extração de sais do perfil de solo, mas quando as plantas são irrigadas com rejeito de alta concentração salina, a quantidade de sais extraída desse perfil pela planta, é da ordem de 3,93% do total de sais adicionados ao solo pelas irrigações; isto implica no fato de que, para um manejo de água sustentável, há necessidade de se gerar mais informações sobre as relações de solo e água para a erva-sal, nas condições das zonas áridas do Brasil.

Viera *et al.* (2005) avaliaram a produtividade e a composição químico-bromatológica de dois genótipos de sorgo forrageiro, CSF 18 e CSF 20, irrigados com águas de diferentes níveis de salinidade, 0,90 (água do poço), 2,60, 4,20 e 5,80 dS m⁻¹. O estudo foi desenvolvido em condições de campo, na estação seca, em um Argissolo Vermelho Amarelo com espaçamento de 0,80 x 0,10 m. Após 112 dias da semeadura, plantas com panículas abertas foram colhidas e, nas amostras pré-secadas e trituradas em moinho tipo Wiley, realizaram-se as análises laboratoriais. A salinidade da água de irrigação reduziu a altura da planta e a produtividade de matéria seca, especialmente no genótipo CSF 18. A salinidade reduziu os teores de proteína bruta e o rendimento de proteína nos dois genótipos e reduziu os teores de carboidrato apenas no genótipo CSF 18. Não se constataram efeitos da salinidade sobre o teor de fibra, em detergente neutro e ácido.

Amorim *et al* (2005) analisaram a produção de forragem hidropônica de milho, utilizando-se águas com diferentes concentrações de sais, quais sejam: água dessalinizada (0,081 dS m⁻¹), água do abastecimento urbano da cidade de Campina Grande, PB (0,8 dS m⁻¹) e águas salinas com condutividade elétrica de 3,5 e 6,5 dS m⁻¹, respectivamente. Os sistemas de cultivo foram usados em canaleta de fibra de vidro revestida de lonas plásticas, com inclinação de 2%, montadas na casa de vegetação do Departamento de Engenharia Agrícola da UFCG. Constataram-se reduções de altura e de produção de forragem de milho, aos quinze dias do plantio, com o aumento da salinidade da

água; a composição química da forragem só foi afetada no nível de salinidade de 6,5 dS m⁻¹ com baixo consumo de água; é possível a produção de forragem hidropônica de milho com uso de águas salinas.

Trindade *et al.* (2006) estudando a influência do acúmulo e distribuição de íons na parte aérea de plantas de feijão-de-corda e de sorgo na aclimação ao estresse. As plantas foram submetidas a dois tratamentos: ao controle (solução nutritiva sem a adição de NaCl) e ao salino (solução nutritiva, contendo NaCl a 75 mM). O sorgo mostrou-se mais tolerante ao estresse salino que o feijão-de-corda, notadamente após o 10º dia de estresse. O feijão-de-corda apresentou maior acúmulo de íons na parte aérea que o sorgo, que se comportou como planta com boa capacidade de exclusão e retenção de íons. O maior acúmulo de íons potencialmente tóxicos nos limbos foliares das plantas de feijão-de-corda, contribuiu para o aumento da suculência. Embora a exclusão ou retenção de íons em plantas de sorgo submetidas a estresse tenha produzido certo grau de desidratação foliar, pareceu tratar-se de um mecanismo de aclimação ao estresse muito mais eficiente que o aumento da suculência resultante do acúmulo excessivo de íons nos tecidos foliares de plantas de feijão-de-corda.

3.3. Fibrosas e oleaginosas

Várias práticas de manejo têm sido utilizadas para se produzir, economicamente, em condições de salinidade, dentre elas, destaca-se o uso de plantas tolerantes, sendo, portanto, importantes os estudos que visem avaliar a sensibilidade ao estresse salino. Dentre estas plantas estão as fibrosas e oleaginosas, aonde importantes estudos vem sendo realizados visando o uso sustentável de águas salinas durante seu cultivo.

Ribeiro *et al.* (2001) avaliaram os efeitos da salinidade na germinação de quatro cultivares de girassol (*Helianthus annuus* L.). O experimento foi realizado no Laboratório de Botânica, do Departamento de Fitossanidade, da Escola Superior de Agricultura de Mossoró

- RN.. Concluiu-se que houve diferença significativa entre os níveis de salinidade e as cultivares. A porcentagem de germinação diminuiu à medida que a salinidade aumentou. As cultivares DK-180, V-2000 e AS-243 apresentaram maiores porcentagens de germinação em relação à cultivar M-742.

A necessidade de integração das economias da região semi-árida aos mercados nacional e internacional torna imperativo o desenvolvimento de pesquisas visando à avaliação de espécies tolerantes à salinidade. Com esse objetivo, Azevedo *et al* (2003) estudaram os efeitos da salinidade da água de irrigação sobre quatro cultivares (CNPA-G2, INAMAR-SM2, ORO-9171 e IAC-OURO) de gergelim (*Sesamum indicum* L.), desenvolvidas pela Embrapa Algodão. Os resultados mostraram que as quatro cultivares estudadas são tolerantes aos teores de sal aplicados, tendo as sementes germinado em todos os níveis de salinidade (25 a 200 mmolc L⁻¹), muito embora o percentual de germinação tenha decrescido com o aumento do teor de NaCl. O comprimento total de plântulas e o comprimento de hipocótilo foram afetados com o aumento das concentrações salinas. A cultivar IAC-OURO foi a mais sensível aos efeitos da salinidade.

Considerando-se a importância do algodoeiro para a Paraíba e a falta de água de boa qualidade, em muitas regiões do Estado, Cavalcante *et al.* (2005) realizaram um estudo onde avaliaram os efeitos da salinidade da água de irrigação (níveis de condutividade elétrica: 0,016; 1,5; 3,0; 4,5; 6,0 e 7,5 dS m⁻¹) sobre o crescimento e rendimento do algodoeiro herbáceo (*Gossypium hirsutum* L. r.latifolium Hutch.) cultivares CNPA-7H e colorido marrom BRS 200. O aumento da salinidade da água de irrigação superior a 4,2 dS m⁻¹ inibiu o crescimento em altura, acima de 2,1 dS m⁻¹ diminuiu a produção de biomassa seca da parte aérea e, maior que 3,1 dS m⁻¹ prejudicou o rendimento em caroço de ambos os genótipos, mas em menor proporção na cultivar CNPA-7H.

A presença de sódio na água de irrigação provoca, quase sempre, redução no crescimento das plantas em função das modificações no balanço de íons, potencial hídrico, fechamento estomático, na nutrição mineral e eficiência fotossintética. Diante disso, Correia *et al.* (2005) conduziram um estudo objetivando avaliar os efeitos da salinidade da água de irrigação na cultura do amendoim, em casa de vegetação. Testaram-se cinco níveis de condutividade elétrica da água de irrigação (0,4; 1,5; 3,0; 4,5 e 6,0 dS m⁻¹, a 25 °C) em duas cultivares BR-1 e L-7. Avaliaram-se o teor, o consumo e a eficiência de uso de água, bem como o número de frutos e a fitomassa de partes da planta que, no geral decresceram com o aumento da salinidade. No maior nível de salinidade o número de frutos decresceu 11,36%, a fitomassa de frutos, de sementes e de 10 sementes diminuíram em 16,68, 17,87 e 36,48%, respectivamente.

Cavalcanti *et al.* (2005) realizaram um trabalho com o objetivo de se estudar a influência da salinidade na germinação e no crescimento da mamoneira BRS 149 – Nordestina. Estes adotaram a combinação de cinco níveis de salinidade da água de irrigação (0,7; 1,7; 2,7; 3,7 e 4,7 dS m⁻¹, a 25 °C) e cinco proporções de íons Na:Ca (9,5:0,5; 7,5:2,5; 5,0:5,0; 2,5:7,5 e 0,5:9,5). As avaliações foram feitas até aos 80 dias após plantio. A salinidade da água não interferiu no processo de germinação e nem no índice de velocidade de emergência, mas o número de folhas, diâmetro do caule, a altura de planta e fitomassa da parte aérea, tiveram decréscimo linear com aumento da salinidade. A relação raiz/ parte aérea aumentou, linearmente, quando as plantas foram submetidas ao estresse salino. A altura de planta e fitomassa da parte aérea foram beneficiadas com a diminuição da proporção de Na na água.

Vale *et al.* (2006) conduziram um ensaio em casa-de-vegetação com objetivo de avaliar o efeito da salinidade da água (0,06;0,90; 1,6; 2,3; 3,0 e 4,2 dSm⁻¹) sobre o pinhão manso. Aos 30 dias após a emergência (DAE), tomaram-se os valores de altura da planta, diâmetro caulinar e número de folhas. A parte aérea da planta foi seca em estu-

fa a 65 °C por 72 horas e pesada. O pinhão manso na fase inicial de crescimento mostrou-se uma espécie sensível à salinidade da água de irrigação na faixa de 0,06 a 4,2 dS/m.

3.4. Flores e plantas ornamentais

A produção de plantas ornamentais constitui hoje uma atividade altamente competitiva, exigindo, desta forma, estudos e pesquisas envolvendo as várias etapas de propagação, conhecimentos técnicos, um eficiente sistema de comercialização e o uso de tecnologias avançadas.

Terceiro Neto *et al* (2004) estudaram o efeito da concentração salina da solução nutritiva na aclimatização de mudas de violeta africana propagadas por cultura de tecidos. As mudas foram transplantadas para bandejas com 63 células (40ml/célula), usando-se como substrato pó de coco seco + casca de arroz + húmus (1:1:1). As mudas foram irrigadas com uma solução nutritiva de 3 concentrações diferentes (1, 2 e 3 dS/m), aplicada de forma contínua e alternada com água. Aos 40 dias de cultivo avaliou-se as variáveis produção de massa fresca total, altura e diâmetro da copa. Os dados mostraram que mudas irrigadas com solução nutritiva com 1 dS/m + água de torneira (T4) e com solução com 2 dS/m + água de torneira (T5) apresentaram os melhores resultados para todas as variáveis avaliadas.

Na floricultura, a competição por mercados é intensa e o diferencial de produtividade consiste no manejo nutricional adequado, por promover grande impacto sobre a qualidade, a produtividade e a longevidade das inflorescências e da planta. Nesse sentido, Mota *et al* (2007) avaliaram os efeitos de níveis de condutividade elétrica (CE) no desenvolvimento de plantas de crisântemo (*Dendranthema grandiflora* Tzvelev.) em vaso sob cultivo protegido. O experimento foi conduzido no município de Paranapanema - SP. As parcelas foram constituídas pelas épocas de amostragem, e as subparcelas, pelos diferentes níveis de CE, determinados na solução aplicada via água de irrigação: 1,42; 1,65; 1,89; 2,13

e $2,36 \text{ dS m}^{-1}$ (fase vegetativa); 1,71; 1,97; 2,28; 2,57 e $2,85 \text{ dS m}^{-1}$ (fase de botão). Determinaram-se, semanalmente, a altura da planta e o diâmetro do buquê, e a cada 14 dias, a área foliar e a fitomassa seca da parte aérea da planta. O tratamento, correspondente à aplicação de solução com CE de $2,13 \text{ dS m}^{-1}$ na fase vegetativa e $2,57 \text{ dS m}^{-1}$ na fase de botão, proporcionou melhor aspecto visual das plantas, além de apresentar maior valor de fitomassa seca da parte aérea, maior área foliar e melhores formação e coloração.

3.5. Aqüicultura

Aqüicultura é o processo de produção de organismos vegetal ou animal com hábitat predominantemente aquático, em qualquer estágio de desenvolvimento (Rana, 1997) e, conforme a FAO (Organização das Nações Unidas para a Agricultura e Alimentação), ela implica na intervenção do homem no processo de criação, para aumentar a produção, em operações tais como reprodução, estocagem, alimentação, proteção contra predadores, etc.

A piscicultura é um dos melhores meios de incremento da produção de alimentos ricos em proteína de primeira qualidade, visto ser a mais econômica das atividades zootécnicas, por propiciar o aproveitamento de áreas improdutivas ou de baixo rendimento agropecuário, transformando-as e elevando sensivelmente sua produtividade.

As águas originárias dos dessalinizadores são um meio de produção de água de qualidade inferior passível de uso na aqüicultura. Este tipo de recurso tem sido muito utilizado em países, como a Tailândia, Equador, Estados Unidos e no Brasil, onde a população do semi-árido nordestino usa como alternativa para obtenção de água para consumo. A utilização de dessalinizadores tem resolvido o problema de água potável, mas tem gerado um problema ambiental, devido à água residual produzida (em média 50% da água que entra no sistema), que tem alto teor de sal e causa graves problemas ambientais (Oliveira & Costa, 2005).

A aquícultura entra na cadeia da dessalinização, para aproveitar a água residual no cultivo de espécies que toleram níveis elevados de sal, entre as quais o camarão marinho, *Litopenaeus vannamei*, e a tilápia nilótica, *O. niloticus*. O camarão é uma espécie eurihalina, que pode ser cultivada em águas com salinidade variando entre 1 e 40 ppt (Bray *et al.*, 1994) e a tilápia do Nilo é uma espécie oligohalina, mas que cresce satisfatoriamente em águas com salinidades de até 15 ppt (Watanabe *et al.*, 1985).

Apesar dos benefícios gerados pelo consórcio dessalinizador/aquícultura, a água residual gerada durante os procedimentos de renovação diária da água dos cultivos aquícolas (reposição das perdas por infiltração e evaporação) e operações de despesca, ainda apresenta o problema da alta concentração de sais, adicionando a este, o problema da carga orgânica (desperdício de ração, fezes e metabólitos tóxicos). Isto torna imprescindível aplicar as águas residuais do segundo nível da cadeia (organismos aquícolas) no cultivo de plantas que sejam resistentes ao sal e que possam aproveitar os nutrientes liberados pelos animais (Brown *et al.*, 1999).

A salinidade pode influenciar o comportamento alimentar das larvas (Dabrowski, 1984). Por serem de natureza ambiental, esses fatores podem ser manipulados de forma a maximizar a sobrevivência e a qualidade das larvas produzidas. A utilização de água salina durante a larvicultura de espécies de água doce, permite o uso de alimento vivo de alta qualidade oriundo dessas águas, como a *Artemia* sp e o rotífero marinho *Brachionus plicatilis*, ambos, amplamente utilizados na larvicultura de espécies de peixes marinhos (Lavens & Sorgeloos, 1996). Em água doce, a *Artemia* vive alguns poucos minutos (Stappen, 1996); a partir daí, morre e vai para o fundo do tanque, tornando-se, assim, menos disponíveis para a alimentação das pós-larvas.

De acordo com Weingartner & Zanibone Filho (2004) fatores abióticos podem determinar o sucesso na larvicultura de algumas espécies de peixes. A cor do tanque e salinidade da água de criação

podem promover alterações no comportamento e na fisiologia das pós-larvas de peixes. O objetivo deste experimento foi avaliar a influência das salinidades 0,0‰; 0,7‰; 1,4‰; 2,0‰; 2,5‰ e 5,0 da água e das cores branca e preta dos tanques na larvicultura de *Pimelodus maculatus*. A sobrevivência foi afetada pela salinidade ($p < 0,05$), sendo o maior valor obtido na salinidade 2,0‰ com $45,6 \pm 3,9\%$, ocorrendo mortalidade total na salinidade 5,0‰. Não houve diferença na sobrevivência ($p > 0,05$) entre os tanques branco e preto com valor médio de $31,7 \pm 17,7\%$. Portanto, o valor de 2mg/L de NaCl revelou-se a melhor salinidade para larvicultura de *Pimelodus maculatus*, e as cores testadas não afetaram a sobrevivência das pós-larvas.

Amorim *et al.* (2004) avaliando os efluentes líquidos para a criação da Tilápia koina (*Oreochromis sp.*), em águas com condutividade elétrica que variou de 9,46 a 12,7 dS m^{-1} observaram, após seis meses, que a sobrevivência da citada espécie foi de 91,50%, valor este dentro dos padrões normais de cultivo (cerca de 85%), indicando que as condições ecológicas do reservatório foram boas, permitindo, inclusive, a reprodução dos indivíduos; constataram, também, que além de condições permissíveis de vida houve ganho de peso (de 3,2 para 276,73 g por indivíduo), e que este ganho só não foi maior em virtude de não ter sido realizada renovação do efluente nos tanques durante o cultivo; concluem eles que o cultivo de tilápias vermelhas, do gênero *Oreochromis* traz, como conseqüências positivas, a alta qualidade do pescado com relação ao sabor e à aparência do peixe além da possibilidade de ofertar alimento de bom valor nutritivo às populações do semi-árido, sendo uma alternativa com grandes potencialidades de viabilidade econômica mas cuja escala de exploração depende do potencial de produção de rejeito por dia.

Dubon & Pinheiro (2004) observaram resultados promissores ao investigar o crescimento da tilápia vermelha *Oreochromis sp.*, em água de maré, de salinidade final de 36.000 mg L^{-1} .

4. PERSPECTIVAS FUTURAS

Embora a agropecuária seja o maior usuário de água de boa qualidade, há uma competição intensa entre outros setores. É necessário que no futuro se promova o gerenciamento sustentável destes recursos e se promova uma busca por fontes alternativas.

Nesse contexto, os recursos hídricos tidos como de qualidades inferiores são de valiosa importância, principalmente em regiões onde há escassez em água. No entanto, o uso inadequado destas águas poderá ocasionar danos a saúde humana e animal e gerar ricos ao meio ambiente se não forem tratadas e manejadas de forma adequada. Para que isso ocorra será preciso que haja investimento em pesquisa por parte dos órgãos governamentais e uma maior conscientização por parte da sociedade sobre a importância das águas de qualidades inferiores .

Apesar da prática de dessalinização da água do mar ou de água naturais altamente salinas com emprego de dessalinizadores ser uma prática cara, há uma expectativa de diminuição de seus custos em um futuro próximo. Para que isso ocorra será importante se assegurar a não ocorrência de danos ambientais gerados pelos rejeitos desta prática.

Há uma evidência emergente que o uso de águas salinas e/ou sódicas conjuntamente com adaptação do solo, da cultura, e de estratégias apropriados da gerência da irrigação pode impulsionar a produtividade da agricultura, indo de forma contrária ao que pensava anteriormente (Oster & Wichelns, 2003). O uso cíclico, misturado, e/ou através de aplicações sequenciais destas águas espera-se que sejam elevados no futuro (Kijne, 2003), assim como as águas provenientes da drenagem agrícola.

Diante disso, O uso de águas de baixa qualidade na irrigação é uma realidade cada vez mais presente no Brasil e no mundo devido à escassez de água de boa qualidade até mesmo para o consumo humano. Entretanto, é importante que os técnicos tenham conhecimento das potencialidades e das restrições de seu uso, adotando as técnicas neces-

sárias à segurança alimentar e ao bom desempenho para os diferentes objetivos, seja na agricultura, seja na pecuária. Outro aspecto importante é a conscientização da população que irá consumir o produto proveniente dessas águas de qualidades inferiores, o que reduz a possibilidade de uma possível contaminação conforme detectado em outros países.

5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICA

ALVES, A. N.; SOARES, F. A. L.; SILVA, F. V. da; GHEYI, H. R.; FERNANDES, P. D.; OLIVEIRA, F. H. T. de; TRAVASSOS, K. D. 2005. Crescimento e desenvolvimento de duas variedades de bananeira a irrigadas sob estresse salino. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, Campina Grande, (suplemento).

AMORIM, D. M.B.; NOTARO, I.A.; FURTADO, D.A.; GHEYI, H.R.; BARACUHY, J.G.V. 2005. Avaliação de diferentes níveis de salinidade da água utilizada na produção de forragem hidropônica de milho. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, Campina Grande, (suplemento).

AMORIM, M. C. C.; PORTO, E. R.; ARAÚJO, O. J.; SILVA JÚNIOR, L. G. 2004. Alternativas de reuso dos efluentes da dessalinização por osmose inversa: evaporação solar e meio líquido para cultivo de tilápia koina (*Oreochromis* sp.). <http://www.cepis.ops-oms.org/indexpor.html>. 10 Jul.

AZEVEDO, M. R. de Q. A.; ALMEIDA, F. de A. C.; GOUVEIA, J.P.G. de.; AZEVEDO, C. A. V. de; SILVA, M.M. da.; PORDEUS, R. V. 2003. Germinação e vigor no desenvolvimento inicial do gergelim: efeito da salinidade da água de irrigação. Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais, Campina Grande, v.5, n.2, p.167-172.

AZEVEDO NETO, A. D. de.; TABOSA, J.N. 2000. Estresse salino em plântulas de milho: parte I análise do crescimento. Revista Brasileira de

AYERS, R. S.; WESTCOT, D. N. A qualidade da água na agricultura, Campina Grande. 1991. 218p.

BEZERRA, I.L.; GHEYI, H.R.; FERNANDES, P.D.; SANTOS, F.J. de S.; GURGEL, M.T.; NOBRE, R.G. Germinação, formação de porta-enxerto e enxertia de cajueiro anão-precoce, sob estresse salino. 2002. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, Campina Grande, v.5, n.3, p.420-424.

BÖHLKE, J.-K., 2002. Groundwater recharge and agricultural contamination. Hydrogeol. J. 10, 153–179.

BRAY, W.A.; LAWRENCE, A.L.; LEUNG-TRUJILLO, J.R. 1994. The effect of salinity on growth and survival of *Penaeus vannamei*, with observations on the interaction of IHNV virus and salinity. Aquaculture, v.122, p.133–146.

BROWN, J.J.; GLENN, E.P.; FITZSIMMONS, K.M.; SMITH, S.E. 1999. Halophytes for the treatment of saline aquaculture effluent. Aquaculture, v.175, p.255–268.

CAVALCANTI, M.L.F.; FERNANDES, P.D.; GHEYI, H.R.; BARROS JÚNIOR, G.; SOARES, F.A.L.; SIQUEIRA, E. da C. 2005. Tolerância da mamoneira BRS 149 à salinidade: germinação e características de crescimento. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, Campina Grande, (suplemento), p.57-61, 2005.

CAVALCANTE, I.H.L.; OLIVEIRA, F.A.DE; CAVALCANTE, L.F.; BECKMANN, M.Z.; CAMPOS, M.C.C.; GONDIM, S.C. 2005. Crescimento e produção de duas cultivares de algodão irrigadas com águas salinizadas. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, Campina Grande, (suplemento), p.108-111.

COSTA, E. G. da.; CARNEIRO, P.T.; SOARES, F.A.L.; FERNANDES,

P. D.; GHEYI, H. R.; CAVALCANTE, L. F. 2005. Crescimento inicial do maracujazeiro amarelo sob diferentes tipos e níveis de salinidade da água de irrigação. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, Campina Grande, v.9, (suplemento), p.242-247.

CORREIA, K.G.; FERNANDES, P.D.; GHEYI, H.R.; RODRIGUES, L.N.; NERY, A.R. Relações hídricas e produção em plantas de e amendoim irrigadas com águas salinas. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, Campina Grande, v.9, (suplemento), p.86-89.

CRISTOFIDIS, D. 2001. Olhares sobre a política de recursos hídricos no Brasil: o caso da bacia do São Francisco. Brasília, UnB. 432p. (Tese Doutorado).

DABROWSKI, K. 1984. The feeding of fish larvae: present <<state of the art>> and perspectives. Reprod. Nutr. Develop., Paris, v.24, n. 6, p.807-833.

DUBON, J.A.M.; PINHEIRO, J.C.V. 2004. Aproveitamento de águas residuais provenientes de dessalinizadores instalados no Estado do Ceará. http://www.aguaboliwia.org/situacionaguaX/IIIEncAguas/contenido/trabajos_verde/TC-115.htm. 10 Jul.

FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations), 2003. Review of World Water Resources by Country. Water Reports 23, FAO, Rome, Italy, 110 pp.

FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations), 2005. Aquastat Information System on Water and Agriculture. FAO, Rome, Italy. Available at: <http://www.fao.org/waicent/faoinfo/agricult/agl/aglw/aquastat/main/index.stm>

GLENN, E.P.; BROWN, J.J.; O'LEARY, J.W. 1998. Irrigating crops with seawater. Scientific American, August, p.76-81.

GRATTAN, S.R., GRIEVE, C.M., POSS, J.A., ROBINSON, P.H., SUAREZ, D.L., BENES, S.E., 2004. Evaluation of salt-tolerant forages for sequential water reuse systems. I. Biomass production.

Agric. Water Manage. 70, 109–120.

GRATTAN, S.R., RHOADES, J.D., 1990. Irrigation with saline ground water and drainage water. In: Tanji, K.K. (Ed.), *Agricultural Salinity Assessment and Management, Manuals and Reports on Engineering Practices No. 71*. American Society of Civil Engineers, New York, USA, pp. 432–449.

GRIEVE, C.M., POSS, J.A., GRATTAN, S.R., SUAREZ, D.L., BENES, S.E., ROBINSON, P.H., 2004. Evaluation of salt-tolerant forages for sequential water reuse systems II. Plant-ion relations. *Agric. Water Manage.* 70, 121–135.

GURGEL, M.T.; FERNANDES, P. D.; GHEYI, H. R.; SANTOS, F.J. DE S.; BEZERRA, I. L.; *Uso de águas salinas na produção de mudas enxertadas de aceroleira*. 2007. *Caatinga*, Mossoró, v.20, n.2, p.24-31.

GURGEL, M.T.; GHEYI, H. R.; FERNANDES, P. D.; SANTOS, F.J. DE S.; NOBRE, R.; *G* 2007. Crescimento inicial de porta-enxertos de goiabeira irrigados com águas salinas. *Caatinga*, Mossoró, v.20, n.2, p.16-23.

GURGEL, M.T.; GHEYI, H. R.; OLIVEIRA, F. H. T. de; UYEDA, C A.; FERNANDES, P. D.; ALMEIDA FILHO, F. D. de. 2005. Análise econômica do uso de água salina no cultivo de meloeiro. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, (suplemento).

HESPANHOL, I. 2003. Potencial reuso de água no Brasil – agricultura, industria, municípios, recargas de aquíferos. *In*: Mancuso, C. S. A.; Santos, H. F. (Editores). *Reuso de água*. Barueri, SP:Manole, p.37-95.

KIJNE, J.W., 2003. Water productivity under saline conditions. In: Kijne, J.W., Barker, R., Molden, D. (Eds.), *Water Productivity in Agriculture: Limits and Opportunities for Improvement*. CABI Publishing, Wallingford, UK, pp. 89–102.

LAVENS, P.; SORGELOOS, P. 1996. *Manual on the production and use of live food for aquaculture*, Rome: FAO Fisheries Technical Paper, n. 361.

- LATORRE, M., 2002. Design optimisation of SWRO plants for irrigation. In: Proceedings of the International Desalination Association's World Congress on Desalination and Water Reuse, March 8–13, 2002, Manama, Bahrain. LIMA, J. E. F. W.; FERREIRA, R. S. A.; CRISTOFIDIS, D. 1999. Uso da irrigação no Brasil. O Estado das águas no Brasil. Agência nacional de Energia Elétrica. CD-ROM.
- LOUCKS, D.P., 2000. Sustainable water resources management. *Water Int.* 25, 3–10.
- MARINHO, F. J.L.; FERREIRA NETO, M.; GHEYI, H.R.; FERNANDES, P. D. VIANA, S.B. A. 2005. Uso de água salina na irrigação do coqueiro (*Cocos nucifera* L.). *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, (suplemento).
- MOTA, P. R. D'A.; BOAS, R. V.; SOUSA, V. F. DE.; RIBEIRO, V. Q. 2007. Desenvolvimento de plantas de crisântemo cultivadas em vaso em resposta a níveis de condutividade elétrica. **Eng. Agríc.**, Jaboticabal, v.27, n.1, p.164-171.
- NOBRE, R. G.; FERNANDES, P.D.; GHEYI, H.R.; SANTOS, F.J. de S.; BEZERRA, I.L.; GURGEL, M.T. 2003. Germinação e formação de mudas enxertadas de gravioleira sob estresse salino. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v.38, n.12, p.1365-1371.
- OLIVEIRA, E.G. de.; COSTA, F.H.F. Uso de águas residuárias da aquicultura. 2005. Workshop Uso e Reuso de Águas de Qualidade Inferior: realidades e perspectivas. Campina Grande – PB, 28 a 30 de novembro.
- OSTER, J.D., BIRKLE, D.E., 2004. Potential crop production systems using saline irrigation waters. In: Taha, F.K., Ismail, S., Jaradat, A. (Eds.), *Prospects of Saline Agriculture in the Arabian Peninsula*. Proceedings of the International Seminar on Prospects of Saline Agriculture in the GCC Countries, March 18–20, 2001, Dubai, United Arab Emirates, pp. 277–298.

OSTER, J.D., GRATTAN, S.R., 2002. Drainage water reuse. *Irrig. Drain. Syst.* 16, 297–310.

OSTER, J.D., WICHELNS, D., 2003. Economic and agronomic strategies to achieve sustainable irrigation. *Irrig. Sci.* 22, 107–120.

OWEIS, T.Y., HACHUM, A., BRUGGEMAN, A., 2004. Indigenous Water-Harvesting Systems in West Asia and North Africa. International Center for Agricultural Research in the Dry Areas (ICARDA), Aleppo, Syria, 173 pp.

PEARCE, F., 2004. Sea change for drinking water. *New Sci.* 22 (10 July).

PORTO, E. R., AMORIM, M. C.C. DE.; SILVA JÚNIOR, L. G. de A. 2001. Uso do rejeito da dessalinização de água salobra para irrigação da erva-sal (*Atriplex nummularia*). *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, v.5, n.1, p.111-114.

QADIR, M., BOERS, TH.M., SCHUBERT, S., GHAFUOR, A., MURTAZA, M., 2003. Agricultural water management in water-starved countries: challenges and opportunities. *Agric. Water Manage.* 62, 165–185.

QADIR, M., OSTER, J.D., 2004. Crop and irrigation management strategies for saline–sodic soils and waters aimed at environmentally sustainable agriculture. *Sci. Total Environ.* 323, 1–19.

QURESHI, R.H., BARRETT-LENNARD, E.G., 1998. Saline Agriculture for Irrigated Land in Pakistan: A Handbook. Australian Centre for International Agricultural Research (ACIAR), Canberra, Australia, 142 pp.

RANA, K.J. Guidelines on the collection of structural aquaculture statistics. Supplement to the programme for the world census of agriculture 1997. *FAO Statistical Development Series*, 5b, FAO, Rome, Italy, 56 p.

RIBEIRO, M. C. C.; MARQUES, M.B.; AMARO-FILHO, J. 2001. Efeito da salinidade na germinação de sementes de quatro cultivares de girassol (*Helianthus annuus* L.). *Revista Brasileira de Sementes*, vol. 23, nº 1, p.281-284.

RHOADES, J.D., 1999. Use of saline drainage water for irrigation. In: Skaggs, R.W., van Schilfgaarde, J. (Eds.), *Agricultural Drainage*. American Society of Agronomy (ASA)-Crop Science Society of America (CSSA)-Soil Science Society of America (SSSA), Madison, Wisconsin, USA, pp. 615–657.

SANTOS, J. B. dos. 1999. Produção e qualidade de mudas de maracujazeiro irrigado com água salina. 57f. Monografia (Trabalho de Graduação em Agronomia) - Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal da Paraíba, Areia, 1999.

SEMIAT, R., 2000. Desalination: present and future. *Water Int.* 25, 54–65.

SHARMA, B.R., MINHAS, P.S., 2005. Strategies for managing saline/alkali waters for sustainable agricultural production in South Asia. *Agric. Water Manage.* 78, 136–151.

SHIKLOMUNOV, I. A. 1997. Comprehensive assessment of the freshwater resources of the world. *Assessment of water. Assessment of water resources and water availability in the world WMO/SEI* 85p.

STAPPEN, V. G. 1996. Use de cyst. *In: Lavens, P.; Sorgelos, P. (Ed). Manual on the production and use of live food for aquaculture*, FAO Fisheries Technical Paper. n°. 361. Rome, FAO, cap. 4.2, p.107-123.

TANJI, K., KIELEN, N.C., 2002. Agricultural drainage water management in arid and semi-arid areas. In: *FAO Irrigation and Drainage Paper No. 61*, Food and Agriculture Organization, Rome, Italy.

TINGU, L., JUAN, X., GUANGYONG, L., JIAH HUA, M., JIANPING, W., ZHINZHONG, L., JIANGUO, Z., 2003. Effect of drip irrigation with saline water on water use efficiency and quality of watermelons. *Water Resour. Manage.* 17, 395–408.

TERCEIRO NETO, C. P. C., HERNANDEZ, F. F. F., BEZERRA, F. C., SOUSA, R. F. DE., CAVALCANTI, M. L. F. 2004. Efeito da con-

centração salina da solução nutritiva na aclimação de plantas micropropagadas de *Violeta Africana* (*Saintpaulia ionantha* Wendl). *Revista de Biologia e Ciência da Terra*, v.4, n.2.

TOMAR, O.S., MINHAS, P.S., SHARMA, V.K., SINGH, Y.P., GUPTA, R.K., 2002. Performance of 32 tree species and soil conditions in a plantation established with saline irrigation. *For. Ecol. Manage.* 177, 333–346.

TRINDADE, A.R., LACERDA, C.F. DE, GOMES FILHO, E.; PRISCO, J.T.; BEZERRA, M.A. 2006. Influência do acúmulo e distribuição de íons sobre a aclimação de plantas de sorgo e feijão-de-corda, ao estresse salino. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, v.10, n.4, p.804-810.

TYAGI, N.K., SHARMA, D.P., 2000. Disposal of drainage water: recycling and reuse. In: *Proceedings of the Eighth ICID Drainage Workshop*, vol. 3, January 31–February 4, 2000, New Delhi, India, pp. 199–213.

UNEP, Nepal: State of the Environment. 2001. MoPE/HMGN/ICIMOD/SACEP/NORAD/UNEP.

VARALLYAY, G.; SZABOLCS, I. 1974. Special water problems in salt affected soils. *Agrochimica*, v.13, p.275-285.

VALE, L.S.; SEVERINO, L.S.; BELTRÃO, N.E. de M. 2006. Efeito da salinidade da água sobre o pinhão manso. *Congresso Biodiesel*.

VAN DER HOEK, W., 2004. A framework for a global assessment of the extent of wastewater irrigation: the need for a common wastewater typology. In: Scott, C.A., Faruqi, N.I., Raschid-Sally, L. (Eds.), *Wastewater Use in Irrigated Agriculture*. CABI Publishing, Wallingford, UK, pp. 11–25.

VOUTCHKOV, N., 2004. The Ocean: a new resource for drinking water. *Public Works* 30–33.

VIEIRA, M.R.; LACERDA, C.F. DE; CÂNDIDO, M.J.D.; CARVALHO, P. L. DE; COSTA, R.N.T.; TABOSA, J.N. 2005. Produtivi-

dade e qualidade da forragem de sorgo irrigado com águas salinas. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, Campina Grande, v.9, (Suplemento), p.42-46.

WATANABE, W. O. *et al.* 1985. The ontogeny of salinity tolerance in the tilapias *Oreochromis aureus*, *Oreochromis niloticus*, and on *O. mossambicus* x *O. niloticus* hybrid, spawned and reared in freshwater. *Aquaculture*. Amsterdam. v.47, p.353-367.

WEINGARTNER. M.; ZANIBONI FILHO, E. 2004. Efeito de fatores abióticos na larvicultura de pintado amarelo *Pimelodus maculatus* (Lacépède, 1803): salinidade e cor de tanque. *Acta Scientiarum. Animal Sciences*, Maringá, v. 26, no. 2, p. 151-157.

EXPERIÊNCIAS DE REÚSO NA IRRIGAÇÃO E AQUICULTURA: ALTERNATIVA PARA O SEMIÁRIDO NORDESTINO

Suetônio Mota

1. IMPORTÂNCIA DO REÚSO DE ÁGUAS

Em termos globais, a quantidade de água disponível em nosso planeta é muito superior ao total necessário aos diversos usos da população. No entanto, a distribuição de água é muito desigual e, na maioria das vezes, não está de acordo com a distribuição da população.

Um exemplo dessa situação, é o que ocorre no Brasil. Enquanto cerca de 80% da água existente no país localiza-se na região amazônica, onde vive 5% da população, o restante dos recursos hídricos (20%) destina-se a abastecer 95% dos brasileiros. A situação fica mais grave na região Nordeste, onde a disponibilidade de água, por habitante, é ainda menor.

A quantidade de água livre sobre a Terra atinge 1.370 milhões de km³. Dessa quantidade, apenas 0,6% de água doce líquida se torna disponível, naturalmente, correspondendo a 8,2 milhões de km³. Desse

valor, somente 1,2% se apresentam sob a forma de rios e lagos, sendo o restante (98,8%) constituído de água subterrânea, da qual somente a metade é utilizável, uma vez que a outra parte está situada abaixo de uma profundidade de 800m, inviável para captação. Assim, restam aproveitáveis 98.400 Km³ nos rios e lagos e 4.050.800 Km³ nos mananciais subterrâneos, o que corresponde a cerca de 0,3% do total de água livre do Planeta (SETTI, 1994).

Além da distribuição irregular e das perdas, deve ser considerada a crescente degradação dos recursos hídricos, resultado da ação antrópica, tornando parte da água imprópria para diversos usos.

Assim, muitas regiões do mundo apresentam problemas relacionados com a água, seja pela escassez ou pela qualidade inadequada da mesma.

Dias (1995), comentando um documento elaborado pelo Banco Mundial, intitulado “Em Direção ao Uso Sustentável dos Recursos Hídricos”, diz que, enquanto o século 20 viu guerras causadas por diferenças ideológicas, religiosas e políticas, ou pelo controle de reservas de petróleo, o século 21 poderá ser dominado por conflitos provocados pela escassez de outro líquido: a água.

De acordo com o Relatório do Banco Mundial, em 1995, 250 milhões de pessoas, distribuídas em 26 países, já enfrentavam escassez crônica de água. No ano 2025, esse número deverá saltar para 3 bilhões, em 52 países. A demanda mundial por água tem dobrado a cada 21 anos.

Conforme Otterstetter (2001), “entre 1900 e 1990, a demanda mundial de água multiplicou por seis, enquanto a população apenas duplicou no mesmo período. Essas demandas incluem uma diversidade de usos - desde municipais, agrícolas e industriais, até recreativos e de navegação - e o aumento reflete a crescente sofisticação tecnológica na produção de bens e serviços destinados a melhorar nossa vida”.

Há necessidade de que sejam adotadas medidas de uso racio-

nal e reaproveitamento da água, como forma de garantir a sua disponibilidade, hoje e sempre.

A tendência atual é se considerar a água residuária tratada como um recurso hídrico a ser utilizado para diversos fins. O reúso de águas constitui, assim, uma prática a ser incentivada em várias atividades humanas.

O aproveitamento de águas residuárias é uma prática que vem sendo incrementada nos últimos anos, como consequência da necessidade de se aumentar a oferta hídrica.

O reúso de águas é uma medida indicada para regiões áridas e semi-áridas, e para outros locais onde há carência de recursos hídricos, apresentando as seguintes vantagens (MOTA, 2006):

- Aumento da oferta de água.
- Suprimento de água durante todo o ano, uma vez que constantemente são produzidos esgotos.
- Possibilidade de se utilizar a água disponível para fins onde há necessidade de melhor qualidade, como o abastecimento humano.
- Evita-se o lançamento de efluentes em cursos d'água com vazões pequenas ou nulas, reduzindo-se os riscos de poluição.
- Aproveitamento dos nutrientes existentes no esgoto, diminuindo, ou mesmo eliminando, o uso de fertilizantes artificiais.
- Adição da matéria orgânica contida no esgoto, ao solo, contribuindo para a conservação do mesmo e a prevenção da erosão.
- Contribui para o aumento da produção de alimentos, quando usado em irrigação ou piscicultura, resultando em benefícios econômicos e sociais.
- Aumento das áreas verdes, de parques e de campos de esporte.
- Os esgotos tratados devem ser considerados como um recurso a ser aproveitado, devendo a sua utilização integrar a política de gestão dos recursos hídricos de uma bacia hidrográfica, constituindo, além de outros benefícios, uma alternativa para o aumento da dispo-

nibilidade de água, principalmente em regiões onde há carência da mesma.

Segundo Metcalf & Eddy (2003), o continuado crescimento populacional, a contaminação das águas superficiais e subterrâneas, a distribuição desigual dos recursos hídricos e as secas periódicas têm levado as agências de águas a buscar novas fontes de abastecimento de água. O uso de esgotos adequadamente tratados, atualmente lançados no ambiente a partir de estações de tratamento de esgotos municipais, tem recebido mais atenção como um seguro recurso hídrico. Em muitos lugares, o reúso de água já é um importante componente no planejamento e implementação de programas de recursos hídricos.

A Agenda 21, em seu Capítulo 18, que trata da “Proteção da Qualidade e do Abastecimento dos Recursos Hídricos: Aplicação de Critérios Integrados no Desenvolvimento, Manejo e Uso dos Recursos Hídricos”, ressalta a importância do reúso de águas, fazendo referência à necessidade desta prática em diversas partes do texto (CONFÉRENCIA DAS NAÇÕES UNIDAS SOBRE MEIO AMBIENTE E DESENVOLVIMENTO, 1996).

Na Área do Programa “Desenvolvimento e manejo integrado dos recursos hídricos”, a Agenda 21 enumera como uma das atividades: “Desenvolver fontes novas e alternativas de abastecimento de água, tais como a dessalinização da água do mar, reposição superficial de águas subterrâneas, uso de água de pouca qualidade, aproveitamento de águas residuais e reciclagem da água”.

Entre os meios científicos e tecnológicos de implementação, a Agenda 21 ressalta que: “O papel da água como bem social, econômico e sustentador da vida deve-se refletir em mecanismos de manejo da demanda e ser implementado por meio de conservação e reutilização da água, avaliação de recursos e instrumentos financeiros”.

Como atividades de prevenção e controle da poluição das águas, são recomendados: “Introdução da abordagem precatória no manejo

de qualidade da água, quando apropriada, centrada na minimização e prevenção da poluição por meio do uso de novas tecnologias, mudança de produtos e processos, redução da poluição na fonte e reutilização, reciclagem e recuperação, tratamento e eliminação ambientalmente segura de efluentes. Estímulo e promoção do uso de águas servidas devidamente tratadas e purificadas na agricultura, aquíicultura, indústria e outros setores”.

A utilização de esgotos tratados constitui uma medida efetiva de controle da poluição da água e uma alternativa para o aumento da disponibilidade de água em regiões carentes de recursos hídricos.

Com o reúso, evita-se ou reduz-se o lançamento de esgotos em corpos de água. Os esgotos, mesmo tratados, oferecem riscos de poluição, os quais são maiores onde há pouca ou nenhuma água para diluí-los, como é o caso da região semi-árida do Nordeste brasileiro.

O aproveitamento das águas residuárias significa um aumento na oferta de água para vários fins, liberando os recursos hídricos disponíveis para utilização em outros usos onde há maior exigência de qualidade, entre eles o abastecimento humano.

Já em 1985, o Conselho Econômico e Social das Nações Unidas, estabeleceu como política de gestão para áreas carentes de recursos hídricos – “a não ser que exista grande disponibilidade, nenhuma água de boa qualidade deve ser utilizada para usos que tolerem águas de qualidade inferior”.

As águas de qualidade inferior, tais como esgotos, particularmente os de origem doméstica, águas de drenagem agrícola e águas salobras, devem, sempre que possível, ser consideradas como fontes alternativas para usos menos restritivos. O uso de tecnologias apropriadas para o desenvolvimento dessas fontes, se constitui, hoje, em conjunção com a melhoria da eficiência do uso e o controle da demanda, na estratégia básica para a solução do problema da falta universal de água (HESPANHOL, 2002).

Ainda segundo Hespanhol (2002), nas regiões áridas e semi-áridas, a água se tornou um fator limitante para o desenvolvimento urbano,

industrial e agrícola. No entanto, o fenômeno da escassez não é atributo exclusivo das regiões áridas e semi-áridas, pois muitas regiões com recursos hídricos abundantes, mas insuficientes para satisfazer demandas excessivamente elevadas, também experimentam conflitos de usos e sofrem restrições de consumo que afetam o desenvolvimento econômico e a qualidade de vida.

2. REÚSO EM IRRIGAÇÃO E PISCICULTURA

A Tabela 1 relaciona as diversas formas de reúso de águas que têm sido utilizadas. Neste trabalho, será dada ênfase ao reúso em irrigação e em piscicultura.

A prática de reúso mais utilizada tem sido em irrigação, já sendo adotada em várias partes do mundo. Segundo Tsutiya (2001), somente na China são irrigados 1.330.000 ha com esgoto, enquanto no México isso ocorre em 250.000 ha.

Nas três últimas décadas, a irrigação com esgotos sanitários tornou-se prática crescente em todo o mundo, por vezes acompanhada de rígido controle sanitário, outras não, impondo sérios riscos à saúde (Bastos, 2003).

No reúso de águas em irrigação devem ser considerados alguns aspectos:

- qualidade desejada para o efluente a ser usado;
- tipo de tratamento a ser aplicado ao esgoto bruto;
- seleção das culturas a serem irrigadas;
- técnicas de irrigação a serem utilizadas;
- medidas de controle ambiental a serem adotadas.

A qualidade da água a ser utilizada depende de: tipo de cultura a ser irrigada; características do solo; tipo de sistema de irrigação a ser usado; riscos ambientais que podem resultar da utilização de esgotos tratados.

Os nutrientes e a matéria orgânica presentes nos esgotos domésticos tratados resultam em benefícios para as culturas. A melhoria

da fertilidade do solo reflete-se na maior produtividade das culturas. Estudos desenvolvidos na Universidade da Pennsylvania, Estados Unidos, mostraram aumentos nas produções de culturas irrigadas com esgoto tratado, comparadas com as irrigadas com água em condições normais, da ordem de 300%, para o feno, e de 50%, para o milho (Pound & Crites, 1993).

Tabela 1. Formas de reúso de águas

TIPO	USOS
Urbano	Fins potáveis Irrigação de parques e jardins públicos Irrigação de jardins em edificações Descarga de aparelhos sanitários Reserva para controle de incêndios Decoração aquática: espelhos de água, chafarizes Lavagens de ruas, praças e pátios Lavagem de trens e ônibus públicos Controle de poeiras Construção civil: preparo de concreto, compactação do solo Desobstrução de tubulações
Agricultura	Irrigação de culturas (alimentícias ou não) Dessedentação de animais Hidroponia Produção de forragem para animais Cultivo de florestas plantadas / áreas de reflorestamento
Industrial	Irrigação de jardins Lavagem de peças e pisos Água para caldeiras Torres de resfriamento No próprio processo industrial
Aqüicultura	Criação de animais / piscicultura Cultivo de vegetais aquáticos
Regularização de vazões	Aumento da vazão de cursos de água Manutenção de vazões ecológicas
Recreação	Esportes aquáticos Pesca
Recarga de aquíferos	Aumento da disponibilidade de água subterrânea Prevenção da subsidência do solo Tratamento adicional de esgotos Controle da intrusão de água salina

Fonte: Mota et al. (2007)

Um aspecto importante a ser considerado na irrigação utilizando esgotos tratados é a salinidade, geralmente elevada em diversos tipos de efluentes de estações de tratamento, inclusive de águas residuárias domésticas.

Valores determinados por Nogueira (1999), no sistema de lagoas de estabilização do Conjunto Habitacional Parque Fluminense, em Fortaleza, Ceará, indicaram um efluente classificado com C_3S_2 , significando alto risco de salinidade e médio risco de sódio. Este líquido deveria ser utilizado em irrigação de solos de textura grossa (ou orgânicos de boa permeabilidade), com drenagem eficiente, utilizando culturas com alta tolerância ao sal. Na irrigação com efluentes de estações de tratamento de esgoto doméstico deve ser verificada a salinidade do líquido, para a escolha da cultura adequada. São culturas mais tolerantes aos sais: algodão, sorgo, soja, beterraba, couve, espinafre e algumas forrageiras, destacando-se, entre elas, a erva-sal. São medianamente tolerantes aos sais: arroz, milho, mamoma, amendoim, girassol, tomate, batata, cenoura, repolho e cana-de-açúcar.

No caso de efluentes com teores elevados de sais, deve ser implantada uma adequada drenagem, para reduzir os riscos de salinização do solo.

A piscicultura utilizando esgotos pode ser feita por uma das seguintes formas:

→ Adição de esgoto (ou excretas) aos tanques piscícolas (diluição de cerca de 100 a 150 vezes).

→ Cultivo de peixes diretamente em lagoas de estabilização (de maturação).

→ Cultivo de peixes em tanques-rede colocados em lagoas de estabilização.

→ Tanques de cultivo de peixes utilizando efluentes de estações de tratamento de esgoto.

A piscicultura com esgotos sanitários constitui fonte alternativa de produção de proteína a baixo custo, além de funcionar como uma forma de reciclagem de nutrientes (Bastos *et al.*, 2003).

Os resíduos orgânicos existentes nos efluentes de estações de tratamento de esgoto são fontes riquíssimas de nutrientes e energia, de forma que podem ser reutilizados na piscicultura. Esta prática já é bem difundida em outros países, pois, além de atenderem as exigências quanto ao controle de poluição, aumentam as fontes de proteínas animais, principalmente das comunidades mais carentes, suprimindo, assim, algumas das necessidades alimentares (HORTEGAL FILHA, 1999).

3. QUALIDADE DO ESGOTO PARA USO EM IRRIGAÇÃO E PISCICULTURA

No Brasil, ainda não foram definidas diretrizes oficiais para a qualidade do esgoto a ser usado em irrigação e piscicultura. Normalmente, têm sido adotadas as diretrizes da Organização Mundial da Saúde (WHO, 1989; WHO, 2006a; WHO, 2006b).

O PROSAB – Programa de Pesquisas em Saneamento Básico elaborou recomendações para o uso de esgotos sanitários na agricultura e na piscicultura. A Tabela 2 contém as diretrizes para o uso agrícola de esgotos sanitários, enquanto a Tabela 3 apresenta as diretrizes para utilização em piscicultura (Santos, 2006).

Pesquisas realizadas no estado do Ceará indicam que uma série composta por quatro lagoas de estabilização é suficiente para alcançar um efluente com Número Mais Provável (NMP) inferior a 1.000 Coliformes Fecais por 100 mL e que três lagoas em série resultam em efluente com ausência de ovos de helmintos (Tabelas 4 e 5). Isto demonstra que é possível utilizar efluentes de uma série com quatro lagoas de estabilização em irrigação irrestrita e em piscicultura.

4. EXPERIÊNCIAS DE REÚSO DE ÁGUA

A prática de reúso já vem sendo utilizada no Brasil, embora ainda não tão difundida como em outros países. São conhecidas algumas experiências de reúso em indústrias, em áreas urbanas, em edificações e em irrigação.

Tabela 2. Diretrizes do PROSAB para uso agrícola de esgotos sanitários.

Categoria	CTer 100 mL ⁻¹ (3)	Ovos de helmintos L ⁻¹ (4)	Observações
Irrigação irrestrita ⁽¹⁾	$\leq 1 \times 10^3$	≤ 1	$\leq 1 \times 10^4$ CTer 100 mL ⁻¹ no caso de irrigação por gotejamento de culturas que se desenvolvem distantes do nível do solo ou técnicas hidropônicas em que o contato com a parte comestível da planta seja minimizada.
Irrigação restrita ⁽²⁾	$\leq 1 \times 10^4$	≤ 1	$\leq 1 \times 10^5$ CTer 100 mL ⁻¹ no caso da existência de barreiras adicionais de proteção do trabalhador ⁽⁵⁾ . É facultado o uso de efluentes (primários e secundários) de técnicas de tratamento com reduzida capacidade de remoção de patógenos, desde que associado à irrigação subsuperficial ⁽⁶⁾ .

(a1) Para uso agrícola do esgoto tratado não há restrição de DBO, DQO e SST, sendo as concentrações efluentes uma consequência das técnicas de tratamento compatíveis com a qualidade microbiológica estipulada. Todavia, efluentes com concentrações elevadas desses parâmetros podem favorecer a formação de biofilmes e o entupimento de sistemas de irrigação.

(b) O padrão de qualidade de efluentes expresso apenas em termos de coliformes termotolerantes e ovos de helmintos aplicam-se ao emprego de sistemas de tratamento por lagoas. Nesses sistemas a remoção de (oo) cistos de protozoárias é indicada pela remoção de ovos de helmintos. No caso de filtração terciária a turbidez deve ser utilizada como parâmetro indicador da remoção de protozoários. Para a irrigação irrestrita recomenda-se um padrão de turbidez $d'' 5$ uT. Além disso, em sistemas que incluam a desinfecção deve-se recorrer aos parâmetros de controle da desinfecção (residual desinfetante e tempo de contato) necessários ao alcance do padrão estipulado para coliformes termotolerantes.

(1) Irrigação superficial ou por aspersão de qualquer cultura, inclusive culturas alimentícias consumidas cruas. Inclui também a hidroponia.

(2) Irrigação superficial ou por aspersão de qualquer cultura não ingerida crua, inclui culturas alimentícias e não alimentícias, forrageiras, pastagens e árvores. Inclui também a hidroponia.

(3) Coliformes termotolerantes; média geométrica durante o período de irrigação, alternativa e preferencialmente pode-se determinar *E. coli*.

(4) Nematóides intestinais humanos; média aritmética durante o período de irrigação.

(5) Barreiras adicionais de proteção encontradas em agricultura de elevado nível tecnológico, incluindo o emprego de irrigação localizada e equipamentos de proteção individual. Exclui-se dessa nota a irrigação de pastagens e forrageiras destinadas à alimentação animal.

(6) Neste caso não se aplicam os limites estipulados de coliformes e ovos de helmintos, sendo a qualidade do efluente consequência das técnicas de tratamento empregadas.

Na realidade, existem vários sistemas utilizando-se do reúso de água, embora de forma não planejada e, muitas vezes, sem os necessários controles.

No Nordeste, também ainda são poucos os sistemas de reúso planejado de água, destacando-se o aproveitamento de esgotos em diversas indústrias. O reúso em irrigação e piscicultura tem sido feito, geralmente, de forma não controlada.

Existem, no entanto, vários grupos de pesquisa sobre reúso de água trabalhando em Universidades nordestinas, podendo-se citar:

Universidade Federal do Ceará, Universidade Federal de Campina Grande, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Universidade Federal de Pernambuco, Universidade Federal da Bahia.

Tabela 3. Diretrizes do PROSAB para uso de esgotos sanitários em piscicultura

Ponto de amostragem	CTer. 100 mL ⁻¹ (1)	Ovos de helmintos. L ⁻¹	
		Nematóides intestinais humanos ⁽²⁾	Trematóides
Afluentes do tanque de piscicultura	$\leq 1 \times 10^4$	≤ 1	ND
No tanque de piscicultura	$\leq 1 \times 10^3$	≤ 1	ND

(a) Para o uso de esgoto tratado em piscicultura não há padrão explícito de DBO, DQO e SST, sendo as concentrações efluentes uma consequência das técnicas de tratamento compatíveis com a qualidade microbiológica estipulada. Entretanto, recomendam-se taxas de aplicação superficial nos tanques de piscicultura da ordem de 10-20 kg DBO ha⁻¹ d⁻¹. Deve-se observar que a amônia livre é tóxica para peixes em níveis superiores a 2-5 mg NH₃ L⁻¹.

(1) Coliformes termotolerantes; média geométrica, alternativa e preferencialmente pode-se determinar *E. coli*. (2) Média aritmética.

Tabela 4. Coliformes fecais em efluentes de lagoas de estabilização no estado do Ceará.

Efluente de	NMP Coliformes Fecais / 100 mL (Média)
3 lagoas em série	5.100
4 lagoas em série	350
5 lagoas em série	48

Fonte: Brandão (2000)

Para demonstrar-se a importância do reúso, especialmente em irrigação, indicam-se, na Tabela 6 as áreas que seriam possível irrigar

no nordeste brasileiro, usando o esgoto tratado das áreas urbanas, para diferentes níveis de atendimento com sistemas de esgotamento. Há, portanto, um grande potencial para o uso de esgoto tratado em irrigação no semi-árido brasileiro.

Tabela 5. Ovos de helmintos¹ no esgoto bruto e no efluente de lagoas de estabilização. Ceará.

Sistema	Nº. de lagoas	Esgoto bruto	Efluente final
Parque Fluminense ²	03	375 – 1480 (Média: 910)	Zero
Conjunto Renascer ³	04	375 – 1480 (Média: 910)	Zero

(1) *ascaris lubricoides*, *Trichuris trichiura*, *Ancylostoma ssp.*; (2) Nogueira (1999); (3) Araújo (1999)

Tabela 6. Áreas a irrigar com esgoto tratado (em hectares) para diferentes percentuais de atendimento com rede de esgoto, à população urbana do Nordeste brasileiro.

Ano	População Urbana ¹	Área a irrigar, para nível de Atendimento de:			
		25 %	50 %	75 %	100 %
2.000	35.158.000	21.387	42.775	64.163	85.551
2.010	41.731.000	25.385	50.772	76.159	101.502
2.020	46.920.000	28.432	57.086	85.629	114.172

1. Estimativa da população: Projeto ARIDAS. 1994.

2. Produção “per capita” de esgoto: 120 l / hab.ano.

3. Consumo de água para irrigação: 18.000 metros cúbicos por hectare por ano.

Fonte: Mota (2002)

5. PESQUISAS SOBRE REÚSO EM IRRIGAÇÃO E PISCICULTURA NA UFC

A Universidade Federal do Ceará, por intermédio do Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, tem desenvolvido, há algum tempo, pesquisas sobre reúso de água em irrigação e piscicultura.

Em 2004, iniciaram-se os trabalhos no Centro de Pesquisa sobre Tratamento de Esgoto e Reúso de Água, em conjunto com a Companhia de Água e Esgoto do Ceará – Cagece, situado em área anexa à estação de tratamento de esgoto da cidade de Aquiraz, município da

A estação de tratamento de esgoto de Aquiraz compõe-se de quatro lagoas de estabilização em série - uma lagoa anaeróbia, uma lagoa facultativa e duas lagoas de maturação. Têm sido realizadas pesquisas sobre irrigação e piscicultura utilizando água de poço e o efluente da última lagoa de maturação, cujas características estão indicadas na Tabela 7.

Tabela 7. Características da água e do esgoto tratado usados na irrigação e na piscicultura

Parâmetro	Água bruta	Esgoto tratado
pH	5,4 - 9,7	7,2 - 10,2
Condutividade elétrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	162 - 344	533 - 944
Alcalinidade (mg/L)	13 - 80	117 - 193
Sódio (mg/L)	16,1 - 87,4	66,7 - 117,3
Magnésio (mg/L)	2,9 - 18	4,4 - 28,2
Cálcio (mg/L)	2,8 - 13,6	5,6 - 32,4
DQO não filtrada (mg/L)	5 - 97	85 - 307
Amônia (mg/L)	0,1 - 0,7	0,1 - 12,3
Fósforo (mg/L)	-	0,4 - 5,5
Sólidos totais (mg/L)	120 - 246	362 - 700
Cloretos	17 - 74	31 - 128
Ovos de helmintos (Ovos/L)	Zero	<1
E. coli (NMP/100mL)	$2,6 \times 10^2$	$7,6 \times 10^2$

A seguir, são apresentados os resultados de algumas pesquisas realizadas.

5.1. Pesquisas com Irrigação

Foram desenvolvidas várias pesquisas sobre o uso de esgoto na irrigação de diversas culturas. Os tratamentos testados nos sistemas de irrigação utilizados foram:

T₁: Testemunha absoluta; irrigação com água de poço mais adubação recomendada pela análise de solo;

T₂: Irrigação com efluente das lagoas de estabilização mais adubação recomendada pela análise de solo;

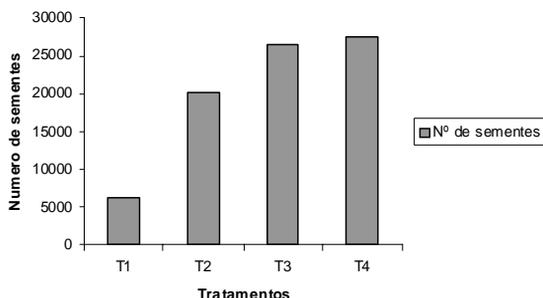
T₃: Irrigação com efluente, sem adubação recomendada pela análise de solo;

T₄: Irrigação com efluente, mais a metade da adubação recomendada pela análise de solo.

O solo da área foi classificado como Argissolo acinzentado eutrófico com textura arenosa. No preparo do solo foram realizadas as etapas de aração, gradagem, calagem e incorporação de matéria orgânica.

Em um experimento foi utilizada a cultura do girassol (*Helianthus annuus*), plantada no espaçamento 0,8m x 0,4m, irrigada por gotejamento. Durante o período de germinação a cultura foi irrigada diariamente durante 2h; após a germinação, a irrigação foi de 1h a cada dois dias (Oliveira *et al.*, 2007).

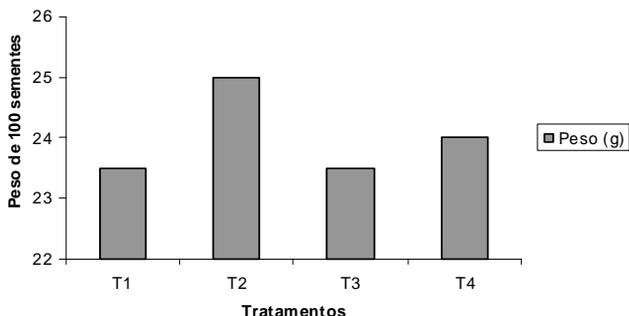
A Figura 1 mostra os valores do número de sementes de girassol em cada tratamento, podendo-se observar que os melhores valores ocorreram nos tratamentos T4 (irrigação com efluente mais a metade da adubação recomendada pela análise do solo) e T3 (irrigação com efluente sem adubação recomendada pela análise de solo). Verifica-se que o T1 (testemunha absoluta, irrigação com água de poço mais adubação recomendada pela análise de solo) foi o que obteve o menor valor, comparando-se com os tratamentos onde a cultura foi irrigada com esgoto doméstico tratado.



T1 – água + adubação; T2 – água + adubação; T3 – esgoto; T4 – esgoto + ½ adubação
Figura 1. Número de sementes de girassol em cada tratamento analisado

Na Figura 2 observam-se os valores do peso de 100 sementes do girassol em cada tratamento, constatando-se que o tratamento T2 (irri-

gação com efluente mais adubação recomendada pela análise de solo) obteve o melhor resultado, com 25g; nos outros tratamentos não ocorreram diferenças significativas entre eles.



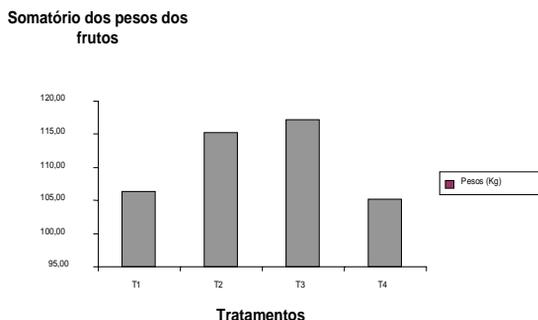
T1 – água + adubação; T2 – água + adubação; T3 – esgoto; T4 – esgoto + ½ adubação
Figura 2. Valores do peso de 100 sementes do girassol em cada tratamento

Em outro experimento a cultura utilizada foi o mamão (*Carica Papaya L.*), variedade Formosa, no espaçamento de 2,5 x 2,0 m, sendo irrigada por microaspersão.

A Figura 3 mostra os valores dos pesos dos frutos do mamão em todos os tratamentos testados. Pode-se observar que a maior produtividade obtida ocorreu no tratamento T3 (somente esgoto tratado), seguida do tratamento T2 (esgoto tratado mais adubação recomendada), indicando que os nutrientes contidos no esgoto já eram suficientes, não necessitando de nenhuma complementação. A produtividade obtida em T3 foi 10,4% superior à produtividade alcançada no testemunho (T1 – água mais adubação).

Na Tabela 8 encontram-se dados sobre a qualidade físico-química do fruto, nos quatro tratamentos testados. Observou-se um aumento nos valores do pH do fruto devido à irrigação com efluente. O tratamento T₂, além de ter apresentado a maior produtividade, foi o que forneceu o maior valor do Grau Brix, em outras palavras, o maior teor de sólidos dissolvidos, o qual se relaciona com a qualidade final do produto. Para o parâmetro acidez, todos os tratamen-

tos forneceram valores próximos, com exceção do tratamento T₄, que divergiu bastante dos demais.



T1 – água + adubação; T2 – água + adubação; T3 – esgoto; T4 – esgoto + ½ adubação

Figura 3 – Somatório dos pesos dos frutos do mamão

Foi avaliada a qualidade microbiológica do mamão, mediante a detecção da presença de patógenos na polpa, cujos resultados são mostrados na Tabela 9. Os testes mostraram, em todos os frutos testados, ausência de *Salmonellas*, coliformes fecais bem abaixo do limite de 5×10^2 NMP g⁻¹, mesófilos e bolores/leveduras abaixo do limite de 10^6 , os quais, independente das águas de irrigação utilizadas, atendem aos limites fixados pela Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA, 2001). Logo, não foi verificado comprometimento da qualidade microbiológica dos produtos analisados, estando os mesmos aptos ao consumo humano.

Tabela 8. Qualidade físico-química da polpa do mamão produzido nos quatro tratamentos testados

Parâmetro	Tratamento			
	T ₁	T ₂	T ₃	T ₄
pH	3,98	4,11	4,30	4,28
Grau Brix	9,30	11,60	8,50	11,05
Acidez total	1,58	1,54	1,53	1,37

T₁ – água + adubação; T₂ – água + adubação; T₃ – esgoto; T₄ – esgoto + ½ adubação

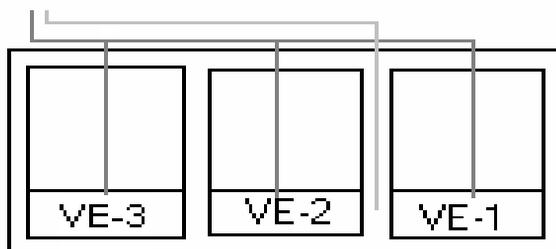
Tabela 9. Características microbiológicas da polpa do mamão produzido nos quatro tratamentos testados.

Amostra	Determinação					Contagem de Bolores e Leveduras (UFC/g)
	Coliformes a 35°C (NMP/g)	Coliformes a 45°C (NMP/g)	<i>E. coli</i> (NMP/g)	<i>Salmonella</i> sp. (em 25g)	Contagem de Mesófilos (UFC/g)	
T ₁ B ₁ (água)	< 3	< 3	< 3	Ausente	< 10	10 ⁵
T ₁ B ₂ + T ₁ B ₃ (água)	< 3	< 3	< 3	Ausente	1,7 x 10 ³	< 100
T ₂ B ₁ + T ₂ B ₂ (esgoto)	< 3	< 3	< 3	Ausente	< 10	< 100
T ₃ B ₁ (esgoto)	< 3	< 3	< 3	Ausente	< 10	< 100
T ₃ B ₃ + T ₃ B ₄ (esgoto)	4	< 3	< 3	Ausente	< 10	< 100
T ₄ B ₁ + T ₄ B ₂ (esgoto)	< 3	< 3	< 3	Ausente	< 10	< 100
T ₄ B ₄ (esgoto)	< 3	< 3	< 3	Ausente	4,4 x 10 ³	1,4 x 10 ³

T – Tratamento; B – Bloco; T₁ – água + adubação; T₂ – água + adubação; T₃ – esgoto; T₄ – esgoto + ½ adubação

5.2. Pesquisas com piscicultura

Desenvolveu-se pesquisa sobre o cultivo de tilápias do Nilo (*Oreochromis niloticus*), em três viveiros com 50m³ de volume, cobertos com tela de nylon para proteção contra predadores (Figura 4), todos eles preenchidos com esgoto efluente da última lagoa de estabilização. Foram estocadas tilápias do Nilo com peso médio inicial de 114,4g. Um dos tanques contou com um aerador mecânico de sucção com $\frac{3}{4}$ de HP de potência, funcionando das 21 horas às 06 horas, diariamente (Santos, 2007).



VE-1: abastecido com esgoto doméstico tratado no sistema de lagoas de estabilização
 VE-2: abastecido com esgoto doméstico tratado, utilizando-se um aerador mecânico de sucção com $\frac{3}{4}$ de HP de potência, funcionando das 21 horas às 06 horas, diariamente;
 VE-3: abastecido com esgoto doméstico tratado no sistema de lagoas de estabilização.

Figura 4. Tratamentos usados no cultivo da tilápia do Nilo

Utilizou-se uma densidade experimental de 02 alevinos/m² (100 alevinos/viveiro). Foi ofertada ração balanceada três vezes ao dia, nos primeiros vinte e oito dias, e duas vezes ao dia, nos cento e vinte e um dias restantes. As taxas de arraçoamento decresceram semanalmente a partir de 5% da biomassa estocada, sendo feitos os ajustes de acordo com as biometrias realizadas.

As curvas de crescimento dos peixes, em peso, dos indivíduos cultivados nos três tratamentos experimentais VE-1, VE-2 e VE-3 são mostradas na Figura 5.

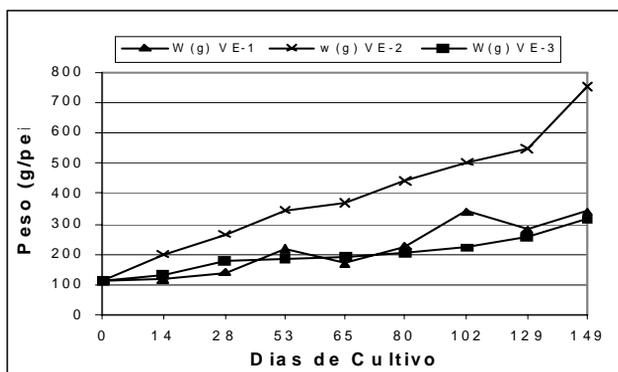


Figura 5. Curvas de crescimento, em peso (g/peixe), nos viveiros experimentais

Observa-se a superioridade do 2º Tratamento (VE-2 – tanque com aeração), onde foi alcançado o peso médio de 751,2 g/peixe, resultado este 2,19 vezes maior que o obtido no tanque VE-1, que chegou ao peso médio de 342,0 g/peixe, e 2,37 vezes maior do que o alcançado no tanque VE-3, com peso médio de 316,0 g/peixe.

A Figura 6 mostra as curvas de crescimento, em comprimento total, dos indivíduos cultivados nos três tratamentos experimentais.

Os resultados referentes ao crescimento, em comprimento total, evidenciaram, novamente, o melhor desempenho do 2º Tratamento (esgoto aerado), onde se alcançou 32,8 cm/peixe.

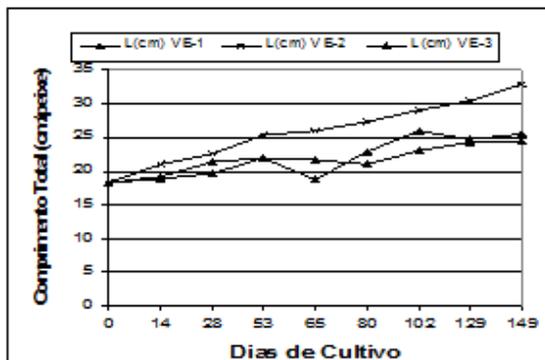


Figura 6. Curvas de crescimento, em comprimento (cm/peixe), nos viveiros experimentais

Na Tabela 10 indicam-se os parâmetros zootécnicos determinados para os três tratamentos. Pode-se destacar o resultado de ganho de peso diário no 2º Tratamento (com aeração), que chegou a 4,27 g/peixe/dia, o que, de acordo com os resultados obtidos, gera uma produtividade igual a 9798,0 kg/ha/ciclo, enquanto para o 3º Tratamento, com 1,35 g/peixe/dia, alcança 2580,5 kg/ha/ciclo, e para o 1º Tratamento, com 1,53 g/peixe/dia, chega a 1684,2 kg/ha/ciclo.

As análises microbiológicas realizadas nas tilápia do Nilo cultivadas nos três viveiros indicaram condições sanitárias satisfatórias em todos eles, como demonstram os dados da Tabela 11.

Tabela 10. Parâmetros zootécnicos obtidos nos três tratamentos

Parâmetros Zootécnicos	VE-1	VE-2	VE-3
Comprimento médio final (cm/peixe)	25,5	32,8	24,4
Ganho de comprimento diário (cm/peixe/dia)	0,05	0,1	0,04
Peso médio final (g/peixe)	342,0	751,2	316,0
Ganho de peso diário (g/peixe/dia)	1,53	4,27	1,35
Biomassa final (Kg/viveiro*)	12,65	57,84	20,22
Ganho de Biomassa (Kg/viveiro*)	1,22	46,41	8,79
Produtividade (Kg/ha/ciclo**)	1684,2	9798,0	2580,5
Sobrevivência (%)	37	77	64
Conversão Alimentar	44,17:1	2,0:1	10,58:1

* Viveiro de 50,0 m³

** Ciclo de 149 dias

VE-1 e VE-3 abastecidos com esgoto doméstico tratado no sistema de lagoas de estabilização;

VE-2: abastecido com esgoto doméstico tratado, utilizando-se um aerador mecânico.

Foram realizadas análises de alguns metais pesados, não tendo sido determinados valores superiores aos limites recomendados na legislação vigente para nenhum dos metais analisados (Tabela 12).

Tabela 11. Resultados das análises microbiológicas realizadas nas tilápia do Nilo cultivadas nos viveiros experimentais.

Repetição	VE-2	Microrg. Pesq. Padrão Microb.	Coliformes Fecais a 45°C*	Salmonella spp Ausência/25g	Estafilococcus coagulase positiva 10 ³ UFC/g	Condições Sanitárias
VE-1	Músculo		2,0 x 10 ²	Ausência	<10	Satisfatória
	Pele		1,1 x 10 ³	Ausência	<10	Satisfatória
	Brânquias		2,0 x 10 ²	Ausência	<10	Satisfatória
VE-2	Músculo		17 x 10 ³	Ausência	<10	Satisfatória
	Pele		1,4 x 10 ³	Ausência	<10	Satisfatória
	Brânquias		2,2 x 10 ³	Ausência	<10	Satisfatória
VE-3	Músculo		6,8 x 10 ²	Ausência	<10	Satisfatória
	Pele		1,1 x 10 ²	Ausência	<10	Satisfatória
	Brânquias		9,2 x 10 ²	Ausência	<10	Satisfatória

* Não existe valor de referência na legislação vigente.

Tabela 12. Resultados das análises de metais pesados realizadas nas tilápia do Nilo cultivadas nos viveiros experimentais

Metal Analisado	Concentração máxima permitidano Brasil	USFDA	Teor médio em peso seco (mg/kg)		
			VE-1	VE-2	VE-3
Chumbo (Pb)	2,00 mg/kg		1,59	1,43	0,46
Cobre (Cu)	30,00 mg/kg		0,52	0,66	0,66
Cromo (Cr)		11,00 mg/kg	0,75	<0,49	<0,49
Zinco (Zn)	50,00 mg/kg		13,14	14,57	18,04

Pb, Cu e Zn = Limites segundo Ministério da Saúde

Cr = Limites segundo USFDA (United States Food and Drug Administration)

6. CONCLUSÃO

Pesquisas realizadas no estado do Ceará indicam que efluentes de sistemas de lagoas de estabilização com quatro ou mais unidades em série têm características para reuso irrestrito em irrigação e piscicultura, em termos de coliformes fecais e número de helmintos.

Os trabalhos desenvolvidos pela Universidade Federal do Ceará mostram que o uso de esgoto tratado na irrigação pode resultar na redução ou mesmo na não utilização de fertilizantes artificiais. Os fru-

tos de culturas irrigadas com esgoto tratado, como foi o caso do mamão, apresentam qualidade microbiológica satisfatória para consumo humano.

As pesquisas com piscicultura em tanques com esgoto doméstico tratado demonstraram que a aeração contribui para o melhor desenvolvimento dos peixes. Foi também constatada a boa qualidade dos peixes cultivados, em termos microbiológicos e quanto à presença de alguns metais pesados.

Os resultados das pesquisas mostram que reúso de água constitui uma prática a ser incentivada no Brasil, especialmente em regiões onde há carência de recursos hídricos, como o Nordeste do país.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANVISA – Agência Nacional de Vigilância Sanitária. Resolução – RDC n.12, de 2 de janeiro de 2001. Aprova o regulamento técnico sobre padrões microbiológicos para alimentos.

ARAÚJO, L. F. P. Lagoas de estabilização na Região Metropolitana de Fortaleza – RMF: qualidade e potencialidade de reúso do efluente final. Fortaleza, 1999. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal do Ceará.

BASTOS, R. K. X (coord.) Utilização de Esgotos Tratados em Irrigação, Hidroponia e Piscicultura. Rio de Janeiro: ABES, RiMa, 2003.

BRANDÃO, L. P. Perspectivas de reúso de águas tratadas por lagoas de estabilização em irrigação, no Estado do Ceará. Fortaleza, 2000. Monografia (Graduação em Engenharia Civil), Universidade Federal do Ceará.

CONFERÊNCIA DAS NAÇÕES UNIDAS SOBRE MEIO AMBIENTE E DESENVOLVIMENTO. Agenda 21. Brasília: Senado Federal, 1996.

DIAS, O. Escassez pode levar à guerra da água. Folha de São Paulo. São Paulo, 01 de outubro de 1995, Caderno 1, p.27.

SANTOS, E. M. dos, *et al.* Uso de esgotos no cultivo de tilápia do Nilo

(*Oreochromis niloticus*). In: MOTA, S.; AQUINO, M. D.; SANTOS, A. B. (org.) Reúso de águas em irrigação e piscicultura. Fortaleza: DEHA / UFC, 2007.

SANTOS, M. L. F. dos (Coord.). Tratamento e utilização de esgotos sanitários. Rio de Janeiro: ABES, 2006.

HESPANHOL, H. Potencial de reúso de água no Brasil. Agricultura. Indústria. Municipais. Recarga de Aquíferos. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 7, n. 4, p. 75-95, 2002.

HORTEGAL FILHA, M. do S. R. Perspectivas do uso de lagoas de maturação na piscicultura. Fortaleza, 1999. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal do Ceará.

METCALF & EDDY. Wastewater Engineering. Treatment and Reuse. New York: McGraw Hill Company, 2003.

MOTA, S. Água: controle do desperdício e reúso. In: HOFMEISTER, W. (ed.). Água e desenvolvimento no semi-árido. Fortaleza: Fundação Konrad Adenauer, 2002.

MOTA, S. Introdução à Engenharia Ambiental. 4ª ed. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2006.

MOTA, S.; AQUINO, M. D.; SANTOS, A. B. Reúso de água: conceitos; importância; tipos. In: MOTA, S.; AQUINO, M. D.; SANTOS, A. B. (org.) Reúso de águas em irrigação e piscicultura. Fortaleza: DEHA / UFC, 2007.

NOGUEIRA, V. L. M. Caracterização de um Sistema de Lagoas de Estabilização numa Estação de Tratamento de Esgotos Domésticos em Escala Real, em Fortaleza, Ceará. Fortaleza, 1999. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal do Ceará.

OLIVEIRA, E. L. L. *et al.* Análise da produtividade de cultura do girassol irrigado com esgoto doméstico tratado. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 24, Belo Horizonte. **Anais**. Rio de Janeiro: ABES, 2007.

OTTERSTETTER, H. Quanto é necessário de água por dia? **Revista BIO**. v.11, n. 19, jul/set, 2001.

POUND C. C. & CRITES, R. W. Wastewater treatment and reuse by land application. Vol. 1, Washington, D. C.: Environmental Protection Agency, 1993.

REGO, J. L. *et al.* Aproveitamento agrícola de água do esgoto doméstico tratado na cultura do mamão. In: SIMPÓSIO ÍTALO-AMERICANO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 8, Fortaleza. **Anais**. Rio de Janeiro:ABES, 2006.

SETTI, A. A. A necessidade do uso sustentável dos recursos hídricos. Brasília: IBAMA, 1994.

TSUTIYA, M. T. Uso agrícola dos efluentes das lagoas de estabilização do Estado de São Paulo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 21, João Pessoa. **Anais**. Rio de Janeiro:ABES, 2001.

WHO. Guidelines for the safe use of wastewater, excreta and greywater. Volume 2. Wastewater use in agriculture. Geneva: World Health Organization, 2006a.

WHO. Guidelines for the safe use of wastewater, excreta and greywater. Volume 3. Wastewater and excreta use in aquaculture. Geneva: World Health Organization, 2006b.

WHO. Health guidelines for the use of wastewater in agriculture and aquaculture. Geneva: World Health Organization. Technical Report Series nº 776, 1989.